

## Analisis Kinerja Sistem *Zero Down Time* (ZDT) dengan Modifikasi Konfigurasi Jaringan Secara Real Time

Ali Ahmad<sup>1\*</sup>, Khairudin<sup>2</sup>, Lukmanul Hakim,<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universitas Lampung/Magister Teknik Elektro; alamat; Jl.Prof.Sumantri Brojonegoro No.1 Bandar Lampung 35145.

Received: 22-12-2025  
Accepted: 12-02-2026

**Keywords:**  
Zero Down Time;  
Keandalan;  
Kontinuitas.

**Correspondent Email:**  
[electrical.ali@gmail.com](mailto:electrical.ali@gmail.com)

**Abstrak.** 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.

**Abstract.** 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 Down Time (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.

### 1. PENDAHULUAN

Keandalan dan kestabilan 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. Pada

beberapa kasus produksi seperti pada pengolahan minyak nabati atau peleburan baja berhentinya pasokan pada saat proses produksi dapat menyebabkan kerugian besar bagi pihak perusahaan, sehingga banyak perusahaan meminta pasokan khusus kepada PLN agar tidak terjadi kehilangan pasokan pada saat produksi berlangsung dan pada kasus lainnya kestabilan tegangan juga menjadi faktor penting dalam suatu proses produksi semisal pada industri tekstile dan pemintalan benang dimana ketika terjadi kestidakstabilan tegangan dapat menyebabkan kegagalan produksi yang bisa menimbulkan kerugian yang sangat besar bagi perusahaan.

Salah satu upaya yang dilakukan oleh PT PLN (Persero) untuk meningkatkan keandalan pasokan energi listrik ke pelanggan adalah dengan menerapkan sistem 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. Sebagai pilot project, PT PLN (Persero) UP3 Tanjung Karang berencana menggunakan sistem ZDT untuk memberikan pasokan tenaga listrik PT Pacrim Nusantara Lestari Foods yang merupakan bagian dari Perusahaan Multinasional asal Amerika Serikat yaitu PT Cargill dengan kebutuhan daya listrik sebesar 5.540 kVA.

Konsep sistem ZDT yang disiapkan yaitu sistem pasokan dengan empat penyulang khusus dari dua Gardu Induk dan tiga trafo tenaga yang berbeda. Dengan kondisi ini diharapkan potensi pemadaman disisi pelanggan dapat ditekan sampai ke level terkecil atau sampai kondisi zero down time terpenuhi, dan apabila project ZDT PT Pacrim ini berjalan sesuai perencanaan maka kedepannya akan di buatkan sistem ZDT lainnya untuk melayani pelanggan pelanggan yang memerlukan keandalan khusus maupun kawasan VIP yang menyangkut kepentingan umum.

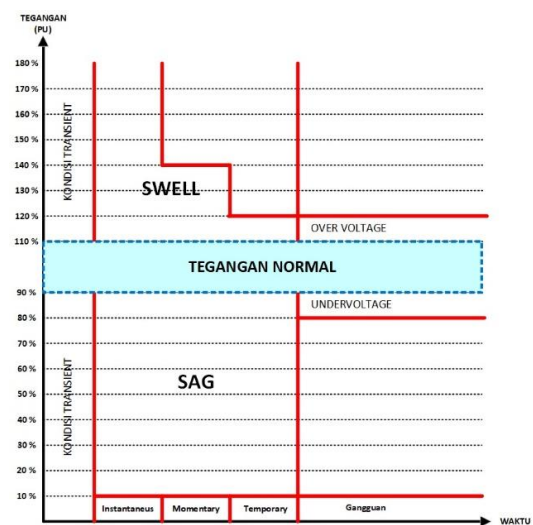
Meskipun konsep ZDT telah diterapkan oleh PT PLN (Persero) sebagai solusi

peningkatan keandalan pasokan bagi pelanggan industri, kajian teknis yang menganalisis kinerja sistem ZDT secara menyeluruh, khususnya terhadap keandalan pasokan dan kestabilan tegangan pada kondisi rekonfigurasi jaringan secara real time, masih terbatas. Selain itu, belum terdapat penelitian yang secara spesifik mengevaluasi unjuk kerja sistem ZDT dengan konfigurasi multi-penyulang dari beberapa gardu induk dan trafo tenaga berbeda pada pelanggan industri berdaya besar. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kinerja sistem ZDT pada pasokan PT Pacrim Nusantara Lestari Foods guna memastikan tercapainya keandalan dan kestabilan pasokan sesuai konsep ZDT.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan merupakan salah satu aspek penting dalam pengoperasian sistem tenaga listrik, yang berkaitan dengan kemampuan sistem untuk mempertahankan profil tegangan pada seluruh bus tetap berada dalam batas yang diizinkan setelah mengalami gangguan. Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa gangguan berupa pelepasan beban atau pelepasan unit pembangkit dalam skala besar dapat mengganggu keseimbangan antara daya pembangkitan dan beban, sehingga menyebabkan penurunan tegangan secara signifikan.



Gambar 1. Definisi Voltage Magnitude Event berdasarkan Standar IEEE 1159-195

Pada sistem distribusi, kondisi ini diperparah oleh tingginya impedansi saluran dan keterbatasan kapasitas penyaluran daya reaktif. Selain itu, pada skema pasokan dengan rekonfigurasi jaringan seperti sistem Zero Down Time (ZDT), perubahan aliran daya yang terjadi secara cepat berpotensi menimbulkan deviasi tegangan apabila tidak disertai dengan pengelolaan daya reaktif yang memadai. Oleh karena itu, analisis kestabilan tegangan menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa sistem ZDT mampu mempertahankan kualitas tegangan selama dan setelah terjadinya gangguan maupun proses pengalihan suplai.

Gangguan kestabilan tegangan pada sistem tenaga listrik dapat diklasifikasikan menjadi gangguan jangka pendek dan jangka panjang berdasarkan durasi kejadian serta karakteristik perubahan tegangannya. Gangguan kestabilan tegangan jangka pendek umumnya memunculkan fenomena kedip tegangan (*voltage sag*) dan kenaikan tegangan (*voltage swell*), yang terjadi dalam rentang waktu 0,5 siklus hingga 1 menit. *Voltage sag* ditandai dengan penurunan nilai efektif tegangan terhadap nilai nominalnya, yang umumnya disebabkan oleh gangguan hubung singkat, proses switching jaringan, atau perubahan beban secara tiba-tiba. Sebaliknya, *voltage swell* merupakan peningkatan nilai efektif tegangan terhadap nilai nominalnya, yang sering terjadi akibat pelepasan beban besar atau ketidakseimbangan aliran daya reaktif dalam sistem.

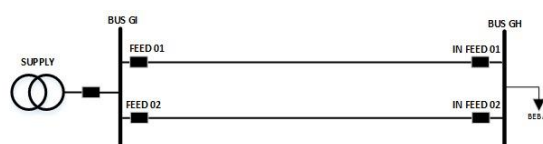
Sementara itu, gangguan kestabilan tegangan jangka panjang berkaitan dengan ketidakmampuan sistem dalam mempertahankan keseimbangan daya reaktif dalam periode waktu yang lebih lama, sehingga menyebabkan kondisi tegangan lebih (*overvoltage*) dan tegangan kurang (*undervoltage*). Tegangan lebih terjadi ketika nilai efektif tegangan melebihi 110% dari tegangan nominal selama durasi lebih dari satu menit, sedangkan tegangan kurang terjadi ketika nilai efektif tegangan berada di bawah 90% dari tegangan nominal dengan durasi yang sama. Kondisi ini umumnya dipengaruhi oleh karakteristik beban, keterbatasan kapasitas pembangkitan daya reaktif, serta konfigurasi jaringan distribusi. Pada sistem distribusi dengan skema pasokan berkeandalan tinggi seperti Zero Down Time (ZDT), gangguan

kestabilan tegangan jangka panjang menjadi perhatian khusus karena dapat menurunkan kualitas tegangan meskipun kontinuitas suplai tetap terjaga. Oleh karena itu, analisis kestabilan tegangan jangka pendek dan jangka panjang diperlukan untuk memastikan sistem beroperasi sesuai batas standar kualitas tegangan

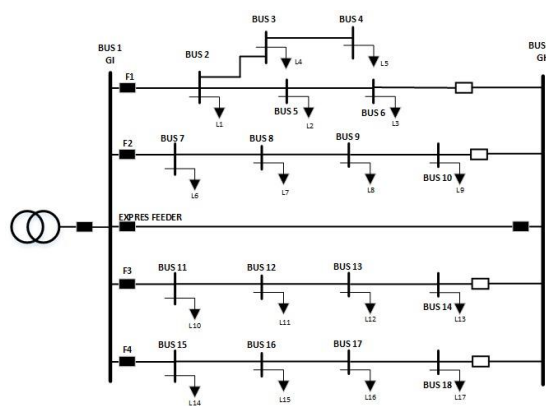
## 2.2. Konfigurasi Jaringan Zero Down Time (ZDT) PT Pacrim

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.

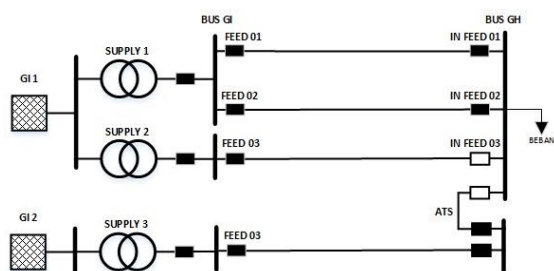
Konfigurasi ZDT pada penelitian ini merupakan kombinasi antara konfigurasi *spotload* dan konfigurasi *spindel* yang dirancang sedemikian rupa sehingga terbentuklah suatu sistem pasokan yang andal baik itu dari segi keberlangsungan pasokan maupun untuk penyediaan kapasitas yang besar.



Gambar 2. Konfigurasi SpotLoad



Gambar 3. Konfigurasi Spindel



Gambar 4. Konfigurasi ZDT PT Pacrim

### 2.3. Analisa dengan Aplikasi ETAP

Analisis sistem tenaga listrik pada penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak Electrical Transient Analyzer Program (ETAP). Kajian yang dilakukan meliputi analisis aliran daya (load flow analysis), analisis hubung singkat (short circuit analysis), dan analisis kestabilan transien (transient stability analysis) guna mengevaluasi kinerja sistem pada kondisi operasi normal maupun saat terjadi gangguan. Analisis ini menjadi penting dalam penerapan skema Zero Down Time (ZDT), karena sistem dirancang untuk tetap mempertahankan kontinuitas pasokan meskipun terjadi gangguan atau proses rekonfigurasi jaringan.

Analisis aliran daya bertujuan untuk menentukan distribusi daya aktif dan daya reaktif pada setiap elemen sistem serta profil tegangan pada seluruh bus. Dalam konteks sistem ZDT, analisis ini digunakan untuk memastikan bahwa setiap konfigurasi penyulang dan sumber suplai cadangan mampu menyalurkan daya tanpa menyebabkan pembebanan berlebih maupun deviasi tegangan di luar batas standar. Selain itu, evaluasi aliran daya juga diperlukan untuk menilai keseimbangan pembagian beban antar penyulang pada kondisi normal maupun saat terjadi pengalihan suplai.

Analisis hubung singkat dilakukan untuk menghitung besarnya arus gangguan akibat kondisi abnormal, seperti gangguan tiga fasa, dua fasa, maupun satu fasa ke tanah. Pada sistem ZDT yang menggunakan beberapa penyulang dari sumber berbeda, analisis ini penting untuk mengevaluasi kontribusi arus gangguan dari masing-masing sumber, menentukan kapasitas peralatan proteksi, serta memastikan koordinasi proteksi tetap selektif setelah dilakukan rekonfigurasi jaringan.

Sementara itu, analisis kestabilan transien digunakan untuk mengevaluasi

kemampuan sistem dalam mempertahankan kestabilan sudut rotor dan profil tegangan setelah mengalami gangguan besar atau perubahan konfigurasi suplai secara cepat. Dalam skema ZDT, proses pengalihan beban dari sumber utama ke sumber cadangan harus berlangsung tanpa menyebabkan ketidakstabilan sistem. Oleh karena itu, analisis kestabilan transien diperlukan untuk memastikan bahwa sistem tetap berada dalam kondisi stabil selama dan setelah proses switching atau rekonfigurasi jaringan dilakukan.

## 3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini adalah metode berbasis pemodelan (model-based simulation). Pendekatan ini dilakukan dengan memodelkan sistem tenaga listrik beserta seluruh komponen pendukungnya ke dalam bentuk rangkaian ekuivalen menggunakan perangkat lunak simulasi. Model yang telah dibangun selanjutnya digunakan untuk melakukan serangkaian simulasi sesuai dengan skema operasi yang dirancang, baik pada kondisi operasi normal maupun pada kondisi rekonfigurasi jaringan dalam skema Zero Down Time (ZDT).

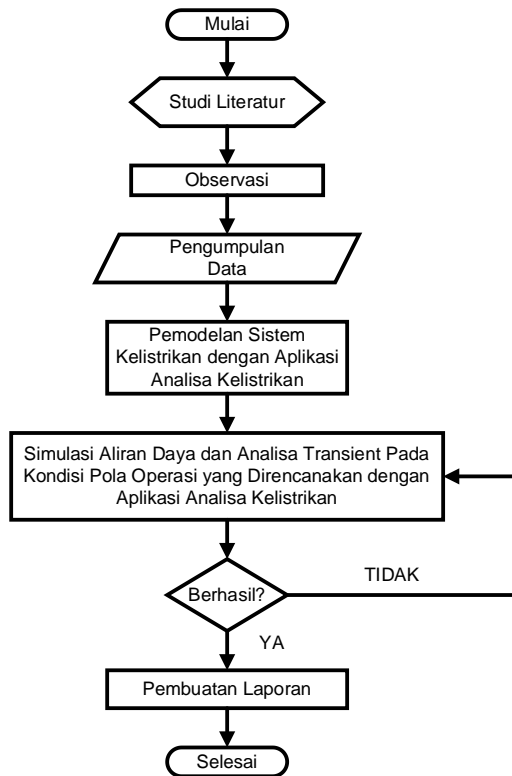
Melalui pendekatan ini, evaluasi kinerja sistem dapat dilakukan secara sistematis tanpa mempengaruhi sistem aktual. Parameter teknis yang dianalisis meliputi profil tegangan pada setiap bus, distribusi aliran daya, arus hubung singkat, serta respons sistem terhadap perubahan konfigurasi suplai. Hasil simulasi kemudian dianalisis untuk menilai tingkat keandalan dan kestabilan sistem sesuai dengan kriteria yang telah ditetapkan.

Tahapan penelitian ini disusun secara sistematis dan divisualisasikan dalam bentuk diagram alur penelitian, yang menggambarkan proses mulai dari pengumpulan data, pemodelan sistem, pelaksanaan simulasi, hingga analisis dan interpretasi hasil.

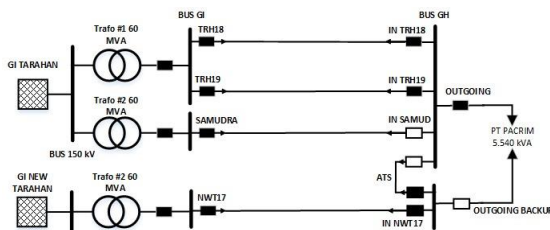
### 3.1. Single Line Diagram Sistem ZDT PT Pacrim.

Sistem Zero Down Time (ZDT) yang diterapkan pada PT Pacrim dirancang sebagai kombinasi antara konfigurasi spot load dan konfigurasi spindle. Integrasi kedua konfigurasi tersebut dilakukan untuk membentuk suatu sistem pasokan tenaga listrik yang memiliki

tingkat keandalan tinggi, baik dari aspek kontinuitas suplai maupun kemampuan penyediaan kapasitas daya dalam jumlah besar. Pendekatan ini bertujuan untuk meminimalkan potensi terjadinya gangguan pasokan serta memastikan ketersediaan sumber daya listrik yang memadai bagi kebutuhan operasional industri.



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian



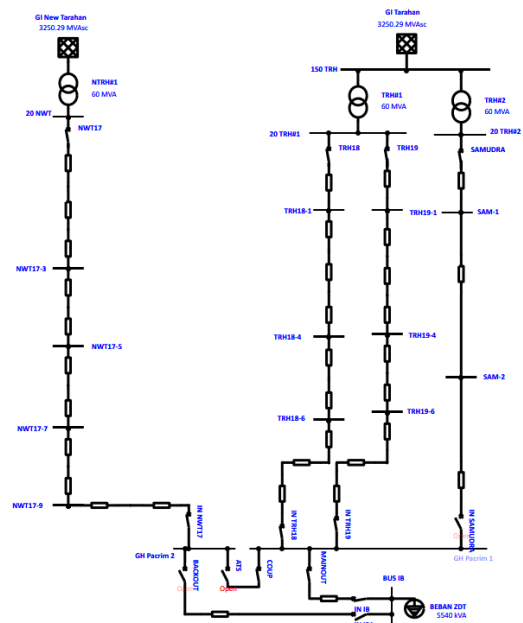
Gambar 6. Single Line Diagram ZDT PT Pacrim

Secara teknis, sistem ZDT pada PT Pacrim terdiri dari empat penyulang khusus 20 kV yang disuplai dari dua Gardu Induk 150/20 kV yang berbeda, serta berasal dari tiga trafo tenaga 150/20 kV yang berbeda. Konfigurasi multi-sumber ini dirancang untuk meningkatkan redundansi sistem, sehingga apabila salah satu sumber atau penyulang

mengalami gangguan, suplai daya dapat dialihkan tanpa menyebabkan terhentinya pasokan ke pelanggan. Dengan komposisi tersebut, diharapkan tingkat keandalan sistem meningkat secara signifikan dan konsep zero down time dapat direalisasikan sesuai dengan perencanaan.

### 3.2. Pemodelan ETAP

Rancangan sistem dan konfigurasi pasokan Zero Down Time (ZDT) pada PT Pacrim direpresentasikan dalam bentuk single line diagram yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak ETAP. Pemodelan ini mencakup seluruh komponen utama sistem, termasuk sumber suplai, transformator tenaga, penyulang, serta elemen pendukung lainnya yang terlibat dalam skema pasokan. Model yang telah dibangun selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk pelaksanaan berbagai analisis teknis sesuai dengan kebutuhan penelitian, seperti analisis aliran daya, hubung singkat, dan kestabilan sistem, guna mengevaluasi kinerja sistem secara komprehensif.



Gambar 7. Pemodelan ZDT PT Pacrim

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

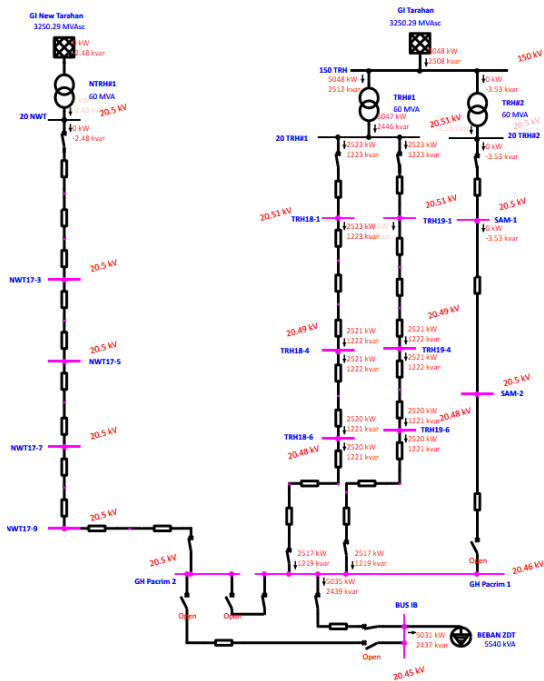
Pemodelan konfigurasi sistem Zero Down Time (ZDT) pada PT Pacrim yang telah disusun selanjutnya dianalisis menggunakan perangkat lunak ETAP melalui modul *load*

flow, short circuit, dan transient stability. Simulasi dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem pada berbagai kondisi operasi sesuai dengan skema pasokan yang dirancang.

Hasil dari masing-masing analisis tersebut digunakan untuk menilai profil tegangan, distribusi aliran daya, besarnya arus gangguan, serta respons dinamis sistem terhadap gangguan atau perubahan konfigurasi suplai. Berikut disajikan hasil simulasi pada konfigurasi sistem ZDT PT Pacrim beserta pembahasannya secara komprehensif.

#### 4.1. Simulasi kondisi normal

Kondisi normal pada konfigurasi sistem ZDT ini didefinisikan sebagai kondisi operasi di mana pelanggan memperoleh pasokan daya secara bersamaan melalui penyulang TRH18 dan TRH19. Pada kondisi ini, kedua penyulang beroperasi secara paralel untuk mendistribusikan beban sesuai dengan skema pembagian daya yang telah dirancang.



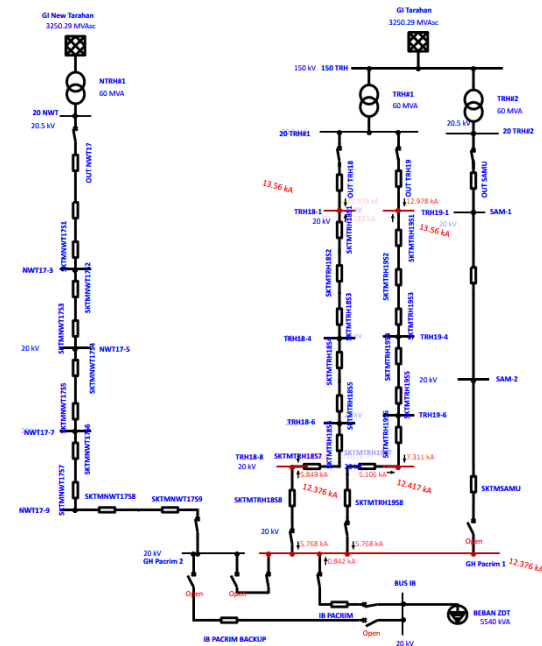
Gambar 8. Aliran Daya ZDT PT Pacrim

Simulasi dilakukan menggunakan modul load flow pada ETAP untuk mengevaluasi distribusi aliran daya, profil tegangan pada setiap bus, serta tingkat pembebanan masing-masing penyulang dalam kondisi operasi normal tersebut. Berikut disajikan hasil

simulasi yang diperoleh beserta analisis terhadap parameter-parameter utama sistem

Berdasarkan hasil simulasi load flow, diperoleh bahwa daya aktif yang harus disuplai oleh sistem PLN sebesar 5.048 kW, sedangkan daya yang diterima oleh pelanggan sebesar 5.031 kW. Dengan demikian, terjadi susut daya sebesar 17 kW atau sekitar 0,34% terhadap daya yang dikirimkan. Nilai susut daya tersebut menunjukkan bahwa rugi-rugi sistem pada kondisi operasi normal masih berada pada tingkat yang relatif kecil, sehingga efisiensi penyaluran daya dapat dikategorikan baik.

Dari sisi profil tegangan, dengan tegangan kirim pada sisi sekunder trafo tenaga yang diatur secara otomatis sebesar 20,5 kV, diperoleh tegangan pada Bus 20 kV Gardu Induk (GI) sebesar 20,51 kV, sedangkan tegangan terima pada Bus 20 kV Gardu Hubung (GH) sebesar 20,46 kV. Hal ini menunjukkan adanya penurunan tegangan (voltage drop) sebesar 0,05 kV atau sekitar 0,24% terhadap tegangan kirim. Besarnya penurunan tegangan tersebut masih berada dalam batas toleransi standar mutu tegangan distribusi, sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem mampu mempertahankan kualitas tegangan dengan baik pada kondisi operasi normal.



Gambar 9. Arus Hubung Singkat Konfigurasi Utama dengan gangguan 3 fasa.

Berdasarkan hasil simulasi analisis hubung singkat, jenis gangguan yang dianalisis adalah gangguan tiga fasa dengan asumsi lokasi gangguan berada pada tiga titik, yaitu pangkal jaringan, ujung jaringan, dan Bus pada Gardu Hubung (GH) pelanggan. Pemilihan gangguan tiga fasa dilakukan karena jenis gangguan ini menghasilkan arus gangguan maksimum dan umumnya digunakan sebagai dasar dalam evaluasi kapasitas peralatan proteksi.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa arus hubung singkat pada Bus di pangkal jaringan sebesar 13,56 kA. Ketika gangguan diasumsikan terjadi pada Bus di ujung jaringan, arus gangguan yang diperoleh sebesar 12,41 kA, sedangkan pada Bus di GH pelanggan sebesar 12,37 kA. Terlihat bahwa besaran arus gangguan mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya jarak dari sumber, yang dipengaruhi oleh impedansi saluran. Perbedaan nilai arus gangguan ini mencerminkan karakteristik sistem distribusi, di mana impedansi jaringan berperan dalam membatasi arus gangguan pada titik yang lebih jauh dari sumber suplai.

Hasil ini selanjutnya dapat digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian kapasitas pemutusan peralatan proteksi serta memastikan koordinasi proteksi tetap bekerja secara selektif dalam skema pasokan Zero Down Time (ZDT).

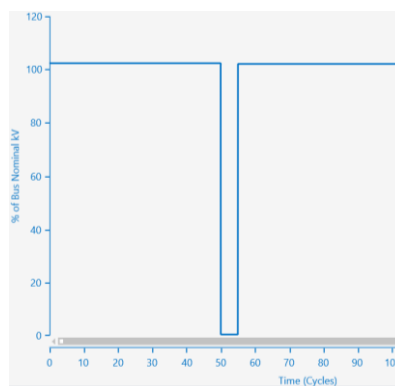
#### 4.2. Analisa Transient Stability pada skema utama ZDT PT Pacrim

Analisis kestabilan transien pada skema utama Zero Down Time (ZDT) PT Pacrim dilakukan untuk mengevaluasi respons dinamis sistem ketika terjadi gangguan yang menyebabkan perubahan konfigurasi suplai secara tiba-tiba. Pada simulasi ini diasumsikan terjadi gangguan pada salah satu penyulang, sehingga pasokan daya yang semula disalurkan melalui dua penghantar secara paralel harus dialihkan dan ditanggung oleh satu penghantar yang tersisa.

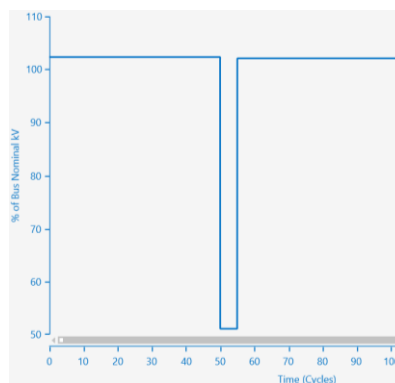
Kondisi tersebut merepresentasikan skenario kritis dalam implementasi ZDT, di mana sistem dituntut untuk tetap mempertahankan kontinuitas pasokan tanpa menyebabkan ketidakstabilan tegangan maupun gangguan sinkronisasi sistem. Untuk memperoleh gambaran respons sistem secara menyeluruh, dilakukan simulasi beberapa jenis gangguan, yaitu gangguan tiga fasa, gangguan

antar fasa, gangguan satu fasa ke tanah, serta gangguan dua fasa ke tanah.

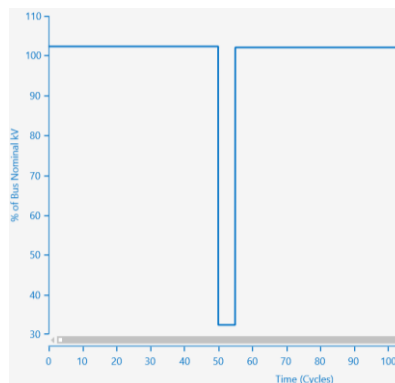
Hasil simulasi digunakan untuk menganalisis perubahan profil tegangan, respons daya, serta kemampuan sistem dalam kembali mencapai kondisi stabil setelah gangguan dieliminasi. Berikut disajikan hasil simulasi beserta pembahasan terhadap karakteristik respons sistem pada masing-masing skenario gangguan.



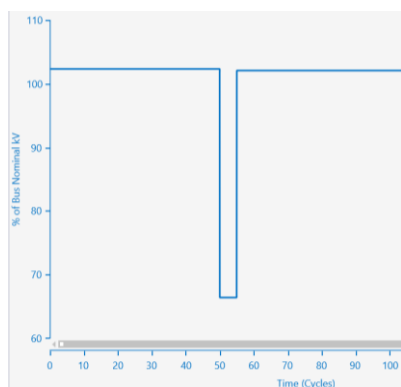
Gambar 10. Gangguan 3 fasa.



Gambar 11. Gangguan 2 fasa.



Gambar 12. Gangguan 2 fasa - tanah.



Gambar 13. Gangguan 1 fasa - tanah.

Tabel 1. Kondisi Tegangan sesuai jenis gangguan

Kondisi	Tegangan (%)			
	3 Fasa	LL Fault	LLG Fault	LG Fault
Awal	102.3	102.3	102.3	102.3
Fault	0.40	51.10	32.30	66.40
Akhir	102.1	102.1	102.1	102.1

Berdasarkan hasil analisis pada modul transient stability, diperoleh bahwa profil tegangan sistem sebelum dan setelah gangguan kembali berada pada kondisi stabil mendekati nilai nominal. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan pemulihan (*post-fault recovery*) yang baik setelah gangguan dieliminasi, sehingga dari sisi kestabilan dinamis, konfigurasi utama ZDT masih berada dalam batas kestabilan yang dapat diterima.

Selama periode gangguan (*fault-on condition*), terjadi variasi penurunan tegangan yang bergantung pada jenis gangguan yang disimulasikan. Penurunan tegangan terbesar terjadi pada gangguan tiga fasa, dengan nilai tegangan minimum mencapai sekitar 40% dari tegangan nominal. Pada gangguan dua fasa ke tanah, tegangan turun hingga sekitar 32,3% dari tegangan nominal, sedangkan pada gangguan dua fasa tercatat penurunan hingga sekitar 51,1% dari tegangan nominal. Adapun penurunan tegangan terkecil terjadi pada gangguan satu fasa ke tanah, dengan nilai minimum sekitar 66,4% dari tegangan nominal. Perbedaan ini konsisten dengan karakteristik teoritis sistem tenaga, di mana gangguan tiga

fasa menghasilkan dampak paling signifikan terhadap profil tegangan.

Apabila dibandingkan dengan klasifikasi gangguan kualitas daya menurut standar IEEE 1159, kondisi yang terjadi selama gangguan termasuk dalam kategori *voltage sag* dengan rentang tegangan antara 0,1 hingga 0,9 per unit (pu) dan durasi kurang dari satu menit. Penurunan tegangan hingga 0,40 pu pada gangguan tiga fasa masih berada dalam rentang definisi instantaneous sag atau momentary sag, tergantung pada durasi gangguan yang disimulasikan. Dengan demikian, meskipun terjadi deviasi tegangan yang signifikan selama periode gangguan, fenomena tersebut masih sesuai dengan karakteristik gangguan sementara (*temporary disturbance*) sebagaimana didefinisikan dalam standar IEEE 1159.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem ZDT mampu mempertahankan kestabilan pasca-gangguan dan memenuhi klasifikasi karakteristik gangguan tegangan berdasarkan standar IEEE 1159. Hal ini mengindikasikan bahwa konfigurasi yang dirancang tidak hanya memenuhi aspek kontinuitas pasokan, tetapi juga tetap berada dalam kerangka evaluasi mutu daya yang diakui secara internasional.

## 5. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa konfigurasi Zero Down Time (ZDT) yang dirancang untuk PT Pacrim secara teknis layak diterapkan berdasarkan hasil analisis aliran daya, hubung singkat, dan kestabilan transien. Pada kondisi terberat, pembebanan penyulang hanya mencapai 42% dari kapasitas penghantar, dengan susut daya sebesar 0,34%, yang menunjukkan tersedianya margin kapasitas dan efisiensi sistem yang memadai untuk mendukung skema redundansi multi-sumber.

Analisis hubung singkat menunjukkan arus gangguan maksimum 13,56 kA masih berada di bawah rating pemutus 16 kA, sehingga konfigurasi ZDT tidak memerlukan peningkatan spesifikasi peralatan proteksi. Dari sisi respons dinamis, sistem mampu kembali stabil setelah gangguan dieliminasi, menegaskan bahwa rekonfigurasi suplai dalam skema ZDT tidak menyebabkan kehilangan kestabilan sistem.

Namun demikian, gangguan tiga fasa menghasilkan penurunan tegangan hingga 0,40 pu yang, berdasarkan klasifikasi IEEE 1159, termasuk kategori *voltage sag* signifikan. Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun kontinuitas pasokan (*zero interruption*) dapat dipertahankan, kualitas tegangan selama gangguan berat masih menjadi aspek kritis yang perlu dipertimbangkan dalam implementasi ZDT pada pelanggan industri sensitif.

Dengan demikian, kontribusi penelitian ini terletak pada pembuktian bahwa konfigurasi multi-penyulang dari sumber berbeda efektif meningkatkan keandalan dan kapasitas sistem tanpa melampaui batas proteksi, sekaligus mengidentifikasi batas kinerja mutu tegangan pada skenario gangguan ekstrem.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Committee of the IEEE Power and E. Society, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality IEEE Power & Energy Society," 2009.
- [2] SEMI F47-0706, Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity.
- [3] N.Harziargyriou dkk, "Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended". IEEE Transactions on Power Systems, Volume: 36, pp. 3271 – 3281, 2021.
- [4] PERMEN ESDM No.37 Tahun 2008, Aturan Sistem Tenaga Listrik Sumatera
- [5] Agung Warsito dkk, Simulasi Tegangan Dip Pada Jaringan tegangan Menengah Menggunakan Model EMTP, 2009.
- [6] 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.
- [7] S. Rudi Salman, Mustamam, "Simulasi dan Analisis Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Perangkat Lunak Electrical Transient Analyser Program (ETAP) Versi 4.0."
- [8] J. J. Grainger, "William d. Stevenson, JR.,", "Power Syst. Anal. McGraw-Hill, Inc, 1994
- [9] J. Son, Y. Afrida, U. U, and A. A. A, "Simulasi Perbaikan Tegangan menggunakan Aplikasi ETAP pada Mobile Substation 150/20 KV Sistem Kelistrikan PLN (Persero) Rayon Menggala", ELC, vol. 17, no. 1, pp. 37-43, Jan. 2023.
- [10] J. Son, Yenni Afrida, and Sri Suryani, "Analisis Setting Over Current Relay Satu Fasa Ke Tanah Sistem 20 Kv Pada Recloser B 21 Penyulang Salju Gardu Induk Teluk Betung Berbasis Etap", ELC, vol. 18, no. 2, pp. 202-211, May 2024.
- [11] R. U. Putra, L. Hakim, and H. Gusmedi, "Studi Analisis Perbaikan Stabilitas Tegangan Melalui Penjadwalan Ulang Generator", ELC, vol. 8, no. 3, pp. 124-135, Sep. 2014.
- [12] Nisa', S. N. R., Haryudo, S. I., & Santana, A. A., "Studi Tegangan Jatuh pada Jaringan Tegangan Menengah Penyulang Sidomulyo", ELC, vol. 19, no. 3, pp. 383-393, Sep. 2025.
- [13] E.Stvaktakis dkk, "Voltage Dip Detection and Power System Transients", 2001.
- [14] A.Honrubia-Escribano dkk, "Influence of Voltage Dips on Industrial: Analisis and Assessment". Electrical Power and Energy Systems, 2012.
- [15] Riza Samsinar, Witji Wiyuno, "Studi Keandalan Rekonfigurasi Jaringan Program Zero Down Time (Zdt) di Kawasan Sudirman Central Business Distric (Scbd) Menggunakan Software ETAP 12.6". 2019.