



## Evaluasi Kinerja Peralatan 20 kV di Gardu Induk Pamaron terhadap Dampak Penambahan Pembangkit 110 MW

Ari Saputra Gunarta\* , I Wayan Sukadana, I Nyoman Gede Adrama, I Wayan Utama

Universitas Pendidikan Nasional, Indonesia

Email: gunartaarisaputra@gmail.com\* , wayansukadana@undiknas.ac.id,  
gedeadrama@undiknas.ac.id, wayansutama@undiknas.ac.id

---

### Keywords:

ETAP;  
Pamaron Substation;  
20 kV Equipment;  
Load Flow;  
Short-Circuit Analysis.

---

### Abstract

*The increasing demand for electrical energy in the Bali System continues to grow, driving the need for additional generating capacity to maintain the reliability of the electricity supply. This study aims to evaluate the performance of 20 kV distribution equipment at the Pamaron Substation due to the integration of a 110 MW leased Diesel Power Plant (PLTD). The evaluation was conducted using the Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) software through power flow and short-circuit current simulations in three operating scenarios, namely 60 MW, 110 MW, and 110 MW generation with one of the power transformers not operating (contingency N-1). The simulation results show that under normal conditions with both transformers operating, the loading of the power transformer, Circuit Breaker (CB), and Current Transformer (CT) is still within the equipment's capacity limits. However, the short-circuit current increased from 19.20 kA to 23.66 kA in the 110 MW scenario, and reached 33.21 kA in the contingency condition. Furthermore, the fault current value exceeded the installed Load Break Switch (LBS)'s breaking capacity of 16 kA. This finding indicates that the 110 MW diesel power plant is still feasible to operate under normal conditions, while under contingency conditions, operational restrictions and LBS specifications must be increased to maintain the reliability and security of the power distribution system.*

---

### Kata Kunci:

ETAP;  
Gardu Induk Pamaron;  
Peralatan 20 Kv;  
Aliran Daya;  
Arus Hubung Singkat.

---

### Abstrak

Peningkatan kebutuhan energi listrik di Sistem Bali yang terus berkembang mendorong perlunya penambahan kapasitas pembangkit guna menjaga keandalan pasokan tenaga listrik. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja peralatan distribusi 20 kV di Gardu Induk Pamaron akibat integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) sewa berkapasitas 110 MW. Evaluasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *Electrical Transient Analyzer Program* (ETAP) melalui simulasi aliran daya dan arus hubung singkat pada tiga skenario operasi, yaitu pembangkitan 60 MW, 110 MW, serta 110 MW pada kondisi salah satu transformator daya tidak beroperasi (kontingensi N-1). Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi normal dengan kedua transformator beroperasi, pembebanan transformator daya, *Circuit Breaker* (CB), dan *Current Transformer* (CT) masih berada dalam batas kemampuan peralatan. Namun, arus hubung singkat mengalami peningkatan dari 19,20 kA menjadi 23,66 kA pada

skenario 110 MW, dan mencapai 33,21 kA pada kondisi kontingensi. Selain itu, nilai arus gangguan tersebut telah melampaui kemampuan pemutusan *Load Break Switch* (LBS) yang terpasang sebesar 16 kA. Temuan ini mengindikasikan bahwa pengoperasian PLTD 110 MW masih layak dilakukan pada kondisi normal, sedangkan pada kondisi kontingensi diperlukan pembatasan operasi dan peningkatan spesifikasi LBS untuk menjaga keandalan serta keamanan sistem distribusi tenaga listrik.

---

## PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan infrastruktur strategis yang mendukung pertumbuhan ekonomi, aktivitas sosial, dan kesejahteraan masyarakat. Di Indonesia, permintaan listrik terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan populasi, industrialisasi, dan digitalisasi di berbagai sektor. Sistem kelistrikan Bali, sebagai salah satu sistem yang terus berkembang, saat ini didukung oleh 12 sumber pasokan listrik yang meliputi PLTS, PLTMH, PLTU, PLTG, PLTD, dan interkoneksi Jawa–Madura–Bali ((Persero), 2020; Bali, 2025; Commission, 2003; IEEE, 1996; Inc., 2020; Sari, Putra, & Lestari, 2019). Namun, peningkatan kebutuhan energi di Provinsi Bali mendorong perlunya penambahan kapasitas pembangkit untuk menjaga keandalan sistem tenaga listrik dan mengantisipasi potensi pemadaman (blackout) akibat ketidakseimbangan antara pasokan dan beban puncak (Pratama, 2020; Ramadhan, 2022; Wulandari & Nugroho, 2021; Yusuf, Andika, & Rahman, 2021).

Menyadari kondisi tersebut, PT PLN (Persero) melakukan berbagai upaya untuk memperkuat sistem kelistrikan Bali, salah satunya melalui penambahan kapasitas pembangkit di wilayah Bali Utara. Data terkini menunjukkan bahwa Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) di Pemaron, Buleleng, yang semula berkapasitas 60 MW, kini ditambah 50 MW sehingga total kapasitasnya menjadi 110 MW. Integrasi pembangkit tambahan ini dilakukan melalui Gardu Induk (GI) Pemaron 150/20 kV, yang berfungsi sebagai titik interkoneksi antara sistem transmisi 150 kV dan jaringan distribusi 20 kV di wilayah Bali Utara. Penambahan kapasitas pembangkit tersebut bertujuan untuk memenuhi pertumbuhan beban sekaligus meningkatkan cadangan daya sistem, terutama pada saat beban puncak (Anggraini, 2023; Blackburn & Domin, 2014; Kundur, 1994; Setiawan, Kurniawan, & Fauzi, 2022; Stevenson, 1982; Stevenson & Grainger, 1994).

Namun demikian, penambahan kapasitas pembangkit pada suatu gardu induk berpotensi mengubah karakteristik operasi sistem distribusi secara signifikan. Perubahan utama yang perlu diwaspadai meliputi redistribusi aliran daya, peningkatan pembebanan transformator daya, serta kenaikan arus hubung singkat pada peralatan distribusi 20 kV seperti *Circuit Breaker* (CB), *Current Transformer* (CT), dan *Load Break Switch* (LBS). Kondisi ini menjadi kritis karena peralatan yang terpasang memiliki spesifikasi dan rating kemampuan tertentu yang telah ditetapkan berdasarkan kondisi operasi awal. Jika kemampuan peralatan terlampaui, maka risiko kegagalan peralatan, gangguan sistem, bahkan pemadaman luas dapat terjadi. Oleh karena itu, evaluasi terhadap kesiapan peralatan eksisting menjadi langkah penting sebelum pengoperasian pembangkit kapasitas besar dilakukan secara penuh (Arsyad, 2021; Asna & Sariana, 2021; Funansar, 2020; Sitompul, 2022; Sugiharto, 2015; Sukadana, 2019; Widiarto & Suprihartini, 2022).

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas analisis aliran daya dan arus hubung singkat pada sistem distribusi 20 kV menggunakan perangkat lunak ETAP. Penelitian oleh (Kusnaldi, 2024) menganalisis sistem interkoneksi PLTBg Pasir Mandoge dengan jaringan distribusi 20 kV dan menemukan bahwa penambahan pembangkit dapat menyebabkan drop tegangan signifikan yang memerlukan kompensasi daya reaktif. Studi lain oleh Imron & Haryudo (2024) membahas perhitungan rating *Circuit Breaker* menggunakan ETAP pada gardu induk 150/20 kV, yang menekankan pentingnya evaluasi peralatan proteksi terhadap perubahan kondisi sistem. Selain itu, penelitian oleh (Agusti, 2026) menunjukkan bahwa pemecahan beban pada penyulang 20 kV mampu memperbaiki profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya. Sementara itu, studi tentang kejenuhan CT oleh para peneliti di GI Priok Barat menunjukkan bahwa arus hubung singkat yang tinggi dapat menyebabkan CT mengalami saturasi dan mengganggu kinerja relay proteksi.

Meskipun berbagai penelitian tersebut telah memberikan kontribusi penting, terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) yang belum terisi secara memadai. Sebagian besar studi sebelumnya berfokus pada analisis aliran daya atau arus hubung singkat secara terpisah, tanpa mengevaluasi secara terpadu dampak penambahan pembangkit terhadap seluruh peralatan utama distribusi secara simultan. Penelitian yang secara spesifik mengevaluasi kemampuan transformator daya, CB, CT, dan LBS dalam satu kerangka analisis pada berbagai skenario operasi (termasuk kondisi kontingensi N-1) masih terbatas. Padahal, evaluasi terpadu sangat diperlukan karena setiap peralatan memiliki fungsi dan batas kemampuan yang berbeda, namun saling terkait dalam menjaga keandalan sistem secara keseluruhan.

Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan mendesak untuk memastikan bahwa integrasi PLTD 110 MW ke GI Pamaron tidak mengorbankan keandalan dan keamanan sistem distribusi. Berdasarkan data operasional, Penyulang Ponjok Batu yang disuplai dari GI Pamaron Trafo II 60 MVA diketahui memiliki efisiensi penyaluran daya sebesar 94,23%, yang masih relatif lebih rendah sekitar 3,55% dari standar SPLN No. 72 Tahun 1987, serta kualitas tegangan di sisi beban sebesar 95,65%. Selain itu, penyulang Anturan di wilayah yang sama sering mengalami gangguan hubung singkat akibat kondisi penghantar dan vegetasi di sekitar jaringan. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem distribusi GI Pamaron sudah memiliki tantangan operasional sebelum penambahan pembangkit, sehingga evaluasi dampak penambahan kapasitas menjadi semakin kritis untuk dilakukan.

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada pendekatan evaluasi yang komprehensif dan terintegrasi, mencakup analisis aliran daya, arus hubung singkat, serta evaluasi kemampuan termal dan akurasi CT (*Accuracy Limit Factor*) secara bersamaan pada tiga skenario operasi yang berbeda. Penelitian ini tidak hanya menganalisis apakah peralatan masih memenuhi ratingnya, tetapi juga menghitung secara kuantitatif margin keamanan operasi dan mengidentifikasi peralatan paling kritis (dalam hal ini LBS) yang memerlukan peningkatan spesifikasi. Selain itu, penelitian ini menggunakan metode perhitungan Actual ALF sesuai standar IEC 61869-2 yang jarang diterapkan dalam studi sejenis di Indonesia, sehingga memberikan kedalaman analisis yang lebih baik terhadap kinerja CT.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh penambahan pembangkit 110 MW terhadap kinerja peralatan 20 kV di GI Pamaron melalui simulasi aliran daya dan arus hubung singkat menggunakan ETAP pada tiga skenario operasi. Secara spesifik,

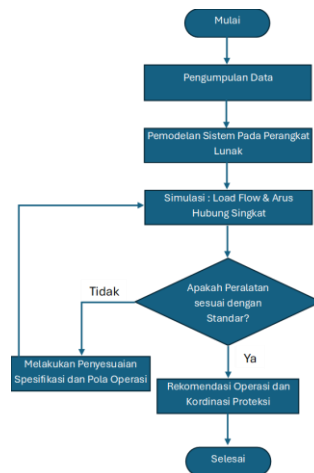
penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengevaluasi distribusi aliran daya dan pembebanan transformator pada setiap skenario; (2) menganalisis peningkatan arus hubung singkat dan dampaknya terhadap CB, CT, dan LBS; serta (3) menghitung Actual ALF CT untuk memastikan kinerja proteksi tetap optimal. Manfaat penelitian ini adalah memberikan rekomendasi teknis berbasis data kepada PT PLN (Persero) mengenai kesiapan peralatan eksisting, batas operasi yang aman, serta langkah-langkah mitigasi yang diperlukan, seperti peningkatan spesifikasi LBS dan pengaturan strategi operasi pada kondisi kontingensi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar teknis dalam pengambilan keputusan operasional dan perencanaan pengembangan sistem distribusi yang lebih andal dan aman.

## **METODE PENELITIAN**

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode simulasi sistem tenaga listrik untuk mengevaluasi pengaruh penambahan pembangkit terhadap kinerja peralatan distribusi 20 kV di Gardu Induk (GI) Pamaron. Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian terapan (*applied research*) yang berorientasi pada pemecahan masalah teknis operasional di lapangan, khususnya dalam menilai kesiapan peralatan eksisting terhadap perubahan kondisi sistem. Populasi data dalam penelitian ini mencakup seluruh data teknis operasional GI Pamaron 150/20 kV, yang meliputi spesifikasi transformator daya, *Circuit Breaker* (CB), *Current Transformer* (CT), *Load Break Switch* (LBS), single line diagram, data pembebanan sistem, serta data arus hubung singkat eksisting. Sampel data yang digunakan terdiri atas parameter teknis utama yang berpengaruh langsung terhadap analisis, yaitu rating peralatan proteksi dan pengukuran pada sisi 20 kV, data impedansi sumber dan transformator, serta kapasitas dan reaktansi PLTD sewa 110 MW. Teknik pengambilan sampel dilakukan secara purposive sampling dengan memilih komponen-komponen kritis yang memiliki peran strategis dalam keandalan sistem distribusi, yaitu transformator daya (2 unit), CB incoming dan kopel, CT outgoing, serta LBS pada penyulang utama.

### **Lokasi Penelitian**

Penelitian dilaksanakan di Gardu Induk Pamaron 150/20 kV, Kabupaten Buleleng, Provinsi Bali. GI Pamaron merupakan salah satu gardu induk yang berfungsi sebagai titik interkoneksi antara sistem transmisi 150 kV dan jaringan distribusi 20 kV di wilayah Bali Utara. Pemilihan lokasi penelitian didasarkan pada adanya rencana integrasi PLTD sewa berkapasitas total 110 MW ke dalam sistem, sehingga diperlukan evaluasi terhadap kemampuan peralatan distribusi yang telah terpasang.



**Gambar 1. Flow Chat Langkah Pelaksanaan**

Sumber: Penulis, 2026.

Dapat dilihat dari Gambar diagram diatas, penulis melakukan penelitian dengan beberapa proses diantaranya :

#### 1. Pengumpulan Data

Data yang digunakan terdiri atas data primer dan data sekunder yang diperoleh dari PT PLN (Persero). Data tersebut meliputi single line diagram (SLD) GI Pamaron, spesifikasi transformator daya, data PLTD sewa, spesifikasi *Circuit Breaker* (CB), *Current Transformer* (CT), *Load Break Switch* (LBS), data pembebanan sistem, serta data arus hubung singkat eksisting.

#### 2. Pemodelan Sistem

Pemodelan sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP dengan mengacu pada konfigurasi aktual jaringan GI Pamaron. Model mencakup seluruh komponen utama yang berpengaruh terhadap analisis, yaitu sumber sistem 150 kV, transformator daya, busbar 20 kV, penyulang, PLTD sewa, serta peralatan proteksi yang terdiri atas CB, CT, dan LBS. Seluruh parameter teknis dimasukkan sesuai data spesifikasi sehingga model mampu merepresentasikan kondisi operasi sistem secara aktual. Sebelum simulasi dilakukan, model diverifikasi terhadap konfigurasi sistem eksisting untuk memastikan kesesuaian hasil simulasi dengan kondisi lapangan.

#### 3. Skenario Simulasi

Analisis dilakukan pada tiga skenario operasi untuk menggambarkan perubahan kondisi sistem akibat penambahan pembangkit, yaitu:

- Skenario I:** Pengoperasian PLTD sewa sebesar **60 MW**, dengan kedua transformator daya beroperasi normal.
- Skenario II:** Pengoperasian PLTD sewa sebesar **110 MW**, dengan kedua transformator daya beroperasi normal.
- Skenario III:** Pengoperasian PLTD sewa sebesar **110 MW** pada kondisi salah satu transformator daya tidak beroperasi (**kontingensi N-1**), sehingga seluruh beban ditanggung oleh satu transformator.

Ketiga skenario tersebut digunakan untuk mengevaluasi perubahan distribusi aliran daya, pembebanan transformator, serta peningkatan arus hubung singkat pada sisi distribusi 20 kV.

#### 4. Teknik Analisa Data

Analisis dilakukan melalui dua jenis simulasi utama, yaitu aliran daya dan arus hubung singkat. Simulasi aliran daya digunakan untuk memperoleh distribusi daya aktif, daya reaktif, arus pembebanan, dan profil tegangan pada setiap skenario operasi. Selanjutnya, simulasi arus hubung singkat dilakukan berdasarkan metode yang diterapkan pada ETAP mengacu pada standar IEC 60909 untuk memperoleh besarnya arus gangguan tiga fasa pada titik-titik yang dianalisis.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Simulasi Aliran Daya

Pemodelan sistem distribusi 20 kV GI Pamaron menggunakan ETAP berhasil merepresentasikan kondisi operasi eksisting serta skenario penambahan pembangkit PLTD sewa sebesar 60 MW dan 110 MW. Simulasi dilakukan untuk mengetahui perubahan distribusi aliran daya, pembebanan transformator, dan arus pada peralatan utama setelah integrasi pembangkit.

Pada Skenario I (PLTD 60 MW), kedua transformator daya masih beroperasi dalam kondisi normal dengan pembagian beban yang relatif seimbang. Arus pada kubikel outgoing tercatat sebesar 168,5 A, sedangkan arus pada kubikel BOO mencapai 789,3 A. Nilai tersebut masih berada di bawah rating *Circuit Breaker* (CB) maupun *Current Transformer* (CT) yang terpasang sehingga sistem masih beroperasi dengan margin keamanan yang memadai.

Pada Skenario II (PLTD 110 MW), peningkatan kapasitas pembangkit menyebabkan redistribusi aliran daya yang lebih besar. Arus pada penyulang meningkat hingga 785,6 A, sedangkan arus pada kubikel BOO sebesar 787,7 A. Meskipun terjadi peningkatan dibandingkan skenario pertama, seluruh nilai arus masih berada di bawah kemampuan hantar arus peralatan sehingga operasi pembangkit 110 MW masih dapat diakomodasi selama kedua transformator daya beroperasi secara normal.

Sebaliknya, pada Skenario III (PLTD 110 MW dengan satu transformator tidak beroperasi), seluruh beban sistem dialihkan ke satu transformator sehingga pembebanan transformator meningkat secara signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa operasi pembangkit pada kapasitas maksimum tanpa dukungan kedua transformator mengurangi margin operasi sistem dan meningkatkan risiko terjadinya overload pada kondisi kontingensi. Oleh karena itu, skenario ini memerlukan pengendalian operasi melalui pembatasan daya pembangkit atau pengaturan ulang konfigurasi sistem untuk menjaga keandalan penyaluran tenaga listrik.

**Tabel 1. Hasil Simulasi Aliran Daya**

| Parameter                          | Skenario 1 - PLTD<br>60 MW       | Skenario 2 - PLTD<br>110 MW      | Skenario 3 - PLTD 110<br>MW (Trafo 1 OFF)  |
|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>A. Spesifikasi Peralatan</b>    |                                  |                                  |                                            |
| Rasio CT                           | 100/5 A                          | 100/5 A                          | 100/5 A                                    |
| Rating ACB/CT                      | 1250 A                           | 1250 A                           | 1250 A                                     |
| Rating PMT Kopel                   | 1250 A                           | 1250 A                           | 1250 A                                     |
| Transformator Daya                 | 2 × 30 MVA<br>(Onan/ONAF)        | 2 × 60 MVA<br>(Onan/ONAF)        | 2 × 60 MVA<br>(Onan/ONAF)                  |
| Generator PLTD                     | 2 × 30 MW (Total 60<br>MW)       | 2 × 55 MW (Total<br>110 MW)      | 2 × 55 MW (Total 110<br>MW)                |
| Tegangan Sistem                    | 20 kV                            | 20 kV                            | 20 kV                                      |
| Frekuensi Sistem                   | 50 Hz                            | 50 Hz                            | 50 Hz                                      |
| Kapasitas Busbar                   | 1250 A                           | 2000 A                           | 2000 A                                     |
| Konfigurasi Sistem                 | Double Bus                       | Double Bus                       | Double Bus (Trafo 1<br>OFF)                |
| <b>B. Hasil Simulasi ETAP</b>      |                                  |                                  |                                            |
| Tegangan Bus 20 kV<br>(Rata-rata)  | 20,21 kV (1,05 pu)               | 20,38 kV (1,07 pu)               | 20,12 kV (1,06 pu)                         |
| Tegangan Bus 6,3 kV<br>(Rata-rata) | 6,38 kV (1,01 pu)                | 6,45 kV (1,02 pu)                | 6,31 kV (1,00 pu)                          |
| Pembebanan Transformator           | 52,1 %                           | 84,3 %                           | 96,7 % (Trafo 2)                           |
| Arus pada PMT Incoming (Bus 20 kV) | 614 A                            | 1032 A                           | 1098 A                                     |
| Arus pada PMT Kopel                | 112 A                            | 256 A                            | — (Tidak digunakan)                        |
| Total Beban Sistem                 | 58,7 MW                          | 104,6 MW                         | 103,2 MW                                   |
| Rugi-rugi Daya Aktif (Total)       | 1,21 MW                          | 1,87 MW                          | 2,15 MW                                    |
| Rugi-rugi Daya Reaktif (Total)     | 0,87 MVar                        | 1,36 MVar                        | 1,58 MVar                                  |
| Kondisi Sistem                     | Normal                           | Normal                           | Aman (Trafo 1 OFF)                         |
| Catatan                            | Semua peralatan dalam batas aman | Semua peralatan dalam batas aman | Pembebanan Trafo 2 tinggi namun masih aman |

Sumber: Hasil simulasi ETAP, 2026.

### Evaluasi Kemampuan Peralatan terhadap Pembebanan

Evaluasi kemampuan pembebanan dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi ETAP terhadap spesifikasi teknis transformator daya, CB, dan CT yang digunakan pada GI Pemaron. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa seluruh peralatan utama masih mampu mengakomodasi peningkatan arus akibat penambahan pembangkit pada kondisi operasi normal.

Pada kedua skenario operasi normal, arus yang mengalir pada kubikel outgoing masih berada di bawah rating CB 1250 A dan CT 800/5 A, sedangkan arus pada kubikel BOO juga masih berada di bawah rating CB 2000 A dan CT 2000/5 A. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kapasitas penghantar arus peralatan masih memenuhi persyaratan operasi sehingga tidak diperlukan penggantian CB maupun CT akibat peningkatan pembebanan.

Namun demikian, kondisi berbeda ditunjukkan pada skenario kontingensi ketika salah satu transformator daya tidak beroperasi. Pada kondisi tersebut, seluruh daya harus disalurkan melalui satu transformator sehingga tingkat pembebanan meningkat secara signifikan.

**Tabel 2. Data Hasil Simulasi ETAP Terhadap Kesiapan Peralatan**

| Parameter                                | Rating Peralatan            | Skenario 1<br>PLTD 60<br>MW | Skenario 2<br>PLTD 110<br>MW | Skenario 3<br>PLTD 110<br>MW (Trafo 10<br>OFF) | Evaluasi                                                     |
|------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>Arus tertinggi Outgoing</b>           | PMT: 1250<br>ACT: 800 A     | 168,5 A                     | 785,6 A                      | 785,2 A                                        | Seluruh skenario masih di bawah rating PMT dan CT.           |
| <b>Arus tertinggi Kopel/BOO</b>          | PMT: 2000<br>ACT: 2000<br>A | 789,3 A                     | 787,7 A                      | 858,1 A                                        | Seluruh skenario masih di bawah rating PMT dan CT Kopel.     |
| <b>Arus tertinggi 150/20 kV (Primer)</b> | 230,9 A                     | 24,7 A                      | 126,4 A                      | 259,0 A                                        | Skenario 1 dan 2 memenuhi, Skenario 3 melebihi rating trafo. |
| <b>Status PMT</b>                        | -                           | Memenuhi                    | Memenuhi                     | Memenuhi                                       | Tidak terjadi overload PMT pada seluruh skenario.            |
| <b>Status CT</b>                         | -                           | Memenuhi                    | Memenuhi                     | Memenuhi                                       | CT masih mampu mengalirkan arus sesuai rating nominal.       |
| <b>Status Trafo</b>                      | -                           | Memenuhi                    | Memenuhi                     | Tidak Memenuhi                                 | Trafo mengalami overload pada Skenario 3.                    |

Sumber: Hasil simulasi ETAP dan analisis penulis, 2026.

### Evaluasi Arus Hubung Singkat terhadap PMT, CT, dan LBS

Penambahan pembangkit memberikan kontribusi langsung terhadap peningkatan arus hubung singkat pada sistem distribusi 20 kV. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa PMT dan CT masih memenuhi kemampuan termalnya pada dua skenario operasi normal karena rating ketahanan arus hubung singkat sebesar 25 kA masih lebih besar dibandingkan arus gangguan hasil simulasi. Dengan demikian, penambahan pembangkit hingga 110 MW tidak memerlukan penggantian PMT maupun CT selama sistem beroperasi dalam konfigurasi normal.

Berbeda dengan PMT dan CT, hasil evaluasi terhadap Load Break Switch (LBS) menunjukkan bahwa kemampuan pemutusan peralatan tidak lagi memenuhi persyaratan. Nilai arus hubung singkat hasil simulasi berkisar antara 16,324 kA hingga 19,94 kA, sedangkan rating LBS yang terpasang hanya sebesar 16 kA. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa LBS merupakan peralatan yang paling kritis terhadap penambahan pembangkit.

### Evaluasi Kemampuan *Current Transformer*

Selain kemampuan termal, penelitian ini juga mengevaluasi kemampuan *Current Transformer* (CT) melalui parameter *Accuracy Limit Factor* (ALF) sesuai IEC 61869-2. Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan arus hubung singkat tidak menyebabkan CT mengalami saturasi selama burden rangkaian sekunder tidak melebihi  $0,28 \Omega$ , sehingga Actual ALF tetap memenuhi nilai minimum 25. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja CT tidak hanya dipengaruhi oleh spesifikasi nameplate, tetapi juga oleh kualitas instalasi rangkaian sekunder, seperti impedansi kabel, sambungan, dan relay proteksi. Oleh karena itu, evaluasi CT perlu mempertimbangkan Actual ALF selain kemampuan termalnya untuk memastikan sistem proteksi tetap mampu mendeteksi arus gangguan secara akurat.

### Spesifikasi CT yang dianalisis

CT outgoing yang digunakan pada sistem distribusi 20 kV GI Pemaron memiliki spesifikasi sebagai berikut:

**Tabel 3. Spesifikasi CT yang dianalisis**

| Parameter                                       | Nilai          |
|-------------------------------------------------|----------------|
| Rasio CT                                        | 800/5 A        |
| Kelas proteksi                                  | 5P20           |
| Arus sekunder nominal, ( $I_n$ )                | 5.00 A         |
| Rated ALF, ( $F_n$ )                            | 20             |
| Rated burden, ( $S_n$ )                         | 15 VA          |
| Tahanan internal lilitan sekunder, ( $R_{in}$ ) | 0,933 $\Omega$ |
| Tahanan burden aktual, ( $R_a$ )                | 0,117 $\Omega$ |
| Knee-point voltage, ( $V_k$ )                   | 173,61 V       |

Sumber: Data teknis CT GI Pemaron dan hasil analisis penulis, 2026.

Rasio CT 800/5 A menunjukkan bahwa arus primer sebesar 800 A direpresentasikan menjadi arus sekunder sebesar 5 A. Rasio transformasinya adalah:

$$K_{CT} = \frac{800}{5} = 160$$

Dengan demikian, setiap arus primer sebesar 160 A akan direpresentasikan menjadi arus sekunder sebesar 1 A. Kelas 5P20 menunjukkan CT proteksi kelas P dengan batas kesalahan komposit sebesar 5% pada arus batas akurasi nominal sebesar 20 kali arus primer nominal, ketika CT dibebani sesuai rated burden. Oleh karena itu, pada kondisi nameplate, batas arus primer yang dapat direproduksi sesuai kelasnya adalah:

$$I_{ALF, rated} = 20 \times 800 = 16 \text{ kA}$$

Angka 16 kA tersebut bukan nilai ALF. ALF merupakan angka tanpa satuan, yaitu 20. Adapun 16 kA merupakan arus primer ekuivalen yang diperoleh dari perkalian rated ALF dengan arus primer nominal CT.

### Perhitungan burden internal CT

Burden internal merupakan daya semu yang dikonsumsi oleh tahanan internal lilitan sekunder CT. Nilainya dihitung menggunakan persamaan:

$$S_{in} = I_n^2 \times R_{in}$$

Dengan :

$$I_n = 5 \text{ A} \text{ \& } R_{in} = 0,933 \Omega$$

Maka :

$$S_{in} = 5^2 \times 0,933 = 23,325 \text{ VA}$$

### Perhitungan burden aktual rangkaian sekunder

Burden aktual merupakan total beban eksternal yang terhubung pada sisi sekunder CT, meliputi tahanan kabel, impedansi relay proteksi, terminal, sambungan, dan komponen lain dalam rangkaian sekunder. Berdasarkan data pengukuran, tahanan burden aktual adalah:

$$R_a = 0,177 \, \Omega$$

Burden aktual dalam satuan VA dihitung menggunakan persamaan:

$$S_a = I_a^2 \times R_a$$
$$S_a = 5^2 \times 0,177 = 2,925 \, VA$$

Nilai burden aktual sebesar 2,925 VA jauh lebih kecil dibandingkan rated burden CT sebesar 15 VA. Kondisi ini menguntungkan karena semakin kecil burden eksternal yang harus disuplai oleh CT, semakin kecil tegangan sekunder yang diperlukan dan semakin lambat CT mencapai kondisi saturasi.

### Perhitungan *Actual Accuracy Limit Factor*

Rated ALF ditentukan pada kondisi rated burden. Dalam kondisi aktual, burden rangkaian sekunder dapat lebih kecil atau lebih besar daripada rated burden. Oleh karena itu, kemampuan aktual CT dinilai menggunakan *Actual Accuracy Limit Factor* dengan persamaan:

$$F_a = F_n \times \frac{S_n + S_{in}}{S_a + S_{in}}$$

Dengan memasukkan data:

$$F_a = 20 \times \frac{38,325}{26,250}$$
$$F_a = 20 \times 1,460 = 29,20$$

Dengan pembulatan sesuai data awal, nilai tersebut dapat ditulis sekitar:

$$F_a \approx 29,24$$

dengan:

- $F_a$  = actual accuracy limit factor;
- $F_n$  = rated accuracy limit factor;
- $S_n$  = rated burden;
- $S_a$  = actual burden;

Hasil tersebut menunjukkan bahwa **actual ALF CT adalah sekitar 29,24**, lebih tinggi daripada rated ALF sebesar 20. Dengan burden yang lebih kecil, CT memerlukan tegangan sekunder yang lebih rendah untuk mengalirkan arus menuju relay sehingga memiliki margin yang lebih besar sebelum mengalami saturasi. Kemampuan reproduksi arus primer maksimum berdasarkan actual ALF dihitung sebagai:

$$I_{max} = F_a \times I_{primer, rated}$$
$$I_{max} = 29,24 \times 800 = 23,392 \, KA$$

Dengan demikian, istilah yang tepat adalah:

- **Actual ALF = 29,24**, tanpa satuan;
- **kemampuan reproduksi arus primer maksimum CT = 23,392 kA.**

### Implikasi Operasi Sistem

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi PLTD sewa 110 MW masih dapat dioperasikan dengan aman pada kondisi normal ketika kedua transformator daya GI Pemaron beroperasi, karena pembebanan transformator, *Circuit Breaker* (CB), dan *Current*

*Transformer* (CT) masih berada dalam batas kemampuan peralatan. Namun, pada kondisi kontingensi saat salah satu transformator tidak beroperasi, terjadi peningkatan pembebanan dan arus hubung singkat yang mengurangi margin keamanan sistem, sehingga diperlukan pembatasan operasi atau rekonfigurasi jaringan. Selain itu, *Load Break Switch* (LBS) menjadi peralatan yang paling kritis karena rating pemutusannya terlampaui pada seluruh skenario simulasi, sehingga peningkatan spesifikasi LBS menjadi rekomendasi utama untuk mendukung pengoperasian pembangkit 110 MW secara andal dan aman.

## KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh penambahan pembangkit PLTD sewa 110 MW terhadap kinerja peralatan distribusi 20 kV di Gardu Induk Pamaron menggunakan simulasi aliran daya dan arus hubung singkat berbasis ETAP pada tiga skenario operasi. Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pada kondisi operasi normal dengan kedua transformator daya beroperasi, seluruh peralatan utama distribusi masih berada dalam batas kemampuan operasinya. Pembebanan transformator daya pada skenario 110 MW mencapai 84,3% dari kapasitas nominal, arus pada CB incoming tercatat sebesar 1032 A (di bawah rating 1250 A), dan arus pada CT outgoing sebesar 785,6 A (di bawah rating 800 A), sehingga pengoperasian pembangkit 110 MW secara teknis masih layak dan aman dilakukan selama tidak terjadi gangguan pada transformator. Namun, pada kondisi kontingensi N-1 ketika salah satu transformator tidak beroperasi, pembebanan transformator meningkat hingga 96,7% dan arus hubung singkat mencapai 33,21 kA, yang secara signifikan mengurangi margin keamanan operasi sistem dan meningkatkan risiko kegagalan peralatan. Temuan paling kritis dari penelitian ini adalah bahwa *Load Break Switch* (LBS) yang terpasang dengan rating pemutusan 16 kA tidak lagi memenuhi persyaratan karena arus hubung singkat hasil simulasi pada seluruh skenario (16,324 kA – 19,94 kA) telah melampaui kemampuannya. Dengan demikian, rekomendasi utama yang diberikan adalah peningkatan spesifikasi LBS menjadi minimal 25 kA serta pembatasan operasi pada kondisi kontingensi untuk menjaga keandalan dan keamanan sistem distribusi tenaga listrik.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar dilakukan analisis koordinasi proteksi secara lebih mendalam dengan mempertimbangkan karakteristik transient arus hubung singkat, pengaruh kontribusi pembangkit terhadap setting relay proteksi yang ada, serta evaluasi dampak operasi PLTD 110 MW terhadap stabilitas tegangan dan frekuensi sistem Bali secara keseluruhan. Selain itu, kajian tentang aspek ekonomis dari peningkatan spesifikasi peralatan (terutama LBS) dibandingkan dengan biaya yang timbul akibat potensi kegagalan peralatan dan pemadaman listrik dapat menjadi topik penelitian yang relevan untuk mendukung perencanaan sistem tenaga listrik yang lebih andal dan efisien. Penelitian lanjutan juga dapat mempertimbangkan penggunaan simulasi dinamis (*dynamic simulation*) untuk menganalisis respons sistem terhadap gangguan mendadak, serta pengembangan strategi operasi optimal pada kondisi kontingensi berbasis kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) untuk meningkatkan ketahanan sistem distribusi di masa depan.

## REFERENSI

- (Persero), P. T. P. L. N. (2020). *SPLN D3.033-2:2020: Peralatan Sakelar pada Jaringan Tegangan Menengah*. PT PLN (Persero).
- Anggraini, L. (2023). Integrasi PLTD Sewa pada Sistem Distribusi 20 kV: Dampak terhadap Arus dan Setting Proteksi. *Jurnal Sistem Tenaga Listrik*, 11(2), 95–104.
- Arsyad, M. I. (2021). Studi Analisa Kelayakan Transformator Arus untuk Proteksi pada Unit PT. Indonesia Power UP Mrica. *Jurnal Teknik Elektro UNTAN*.
- Asna, I. M., & Sariana, I. M. (2021). Analisis Konstruksi Posisi Lightning Arrester di Gardu Distribusi. *Jurnal Ilmiah TELSINAS*.
- Bali, P. T. P. L. N. (Persero) U. I. D. (2025). *Data Sistem GI Pemaron: Diagram Satu Garis dan Spesifikasi Teknis CT/CB*. PT PLN (Persero).
- Blackburn, J. L., & Domin, T. J. (2014). *Protective Relaying: Principles and Applications*. CRC Press.
- Commission, International Electrotechnical. (2003). *IEC 60044-1: Instrument Transformers – Part 1: Current Transformers*. International Electrotechnical Commission.
- Funansar, F. (2020). Evaluasi Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik. *Jurnal Ilmiah TELSINAS*.
- IEEE. (1996). *IEEE Std C37.110-1996: IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Inc., Operation Technology. (2020). *ETAP 20.0: Electrical Power System Analysis Software*. Operation Technology Inc.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill.
- Pratama, R. (2020). Simulasi Aliran Daya dan Hubung Singkat Menggunakan ETAP pada Jaringan Distribusi 20 kV. *Jurnal Energi Dan Kelistrikan*, 12(1), 33–40.
- Ramadhan, A. (2022). Analisis Arus Hubung Singkat Tiga Fasa pada Jaringan Distribusi 20 kV. *Jurnal Teknik Elektro UNDIP*, 17(2), 77–85.
- Sari, A., Putra, D., & Lestari, M. (2019). Analisis Keandalan Sistem Distribusi 20 kV pada Gardu Induk X. *Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 8(2), 45–52.
- Setiawan, R., Kurniawan, D., & Fauzi, I. (2022). Analisis Thermal Kabel Distribusi 20 kV Akibat Peningkatan Penetrasi Daya. *Jurnal Energi Dan Sistem Tenaga*, 10(3), 140–148.
- Sitompul, Z. C. S. (2022). *Karakteristik dan Kejenuhan Current Transformer untuk Proteksi*. Repository Universitas HKBP Nommensen.
- Stevenson, W. D. (1982). *Elements of Power System Analysis*. McGraw-Hill.
- Stevenson, W. D., & Grainger, J. J. (1994). *Power system analysis*. New York: McGraw-Hill.
- Sugiharto, A. (2015). Pemakaian dan Pemeliharaan Transformator Arus (CT). *Swara Patra: Majalah Ilmiah PPSDM Migas*.
- Sukadana, I. Wayan. (2019). *Optimalisasi Lbs Motorized Key Point Pada Jaringan Distribusi 20 Kv Untuk Meningkatkan Keandalan Sistem*.
- Widiarto, H., & Suprihartini, Y. (2022). Analisis Kualitas Jalur Distribusi Menggunakan ETAP 12.6.0 pada Gardu PPI. *Cendekia*, 2(1), 82–90.
- Wulandari, S., & Nugroho, B. (2021). Analisis Koordinasi Proteksi pada Jaringan Distribusi 20 kV. *Jurnal Rekayasa Energi*, 14(2), 101–108.
- Yusuf, M., Andika, H., & Rahman, T. (2021). Evaluasi Performa Transformator Distribusi akibat Penetrasi Pembangkit Energi Terbarukan. *Jurnal Tenaga Listrik*, 15(1), 55–63.