

Analisis Tekno-Ekonomi Alternatif Penyambungan PT Citra Palu Minerals pada Sistem Transmisi 150 kV Sulbagsel

¹Reza Kurniawan, ²Syamsir Abduh

Program Studi Magister Teknik Elektro, Sekolah Pascasarjana, Institut Teknologi PLN, Indonesia

Email Korespondensi: kurniawanreza222@gmail.com

Received: June 2026; Revised: July 2026; Published: July 2026

Abstrak

Pertumbuhan kebutuhan energi listrik di Provinsi Sulawesi Tengah diproyeksikan meningkat seiring berkembangnya pelanggan Konsumen Tegangan Tinggi (KTT), khususnya industri pertambangan dan smelter. Salah satu calon pelanggan tersebut adalah PT Citra Palu Minerals (CPM), perusahaan pertambangan emas dengan kebutuhan daya sebesar 30 MVA yang akan disuplai dari Sistem Sulbagsel. Rencana penyambungan PT CPM tercantum dalam Demand Forecast RUPTL 2021–2030 sebesar 15 MVA dan diperbarui dalam RUPTL 2025–2034 menjadi 30 MVA. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kelayakan teknis dan finansial dua alternatif penyambungan PT CPM, yaitu melalui GI 150 kV Talise dengan jaringan SUTT sepanjang ±11 km dan GI 150 kV Tawaeli dengan jaringan SUTT sepanjang ±44 km. Analisis teknis meliputi aliran daya, hubung singkat, stabilitas transien, dan kontingensi N-1, sedangkan analisis finansial menggunakan indikator Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (BCR), dan Payback Period (PP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua alternatif dapat memenuhi kriteria operasi sistem pada skenario yang dianalisis. Dari aspek finansial, alternatif Talise membutuhkan investasi sekitar Rp99,00 miliar dan menghasilkan NPV sebesar Rp38,35 miliar, IRR 13,26%, BCR 1,01, dan PP 7,4 tahun. Sementara itu, alternatif Tawaeli membutuhkan investasi sekitar Rp248,34 miliar dan tidak memenuhi kriteria kelayakan finansial. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa GI 150 kV Talise merupakan alternatif yang lebih layak secara finansial dengan kinerja teknis yang memenuhi kriteria operasi sistem. Dengan mempertimbangkan aspek teknis, finansial, dan konfigurasi keandalan, alternatif Talise dengan konfigurasi double line menjadi opsi yang direkomendasikan dalam skenario penelitian.

Kata kunci: Kelayakan Tekno-Ekonomi, Konsumen Tegangan Tinggi, Tambang Emas, PT Citra Palu Minerals, Sistem Sulbagsel, PT PLN (Persero)

Techno-Economic Feasibility Analysis of Gold Mining Electrification Connection by PT PLN (Persero) in Central Sulawesi

Abstract

Electricity demand in Central Sulawesi is projected to increase along with the development of High Voltage Consumers (Konsumen Tegangan Tinggi/KTT), particularly in the mining and smelter industries. One of the prospective customers is PT Citra Palu Minerals (CPM), a gold mining company with a power demand of 30 MVA to be supplied from the Sulbagsel interconnected system. The connection plan for PT CPM was initially included in the 2021–2030 RUPTL Demand Forecast at 15 MVA and was subsequently updated to 30 MVA in the 2025–2034 RUPTL. This study aims to evaluate the technical and financial feasibility of two alternatives for connecting PT CPM: through the 150 kV Talise Substation (GI Talise) using approximately 11 km of 150 kV transmission line and through the 150 kV Tawaeli Substation (GI Tawaeli) using approximately 44 km of transmission line. The technical analysis includes power flow, short-circuit analysis, transient stability, and N-1 contingency assessment, while the financial analysis uses Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (BCR), and Payback Period (PP). The results indicate that both alternatives satisfy the system operating criteria under the analyzed scenarios. From a financial perspective, the Talise alternative requires an estimated investment of IDR 99.00 billion and generates an NPV of IDR 38.35 billion, an IRR of 13.26%, a BCR of 1.01, and a PP of 7.4 years. In contrast, the Tawaeli alternative requires an estimated investment of IDR 248.34 billion and does not meet the financial feasibility criteria. The comparative results indicate that the 150 kV Talise Substation provides greater financial feasibility while maintaining technical performance within the applicable system operating criteria. Considering the technical, financial, and reliability configuration aspects, the Talise alternative with a double-line configuration is recommended under the scenarios evaluated in this study.

Keywords: Techno-economic feasibility, High Voltage customer, gold mining, PT Citra Palu Minerals, Sulbagsel system, PT PLN (Persero)

How to Cite: Kurniawan, R. ., & Abduh, S. . (2026). Analisis Kelayakan Tekno-Ekonomi Elektrifikasi Penyambungan Tambang Emas oleh PT PLN (Persero) di Sulawesi Tengah. *Journal of Authentic Research*, 5(3), 6941-6956. <https://journal-center.litpam.com/index.php/jar/article/view/6380>



<https://journal-center.litpam.com/index.php/jar/article/view/6380>

Copyright© 2026, Kurniawan et al.
This is an open-access article under
the CC-BY-SA License.

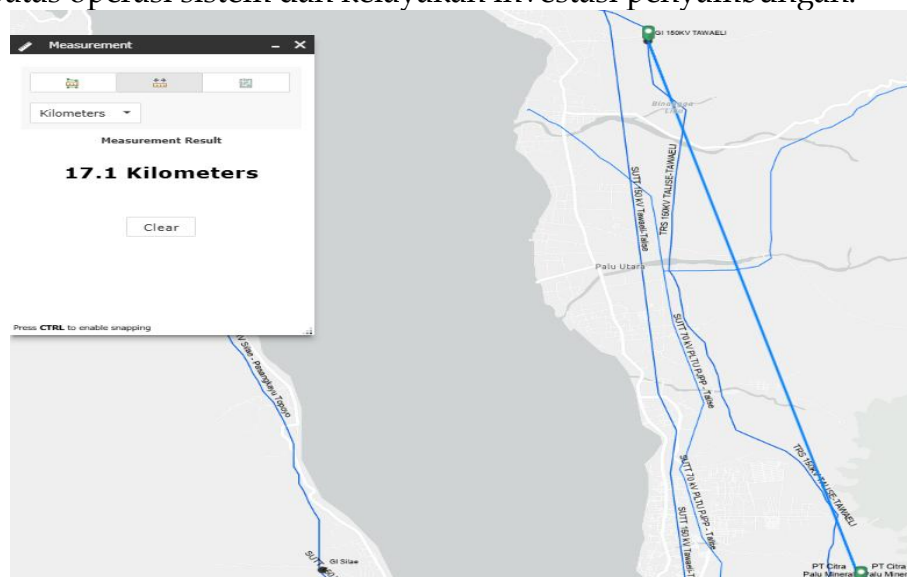


PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Provinsi Sulawesi Tengah diperkirakan terus bertumbuh seiring dengan berkembangnya kegiatan industri, khususnya sektor pertambangan, smelter, dan industri berbasis sumber daya alam. Pertumbuhan industri tersebut mendorong peningkatan kebutuhan daya listrik dalam jumlah besar sehingga diperlukan perencanaan penyambungan pelanggan yang mempertimbangkan kemampuan sistem tenaga listrik sekaligus kelayakan investasinya. Kondisi tersebut menjadi semakin penting pada sistem interkoneksi karena penambahan beban dalam kapasitas besar dapat memengaruhi profil tegangan, pembebanan jaringan, kapasitas peralatan, arus hubung singkat, serta keandalan operasi sistem.

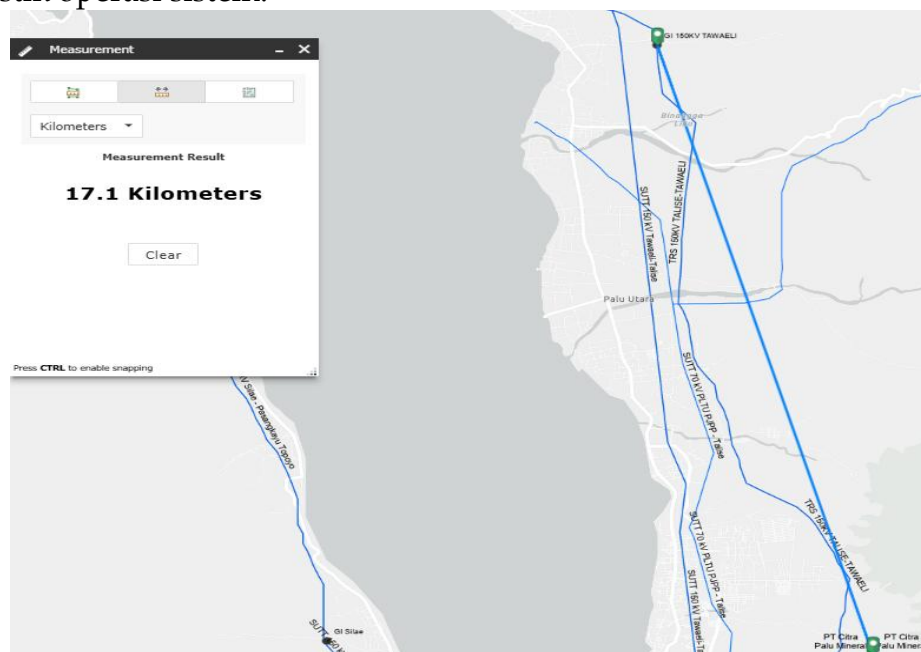
Salah satu calon pelanggan dengan kebutuhan daya yang signifikan adalah PT Citra Palu Minerals (CPM), perusahaan pertambangan emas yang berlokasi di Tondo, Kecamatan Mantikulore, Kota Palu, Sulawesi Tengah. PT CPM memiliki area konsesi sekitar 28.000 hektar dan termasuk dalam kategori calon pelanggan Konsumen Tegangan Tinggi (KTT). Permintaan daya pelanggan yang semula sekitar 22 MVA kemudian dikonfirmasi meningkat menjadi 30 MVA berdasarkan notulen rapat koordinasi pada April 2025. Peningkatan kebutuhan tersebut menunjukkan bahwa penyambungan PT CPM merupakan penambahan beban yang cukup signifikan bagi Sistem Sulbagsel sehingga diperlukan evaluasi yang tidak hanya mempertimbangkan kemampuan teknis jaringan, tetapi juga konsekuensi investasi bagi PT PLN (Persero).

Dalam perencanaannya, terdapat dua alternatif sumber suplai untuk melayani kebutuhan daya PT CPM sebesar 30 MVA. Alternatif pertama direncanakan berasal dari Gardu Induk (GI) 150 kV Talise dengan panjang jaringan sekitar 11 km, sedangkan alternatif kedua berasal dari GI 150 kV Tawaeli dengan panjang jaringan sekitar 44 km. Perbedaan panjang jaringan dan titik sumber tersebut berpotensi menghasilkan karakteristik teknis dan kebutuhan investasi yang berbeda. Oleh karena itu, pemilihan alternatif tidak dapat hanya didasarkan pada jarak jaringan, tetapi perlu mempertimbangkan kemampuan masing-masing alternatif dalam memenuhi batas operasi sistem dan kelayakan investasi penyambungan.



Gambar 1. Rencana Suplai PT CPM dari GI Talise via Aplikasi Arcgis

Alternatif pertama menggunakan GI 150 kV Talise sebagai titik suplai dengan panjang jaringan sekitar 11 km menuju lokasi PT CPM. Jarak jaringan yang relatif lebih pendek menjadi salah satu karakteristik yang perlu dipertimbangkan dalam evaluasi teknis dan ekonomi, terutama terkait kebutuhan pembangunan jaringan dan karakteristik operasi sistem.



Gambar 2. Rencana Suplai PT CPM dari GI Tawaeli via Aplikasi Arcgis

Alternatif kedua menggunakan GI 150 kV Tawaeli sebagai titik suplai dengan panjang jaringan sekitar 44 km. Perbedaan jarak yang cukup besar dibandingkan alternatif GI Talise menunjukkan adanya perbedaan karakteristik investasi dan jaringan yang perlu dianalisis secara kuantitatif. Kedua alternatif tersebut selanjutnya perlu dibandingkan berdasarkan parameter teknis sistem tenaga dan indikator kelayakan finansial.

Dari sisi praktis, permasalahan utama dalam rencana penyambungan PT CPM adalah menentukan alternatif titik sambung yang mampu melayani kebutuhan daya 30 MVA dengan tetap memenuhi batas teknis operasi sistem dan memberikan kelayakan investasi bagi PLN. Namun, permasalahan tersebut tidak hanya merupakan persoalan pemilihan lokasi sambungan. Secara ilmiah, permasalahan yang lebih mendasar adalah bagaimana mengintegrasikan evaluasi teknis sistem tenaga dan evaluasi finansial untuk menentukan kelayakan penyambungan beban industri besar pada sistem interkoneksi. Penambahan beban sebesar 30 MVA dapat mengubah kondisi operasi sistem sehingga alternatif yang secara finansial membutuhkan investasi lebih rendah belum tentu memberikan kondisi operasi yang sama dengan alternatif lainnya.

Elektrifikasi sektor pertambangan menjadi isu penting dalam pengembangan sistem energi karena kegiatan pertambangan memiliki kebutuhan energi yang relatif tinggi. Mahandari et al. (2025) menunjukkan bahwa industri pertambangan emas membutuhkan energi dalam jumlah besar sehingga pengelolaan dan pemanfaatan energi menjadi aspek penting dalam operasi pertambangan. Hooli dan Halim (2025) menunjukkan bahwa penerapan teknologi berbasis listrik pada kegiatan pertambangan dapat meningkatkan efisiensi energi dan berpotensi mengurangi emisi

langsung dari penggunaan bahan bakar fosil. Sementara itu, Li et al. (2024) menunjukkan bahwa transisi menuju elektrifikasi sektor pertambangan tidak hanya dipengaruhi oleh perkembangan teknologi, tetapi juga oleh kesiapan infrastruktur kelistrikan, kebijakan energi, serta struktur biaya investasi dan operasi.

Pada sisi lain, Strazzabosco et al. (2022) mengkaji pemanfaatan energi terbarukan pada industri pertambangan di Australia dan menunjukkan potensi integrasi energi terbarukan dalam mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, menurunkan emisi, dan meningkatkan keberlanjutan operasi pertambangan. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan pentingnya elektrifikasi dalam mendukung transformasi sektor pertambangan. Namun, fokus kajian tersebut lebih banyak berada pada aspek energi, teknologi, efisiensi, dan keberlanjutan, sehingga belum secara spesifik membahas persoalan pemilihan alternatif titik sambung pada sistem tenaga interkoneksi berdasarkan kombinasi parameter teknis sistem dan kelayakan investasi penyedia tenaga listrik.

Penelitian mengenai kelayakan investasi proyek energi pada umumnya menggunakan indikator finansial seperti Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (BCR), dan Payback Period (PBP). Nkambule et al. (2023) menggunakan indikator finansial dalam mengevaluasi kelayakan proyek energi, sedangkan Nurliani (2025) menggunakan NPV sebagai salah satu indikator penilaian investasi. Putra et al. (2020) menggunakan IRR dan BCR dalam analisis kelayakan investasi, sementara Paradongan et al. (2024) menerapkan indikator ekonomi dalam mengevaluasi proyek energi. Pendekatan tersebut memberikan dasar untuk menilai apakah suatu investasi memberikan manfaat finansial, tetapi pada sejumlah kajian evaluasi investasi energi, aspek teknis sistem tenaga belum menjadi bagian utama dalam penentuan alternatif investasi.

Dengan demikian, terdapat celah penelitian pada integrasi antara evaluasi teknis sistem tenaga dan evaluasi finansial dalam pemilihan alternatif penyambungan pelanggan industri berkapasitas besar pada sistem interkoneksi. Evaluasi teknis diperlukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam menerima tambahan beban, sedangkan evaluasi finansial diperlukan untuk mengetahui konsekuensi investasi dan manfaat ekonomi bagi penyedia tenaga listrik. Integrasi kedua aspek tersebut menjadi penting karena alternatif dengan kebutuhan investasi yang berbeda dapat menghasilkan karakteristik operasi sistem yang berbeda pula. Oleh sebab itu, keputusan penyambungan tidak cukup ditentukan berdasarkan satu aspek saja, tetapi perlu mempertimbangkan keterkaitan antara kinerja teknis dan kelayakan investasi.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini berfokus pada evaluasi terintegrasi dua alternatif penyambungan PT Citra Palu Minerals sebesar 30 MVA melalui GI 150 kV Talise dan GI 150 kV Tawaeli pada Sistem Sulbagsel. Evaluasi teknis dilakukan dengan mempertimbangkan parameter operasi sistem yang meliputi profil tegangan bus, loading saluran transmisi, loading transformator, arus hubung singkat, dan stabilitas transien. Sementara itu, evaluasi finansial dilakukan dengan mempertimbangkan kebutuhan investasi dan indikator kelayakan berupa Capital Expenditure (CAPEX), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (BCR), dan Payback Period (PBP). Dengan pendekatan tersebut, penelitian tidak hanya mengidentifikasi kemampuan teknis masing-masing alternatif, tetapi juga membandingkan konsekuensi investasinya dalam kerangka evaluasi yang sama.

Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi terintegrasi aspek teknis sistem tenaga dan kelayakan finansial terhadap dua alternatif penyambungan pelanggan pertambahan berkapasitas 30 MVA pada sistem interkoneksi Sulbagsel. Berbeda dari kajian yang berfokus pada elektrifikasi pertambahan atau kelayakan finansial proyek energi secara terpisah, penelitian ini menghubungkan hasil analisis sistem tenaga dengan hasil analisis investasi untuk memberikan dasar evaluasi alternatif penyambungan. Pendekatan tersebut juga memungkinkan perbandingan langsung antara alternatif GI Talise dan GI Tawaeli berdasarkan konsekuensi teknis dan ekonominya. Dengan demikian, kontribusi penelitian diarahkan pada pengembangan kerangka evaluasi yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam perencanaan penyambungan pelanggan industri besar pada sistem interkoneksi.

Berdasarkan uraian tersebut, research problem dalam penelitian ini adalah belum diketahui alternatif penyambungan 150 kV yang mampu memenuhi secara simultan kriteria operasi Sistem Sulbagsel dan kriteria kelayakan investasi PLN untuk melayani tambahan beban PT CPM sebesar 30 MVA. Research problem tersebut kemudian dijabarkan ke dalam pertanyaan penelitian sebagai berikut: (1) apakah alternatif penyambungan melalui GI 150 kV Talise dan GI 150 kV Tawaeli memenuhi batas teknis operasi Sistem Sulbagsel setelah penambahan beban PT CPM sebesar 30 MVA; (2) bagaimana perbedaan kebutuhan investasi dan kelayakan finansial antara kedua alternatif penyambungan; dan (3) bagaimana perbandingan kedua alternatif berdasarkan kombinasi kinerja teknis dan kelayakan finansial sebagai dasar pemilihan alternatif penyambungan?

Sejalan dengan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi kelayakan teknis dan finansial dua alternatif penyambungan PT Citra Palu Minerals sebesar 30 MVA melalui GI 150 kV Talise dan GI 150 kV Tawaeli pada Sistem Sulbagsel. Evaluasi teknis dilakukan berdasarkan profil tegangan bus, loading saluran transmisi, loading transformator, arus hubung singkat, dan stabilitas transien, sedangkan evaluasi finansial dilakukan berdasarkan CAPEX, NPV, IRR, BCR, dan PBP. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar analitis dalam membandingkan kedua alternatif penyambungan serta mendukung perencanaan penyambungan pelanggan industri besar yang mempertimbangkan kinerja sistem tenaga dan kelayakan investasi secara terpadu.

METODE

Penelitian ini menggunakan desain studi kasus berbasis analisis sistem tenaga dan analisis kelayakan investasi untuk mengevaluasi rencana penyambungan pelanggan Konsumen Tegangan Tinggi (KTT) PT Citra Palu Minerals (CPM) sebesar 30 MVA pada Sistem Sulbagsel. Dua alternatif penyambungan yang dianalisis adalah suplai melalui GI 150 kV Talise dengan panjang jaringan sekitar 11 km dan GI 150 kV Tawaeli dengan panjang jaringan sekitar 44 km. Analisis dilakukan melalui tiga tahapan utama, yaitu analisis teknis sistem tenaga, analisis kelayakan finansial, dan analisis komparatif.

Data penelitian diperoleh melalui dokumentasi, observasi, dan wawancara terarah. Data utama berupa data teknis Sistem Sulbagsel, meliputi konfigurasi jaringan, kapasitas pembangkit, gardu induk, transformator, saluran transmisi, parameter jaringan, dan kondisi beban sistem tahun 2027. Data pelanggan meliputi

kebutuhan daya PT CPM sebesar 30 MVA, faktor daya, pola operasi, dan kebutuhan energi. Data ekonomi meliputi biaya investasi, biaya operasi dan pemeliharaan, biaya pembelian energi, proyeksi energi terjual, tarif listrik, BPP, dan skema kompensasi yang relevan. Observasi dan wawancara dilakukan sebagai data pendukung untuk memverifikasi kondisi infrastruktur, kebutuhan pelanggan, serta asumsi teknis dan ekonomi yang digunakan dalam analisis.

Analisis teknis dilakukan dengan membangun model Sistem Sulbagsel yang mencakup GI Talise, GI Tawaeli, GI di sekitar lokasi penyambungan, jaringan transmisi, dan titik sambung PT CPM. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak analisis sistem tenaga yang digunakan dalam perencanaan sistem PLN. Analisis *load flow* dilakukan untuk kondisi sebelum dan sesudah penyambungan PT CPM pada beban puncak tahun 2027 untuk masing-masing alternatif. Parameter yang dievaluasi meliputi tegangan bus, pembebanan saluran, pembebanan transformator, dan rugi-rugi daya dengan mengacu pada batas operasi dan Grid Code yang berlaku.

Selanjutnya dilakukan analisis hubung singkat untuk mengetahui perubahan arus gangguan akibat penambahan beban PT CPM. Analisis mencakup gangguan tiga fasa dan gangguan tak seimbang pada bus yang terkait dengan titik penyambungan. Hasilnya digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian tingkat arus hubung singkat terhadap kemampuan peralatan dan kebutuhan sistem proteksi. Analisis stabilitas transien dilakukan dengan memberikan skenario gangguan yang relevan terhadap jaringan penyambungan untuk mengevaluasi kemampuan sistem mempertahankan kondisi stabil setelah gangguan.

Evaluasi keandalan dibatasi pada kriteria kontingensi N-1, dengan menguji kehilangan satu elemen jaringan yang relevan terhadap masing-masing alternatif penyambungan. Kriteria keberhasilan meliputi tidak terjadinya pelanggaran batas tegangan dan pembebanan peralatan serta kemampuan sistem tetap beroperasi tanpa *loss of load*. Penelitian ini tidak menghitung indeks SAIDI, SAIFI, EENS, atau LOLP sehingga keandalan yang dimaksud dibatasi pada evaluasi kemampuan sistem berdasarkan skenario N-1.

Analisis finansial dilakukan dari perspektif PLN dengan menyusun arus kas proyek yang mencakup CAPEX, OPEX, biaya pembelian energi, pendapatan penjualan energi, pajak, dan nilai residual apabila terdapat aset yang masih memiliki nilai pada akhir periode. Proyeksi energi terjual ditentukan berdasarkan daya pelanggan, faktor daya, faktor utilisasi, dan pola operasi. Kelayakan investasi dievaluasi menggunakan Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (BCR), dan Payback Period (PBP). Perhitungan menggunakan umur ekonomis proyek, tingkat diskonto, inflasi, eskalasi biaya, tarif listrik, BPP, serta parameter ekonomi lain yang konsisten untuk kedua alternatif.

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan asumsi utama terhadap kelayakan investasi. Skenario sensitivitas meliputi perubahan biaya investasi sebesar 20–40%, penurunan energi terjual akibat berkurangnya jam operasi, serta perubahan tarif atau skema kompensasi yang meliputi PSA, BPP, dan tarif reguler. Hasil sensitivitas dievaluasi berdasarkan perubahan NPV, IRR, BCR, dan PBP.

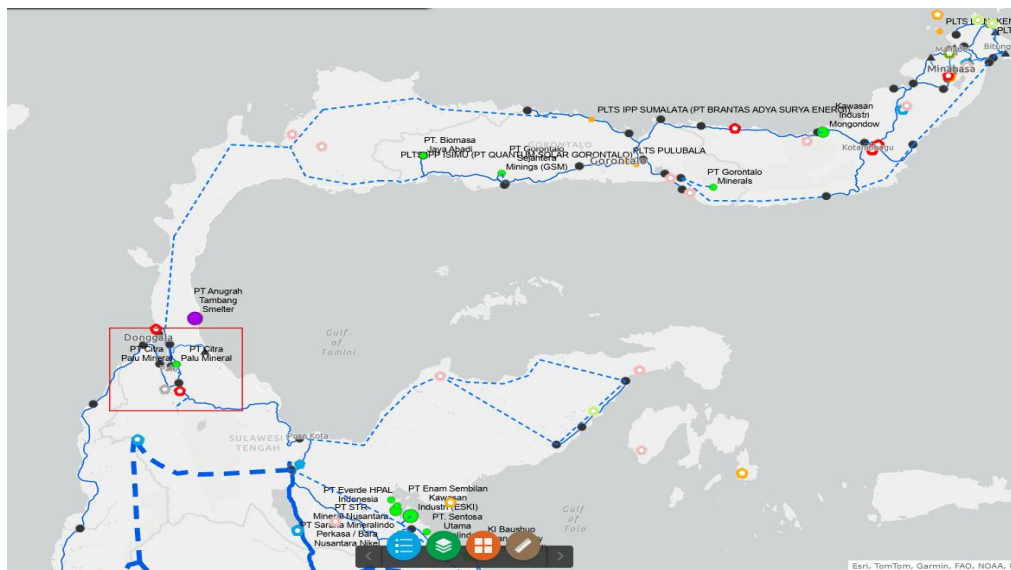
Tahap akhir dilakukan melalui analisis komparatif dengan membandingkan hasil teknis dan finansial alternatif Talise dan Tawaeli. Perbandingan teknis mencakup tegangan bus, pembebanan saluran dan transformator, arus hubung

singkat, stabilitas transien, serta hasil kontingensi N-1. Perbandingan finansial mencakup CAPEX, OPEX, NPV, IRR, BCR, dan PBP. Hasil kedua aspek tersebut digunakan untuk mengevaluasi perbedaan karakteristik, biaya, dan kinerja masing-masing alternatif sebagai dasar penentuan kelayakan penyambungan PT CPM.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambaran Umum Objek Penelitian

PT Citra Palu Minerals (CPM) merupakan perusahaan pertambangan emas yang beroperasi di wilayah Tondo, Kota Palu, Provinsi Sulawesi Tengah. Perusahaan ini mengelola Wilayah Izin Usaha Pertambangan Khusus (WIUPK) emas yang termasuk salah satu cadangan emas terbesar di Indonesia bagian timur. Seiring dengan peningkatan kapasitas produksi dan pengembangan fasilitas pengolahan mineral, kebutuhan energi listrik PT CPM diproyeksikan mencapai sekitar 30 MVA. Kebutuhan daya tersebut termasuk dalam kategori pelanggan Konsumen Tegangan Tinggi (KTT) sehingga memerlukan penyambungan langsung ke sistem transmisi PT PLN (Persero).



Gambar 3. Lokasi Tambang Emas CPM

Berdasarkan hasil Formulir Asesmen Confidence Level Calon Pelanggan KTT untuk PT Citra Palu Minerals (PT CPM) dengan kapasitas layanan 30 MVA, diperoleh total skor sebesar 49. Nilai tersebut menunjukkan bahwa tingkat keyakinan (confidence level) terhadap realisasi penyambungan pelanggan berada pada kategori rendah, sehingga proyek penyambungan harus ditingkatkan lagi sehingga dapat dijadikan dasar dalam perencanaan penyediaan infrastruktur kelistrikan.

Tabel 1. Rencana Kebutuhan & Pemakaian Energi PT CPM

Year	2025	2026						2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041
		Q1	Q2			Q3	Q4															
			Apr	May	June																	
	2025	Q1 2026	Apr-26	May-26	Jun-26	Q3 2026	Q4 2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041
MW Max / Tahun (MW)	10.7	11.1	11.1	11.1	15.5	16.2	16.1	16.7	17.5	17.7	18.0	18.2	18.3	18.5	18.6	18.0	17.3	13.9	16.4	14.8	13.7	14.1
MV Max / Tahun (MVA)	12.6	13.1	13.0	13.0	18.2	19.0	18.9	19.7	20.6	20.8	21.1	21.4	21.5	21.8	21.9	21.2	20.4	16.3	19.3	17.4	16.2	16.5
MVA Max (MVA)	12.59	13.06	13.02	13.04	18.23	19.00	18.89	19.68	20.56	20.82	21.14	21.38	21.53	21.80	21.86	21.19	20.36	16.34	19.32	17.44	16.17	16.54

Rencana Penyambungan PT CPM

Berdasarkan rencana, terdapat dua alternatif utama penyambungan yang dapat digunakan untuk melayani kebutuhan listrik PT Citra Palu Minerals, yaitu melalui Gardu Induk (GI) 150 kV Talise dan Gardu Induk (GI) 150 kV Tawaeli. Alternatif pertama menggunakan pembangunan SUTT 150 kV sepanjang ± 11 km, sedangkan alternatif kedua memerlukan pembangunan SUTT 150 kV sepanjang ± 44 km. Kedua alternatif tersebut sama-sama dirancang menggunakan konfigurasi double circuit (2 circuit) dengan konduktor ACSR 1 $\times$ 250 mm², sehingga memenuhi kebutuhan daya pelanggan sesuai standar pelayanan pelanggan Konsumen Tegangan Tinggi (KTT).

Tabel 2. Program Utama dan Biaya Investasi

No.	Program Utama	Biaya Investasi (Rp)	Keterangan
OPSI 1			
1	GI 150 kV Talise (Ext. 2 LB)	46.210.354.311	-
2	SUTT 150 kV Talise – Pelanggan PT CPM (2 cct, ACSR 1 $\times$ 250, 11 kms)	52.794.045.205	-
Grand Total		99.004.399.516	(Include PPN 12%)
OPSI 2			
1	GI 150 kV Tawaeli (Ext. 2 LB arah Pelanggan PT CPM)	43.046.914.311	-
2	SUTT 150 kV GI Tawaeli – GI Pelanggan PT CPM (2 cct, ACSR 1 $\times$ 250, 44 kms)	205.296.180.818	-
Grand Total		248.343.095.129	(Include PPN 12%)

Analisis Kelayakan Teknis

Dalam kajian ini, analisa aliran daya dilakukan pada 2 case yaitu kondisi sebelum dan sesudah penyambungan pelanggan KTT PT CPM 30 MVA ke Sistem Kelistrikan Sulbagesel.

Tabel 3. Rincian konfigurasi sistem mengacu pada RUPTL 2025-2034

No.	Check List Konfigurasi/ Perkembangan Sistem dari kondisi Eksisting	List keterangan	COD	Tahun Kajian 2027	Keterangan
1	Neraca Daya DRUPTL 2024-2033	Beban Sistem Sulbagsel		3391	Neraca Daya DRUPTL 2024-2033 R1
2	List Additional KTT PJBT	Antam 150 MVA Huadi 480 MVA Stargate 100 MVA ACN 200 MVA KTT Ceria 414 MVA	COD 2024 COD 2024 COD 2025 COD 2026 COD 2028	150 480 100 200 214	Sesuai KTT Reguler
3	Additional KTT	KTT CMP 30 MVA		30	KTT non Reguler
4	A. ON GOING & COMMITTED				
	1) PLN				
	Interkoneksi Sistem Luwuk	PLTMG 40 MW	COD 2024	✓	Interkoneksi Melalui SUTT Poso-Ampana
	MPP Sulselbar	PLTMG Kolaka #1 60 MW	COD 2024	✓	
	Palu #3	PLTMG Kolaka #2 60 MW	COD 2025	✓	
	MPP Paya Pasir dan Tarahan	PLTU 100 MW	COD 2024	✓	
	PLTD Sewa	Relokasi 100 MW (sewa)	COD 2024-2027	✗	Sudah tidak operasi di tahun 2027
		Relokasi 80 MW (sewa)	COD 2024-2027	✗	Sudah tidak operasi di tahun 2027
5	B. RENCANA TAMBAHAN				
	1) Dikembangkan Sendiri:				
	PLTM Lapai	PLTA Lapai 5 MW	COD 2027	✓	
	PLTM Riorita	PLTA Riorita 8 MW	COD 2027	✓	
	Tambahan Pembangkit Baru Cluster KTT:				
	ITC Kluster Huadi (Sewa)	PLTG/MG/GU/MPP Cluster Huadi (200 MW)	COD 2024-2030	✓	Sudah COD Injeksi GI Punagaya
	ITC Kluster Kemo (Sewa)	PLTG/MG/GU/MPP Cluster Kemo (200 MW)	COD 2025-2030	✓	Konek di Andowia
	ITC Kluster Poci (Sewa)	PLTG/MG/GU/MPP Cluster Poci (200 MW)	COD 2025-2030	✓	Disesuaikan dengan KKP sebelumnya (di Pomala)
	Permanen Kluster Poci	PLTG/MG/GU/MPP Cluster Poci (200 MW) (PERMANEN)	COD 2027	✓	Injeksi melalui Pomala SW sejak 2027
	Sulbagsel*	PLTG/MG/GU/MPP Sulbagsel 200 MW	COD 2025-2026	✗	Sudah tidak operasi di tahun 2027
		PLTG/MG/GU/MPP Sulbagsel 500 MW	COD 2026-2026 (1 thn)	✗	Sudah tidak operasi di tahun 2027
	Sulbagsel	OBC PLTGU Rantaeng (400 MW)	COD 2027	✓	
		OBC PLTGU Andowia (300 MW)	COD 2027	✓	
		OBC PLTGU Pomala (300 MW)	COD 2027	✓	
	PLTMG Baubau-2	PLTMG 15 MW	COD 2026	✓	
		PLTMG 15 MW	COD 2027	✓	
	2) Kerja Sama dengan IPP:				
	PLTB Sulbagsel (Kuota) Tersebar	PLTB 60 MW	COD 2026	✓	Diasumsikan tidak masuk DMP (COD 2027) Inject di Sidrap/leneponto
		PLTB 70 MW	COD 2027	✓	Diasumsikan tidak masuk DMP (COD 2027) Inject di Sidrap/leneponto
6	PROYEK TRANSMISI				
	SUTT 150 kV Bengo-Soppeng 74 kms		2025	✓	
	SUTT 150 kV Punagaya-Bantaeng switching 132 kms		2025	✓	
	SUTT 150kV Rantepao – Inc 1 phi Makale - Masamba 4 kms		2027	✓	
	SUTT 150 kV Pamona/Tentena - Kolonedale - Bungku		2024	✓	
	SUTT 150 kV Luwuk - PLTMG Luwuk - Toili		2024	✓	
	SUTT 150 kV KTT PT ACN – Bungku 76 kms		2025	✓	
	SUTT 150 kV Tambu - PLTU Palu-3 82 kms		2025	✓	
	SUTT 150 kV Poso - Ampana - Bunta - Luwuk		2025	✓	
	SUTT 150 kV Toili - Ampana 228 kms		2025	✓	
	SUTT 150 kV Mauro/Parigi - Inc Single Phi (Poso-Palu Baru) 78 kms		2027	✓	
	SUTT 150 kV Sigi - Inc 1 phi (Palu Baru - Poso)10 kms		2027	✓	
	SUTT 150 kV Polman-Mamasa 80 kms (2026)		2026	✓	
	SUTET Wotu-Bungku-Andowia-Kendari		COD 2026	✓	
	Konfigurasi IBT Pamona 2x250 MVA		2027	✓	
	Konfigurasi IBT Pamona 2 x 90 MVA		2027	✗	Standby

Pada simulasi penyambungan GI Pelanggan KTT CPM sebesar 30 MVA dengan Sistem Sulbagsel melalui pembangunan transmisi SUTT 150 kV Talise – KTT CPM menggunakan konduktor ACSR 1 x 250, setelah dilakukan maka berdasarkan RUPTL 2025-2034 diketahui beban puncak tahun 2027 menjadi sebesar 3.416 MW. Berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat loading transmisi dan IBT pada GI sekitar KTT masih normal. Tegangan di GI KTT CPM sebesar 151,1 kV, sedangkan tegangan pada gardu induk sekitar pelanggan KTT yaitu masing-masing GI Tawaeli 152,0 kV, GI Talise 151,3 kV, GI Silae 149,7 kV, GI PLTU Palu 3 153,4 kV, dan GI Poso 154,2 kV dimana nilai tegangan tersebut masih memenuhi grid code sehingga sistem masih dalam keadaan Normal.

Tabel 4. Hasil analisa aliran daya Sistem Sulbagsel masing-masing case

Segmen Load Flow	Satuan	Case KKO 2027			Keterangan
		KTT Citra Palu Mineral 30 MVA			
		Sebelum Case 1	Sesudah Case 2-1	Sesudah Case 2-2	
Level Tegangan Gardu Induk					
GITET 275 kV Pamona	kV	281.15	280.84	280.91	Normal
GI 150 kV Silae	kV	150.61	149.74	149.89	Normal
GI 150 kV Sidera	kV	151.25	150.37	150.53	Normal
GI 150 kV Sigi	kV	151.71	150.89	151.04	Normal
GI 150 kV Mauro/Parigi Baru	kV	153.11	152.47	152.59	Normal
GI 150 kV Poso	kV	154.70	154.23	154.33	Normal
GI 150 kV Talise	kV	152.41	151.29	151.50	Normal
GI 150 kV Tawaeli	kV	152.97	151.98	152.01	Normal
GI 150 kV PLTU Palu 3	kV	154.10	153.36	153.39	Normal
GI 150 kV Tambu	kV	154.06	153.33	153.36	Normal
GI 150 kV KTT CITRA PALU MINERAL	kV	-	151.07	151.17	Normal
GI 70 kV Talise	kV	70.70	70.15	70.25	Normal
GI 70 kV Parigi	kV	70.26	69.68	69.78	Normal
Pembebanan Transmisi					
TL 150 kV Poso - Sigi	%	35.20	35.70	35.80	Normal
TL 150 kV Poso - Mauro/Parigi Baru	%	28.10	28.40	28.50	Normal
TL 150 Kv Sidera- Sigi	%	31.40	31.90	32.00	Normal
TL 150 kV Mauro/Parigi Baru - Sigi	%	24.10	24.40	24.50	Normal
TL 150 kV Sidera - Silae 1	%	21.20	21.10	21.10	Normal
TL 150 kV Sidera - Silae 2	%	21.20	21.10	21.10	Normal
TL 150 kV Sidera - Talise 1	%	11.10	9.40	9.90	Normal
TL 150 kV Sidera - Talise 2	%	11.10	9.40	9.90	Normal
TL 150 kV Tawaeli - PLTU Palu 3 1	%	14.60	18.00	18.00	Normal
TL 150 kV Tawaeli - PLTU Palu 3 2	%	14.60	18.00	18.00	Normal
TL 150 kV Tawaeli - Talise 1	%	14.10	17.40	12.90	Normal
TL 150 kV Tawaeli - Talise 2	%	14.10	17.40	12.90	Normal
TL 150 kV Talise - KTT CPM 1	%	-	9.60	-	Normal
TL 150 kV Talise - KTT CPM 2	%	-	9.60	-	Normal
TL 150 kV Tawaeli - KTT CPM 1	%	-	-	9.50	Normal
TL 150 kV Tawaeli - KTT CPM 2	%	-	-	9.50	Normal
Pembebanan IBT					
Trafo IBT 275/150 250 MVA Pamona 1	%	51.0	51.4	51.5	N-1
Trafo IBT 275/150 250 MVA Pamona 2	%	51.0	51.4	51.5	N-1
Trafo IBT 150/70 30 MVA Talise 1	%	56.5	57.0	56.9	N-1
Trafo IBT 150/70 30 MVA Talise 2	%	56.5	57.0	56.9	N-1
Generation	MW	3,457	3,486	3,484	
Load	MW	3,391	3,417	3,417	
Losses	MW	66.12	67.03	67.19	
Losses	%	1.91%	1.92%	1.93%	

Secara umum pada kedua kondisi sebelum dan sesudah interkoneksi pelanggan KTT PT. Citra Palu Minerals yang disimulasikan, kondisi arus hubung singkat masing-masing GI masih dibawah standar peralatan sebesar 40 kA, sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan masuknya pelanggan KTT PT. Citra Palu Minerals 30 MVA, arus hubung singkat dalam kondisi LAYAK. Pada skenario 1, dari hasil simulasi transient ketika trip 1 line SUTT 150 kV Talise - KTT CPM, terlihat terjadi osilasi yang tidak signifikan pada frekuensi sistem Sulbagsel dan dapat kembali stabil pada 50,00 Hz.

Tabel 5. Kajian Teknis PT CPM 30MVA

Kajian Teknis PT CPM 30MVA				
Uraian	Sebelum Penyambungan CPM	Sesudah Penyambungan CPM		
		Aliran Daya	Hubung Singkat	Analisa Aliran Daya
GI 150 kV Talise Ext 2 Line Bay Arah Pelanggan	X	V	V	V
GI 150 kV Tawaeli Ext 2 Line Bay Arah Pelanggan	X	V	V	V
Total KTT CPM yang sudah COD (MVA)	0	30	30	30
BP Sistem Sulbagsel (MW)	3.391	3.416	3.416	3.416

Analisis Kelayakan Finansial

Analisis finansial mencerminkan tingkat pengembalian investasi yang diharapkan oleh pemilik suatu proyek. Perkiraan biaya investasi untuk penyambungan Pelanggan KTT PT Citra Palu Minerals 30 MVA mengacu berdasarkan surat dari Unit Induk Pembangunan dengan nomor surat 4057/TRS.01.03/F38000000/2024 tanggal 16 November 2024 perihal penyampaian update rincian biaya investasi penyambungan pelanggan PT Citra Palu Minerals.

Tabel 6. Perkiraan Biaya Proyek dan Sumber Pendanaan

NO	DESKRIPSI BIAYA	NILAI (Rupiah)	SUMBER PENDANAAN
1	GI 150 kV Talise (Extension) 2 LB arah pelanggan PT CPM	46.210.354.311,-	APLN
2	SUTT 150 kV GI Talise - GI Pelanggan PT CPM	52.794.045.205,-	APLN
	TOTAL	99.004.399.516,-	APLN
	GI 150 Kv Tawaeli (Extension) 2 LB arah pelanggan PT CPM	43.046.914.311,-	APLN
3	SUTT 150 Kv GI Tawaeli - GI Pelanggan PT CPM	205.296.180.818,-	APLN
	TOTAL	248.343.095.129,-	APLN

Setelah dibandingkan secara Life Cycle Cost (LCC) dari kedua opsi tersebut, maka didapatkan opsi 1 dan opsi 2 yang memenuhi untuk dilakukan kajian financial. Perhitungan revenue yang digunakan yaitu model pelanggan non subsidi atau model kompensasi dengan tarif PSA+7%.

Tabel 7. Analisis kelayakan Finansial (Opsi 1 dan 2)

PARAMETER	SATUAN	NILAI	
		OPSI 1	OPSI 2
Net Present Value (NPV)	IDR	38.349.001.000	(146.879.042)
Internal Rate of Return (IRR)	%	13,26%	-1,78%
Benefit Cost Ratio		1,01	0,95
Payback Period	Tahun	7,4 Tahun	#VALUE!

Penyambungan PT Citra Palu Mineral dengan perhitungan finansial skema revenue model pelanggan non subsidi atau revenue model kompensasi LAYAK dengan nilai NPV sebesar 38,34 Miliar dan IRR sebesar 13,26%, B/C ratio sebesar 1,01, PBP pada tahun ke 7 dengan BPP (PSA+7%) Rp 2.217 /kWh. Berdasarkan hasil analisis finansial didapatkan bahwa skema pelayanan dengan opsi 1 dinyatakan layak sedangkan opsi 2 dinyatakan tidak layak.

PT Citra Palu Minerals (CPM) merupakan perusahaan pertambangan emas yang beroperasi di wilayah Tondo, Kota Palu, Provinsi Sulawesi Tengah. Perusahaan ini mengelola Wilayah Izin Usaha Pertambangan Khusus (WIUPK) emas yang termasuk salah satu cadangan emas potensial di kawasan Indonesia bagian timur. Seiring dengan peningkatan kapasitas produksi dan pengembangan fasilitas pengolahan

mineral, kebutuhan energi listrik PT CPM diproyeksikan mencapai sekitar 30 MVA. Kebutuhan daya tersebut termasuk dalam kategori pelanggan Konsumen Tegangan Tinggi (KTT) sehingga memerlukan penyambungan langsung ke sistem transmisi PT PLN (Persero).

Peningkatan kebutuhan energi listrik pada sektor pertambangan merupakan konsekuensi dari meningkatnya penggunaan fasilitas pengolahan mineral, sistem pemompaan, ventilasi, penghancuran (*crushing*), dan proses ekstraksi yang membutuhkan suplai daya kontinu dengan kapasitas besar. Karakteristik beban industri pertambangan yang memiliki konsumsi energi tinggi menyebabkan aspek keandalan dan kualitas pasokan listrik menjadi faktor penting dalam perencanaan infrastruktur kelistrikan. Studi Mahandari et al. (2025) menunjukkan bahwa industri pertambangan emas memiliki intensitas penggunaan energi yang tinggi sehingga strategi pengelolaan energi menjadi salah satu faktor penting dalam keberlanjutan operasi pertambangan.

Dalam konteks elektrifikasi sektor pertambangan, peningkatan kapasitas sambungan listrik tidak hanya berkaitan dengan pemenuhan kebutuhan energi pelanggan, tetapi juga berpengaruh terhadap konfigurasi dan kemampuan sistem tenaga dalam menerima tambahan beban besar. Li et al. (2024) menjelaskan bahwa pengembangan elektrifikasi industri pertambangan membutuhkan kesiapan infrastruktur kelistrikan karena penambahan beban industri dapat memengaruhi kebutuhan investasi jaringan, fleksibilitas sistem, serta keandalan operasi. Oleh karena itu, integrasi pelanggan industri besar seperti PT CPM ke sistem interkoneksi perlu dievaluasi melalui pendekatan teknis dan ekonomi secara bersamaan.

Berdasarkan hasil Formulir Asesmen Confidence Level Calon Pelanggan KTT untuk PT Citra Palu Minerals (PT CPM) dengan kapasitas layanan 30 MVA, diperoleh total skor sebesar 49. Nilai tersebut menunjukkan bahwa tingkat keyakinan (*confidence level*) terhadap realisasi penyambungan pelanggan berada pada kategori rendah, sehingga proyek penyambungan perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut agar dapat menjadi dasar perencanaan penyediaan infrastruktur kelistrikan.

Tingkat kepastian realisasi pelanggan merupakan salah satu faktor penting dalam perencanaan ekspansi sistem tenaga karena pembangunan infrastruktur transmisi membutuhkan investasi awal yang besar dan memiliki umur operasi yang panjang. Dalam perencanaan jaringan tenaga listrik, ketidakpastian pertumbuhan beban dapat meningkatkan risiko ketidaksesuaian antara kapasitas infrastruktur yang dibangun dan kebutuhan aktual sistem. Pendekatan berbasis skenario dan analisis sensitivitas sering digunakan untuk mengevaluasi dampak ketidakpastian permintaan energi terhadap keputusan investasi infrastruktur listrik (Ragab, 2024).

Tabel 1. Rencana Kebutuhan & Pemakaian Energi PT CPM

Berdasarkan rencana kebutuhan energi tersebut, PT CPM direncanakan memperoleh suplai listrik melalui sistem transmisi 150 kV karena kapasitas daya yang dibutuhkan telah berada pada kategori pelanggan tegangan tinggi. Penyambungan pelanggan industri besar melalui jaringan transmisi memberikan keuntungan berupa kemampuan transfer daya yang lebih besar dengan rugi-rugi teknis yang lebih rendah dibandingkan penggunaan jaringan distribusi tegangan menengah. Namun demikian, integrasi beban baru pada sistem transmisi harus mempertimbangkan pengaruhnya terhadap profil tegangan, pembebanan saluran, kapasitas peralatan, dan stabilitas sistem secara keseluruhan (Tonini et al., 2022).

Dengan karakteristik kebutuhan daya sebesar 30 MVA, PT CPM dapat dikategorikan sebagai pelanggan dengan pengaruh signifikan terhadap sistem kelistrikan lokal. Penambahan beban dalam kapasitas besar pada sistem interkoneksi dapat menyebabkan perubahan pola aliran daya (*power flow*) dan distribusi pembebanan antar elemen jaringan. Oleh sebab itu, evaluasi alternatif titik sambung menjadi bagian penting dalam proses perencanaan sistem tenaga untuk memastikan bahwa kebutuhan pelanggan dapat dipenuhi tanpa menurunkan batas operasi sistem (Winarta & Rozzi, 2021).

Lokasi geografis pelanggan menjadi salah satu faktor utama yang menentukan alternatif penyambungan sistem tenaga. Perbedaan jarak antara lokasi pelanggan dengan sumber suplai akan berpengaruh terhadap panjang saluran transmisi, kebutuhan material, biaya konstruksi, rugi-rugi daya, serta karakteristik operasi jaringan. Dalam studi perencanaan ekspansi transmisi, pemilihan konfigurasi jaringan tidak hanya mempertimbangkan aspek teknis, tetapi juga harus memperhitungkan efisiensi investasi sepanjang umur aset (*life cycle cost*) (Ragab, 2024).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis teknis, kedua alternatif penyambungan PT Citra Palu Minerals (CPM) sebesar 30 MVA melalui GI 150 kV Talise dan GI 150 kV Tawaeli secara umum dapat melayani tambahan beban pada Sistem Sulbagsel. Hasil evaluasi profil tegangan, pembebanan saluran dan transformator, aliran daya, serta stabilitas sistem menunjukkan bahwa kedua alternatif dapat memenuhi kriteria operasi yang digunakan dalam penelitian. Namun, perbedaan panjang jaringan menghasilkan karakteristik teknis dan kebutuhan infrastruktur yang berbeda, sehingga kedua alternatif memiliki konsekuensi teknis dan investasi yang berbeda.

Dari aspek finansial, alternatif penyambungan melalui GI 150 kV Talise menunjukkan kelayakan investasi yang lebih baik dibandingkan GI 150 kV Tawaeli berdasarkan indikator NPV, IRR, BCR, dan PBP. Kebutuhan jaringan yang lebih pendek pada alternatif Talise berkontribusi terhadap kebutuhan investasi yang lebih rendah. Hasil sensitivitas juga menunjukkan bahwa perubahan biaya investasi, energi terjual, dan tarif atau skema kompensasi dapat memengaruhi tingkat kelayakan proyek. Oleh karena itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa alternatif Talise memberikan kombinasi kinerja teknis dan finansial yang lebih menguntungkan dalam skenario yang dianalisis.

Perbandingan konfigurasi menunjukkan bahwa single line memiliki kebutuhan investasi yang lebih rendah dan menghasilkan indikator finansial yang lebih baik dibandingkan double line. Namun, konfigurasi double line menyediakan jalur alternatif yang lebih baik dalam menghadapi gangguan atau pemeliharaan jaringan. Dengan mempertimbangkan hasil analisis teknis dan finansial secara bersamaan, konfigurasi double line pada alternatif GI Talise dapat dipertimbangkan sebagai pilihan penyambungan dengan kompromi antara kebutuhan investasi dan aspek keandalan jaringan. Kesimpulan ini dibatasi pada skenario dan asumsi yang digunakan dalam penelitian dan tidak dimaksudkan sebagai penilaian terhadap aspek ekonomi sosial atau dampak ekonomi daerah yang tidak dianalisis secara khusus.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, analisis menggunakan proyeksi kebutuhan beban PT CPM sehingga terdapat ketidakpastian terhadap perkembangan aktual demand dan waktu *Commercial Operation Date* (COD). Kedua, tingkat kepastian realisasi beban pelanggan dapat berbeda dari asumsi yang digunakan dalam proyeksi energi dan pendapatan. Ketiga, hasil analisis finansial sensitif terhadap asumsi tarif, biaya investasi, biaya operasi, dan energi terjual. Keempat, nilai CAPEX yang digunakan merupakan estimasi sehingga dapat berbeda dengan biaya aktual pada saat implementasi. Kelima, evaluasi keandalan dibatasi pada skenario kontingensi N-1 dan belum memasukkan probabilitas gangguan maupun indeks probabilistik seperti EENS atau LOLP.

Rekomendasi Penelitian Selanjutnya

Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan analisis dengan menggunakan proyeksi demand PT CPM yang diperbarui berdasarkan perkembangan aktual proyek dan kepastian COD. Analisis finansial juga dapat dikembangkan menggunakan rentang ketidakpastian CAPEX, tarif, energi terjual, dan biaya operasi untuk memperoleh gambaran risiko investasi yang lebih komprehensif. Selain itu, evaluasi keandalan dapat diperluas menggunakan pendekatan probabilistik dengan memasukkan probabilitas gangguan, EENS, LOLP, atau biaya gangguan (*reliability cost*). Penelitian berikutnya juga dapat memasukkan aspek ekonomi sosial dan dampak ekonomi wilayah apabila tersedia data yang memadai.

REFERENSI

- Awuah-Offei, K., & Adekpedjou, A. (2011). Application of life cycle assessment in the mining industry. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, 82–89. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0246-6>
- Beylot, A., Villeneuve, J., Bellenfant, G., & Eberle, P. (2019). Life cycle assessment of mining activities: A review of environmental impacts and energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 222, 815–826. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.003>
- Billinton, R., & Allan, R. N. (1996). *Reliability evaluation of power systems* (2nd ed.). Springer.
- Blank, L., & Tarquin, A. (2018). *Engineering economy* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Blumsack, S. (2006). Basic economics of power transmission. *Utilities Policy*, 14(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2005.09.002>
- Endrenyi, J. (1978). *Reliability modeling in electric power systems*. Wiley.
- Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (1994). *Power system analysis*. McGraw-Hill.
- Haque, N., & Norgate, T. (2014). Estimation of greenhouse gas emissions from ferroalloy production using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 68, 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.019>
- Hooli, J., & Halim, A. (2025). Battery electric vehicles in underground mines: Insights from industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 208, 115022.
- International Energy Agency. (2022). *World energy outlook 2022*. International Energy Agency.
- International Renewable Energy Agency. (2023). *Renewable power generation costs in 2022*. International Renewable Energy Agency.

- Jamasb, T., & Pollitt, M. (2008). Electricity sector liberalization and innovation: An analysis of the European electricity utilities. *International Journal of Industrial Organization*, 26(1), 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.ijindorg.2006.11.005>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2025). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT PLN (Persero) 2025–2034*. Jakarta: Kementerian ESDM.
- Kundur, P. (1994). *Power system stability and control*. McGraw-Hill.
- Li, X., Gu, Q., Wang, Q., Luo, J., Liu, D., & Chang, Y. (2024). Renewable energy in the mining industry: Status, opportunities and challenges. *Energy Strategy Reviews*, 56, 101597.
- Mahandari, C. P., Yamin, M., Palaloi, S., Hasan, M. S., & Kurniawan, C. (2025). Comprehensive assessment of the energy performance indicator of a gold mining industry in Indonesia. *Science and Technology: Developments and Applications*, 10.
- Newnan, D. G., Eschenbach, T. G., & Lavelle, J. P. (2017). *Engineering economic analysis* (14th ed.). Oxford University Press.
- Nkambule, M. S., et al. (2023). Performance and techno-economic analysis of optimal hybrid renewable energy systems for mining sector applications. *Sustainability*, 15(24), 16766. <https://doi.org/10.3390/su152416766>
- Nurliani, A. (2025). Techno-economic analysis of the transition from off-grid to on-grid electricity in the mining industry. *Journal of Management, Accounting and Economics*.
- Pamungkas, A., & Hajar, I. (2023). *Analisis aliran daya dan stabilitas transient evakuasi daya PLTMG 2×10 MW pada Sistem Pulau Seram*. Institut Teknologi PLN.
- Paradongan, H. T., et al. (2024). Techno-economic feasibility study of solar photovoltaic power plant in Indonesia. *Heliyon*.
- PT PLN (Persero). (2026). *Kondisi Sistem Kelistrikan Sulbagsel*. Jakarta: PT PLN (Persero).
- PT PLN (Persero) Direktorat Retail dan Niaga. (2025). *BA Demand Forecast*. Jakarta: PT PLN (Persero).
- Putra, A. Y., et al. (2020). Techno-economic analysis of remote microgrid and high-voltage interconnection for rural electrification.
- Ragab, A. E. (2024). Transmission expansion planning in a wind-dominated power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 155, 109611.
- Saadat, H. (2010). *Power system analysis* (3rd ed.). PSA Publishing.
- Short, W., Packey, D. J., & Holt, T. (1995). *A manual for the economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies*. National Renewable Energy Laboratory.
- Strazzabosco, A., Paterson, R. N. J., & Brooks, B. S. (2022). A review of renewable energy practices in the Australian mining industry. *Renewable Energy*.
- Tonini, L. G. R., Issicaba, D., & Coelho, J. (2022). Load flow and short-circuit methods for grids dominated by inverter-based distributed generators. *Energies*, 15(13), 4723. <https://doi.org/10.3390/en15134723>
- Winarta, F. P., & Rozzi, Y. A. (2021). Load flow analysis and short circuit faults with additional load in power systems. *Andalas University Electrical Engineering Journal*.