

ANALISIS KEAMANAN SISTEM AKIBAT PERTUMBUHAN BEBAN KELISTRIKAN PADA *COPPER CLEANER PROJECT* DI TIMIKA, PAPUA MENGGUNAKAN SIMULASI *ETAP*

Budi Permadi¹, Widodo Pudji Muljanto², Widamuri Anistia³

Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional, Malang

¹bpermadi65@gmail.com, ²widodo_pm@lecturer.itn.ac.id, ³widamuri@lecturer.itn.ac.id

Abstrak—Penelitian ini membahas analisis keamanan sistem tenaga listrik akibat pertumbuhan beban pada *Copper Cleaner Project* di Timika, Papua. Pengembangan fasilitas pengolahan tembaga menyebabkan peningkatan kebutuhan daya yang harus diakomodasi oleh sistem kelistrikan eksisting *Substation C South* 115/13,8 kV. Evaluasi dilakukan menggunakan simulasi aliran daya dan analisis hubung singkat berbasis *software ETAP* untuk menilai dampak penambahan beban terhadap profil tegangan, pembebanan peralatan, rugi daya, serta kecukupan sistem proteksi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa setelah integrasi *Copper Cleaner*, total beban sistem mencapai 56,7 MW dan 29,1 MVAR, dengan kontribusi beban aktual sebesar 1,29 MVA. Nilai ini merepresentasikan pertumbuhan beban sekitar 0,91% terhadap total beban sistem eksisting, serta setara dengan 4,3% dari kapasitas beban terpasang dan 6,76% dari beban puncak operasional proyek. Rugi daya aktif dan reaktif sistem sangat kecil, masing-masing sebesar 0,0004 MW dan 0,0021 MVAR. Pembebanan transformator berada pada kisaran 1–2% dari kapasitas nominal, sedangkan pembebanan kabel daya 115 kV masih di bawah 50%. Analisis hubung singkat tiga fasa menghasilkan arus gangguan sebesar 21,504 kA, masih di bawah rating pemutus 40 kA. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem tenaga listrik *Substation C South* aman dan mampu mengakomodasi pertumbuhan beban *Copper Cleaner Project* tanpa perubahan konfigurasi utama.

Kata Kunci: Pertumbuhan beban, *ETAP*, aliran daya, hubung singkat, transformator.

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik di Indonesia menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan pertumbuhan sektor industri, komersial, dan pertambangan. Di antara sektor tersebut, industri pertambangan merupakan salah satu pengguna energi listrik terbesar karena proses operasionalnya melibatkan peralatan berdaya tinggi, sistem pengolahan berkelanjutan, serta infrastruktur pendukung yang menuntut suplai daya yang stabil dan andal. Keandalan sistem tenaga listrik menjadi faktor krusial dalam menjaga kontinuitas

operasi dan keselamatan proses produksi, sehingga setiap perubahan atau penambahan beban harus dianalisis secara cermat untuk menghindari gangguan sistem [1].

Wilayah pertambangan di Timika, Papua, merupakan salah satu kawasan pertambangan terbesar di Indonesia bahkan dunia, dengan produksi tembaga dan emas dalam skala besar untuk memenuhi kebutuhan global. Dalam rangka meningkatkan efisiensi dan nilai tambah hasil produksi, dikembangkan *Copper Cleaner Project* yang berfungsi sebagai fasilitas pengolahan lanjutan untuk mengoptimalkan pemanfaatan sisa hasil konsentrat. Implementasi proyek ini secara langsung menimbulkan pertumbuhan beban listrik baru pada sistem tenaga eksisting, yang harus diakomodasi tanpa mengurangi tingkat keandalan sistem secara keseluruhan.

Beban listrik yang direncanakan untuk *Copper Cleaner Project* memiliki kapasitas terpasang sebesar 29,97 MVA dengan beban puncak operasional mencapai 19,1 MVA. Penambahan beban dengan karakteristik dominan induktif ini berpotensi memengaruhi profil tegangan, tingkat pembebanan transformator dan kabel, serta besarnya rugi daya sistem apabila tidak didukung oleh perencanaan yang tepat. Penambahan beban tanpa evaluasi teknis yang memadai dapat menyebabkan penurunan kualitas tegangan, pembebanan berlebih peralatan, dan meningkatnya risiko gangguan atau kegagalan sistem [2].

Untuk memastikan sistem tenaga listrik mampu mengakomodasi pertumbuhan beban secara aman dan efisien, diperlukan analisis teknis berbasis simulasi. Perangkat lunak *ETAP (Electrical Transient and Analysis Program)* banyak digunakan dalam studi sistem tenaga karena mampu melakukan analisis aliran daya, hubung singkat, serta evaluasi kinerja sistem secara terintegrasi. Melalui simulasi *ETAP*, kondisi operasi sistem sebelum dan sesudah penambahan beban dapat dianalisis secara kuantitatif, sehingga potensi permasalahan teknis dapat diidentifikasi sejak tahap perencanaan [3]. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan

pada analisis keamanan sistem tenaga listrik akibat pertumbuhan beban *Copper Cleaner Project* di Timika, Papua, guna menilai kesiapan sistem eksisting dalam mendukung pengoperasian proyek secara berkelanjutan.

B. Rumusan Masalah

Sesuai dengan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana kondisi sistem kelistrikan eksisting sebelum adanya penambahan beban dari *Copper Cleaner Project* di Timika, Papua?
2. Bagaimana besarnya pertumbuhan beban listrik yang ditimbulkan oleh pengembangan *Copper Cleaner Project*?
3. Bagaimana pengaruh penambahan beban tersebut terhadap performa sistem tenaga listrik eksisting berdasarkan hasil simulasi dengan menggunakan *software ETAP*?

C. Tujuan

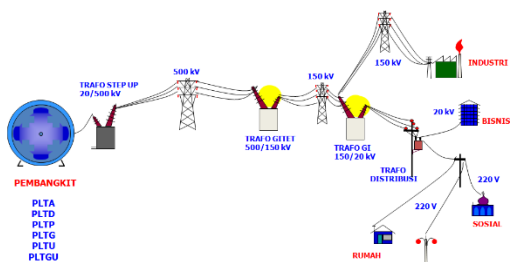
Sesuai dengan rumusan masalah yang telah dipaparkan diatas, tujuan dari penulisan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menganalisis kondisi sistem kelistrikan eksisting yang menyuplai area operasional sebelum adanya penambahan beban dari *Copper Cleaner Project* di Timika, Papua.
2. Menghitung dan mengevaluasi besarnya pertumbuhan beban listrik akibat pengembangan *Copper Cleaner Project*.
3. Menilai dampak penambahan beban terhadap performa sistem tenaga listrik eksisting melalui simulasi sistem menggunakan *software ETAP*, khususnya dalam hal kestabilan tegangan, kapasitas peralatan, dan suplai daya.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Sistem Tenaga Listrik

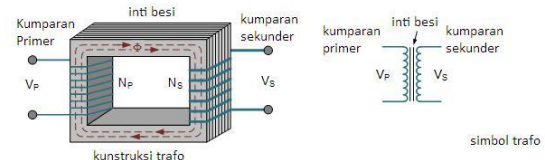
Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen, antara lain unit pembangkitan, saluran transmisi, gardu induk dan jaringan distribusi yang berhubungan sedemikian rupa dan bekerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan. Secara garis besar skema sistem tenaga listrik dapat digambarkan dengan skema seperti Gambar 1 berikut [4].



Gambar 1. Skema Sistem Tenaga Listrik

B. Transformator

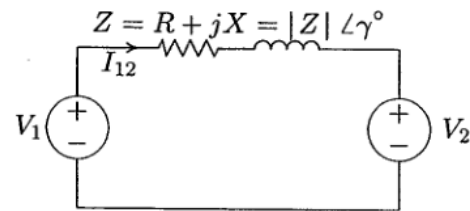
Transformator merupakan suatu alat listrik yang mengubah tegangan arus bolak-balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain melalui suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip-prinsip induksielektromagnet dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya, Transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder seperti pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Dasar Teori Transformator

C. Aliran Daya Komplek

Mempertimbangkan dua sumber tegangan ideal yang terhubung oleh saluran dengan impedansi $Z = R + jX \Omega$ seperti pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Dua Sumber Tegangan Terinterkoneksi

Biarkan tegangan fasor adalah $|V_1| \angle \delta_1$ dan $|V_2| \angle \delta_2$. Dengan asumsi arah arus seperti pada Gambar 3 [5].

$$I_{12} = \frac{|V_1| \angle \delta_1 - |V_2| \angle \delta_2}{|Z| \angle \gamma} = \frac{|V_1|}{|Z|} \angle \delta_1 - \gamma - \frac{|V_2|}{|Z|} \angle \delta_2 - \gamma \quad (1)$$

Daya komplek S_{12} adalah

$$S_{12} = V_1 I_{12}^* = |V_1| \angle \delta_1 \left[\frac{|V_1|}{|Z|} \angle \delta_1 - \gamma - \frac{|V_2|}{|Z|} \angle \delta_2 - \gamma \right] \quad (2)$$

$$S_{12} = \frac{|V_1|^2}{|Z|} \angle \gamma - \frac{|V_1||V_2|}{|Z|} \angle \gamma + \delta_1 - \delta_2 \quad (3)$$

Maka, daya aktif dan reaktif pada titik kirim adalah

$$P_{12} = \frac{|V_1|^2}{|Z|} \cos \gamma - \frac{|V_1||V_2|}{|Z|} \cos(\gamma + \delta_1 - \delta_2) \quad (4)$$

$$Q_{12} = \frac{|V_1|^2}{|Z|} \sin \gamma - \frac{|V_1||V_2|}{|Z|} \sin(\gamma + \delta_1 - \delta_2) \quad (5)$$

Saluran transmisi pada sistem tenaga mempunyai resistansi yang kecil dibandingkan dengan reaktansi. Dengan mengasumsikan $R = 0$ (i.e., $Z = X \angle 90^\circ$), maka persamaan di atas menjadi

$$P_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{|X|} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (6)$$

$$Q_{12} = \frac{|V_1|}{|X|} [|V_1| - |V_2| \cos(\delta_1 - \delta_2)] \quad (7)$$

Selama $R = 0$, maka tidak ada rugi – rugi pada saluran transmisi dan daya aktif kirim sama dengan daya aktif terima.

D. Analisis Aliran Daya

Analisis aliran daya digunakan untuk menghitung tegangan, arus, daya dan faktor daya yang terdapat pada berbagai titik dalam suatu jaringan listrik pada keadaan operasi normal. Dari analisis tersebut dapat diperoleh besar dan sudut fasa tegangan setiap bus, daya aktif dan daya reaktif yang mengalir dalam setiap saluran, dalam bentuk parameter P, Q, V dan δ [6].

Adapun tujuan dari analisis aliran daya adalah sebagai berikut.

- Untuk mengetahui profil tegangan pada setiap bus yang ada, baik magnitude maupun sudut fasa tegangan.
- Untuk mengetahui daya aktif dan daya reaktif yang mengalir dalam setiap saluran yang ada pada sistem.
- Untuk mengetahui kondisi dari semua peralatan, apakah memenuhi batas-batas yang ditentukan untuk menyalurkan daya listrik yang diinginkan
- Untuk memperoleh kondisi mula pada perencanaan sistem yang baru
- Untuk memperoleh kondisi awal untuk studi-studi selanjutnya seperti; studi hubung singkat, stabilitas dan pembebanan ekonomis

E. Pertumbuhan Beban Listrik

Pertumbuhan beban listrik adalah peningkatan permintaan daya listrik yang terjadi akibat bertambahnya infrastruktur, peralatan, dan aktivitas pengguna listrik. Pertumbuhan ini bisa bersifat musiman, tahunan, atau dipicu oleh proyek strategis baru.

Faktor-faktor penyebab pertumbuhan beban listrik antara lain:

- Ekspansi fasilitas industri (misalnya tambang, pabrik)
- Pembangunan gedung, kantor, dan perumahan
- Penambahan peralatan listrik berdaya besar
- Peningkatan jam operasional dan intensitas produksi

Analisis beban diperlukan untuk memproyeksikan kebutuhan daya di masa mendatang. Parameter penting dalam analisis beban meliputi:

- Beban terpasang (*installed capacity*)
- Beban puncak (*peak load*)
- Load factor = (energi rata-rata) / (beban puncak $\times$ waktu)
- Load growth rate = laju pertumbuhan tahunan (%)

Analisis pertumbuhan beban membantu dalam menentukan kapasitas transformator, ukuran kabel, sistem proteksi, dan strategi ekspansi jaringan. Persentase

pertumbuhan daya aktif dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\text{Persentase pertumbuhan daya aktif} = \frac{(P_{\text{baru}} - P_{\text{lama}})}{P_{\text{lama}}} \times 100\% \quad (8)$$

Keterangan:

Pbaru = Daya aktif beban baru (W)

Plama = Daya aktif beban lama (W)

F. Analisis Sistem Tenaga dengan Software ETAP

ETAP (*Electrical Transient and Analysis Program*) adalah perangkat lunak berbasis komputer untuk perencanaan, analisis, dan simulasi sistem tenaga listrik. ETAP digunakan oleh industri, konsultan, dan akademisi karena menyediakan antarmuka visual dan basis data komponen yang luas [7].

Modul utama yang tersedia pada ETAP antara lain:

1. Load Flow Analysis

Digunakan untuk mengevaluasi aliran daya, tegangan di tiap bus, rugi-rugi daya, serta pembebanan peralatan.

2. Short Circuit Analysis

Menganalisis arus gangguan akibat hubung singkat 3 fasa, 2 fasa, atau fasa-ke-tanah, penting untuk setting proteksi.

3. Protective Device Coordination

Membantu merancang sistem proteksi dengan kurva waktu-arus (*TCC curve*), sehingga perangkat dapat bekerja selektif.

4. Arc Flash Analysis

Menentukan tingkat bahaya *flash-over* listrik serta label peringatan sesuai standar IEEE 1584.

5. Harmonic Analysis

Mengukur distorsi harmonik (THD) akibat penggunaan peralatan elektronik, dan menentukan kapasitor filter.

Kelebihan ETAP adalah kemampuannya untuk menangani model sistem besar dengan banyak bus dan peralatan. ETAP juga mendukung standar internasional seperti IEEE, IEC, dan ANSI [3].

G. Analisis Hubung Singkat (Short Circuit Analysis)

Analisis hubung singkat merupakan salah satu studi penting dalam sistem tenaga listrik yang bertujuan untuk menentukan besarnya arus gangguan yang terjadi ketika terjadi hubungan langsung antara penghantar yang berbeda potensial, baik antar fasa maupun antara fasa dan tanah. Gangguan ini dapat disebabkan oleh kegagalan isolasi, kesalahan mekanis, atau kondisi lingkungan seperti petir dan kelembapan tinggi.

Menurut standar IEC 60909 dan IEEE Std 551 (*Brown Book*), analisis hubung singkat diperlukan untuk memastikan bahwa seluruh peralatan dalam sistem tenaga listrik memiliki kapasitas pemutusan (*interrupting capacity*) yang lebih besar dari arus gangguan maksimum yang mungkin terjadi. Dengan

demikian, sistem dapat tetap beroperasi secara andal dan aman meskipun terjadi gangguan.

Secara umum, jenis-jenis gangguan dalam sistem tenaga listrik dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Gangguan Tiga Fasa Simetris (*Three-Phase Fault*)
Merupakan gangguan yang paling berat karena melibatkan ketiga fasa secara bersamaan dan menghasilkan arus gangguan terbesar.
2. Gangguan Dua Fasa (*Line-to-Line Fault*)
Terjadi antara dua penghantar fasa tanpa melibatkan tanah.
3. Gangguan Satu Fasa ke Tanah (*Single Line-to-Ground Fault*)
Terjadi ketika salah satu penghantar fasa menyentuh tanah atau konduktor pentanahan.
4. Gangguan Dua Fasa ke Tanah (*Double Line-to-Ground Fault*)
Terjadi ketika dua fasa secara bersamaan terhubung ke tanah.

Secara matematis, besarnya arus hubung singkat simetris tiga fasa dapat ditentukan dengan Persamaan berikut:

$$I_{sc} = \frac{E_{sys}}{Z_{eq}} \quad (9)$$

dengan keterangan:

I_{sc} = arus hubung singkat simetris (A)

E_{sys} = tegangan nominal sistem (V)

Z_{eq} = impedansi ekuivalen antara sumber dan titik gangguan (Ω)

Nilai Z_{eq} merupakan kombinasi impedansi dari sumber, transformator, saluran, dan komponen sistem lainnya. Karena impedansi sistem bergantung pada konfigurasi jaringan dan posisi titik gangguan, maka perhitungan manual biasanya digantikan dengan simulasi menggunakan perangkat lunak analisis sistem tenaga seperti ETAP.

Secara teoretis, arus hubung singkat dapat dihitung menggunakan persamaan ANSI berikut:

$$I_{sc} = \frac{S_{sc}}{\sqrt{3} \cdot V_{LL}} \quad (10)$$

dengan keterangan:

I_{sc} = arus hubung singkat simetris (kA)

S_{sc} = daya hubung singkat (MVA)

V_{LL} = tegangan sistem *Line to Line* (kV)

Arus hubung singkat asimetris dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$I_{asym} = M.F. \times I_{sym} \quad (11)$$

dengan keterangan:

I_{asym} = arus hubung singkat asimetris (kA)

M. F.= Multiplying factor

I_{sym} = arus hubung singkat simetris (kA)

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di area kerja pengembangan *Copper Cleaner Project* yang berada di Timika, Papua. Waktu penelitian dilakukan dalam rentang bulan Mei hingga Agustus 2025.

B. Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah sistem tenaga listrik 3 fasa dengan tegangan 115 kV yang digunakan untuk menyalurkan daya ke beban di *Copper Cleaner Project*. Fokus utama adalah analisis beban terpasang, beban puncak, serta simulasi kinerja sistem saat terjadi pertambahan beban.

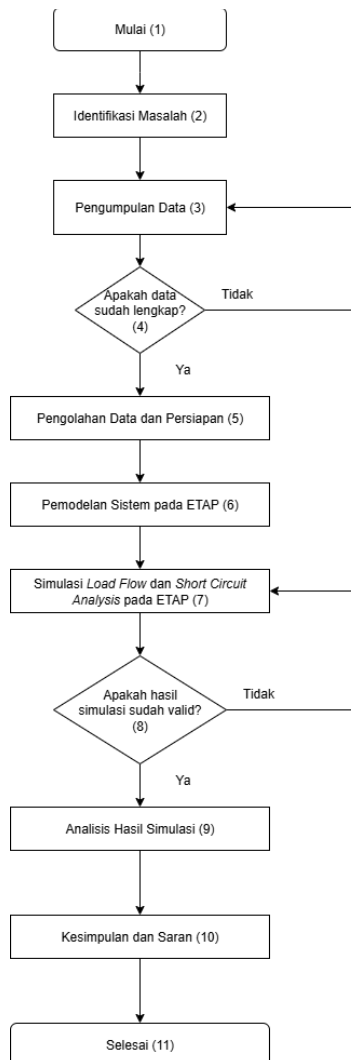
C. Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan penjelasan dari diagram alir penelitian.

- (1) Mulai
Merupakan awal dari proses penelitian yang menandai dimulainya kegiatan studi dan perencanaan sistem tenaga listrik.
- (2) Identifikasi Masalah
Mengidentifikasi isu teknis terkait sistem kelistrikan di *Copper Cleaner Project*, khususnya terkait dengan pertumbuhan beban dan kebutuhan daya baru.
- (3) Pengumpulan Data
Mengumpulkan seluruh data teknis yang dibutuhkan seperti data trafo, kabel, panel, sistem proteksi, dan data beban baik terpasang maupun puncak. Data ini dapat diperoleh dari dokumen teknis, wawancara, dan observasi lapangan.
- (4) Apakah Data Sudah Lengkap?
Tahapan evaluasi kelengkapan data. Jika data belum lengkap, proses kembali ke tahap 3 untuk melengkapi kekurangannya.
- (5) Pengolahan Data dan Persiapan
Data yang telah lengkap kemudian diolah dan disesuaikan formatnya agar siap diinput ke perangkat lunak ETAP. Ini termasuk perhitungan awal (misalnya impedansi) dan verifikasi konsistensi data.
- (6) Pemodelan Sistem pada ETAP
Merupakan tahap pembuatan model jaringan kelistrikan berdasarkan data lapangan ke dalam ETAP, termasuk pemasangan komponen seperti trafo, kabel, dan beban.
- (7) Simulasi *Load Flow* dan *Short Circuit Analysis* pada ETAP
Melakukan *Load Flow Analysis* menggunakan software ETAP untuk mengetahui distribusi tegangan, arus, daya aktif dan reaktif di seluruh sistem. Serta, *Short Circuit Analysis* dilakukan menggunakan modul *Short Circuit Analysis* pada ETAP untuk menentukan besarnya arus gangguan maksimum pada sisi 115 kV.
- (8) Apakah Hasil Simulasi Sudah Valid?
Mengevaluasi apakah hasil simulasi masuk dalam batas normal dan sesuai ekspektasi sistem. Jika belum valid

(misalnya tegangan *drop* besar atau *overloading*), kembali ke tahap 6 untuk revisi pemodelan.

- (9) Analisis Hasil Simulasi
Menafsirkan hasil simulasi untuk menentukan dampak dari pertumbuhan beban terhadap performa sistem. Menyusun grafik, tabel, dan penjelasan teknis.
- (10) Kesimpulan dan Saran
Menyimpulkan temuan utama dari penelitian serta memberikan rekomendasi teknis atau penguatan sistem jika dibutuhkan berdasarkan simulasi.
- (11) Selesai
Penelitian dinyatakan selesai setelah seluruh tahapan dilakukan dan dokumen akhir (misalnya laporan atau skripsi) disusun.



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

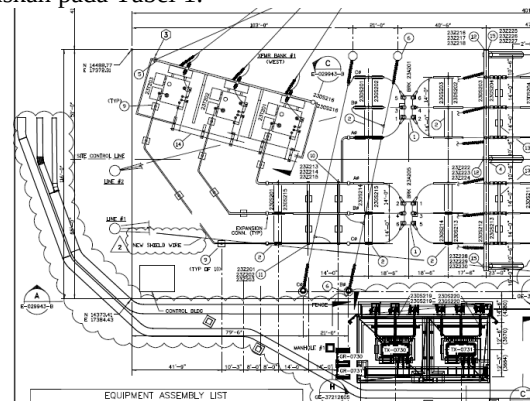
D. Data

Data yang diperlukan dalam penulisan tugas akhir ini didapatkan langsung dari data yang dimiliki oleh *owner Copper Cleaner Project*. Data yang dibutuhkan adalah sebagai berikut.

1) Power Transformer 115/13.8kV Copper Cleaner Project

Berdasarkan Gambar 5 yang bercetak tebal, terdapat 2 set *Power Transformer* baru yaitu, TX-730 dan TX-731 untuk mensuplai beban listrik di *Copper Cleaner Project*. Beban tersebut terbagi menjadi 2 yaitu, CUCL-1 dan CUCL-2 masing-masing melalui *Power Transformer* TX-730 dan TX-731

Power Transformer TX-730 dan TX-731 yang digunakan pada *Substation C South 115 kV* merupakan tipe *Liquid Immersed Power Transformer* buatan Siemens Energy, dengan nomor seri V173901 (TX-730) dan V173902 (TX-731) serta diproduksi pada bulan Januari 2023. Transformator ini dirancang untuk beroperasi pada sistem tenaga listrik 115 kV – 13,8 kV, dengan konfigurasi sambungan Dyn1 dan standar pabrikan mengikuti ANSI/IEEE C57.12.00–2021. Secara rinci, spesifikasi teknis transformator tersebut dijelaskan pada Tabel 1.



Gambar 5. Arrangement Plan 115/13.8kV Power Transformer Copper Cleaner

Tabel 1. Spesifikasi Teknis *Power Transformer* TX-730 dan TX-731

No.	Parameter	Spesifikasi Teknis
1	Pabrikan / Merek	Siemens Energy
2	Tipe Transformator	TEUN7751N
3	Nomor Seri	V173901 dan V173902
4	Tahun / Bulan Pembuatan	Januari 2023
5	Standar Pabrikan	ANSI/IEEE C57.12.00 – 2021
6	Jenis Transformator	<i>Liquid Immersed Power Transformer</i>
7	Sistem Pendinginan (Cooling Class)	KNAN / KNAF / KNAF
8	Jenis Cairan Isolasi	<i>Ester FR3 (biodegradable insulating oil)</i>
9	Frekuensi Sistem	60 Hz
10	Jumlah Fasa	3 fasa
11	Kapasitas Daya (Rated Power)	37,5 MVA / 50 MVA / 62,5 MVA
12	Tegangan Nominal (Rated Voltage)	HV: 115.000 V – LV: 13.800V Y / 7.967
13	Simbol Sambungan (Connection Symbol)	Dyn1 (Delta – Wye Grounded)
14	BIL (Basic Insulation Level)	HV: 550 kV BIL – LV: 110 kV BIL – Neutral: 110 kV BIL

No.	Parameter	Spesifikasi Teknis
15	Impedansi (% pada 85°C, 37,5 MVA)	Tap 1: 8,13% – Tap 3: 8,19% – Tap 5: 8,39%
16	Tap Changer Type	Off-Load Tap Changer (Manual) – W(D,E,G II) Δ 400/170 – 6×5 (211)
17	Jumlah Posisi Tap	5 posisi (Tap 1–5)
18	Kenaikan Suhu Minyak (Top Oil Rise)	65°C
19	Kenaikan Suhu Belitan (Winding Rise)	65°C
20	Temperatur Lingkungan Maksimum	40°C
21	Jenis Konduktor	Tembaga (Copper)
22	Massa Inti dan Kumputan (Core & Coils)	37.800 kg
23	Massa Tangki dan Penutup (Tank & Cover)	7.450 kg
24	Massa Tanpa Minyak (Shipping Mass without Oil)	48.500 kg
25	Massa dengan Minyak (Shipping Mass with Oil)	58.500 kg
26	Massa Total Transformator	69.000 kg
27	Massa Cairan Isolasi	14.200 kg
28	Volume Cairan Isolasi	16.103 liter

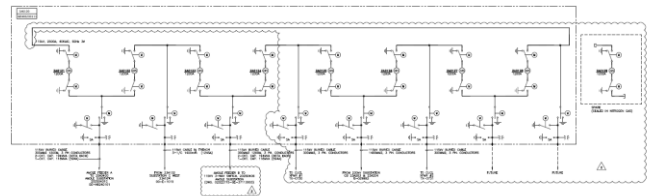
Berdasarkan Tabel 1, Transformator TX-730 dan TX-731 termasuk dalam kategori power transformer dengan cairan isolasi ester alami (FR3), yang memiliki keunggulan berupa titik nyala tinggi ($>300^{\circ}\text{C}$), sifat biodegradabel, serta ketahanan termal yang lebih baik dibandingkan minyak mineral konvensional. Sistem pendinginannya menggunakan kombinasi KNAN–KNAF, yang berarti pendinginan alami minyak dan udara dalam kondisi beban normal, serta pendinginan paksa dengan kipas (*fan*) untuk kapasitas beban tinggi hingga 62,5 MVA.

Konstruksi sambungan Dyn1 memastikan isolasi galvanik antara sisi primer dan sekunder, serta memudahkan deteksi gangguan tanah pada sisi 13,8 kV. Impedansi transformator sebesar 8,13–8,39% menunjukkan karakteristik pembatas arus gangguan yang memadai, sehingga sesuai untuk sistem distribusi menengah dengan kapasitas hubung singkat tinggi seperti pada jaringan 115 kV tambang Timika.

Transformator TX-730 dan TX-731 menggunakan *Off-Load Tap Changer* (OLTC manual) yang memungkinkan pengaturan rasio tegangan hanya saat unit dalam keadaan tidak bertegangan (*de-energized*). *Tap changer* ini digunakan untuk menyesuaikan tegangan sekunder 13,8 kV terhadap variasi kecil pada sisi primer 115 kV saat *commissioning* atau pengaturan sistem awal, bukan untuk operasi dinamis. Konsep ini umum diterapkan pada transformator distribusi di sistem industri tambang karena lebih sederhana, memiliki reliabilitas tinggi, dan meminimalkan risiko kerusakan mekanis dibandingkan sistem OLTC yang bekerja saat berbeban.

2) Single Line Diagram Kasuang Substation C South 115kV

Substation C South 115kV merupakan salah satu gardu induk berupa GIS (*Gas Insulated Switchgear*) yang berfungsi sebagai pusat penyaluran dan pengaturan daya listrik untuk area produksi di wilayah tambang Timika, Papua. Berdasarkan Gambar 6, gardu ini menerima suplai daya dari sistem transmisi 115kV *Substation C West* dan tambahan interkoneksi dari *Millsite 230/115kV* melalui *autotransformer*. *Substation C South* mengirim daya listrik ke beberapa *feeder* seperti *Amole Feeder A* dan B termasuk *Copper Cleaner Project* yaitu CUCL-1 melalui Power Transformer TX-730 dan CUCL-2 melalui Power Transformer TX-731 untuk disalurkan ke *Copper Cleaner* melalui distribusi tegangan menengah 13.8kV.



Gambar 6. Single Line Diagram Substation C South 115kV

Secara operasional, *Substation C South* berfungsi sebagai gardu hub (*load center*) yang mengirimkan energi listrik ke beberapa *feeder* utama di area industri, antara lain:

- *Amole Feeder A* dan B, yang menyuplai daya untuk area tambang bawah tanah;
- *CUCL-1 Feeder* melalui Power Transformer TX-730, dan *CUCL-2 Feeder* melalui Power Transformer TX-731, yang keduanya berperan sebagai suplai utama untuk *Copper Cleaner Project*.

Kedua transformator TX-730 dan TX-731 memiliki rasio tegangan 115/13,8 kV dengan kapasitas masing-masing 62.5 MVA, berfungsi menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi menengah yang digunakan di area *Copper Cleaner*. Setelah melalui transformator tersebut, daya listrik didistribusikan melalui jaringan 13,8 kV menuju *Main Switchgear Copper Cleaner*, yang selanjutnya membagi suplai ke berbagai peralatan proses seperti *pumps*, *thickener drives*, *agitators*, *mills*, dan *control systems* di area *plant*.

Sistem konfigurasi dua trafo paralel ini memberikan fleksibilitas operasional dengan filosofi N+1 *redundancy*, yaitu salah satu transformator dapat menopang beban penting saat unit lainnya dalam kondisi pemeliharaan atau gangguan. Selain itu, sistem busbar 13,8 kV pada sisi sekunder diatur dalam skema *double bus with transfer scheme*, yang memungkinkan *switching* beban tanpa interupsi suplai, sehingga kontinuitas operasi proses produksi tetap terjaga.

3) Sistem Koneksi dan Kabel Daya 115 kV

Koneksi antara *Substation C South* 115 kV dan Power Transformer TX-730 serta TX-731 menggunakan kabel tenaga berisolasi XLPE (*Cross-Linked Polyethylene*) dengan konstruksi *single core* (inti tunggal) dan luas penampang

konduktor 300 mm². Jenis kabel ini merupakan 115 kV *Single Core XLPE Insulated Power Cable*, yang dirancang khusus untuk aplikasi tegangan tinggi di lingkungan industri berat seperti area pertambangan.

Secara fisik, kabel daya 115 kV ini memiliki tiga fasa terpisah (R, S, dan T) yang masing-masing berupa kabel inti tunggal (*single core*). Setiap kabel dilengkapi dengan konduktor tembaga padat (*stranded copper conductor*), isolasi XLPE berkualitas tinggi, lapisan semikonduktor internal dan eksternal, serta pelindung logam (*copper wire screen*) dan *sheath* luar berbahan PVC atau PE tahan korosi. Desain ini memberikan ketahanan terhadap suhu tinggi, kelembapan, serta tekanan elektromagnetik yang muncul saat arus hubung singkat.

Rute pemasangan kabel dirancang dengan mempertimbangkan efisiensi dan keamanan sistem.

- Kabel penghubung dari busbar GIS 115 kV *Substation C South* menuju Power Transformer TX-730 memiliki panjang sekitar 140 meter,
- Sedangkan kabel menuju Power Transformer TX-731 memiliki panjang 110 meter.

4) Beban Listrik Copper Cleaner Project

KASUANG COPPER CLEANERS TOTAL CALCULATED LOAD

LOADS	KTPD	
CONN. (MVA)	130K	
PEAK OP. (MVA)	29.97	
	19.10	

Gambar 7. Beban Listrik Copper Cleaner Project

Berdasarkan Gambar 7, total beban listrik terpasang (*Connected Load*) pada *Copper Cleaner Project* sebesar 29.97 MVA, sedangkan total beban puncak operasi (*Peak Load Operation*) sebesar 19.1 MVA.

5) Data Pembebanan Substation C South 115kV

Berdasarkan hasil wawancara dengan pembimbing lapangan, digunakan data pembebanan pada tanggal 21 Oktober 2025 pukul 11:08 WIT.

Berdasarkan Gambar 8, merupakan data *metering* dari *SCADA Substation C South 115kV* dimana dapat didapatkan data beban dan data sumber pada kondisi awal di *Substation C South 115kV*.

Berdasarkan Tabel 2, sebelum pembangunan *Copper Cleaner Project*, sistem kelistrikan pada *Substation C South 115 kV* hanya melayani beban eksisting dari area Amole, yaitu *Amole Feeder A* dan *Amole Feeder B*. Pada periode pengambilan data (21 Oktober 2025, pukul 11:08 WIT), *Amole Feeder A* berada dalam tahap pemeliharaan (*maintenance*) sehingga tidak berbeban, sementara suplai utama berasal dari *Amole Feeder B*.

SUB C SOUTH METERING TELEMETRY TABULAR - SHARK METER									
10/21/2025 11:08:20									
STATION - 92									
	AMOLE A FEEDER	INCOMING SUBC WEST	AMOLE B FEEDER	CUCL - A KFR 0730	CUCL - B KFR 0731	SOUTH XFR 207/208/209	LCC 8 BUS DIFF.		
VOLTAGE	0.00	117.49	117.32	117.01	117.03	0.00	117.04	kV	
PHASE A AMPS	0	431.1	432.2	43	43	0	431	A	
PHASE B AMPS	0	431.7	430.8	43	43	0	432	A	
PHASE C AMPS	0	431.2	431.2	42	43	0	431	A	
AVERAGE AMPS	0	431.3	431.4	42	43	0	431	A	
TOTAL KW	0	456634	-56196	-320	-190	0	45750	KW	
TOTAL KVAR	0	429022	-30298	4610	4660	0	42890	KVAR	
POWER FACTOR	0.00	0.89	-0.88	-0.53	-0.38	0.00	0.89	PF	
TOTAL KVA	0	463837	463843	4692	4667	0	46438	KVA	
FREQUENCY	50.00	60.00	60.00	60.00	60.00	50.00	60.00	Hz	
METER STATUS	01 LINE	02 LINE	03 LINE	04 LINE	05 LINE	06 LINE	07 LINE		
METER NO.	2PM001	2PM002	2PM003	2PM004	2PM005	2PM006	2PM007		
KWH IN	0	54018	0	0	0	0	5493		
KWH OUT	0	0	53543	312	198	0	0		
KVARH IN	0	27442	0	516	659	0	2707		
KVARH OUT	0	0	28679	0	0	0	0		

Gambar 8. Data Metering SCADA Substation C South 115kV

Tabel 2 Data Beban Substation C South 115kV

Beban	Daya Aktif (kW)	Daya Reaktif (kvar)	Keterangan
Amole Feeder A	0	0	Dalam tahap pemeliharaan (<i>maintenance</i>)
Amole Feeder B	56196	30298	Beban eksisting Amole Feeder B
CUCL-1	320	-510	Beban tambahan Copper Cleaner Unit 1
CUCL-2	190	-660	Beban tambahan Copper Cleaner Unit 2

Tabel 3 Data Sumber Substation C South 115kV

ID Sumber	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)	Keterangan
Substation C West	56,706	29,13	Menjadi satu-satunya sumber aktif sistem
Millsite 230 kV	0	0	Tidak menyuplai daya karena sistem dalam kondisi beban ringan

Berdasarkan Tabel 3, pada tanggal 21 Oktober 2025 pukul 11:08 WIT, diketahui bahwa pasokan daya ke *Substation C South 115kV* hanya berasal dari *Substation C West 115 kV*, sedangkan suplai dari *Millsite 230 kV* tidak berkontribusi pada sistem karena beban total masih rendah.

6) Data Hubung Singkat Substation C South 115kV

Tabel 4. Data Hubung Singkat Substation C South 115kV

Parameter	Nilai
Tegangan sistem	115 kV
Tegangan peralatan	121/145 kV
Short-circuit power (MVAsc)	4.070,319 MVA
Titik gangguan	Bus 4 (3-phase bolted fault)
Jenis gangguan	Three-phase symmetrical
Standar analisis	ANSI C37
Sumber utama	Substation C West

Pada penelitian ini, simulasi hubung singkat dilakukan pada Bus4, yaitu bus 115 kV yang menjadi jalur suplai menuju *feeder Copper Cleaner Unit 1 (CUCL-1)*. Pemilihan Bus 4 sebagai titik gangguan memungkinkan evaluasi yang lebih representatif terhadap ketahanan seluruh peralatan pada jaringan 115 kV karena bus tersebut menerima kontribusi arus gangguan dari kedua arah sistem (*bus upstream* dan *downstream*). Tabel 4 berikut menyajikan data utama sistem yang digunakan dalam analisis.

HV Circuit Breaker 115 kV yang digunakan mulai dari 2A0121 s/d 2A0128 pada jaringan 115kV *Substation C South* memiliki rating berikut berdasarkan Tabel 5.

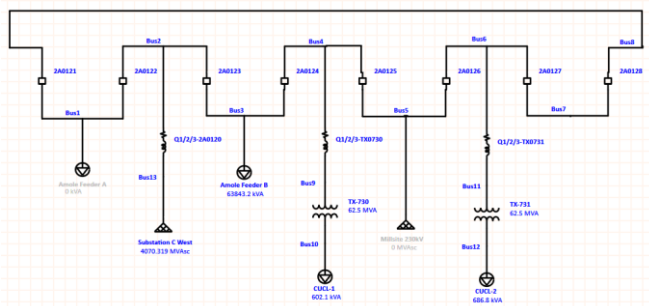
Tabel 5. Rating *HVCB 115kV Substation C South*

Parameter	Rating
Rated breaking current	40 kA
Short-time withstand (3 s)	40 kA
Peak withstand current	108 kA
Break time	< 3 cycles
Standard	IEC / IEEE

IV. SIMULASI DAN ANALISA

A. Gambaran Umum Sistem Kelistrikan *Substation C South 115kV*

Analisis sistem tenaga listrik pada penelitian ini dimodelkan menggunakan perangkat lunak *ETAP* dengan sistem representasi satu garis (*Single Line Diagram*) sebagaimana merujuk pada Gambar 3.3 sebagai acuan. Diagram ini menggambarkan konfigurasi lengkap sistem kelistrikan *Substation C South 115 kV*, termasuk sumber suplai, transformator daya, busbar, serta *feeder* distribusi tegangan menengah 13,8 kV.



Gambar 9. *Single Line Diagram Substation C South 115kV ETAP*

Gambar 9 memperlihatkan bahwa *Substation C South 115kV* menerima suplai daya dari dua arah, yaitu dari *Substation C West 115 kV* dan *Millsite 230/115 kV*, yang masing-masing berfungsi sebagai *main supply* dan *interconnected backup source*. Kedua sumber ini membentuk sistem paralel dengan impedansi rendah (*stiff source*), yang meningkatkan keandalan dan kontinuitas pasokan daya pada area produksi. Tabel berikut memberikan interpretasi elemen utama pada *Single Line Diagram* hasil simulasi ETAP.

Berdasarkan Gambar 9 dan Tabel 6, hasil analisis *single line diagram* menunjukkan bahwa:

- Sistem beroperasi dalam konfigurasi ganda (*dual source*) untuk meningkatkan keandalan suplai.
- Kedua transformator dioperasikan paralel dengan beban seimbang, dan masing-masing menyalurkan daya ke *feeder* CUCL-1 dan CUCL-2.
- Bus distribusi 13,8 kV menyalurkan daya utama ke *Amole Feeder B* yang menjadi beban terbesar, sementara beban *Copper Cleaner* masih tergolong kecil karena fase operasi masih awal (*commissioning phase*).
- Tidak ditemukan adanya *loop flow* atau arus sirkulasi antar-trafo karena impedansi kedua unit identik dan sistem sinkronisasi bekerja dengan baik.

Tabel 6. Elemen Utama Sistem *Substation C South 115kV*

Elemen Sistem	Simbol / ID di ETAP	Keterangan Teknis
Sumber 1 (C West)	Substation C West	Suplai utama sistem 115 kV
Sumber 2 (Millsite)	Millsite 230 kV	Sumber interkoneksi cadangan
Transformator Daya 1	TX-730	62,5 MVA, 115/13,8 kV, Off-load tap $\pm 2,5$ %
Transformator Daya 2	TX-731	62,5 MVA, 115/13,8 kV, Off-load tap $\pm 2,5$ %
Feeder 1	CUCL-1 (Bus TX-730 LV)	Daya 602,1 kVA – <i>Copper Cleaner Unit 1</i>
Feeder 2	CUCL-2 (Bus TX-731 LV)	Daya 686,8 kVA – <i>Copper Cleaner Unit 2</i>
Feeder 3	Amole Feeder B	63.843 kVA – Beban utama area Amole
Feeder 4	Amole Feeder A	0 kVA – Dalam tahap <i>maintenance</i>
Busbar Sistem	Bus1 – Bus13	Bus penghubung tegangan 115 kV dan 13,8 kV
Kabel Daya 115 kV	XLPE 1×300 mm ²	Panjang TX-730: 140 m; TX-731: 110 m

B. Analisis Pertumbuhan Beban Listrik *Copper Cleaner Project*

Untuk menunjang bertambahnya permintaan energi listrik harus diimbangi dengan peningkatan kualitas energi listrik yang disalurkan. Dengan melakukan suatu analisa terhadap sistem tenaga merupakan salah satu cara untuk meningkatkan kualitas energi listrik, dikarenakan analisa sistem tenaga mencakup beberapa permasalahan utama dalam sistem tenaga [8]. Setelah sistem *Copper Cleaner Project* diintegrasikan ke *Substation C South 115kV*, terjadi penambahan dua *feeder* baru, yaitu CUCL-1 dan CUCL-2, masing-masing disuplai oleh Power Transformer TX-730 dan TX-731. Kedua *feeder* ini merupakan beban proses produksi (proses pembersihan tembaga), yang memiliki karakteristik beban induktif dominan akibat penggunaan motor-motor penggerak, pompa *slurry*, *agitator*, dan *thickener drive*.

Berdasarkan Tabel 2, dapat dihitung total daya beban baru (P_{baru}) antara *Amole Feeder B*, CUCL-1, dan CUCL-2 sedangkan total daya beban lama (P_{lama}) hanya mencakup

Amole Feeder B. Sehingga total daya dapat dihitung sebagai berikut

$$P_{baru} = 56.196 + 0.320 + 0.190 = 56.706 \text{ MW}$$

$$Q_{baru} = 30.298 + (-0.510) + (-0.660) = 29.128 \text{ MVAR}$$

Dengan demikian, total daya sistem setelah penambahan proyek *Copper Cleaner Project* menjadi 56,7 MW dan 29,1 MVAR.

Sedangkan total daya total daya beban lama (P_{lama}) adalah sebagai berikut.

$$P_{lama} = 56.196 \text{ MW}$$

$$Q_{lama} = 30.298 \text{ MVAR}$$

Dengan demikian, total daya sistem sebelum penambahan proyek *Copper Cleaner Project* menjadi 56,196 MW dan 30,298 MVAR.

Penambahan beban *Copper Cleaner* relatif kecil dibandingkan total daya eksisting. Secara proporsional, pertumbuhan beban dapat dihitung berdasarkan Persamaan 8.

$$\text{Persentase pertumbuhan daya aktif} = \frac{(56.706 - 56.196)}{56.196} \times 100\% = 0,91\%$$

Artinya, secara total beban *Copper Cleaner Project* hanya menambah sekitar 0,91 % daya aktif terhadap total sistem Sub C South. Namun demikian, karakteristik beban reaktif yang tinggi dari CUCL-1 dan CUCL-2 (masing-masing -510 dan -660 kvar) mempengaruhi faktor daya lokal di sisi 13,8 kV.

Berdasarkan Tabel 8, dapat dihitung persentase perbandingan antara Beban Aktual kondisi awal terhadap beban terpasang dan beban puncak operasi.

Persentase beban aktual terhadap beban listrik terpasang dihitung sebagai berikut.

$$\text{Persentase Terhadap Connected Load} = \frac{1,29}{29,97} \times 100\% = 4,30\%$$

Artinya, pada tanggal 21 Oktober 2025 pukul 11:00, sistem *Copper Cleaner* hanya beroperasi sebesar 4,3% dari total kapasitas terpasang. Kondisi ini menandakan bahwa proyek masih berada pada tahap *commissioning* awal atau uji fungsional sebagian sistem, di mana sebagian besar motor proses dan peralatan belum beroperasi penuh.

Tabel 7. Hasil Perbandingan Beban *Copper Cleaner Project*

Keterangan	Nilai (MVA)	Sumber Data
Beban Terpasang (<i>Connected Load</i>)	29,97	Gambar 3.4
Beban Puncak Operasi (<i>Peak Load</i>)	19,10	Gambar 3.4
Beban Aktual ETAP (21 Okt 2025, 11:00 WIT)	0,60 (CUCL-1) + 0,69 (CUCL-2) = 1,29	Tabel 3.2

Selanjutnya dibandingkan terhadap beban puncak 19,1 MVA dihitung sebagai berikut.

$$\text{Persentase Terhadap Peak Load} = \frac{1,29}{19,10} \times 100\% = 6,76\%$$

Dari hasil tersebut, beban aktual baru mencapai 6,76% dari beban operasi puncak yang direncanakan. Nilai ini menunjukkan sistem *Copper Cleaner* masih pada tahap awal operasi (di bawah 10% kapasitas maksimum), yang sangat umum pada periode *commissioning* untuk menjaga kestabilan trafo, MCC, dan sistem proteksi.

Tabel 8. Persentase Beban *Copper Cleaner*

Parameter	Nilai (MVA)	Persentase terhadap Beban Terpasang (29,97 MVA)	Persentase terhadap Beban Puncak (19,1 MVA)
CUCL-1 + CUCL-2 (Aktual 21 Okt 2025)	1,29	4,30 %	6,76 %

Berdasarkan Tabel 8, beban aktual sistem *Copper Cleaner* per 21 Oktober 2025 masih berada pada tahap awal operasi dengan utilisasi rendah (<10%). Dibandingkan kapasitas terpasang 29,97 MVA dan beban puncak 19,1 MVA, nilai aktual jauh di bawah target operasi normal.

C. Analisis Aliran Daya Substation C South Menggunakan ETAP

Manfaat dari adanya analisis aliran daya listrik adalah untuk mengetahui besarnya daya dalam sistem tenaga listrik apakah masih memenuhi batas-batas yang telah ditentukan, serta untuk mengetahui besar *Losses* yang ada, dan untuk memperoleh kondisi mula pada perencanaan sistem yang baru [9].

1) Kondisi Sumber Daya

Berdasarkan Tabel 2, dapat dinalaisis bahwa pada kondisi operasi beban ringan (sekitar 56,7 MW dan 29,1 MVAR), *Substation C West* mampu menyuplai seluruh kebutuhan daya tanpa memerlukan dukungan interkoneksi dari *Millsite 230 kV*.

Kondisi ini merupakan bagian dari strategi operasi sistem paralel:

- Saat beban sistem rendah, hanya satu sumber utama (*Substation C West*) yang beroperasi untuk mengoptimalkan efisiensi,
- Sedangkan sumber *Millsite 230 kV* tetap dalam kondisi *energized standby*, siap beroperasi otomatis jika terjadi peningkatan beban atau gangguan suplai utama.

Hal ini juga memperlihatkan bahwa sistem *Sub C South* memiliki fleksibilitas operasi tinggi dan redundansi yang baik, sesuai prinsip N-1 *contingency* dalam sistem tenaga, di mana kehilangan satu sumber tidak mengganggu kontinuitas suplai daya ke beban penting seperti *Amole Feeder* dan *Copper Cleaner Project*.

2) Hasil Simulasi Analisis Aliran Daya Substation C South 115kV

Berdasarkan hasil simulasi *load flow* menggunakan ETAP, diperoleh data ringkasan sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 9. Hasil Aliran Daya

Parameter	Satuan	Nilai Simulasi ETAP	Nilai Aktual	Error (%)
Total Daya Beban Aktif (Load-MW)	MW	56,706	56,706	0%
Total Daya Beban Reaktif (Load-MVAR)	MVAR	29,128	29,128	0%
Total Daya Pembangkitan Aktif (Generation-MW)	MW	56,706	56,634	0,12%
Total Daya Pembangkitan Reaktif (Generation-MVAR)	MVAR	29,130	29,022	0,37%
Rugi Daya Aktif (Loss-MW)	MW	0,0004	0,0004	0%
Rugi Daya Reaktif (Loss-MVAR)	MVAR	0,0021	0,0021	0%

Berdasarkan Tabel 9, hasil analisis validasi seluruh parameter utama sistem tenaga listrik menunjukkan tingkat error yang sangat kecil, yaitu di bawah 1%, bahkan sebagian besar bernilai 0%. Hal ini membuktikan bahwa model sistem tenaga listrik yang dibangun pada perangkat lunak ETAP memiliki tingkat akurasi yang sangat tinggi dan dapat diandalkan untuk analisis keamanan sistem akibat pertumbuhan beban kelistrikan. Dengan demikian, hasil simulasi ETAP layak digunakan sebagai dasar evaluasi kinerja dan pengambilan keputusan teknis terkait pengembangan beban pada *Copper Cleaner Project*.

3) Analisis Profil Tegangan

Berdasarkan Tabel 10, hasil evaluasi menunjukkan bahwa seluruh bus memiliki tegangan berada pada kisaran 102,17–102,25%, atau sekitar +2,2% di atas tegangan nominal. Rentang ini masih jauh di dalam batas standar IEC 60038 dan IEEE Std 141 yang mengizinkan variasi tegangan operasi hingga $\pm 5\%$ untuk sistem transmisi dan distribusi industri.

Tabel 10. Profil Tegangan Hasil Simulasi ETAP

ID	Tegangan Nominal (kV)	Tegangan Simulasi (kV)	Persentase Tegangan (%)
Amole Feeder A	115	—	—
Amole Feeder B	115	117,498	102,17%
CUCL-1	13,8	14,109	102,23%
CUCL-2	13,8	14,111	102,25%

4) Analisis Keseimbangan Daya

Dari hasil simulasi di atas terlihat bahwa daya aktif total pembangkitan (56,706 MW) hampir identik dengan daya

beban (56,706 MW), dengan rugi daya hanya 0,0004 MW. Demikian juga daya reaktif sistem (29,13 MVAR dan 29,128 MVAR) menunjukkan keseimbangan sempurna antara suplai dan permintaan reaktif.

Rugi daya yang sangat kecil (kurang dari 0,001% dari total daya sistem) menandakan bahwa impedansi sistem sangat rendah dan konfigurasi jaringan GIS *Substation C South* memiliki efisiensi tinggi.

$$\text{Efisiensi sistem} = \left(1 - \frac{0,0004}{56,706}\right) \times 100\% = 99,9993\%$$

Sehingga efisiensi sistem hampir 100%, yang secara teknis menggambarkan bahwa sistem beroperasi pada kondisi ideal dengan rugi energi sangat kecil ($<0,001\%$). Kondisi ini wajar karena:

- Panjang penghantar 115 kV dan 13,8 kV relatif pendek (≤ 150 m),
- Nilai arus operasi masih jauh di bawah rating nominal,
- Sistem hanya disuplai oleh satu sumber yang *stiff* (*Substation C West*) dengan impedansi rendah.

5) Analisis Daya Aktif dan Reaktif

- Daya aktif ($P = 56,706$ MW) terutama terserap oleh Amole Feeder B (~ 56 MW), sedangkan dua *feeder Copper Cleaner* (CUCL-1 dan CUCL-2) hanya berkontribusi <1 MW.
- Daya reaktif ($Q = 29,13$ MVAR) menunjukkan dominasi beban induktif, terutama dari motor besar pada area Amole.

Perbandingan antara P dan Q menghasilkan faktor daya sistem (PF) sebesar:

$$PF = \frac{56,706}{\sqrt{(56,706)^2 + (29,13)^2}} = 0,89$$

Nilai ini menunjukkan sistem masih efisien dan stabil, namun kompensasi reaktif tambahan di sisi 13,8 kV akan bermanfaat untuk menurunkan rugi transmisi dan memperbaiki efisiensi energi.

6) Analisis Rugi-rugi Sistem (System Losses)

Rugi daya aktif (Loss-MW = 0,0004 MW) berasal dari rugi tembaga (I^2R) pada penghantar dan trafo, sedangkan rugi reaktif (Loss-MVAR = 0,0021 MVAR) disebabkan oleh rugi magnetisasi dan fluks bocor transformator.

Secara relatif, rugi-rugi ini dapat dihitung:

$$\text{Persentase rugi aktif} = \frac{0,0004}{56,706} \times 100\% = 0,0007\%$$

$$\text{Persentase rugi reaktif} = \frac{0,0021}{29,13} \times 100\% = 0,0072\%$$

Nilai tersebut sangat kecil dibandingkan batas normal sistem distribusi industri (biasanya 1–3%), sehingga dapat

disimpulkan bahwa sistem *Substation C South* bekerja pada efisiensi energi sangat tinggi

7) Analisis Pembebanan Kabel dan Transformator Substation C South 115kV

Tabel 11. Hasil Pembebanan Kabel dan Transformator pada Simulasi ETAP

ID Peralatan	Tipe	Aliran Daya Aktif (kW)	Aliran Daya Reaktif (kvar)	Arus (A)	% Loading	Keterangan
Q1/2/3-2A0120	Kabel 115 kV	56.706,4	29.130,1	313,2	42,8	Suplai utama dari Substation C West
Q1/2/3-TX0730	Kabel 115 kV	320	-509,5	2,96	0,5	Kabel HV ke trafo TX-730
Q1/2/3-TX0731	Kabel 115 kV	190	-659,4	3,37	0,5	Kabel HV ke trafo TX-731
TX-730	Transformator 115/13,8 kV	320	-510	24,64	1,0	Menyuplai CUCL-1
TX-731	Transformator 115/13,8 kV	190	-660	28,1	1,2	Menyuplai CUCL-2

Berdasarkan Tabel 11, dapat dianalisis data pembebanan sebagai berikut.

1. Kabel utama 115 kV (Q1/2/3-2A0120) beroperasi pada 42,8% pembebanan, masih sangat aman dan efisien.
2. Kabel suplai TX-730 dan TX-731 hanya terpakai 0,5%, dengan arus <4 A — menandakan kondisi beban sangat ringan.
3. Transformator TX-730 dan TX-731 bekerja di bawah 2% rating nominal, menunjukkan cadangan kapasitas sangat besar (>98%).
4. Kondisi pembebanan saat ini merepresentasikan fase *commissioning Copper Cleaner Project*, di mana sistem diuji dengan beban parsial.
5. Secara keseluruhan, sistem *Substation C South* 115/13,8 kV berada dalam kondisi stabil, efisien, dan siap mendukung beban operasi penuh di masa mendatang.

D. Analisis Hubung Singkat Substation C South 115kV Menggunakan ETAP

Analisis hubung singkat (*short circuit analysis*) merupakan langkah penting dalam mengevaluasi karakteristik arus gangguan pada sistem tenaga listrik. Studi ini dilakukan untuk mengetahui besarnya arus hubung singkat pada titik kritis sistem serta memahami perilaku listrik yang muncul ketika terjadi gangguan tiga fasa. Sistem tersebut menerima suplai utama dari *Substation C West* dengan nilai *short-circuit power* sebesar 4.070,319 MVA. Berdasarkan persamaan 10, dapat dihitung arus hubung singkat pada *Substation C South* sebagai berikut.

$$I_{sc} = \frac{4.070,319}{\sqrt{3} \times 115} = 20,42 \text{ kA}$$

Nilai ini digunakan sebagai pembanding terhadap hasil simulasi ETAP pada titik gangguan Bus 4.

1) Hasil Simulasi ETAP pada Kondisi Bus 4 Fault

Simulasi dilakukan dengan memberikan gangguan tiga fasa pada Bus 4, sehingga arus gangguan mengalir dari seluruh jalur kontributor di kedua sisi bus. Dampaknya, Bus 4 menunjukkan nilai arus hubung singkat tertinggi dibandingkan bus lain, sedangkan bus yang lebih jauh dari titik gangguan mengalami sedikit penurunan nilai arus SC akibat adanya impedansi saluran dan pemutus di antaranya.

Tabel 12. Hasil *Short Circuit* 115 kV (ETAP) dengan Fault di Bus 4

ID	Nominal kV	Symm. kA	Asymm. kA	Peak kA	M.F.	X/R Ratio	NACD
Bus4	115	21.504	30.902	52.604	1.437	9.971	1

Nilai Symm. kA merupakan arus hubung singkat tiga fasa simetris (komponen AC murni) sebesar 21,504 kA pada tegangan nominal 115 kV. Nilai ini sejalan dengan perhitungan teoritis menggunakan daya hubung singkat sumber 4.070,319 MVA, yang menghasilkan arus sekitar 20–21 kA. Perbedaan kecil antara hasil teoritis dan numerik berasal dari pemodelan impedansi rinci peralatan (busbar, pemutus, penghantar, dan trafo) di dalam ETAP.

Kolom M.F. (*Multiplying Factor*) menunjukkan faktor pengali antara arus simetris dan arus asimetris. Berdasarkan persamaan 11, dapat dihitung arus simetris sebagai berikut.

$$I_{asym} = 1,437015 \times 21,50428 \approx 30,90 \text{ kA}$$

Hasil tersebut cocok dengan nilai Asymm. kA pada tabel, yaitu 30,902 kA. Faktor pengali ini sendiri ditentukan terutama oleh X/R Ratio sistem di titik gangguan. Pada Bus 4, rasio X/R $\approx 9,97$, yang menunjukkan bahwa komponen reaktansi jauh lebih dominan dibandingkan resistansi, sehingga menghasilkan komponen *DC-offset* yang cukup besar dan menyebabkan arus asimetris lebih tinggi dibanding arus simetrisnya.

Nilai Peak kA merupakan arus puncak sesaat (*instantaneous peak current*) yang diperoleh dari arus asimetris dengan mempertimbangkan bentuk gelombang sinusoidal yang diberi *offset DC*.

dengan k_{peak} bergantung pada X/R. Untuk Bus 4:

$$I_{peak} = \frac{52,60392}{21,50428} \approx 2,45$$

sehingga faktor puncak sekitar 2,45. Nilai ini konsisten dengan standar ANSI/IEEE C37, yang menyatakan bahwa untuk rasio X/R sekitar 10, faktor puncak berada di kisaran 2,3–2,6 kali arus simetris.

2) Analisis Kecukupan HVCB

Nilai arus hubung singkat ini dapat digunakan untuk penentuan nilai *breaking capacity* pada *Circuit Breaker* (CB) [10]. Dari perspektif kecukupan pemutus tenaga, nilai arus simetris 21,5 kA dan arus puncak 52,6 kA pada Tabel 12 masih berada jauh di bawah rating pemutus 115 kV dengan

kemampuan pemutusan 40 kA dan arus puncak tahanan 108 kA pada Tabel 3.5. Tingkat pemanfaatan (*utilization*) pemutus dapat dihitung sebagai:

$$\text{Utilization}_{\text{sym}} = \frac{I_{\text{sym}}}{I_{\text{CB, rated}}} = \frac{21,504}{40} \approx 0,54 \text{ (54\%)}$$

$$\text{Utilization}_{\text{peak}} = \frac{I_{\text{peak}}}{I_{\text{CB, peak}}} = \frac{52,604}{108} \approx 0,49 \text{ (49\%)}$$

Dengan demikian, pemutus masih memiliki margin keselamatan sekitar 46–51% terhadap ratingnya, sehingga dapat disimpulkan bahwa kapasitas HVCB pada Bus 4 memadai dan aman untuk menghadapi kondisi gangguan tiga fasa yang disimulasikan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai “*Analisis Keamanan Sistem Akibat Pertumbuhan Beban Kelistrikan pada Copper Cleaner Project di Timika, Papua Menggunakan Simulasi ETAP*”, maka kesimpulan penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Kondisi sistem kelistrikan eksisting pada *Substation C South* 115 kV menunjukkan keadaan operasi yang stabil dan memiliki cadangan kapasitas yang besar. Sebelum adanya penambahan beban *Copper Cleaner Project*, suplai daya berasal dari *Substation C West* dengan total beban sekitar 56,7 MW dan 29,1 MVAR. Sistem bekerja sangat efisien dengan rugi daya yang sangat kecil, yaitu hanya 0,0004 MW dan 0,0021 MVAR, yang menunjukkan bahwa sistem berjalan dengan impedansi rendah dan efisiensi hampir 100%.
2. Pertumbuhan beban akibat pengembangan *Copper Cleaner Project* masih berada pada kisaran yang sangat kecil terhadap total kapasitas sistem. Beban terpasang proyek sebesar 29,97 MVA dan beban puncak operasi 19,1 MVA, namun pada kondisi aktual (21 Oktober 2025), beban *Copper Cleaner* baru mencapai 1,29 MVA atau sekitar 4,3% dari total kapasitas terpasang dan 6,76% dari beban puncak. Hal ini menunjukkan bahwa proyek masih berada pada tahap awal *commissioning* dan belum memberikan dampak signifikan pada sistem keseluruhan.
3. Hasil simulasi ETAP menunjukkan bahwa profil tegangan pada seluruh bus baik di sisi 115 kV maupun 13,8 kV berada pada rentang aman, yaitu sekitar 102% dari tegangan nominal. Kenaikan tegangan ini masih sesuai dengan standar IEC/IEEE dan tidak menimbulkan risiko terhadap peralatan. Transformator TX-730 dan TX-731 juga bekerja pada beban sangat ringan (<2%), menandakan tersedianya margin operasi yang besar untuk menampung pertumbuhan beban penuh di masa mendatang.
4. Pembebanan kabel dan transformator berada jauh di bawah batas kemampuan peralatan. Kabel utama 115 kV hanya terpakai 42,8% dan kabel ke transformator hanya 0,5%. Dua transformator 62,5 MVA masing-masing hanya terpakai 1–1,2%. Dengan demikian, infrastruktur kelistrikan sangat siap menghadapi peningkatan beban

Copper Cleaner secara bertahap hingga mencapai beban puncak operasi.

5. Analisis hubung singkat pada Bus 4 menghasilkan arus gangguan tiga fasa simetris sebesar 21,504 kA, masih jauh di bawah rating pemutus tenaga 115 kV sebesar 40 kA. Hal ini menunjukkan bahwa sistem proteksi dan kapasitas HVCB memadai untuk mengatasi gangguan maksimum yang mungkin terjadi, sehingga keandalan dan keselamatan operasi dapat terjamin.

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis simulasi, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan sistem kelistrikan *Copper Cleaner Project* maupun penelitian sejenis di masa mendatang adalah sebagai berikut:

1. Pemantauan beban secara berkala perlu dilakukan ketika *Copper Cleaner Project* mulai beroperasi mendekati beban puncak. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa profil tegangan, pembebanan trafo, dan rugi daya tetap berada dalam rentang aman serta mengantisipasi potensi *bottleneck* atau ketidakseimbangan beban antar-feeder.
2. Evaluasi sistem proteksi secara lebih mendalam perlu dilakukan, khususnya koordinasi kurva proteksi (TCC) antara pemutus 115 kV, transformator, dan *switchgear* 13,8 kV. Meskipun kapasitas pemutus saat ini mencukupi, pengaturan proteksi yang tepat sangat penting untuk selektivitas dan pencegahan *blackout parsial*.
3. Untuk penelitian selanjutnya, dapat ditambahkan analisis kontingensi (N-1) dan simulasi skenario gangguan lainnya, seperti kehilangan salah satu sumber 115 kV atau salah satu transformator. Studi ini akan memberikan gambaran lebih komprehensif mengenai keandalan sistem dalam kondisi ekstrem.
4. Perlu dilakukan pembaruan data teknis secara berkala dan integrasi digital dengan sistem SCADA, agar simulasi berikutnya dapat menggunakan data *real-time* yang lebih akurat dan representatif terhadap kondisi lapangan.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gönen, T. (2014). *Electric Power Distribution Engineering* (3rd ed.). CRC Press.
- [2] El-Hawary, M. (2013). *Electrical Power Systems: Design and Analysis* (2nd ed.). CRC Press.
- [3] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, K. E. (2023). *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2023*. KESDM.
- [4] Suropto, S. (2017). *Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Malang.
- [5] Saadat, H. (2002). *Power System Analysis* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- [6] Stevenson, W. D., & Grainger, J. J. (1994). *Power System Analysis* (6th ed.). McGraw-Hill.

- [7] Operation Technology Inc. (2022). *ETAP Power System Analysis Software – User Guide* (Version 20.6).
- [8] Widiarto, H. (2023). Analisis Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik Di Bandara Internasional Supadio Menggunakan Software ETAP 19, Vol. 3 No. 4. <https://doi.org/10.51878/knowledge.v3i4.2585>
- [9] Nigara, A.G., & Primadiyono, Y. (2016). Analisis Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik pada Bagian Texturizing di PT Asia Pasific Fibers Tbk Kendal menggunakan Software ETAP Power Station 4.0, Vol 7, No 1. <https://doi.org/10.15294/jte.v7i1.8580>.
- [10] Sampeallo, A.S., Nursalim, & Fischer, P.J. (2019). Analisis Gangguan Hubung Singkat pada Jaringan Pemakaian Sendiri PLTU Bolok PT. SMSE (IPP) Unit 3 dan 4 Menggunakan Software ETAP 12.6.0., Vol 8, No ISSN:2252-6692. <https://doi.org/10.35508/jme.v8i1.1442>

VII. BIODATA PENULIS



Budi Permadi lahir di Bandung, 9 November 1965. Lulusan D3 Fakultas Politeknik Universitas Brawijaya pada tahun 1988. Budi Permadi adalah sosok profesional yang telah mengabdikan diri lebih dari tiga dekade di dunia teknik elektro, dengan semangat yang tak pernah padam untuk terus belajar, tumbuh, dan memberi dampak. Budi Permadi memulai kariernya di bidang kelistrikan sejak 1989 sebagai Electrical Supervisor di PT Freeport Indonesia, sebelum menempati posisi strategis sebagai General *Superintendent* di PT Puncak Jaya Power selama lebih dari 20 tahun. Sekarang Budi Permadi menjabat sebagai Direktur di PT Electrindo Inti Nusantara.