Jurnal: Elektrika Borneo (JEB)
Vol. 12, No. 2, Oktober 2026, hlm. 98-106 p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

ANALISIS SENSITIVITAS HARGA TANAH DALAM PEMILIHAN TOWER COMPACT LATTICE DAN TOWER STANDAR PADA KORIDOR SUTET 500 KV PERKOTAAN

Firmansyah Rizal[1], Aminullah Assagaf[2]

[12]*Institut Teknologi PLN, Jakarta Barat, DKI Jakarta, Indonesia*

[1]e-mail.firmansyah2410701@itpln.ac.id

Abstract*— The development of 500 kV Extra High Voltage Overhead Transmission Lines in urban areas is constrained by limited land availability and high land acquisition costs. This study evaluates the technical and financial feasibility of the 18.3 km Muara Tawar–Bekasi transmission corridor by comparing Compact Lattice Towers and conventional towers using technical, financial, and land-price sensitivity analyses. A corridor-based approach integrating technical performance, spatial requirements, land costs, and investment feasibility is adopted. Both tower designs satisfy technical requirements. Compared with conventional towers, Compact Lattice Towers reduce the right-of-way (ROW) width from 34 m to 28 m, decreasing land acquisition and ROW compensation costs by 54.00% and 17.20%, respectively, despite a 29.30% increase in construction cost. Both alternatives remain financially feasible, with B/C > 3.79, NPV > IDR 3.0 trillion, and IRR > 19,89 %. The economic break-even land price is approximately IDR 3.03 million/m², below which conventional towers are more economical, whereas Compact Lattice Towers are preferable above this threshold. The proposed approach provides a quantitative basis for tower selection in urban transmission corridors.

Keywords*—Compact Lattice Tower; land acquisition cost sensitivity; transmission corridor; transmission investment; 500 kV transmission line.

Intisari—Pembangunan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV di wilayah perkotaan menghadapi keterbatasan lahan dan tingginya biaya pembebasan lahan. Penelitian ini mengevaluasi kelayakan teknis dan finansial koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi sepanjang 18,3 km dengan membandingkan Tower Compact Lattice dan Tower Standar menggunakan analisis teknis, finansial, dan sensitivitas harga tanah. Penelitian menerapkan pendekatan berbasis koridor yang mengintegrasikan aspek teknis, kebutuhan ruang, biaya lahan, dan kelayakan investasi. Kedua alternatif memenuhi persyaratan teknis. Tower Compact Lattice mengurangi lebar *right-of-way* (ROW) dari 34 m menjadi 28 m, sehingga menurunkan biaya pembebasan lahan sebesar 54,00% dan biaya kompensasi ROW sebesar 17,20%, meskipun biaya konstruksi meningkat 29,30%. Kedua alternatif layak secara finansial dengan B/C > 3,79, NPV > Rp3,0 triliun, dan IRR > 19,89%. Titik keseimbangan ekonomi diperoleh pada harga tanah sekitar Rp3,03 juta/m²; di bawah nilai tersebut Tower Standar lebih ekonomis, sedangkan di atasnya Tower Compact Lattice lebih ekonomis. Pendekatan ini memberikan dasar kuantitatif dalam pemilihan desain tower pada koridor transmisi perkotaan.

***Kata kunci*—Tower Compact Lattice; investasi transmisi; koridor transmisi; sensitivitas biaya pembebasan lahan; SUTET 500 kV.**

I. PENDAHULUAN

Pengembangan jaringan transmisi tegangan ekstra tinggi merupakan aspek penting dalam meningkatkan keandalan, fleksibilitas, dan efisiensi sistem ketenagalistrikan. Sesuai RUPTL 2025–2034, jaringan transmisi 500 kV menjadi tulang punggung sistem interkoneksi nasional untuk mendukung pertumbuhan beban, integrasi energi baru terbarukan (EBT), dan pemenuhan kriteria keandalan N-1. Salah satu proyek strategis yang mendukung tujuan tersebut adalah Jalur Looping Jakarta, termasuk koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi yang berperan dalam meningkatkan kapasitas transfer daya dan keandalan sistem Jawa–Bali [1].

Meskipun memiliki peran strategis, pembangunan SUTET 500 kV di wilayah perkotaan menghadapi berbagai kendala, terutama keterbatasan lahan, tingginya harga tanah, dan kebutuhan right-of-way (ROW) yang besar. Kondisi tersebut menyebabkan biaya pembebasan lahan menjadi salah satu komponen utama dalam investasi proyek dan sering kali menjadi faktor pembatas dalam pengembangan infrastruktur transmisi. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, PT PLN (Persero) mengembangkan Tower Compact Lattice 500 kV yang memiliki dimensi struktur lebih ramping sehingga membutuhkan tapak tower dan ROW yang lebih kecil dibandingkan tower standar. Namun, penggunaan Tower Compact Lattice juga mengakibatkan basic span yang lebih pendek sehingga jumlah tower yang diperlukan menjadi lebih banyak. Kondisi ini menimbulkan trade-off antara peningkatan biaya konstruksi dan pengurangan biaya lahan akibat kebutuhan ruang yang lebih kecil [3], [11], [14], [15].

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas aspek teknis dan ekonomi pada pembangunan saluran transmisi. Fauzi dan Sidqi [3] mengevaluasi perubahan desain SUTET 500 kV dari tower standar menjadi Tower Compact Lattice dan menunjukkan bahwa desain compact lattice mampu mengurangi kebutuhan ruang tanpa mengurangi kemampuan penyaluran daya. Sementara itu, Nugraha et al. [1] menunjukkan pentingnya evaluasi biaya siklus hidup dalam penentuan alternatif pembangunan transmisi. Namun, penelitian-penelitian tersebut masih berfokus pada karakteristik teknis atau biaya pada tingkat unit tower dan belum mempertimbangkan pengaruh perbedaan basic span terhadap jumlah tower, kebutuhan lahan, kebutuhan ROW, dan struktur investasi pada tingkat koridor transmisi secara keseluruhan. Selain itu, pengaruh harga tanah terhadap

pemilihan desain tower juga masih belum banyak dievaluasi secara kuantitatif, khususnya pada koridor transmisi perkotaan yang memiliki keterbatasan ruang dan harga lahan yang tinggi [4], [5], [9], [16].

Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut melalui evaluasi teknis dan finansial pembangunan koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi dengan membandingkan Tower Compact Lattice dan tower standar. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini menggunakan pendekatan berbasis koridor transmisi yang mengintegrasikan karakteristik teknis, kebutuhan ruang, biaya pembebasan lahan, dan kinerja investasi dalam satu kerangka analisis. Evaluasi finansial dilakukan menggunakan indikator Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (B/C), dan Payback Period (PBP) [2], [8], [18], serta dilengkapi analisis sensitivitas harga tanah [4], [9], [16].

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka evaluasi yang menghubungkan perbedaan basic span, kebutuhan ruang, struktur biaya investasi, dan sensitivitas harga tanah pada tingkat koridor transmisi. Selain membandingkan kelayakan teknis dan finansial kedua alternatif tower, penelitian ini juga mengidentifikasi titik keseimbangan ekonomi yang memengaruhi pemilihan desain tower [4], [5]. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar kuantitatif dalam pengambilan keputusan investasi transmisi pada kawasan perkotaan dengan keterbatasan lahan dan harga tanah yang tinggi.

II. LANDASAN TEORI

A. Kemampuan Penyaluran Daya pada Sistem Transmisi Tiga Fasa

Kemampuan penyaluran daya menunjukkan kapasitas sistem transmisi dalam menyalurkan energi listrik dari pembangkit ke pusat beban. Pada sistem tenaga listrik tiga fasa, daya aktif yang dapat disalurkan dipengaruhi oleh tegangan sistem, arus penghantar, dan faktor daya. Besarnya daya aktif dapat dihitung menggunakan Persamaan (1) [15].

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \emptyset \tag{1}$$

dengan P adalah daya aktif (W), V adalah tegangan saluran (V), I adalah arus saluran (A), dan $\cos \emptyset$ adalah faktor daya. Persamaan (1) menunjukkan bahwa kapasitas penyaluran daya dipengaruhi oleh tegangan sistem, arus penghantar, dan faktor daya. Pada sistem interkoneksi, penggunaan transmisi tegangan ekstra tinggi diperlukan untuk menyalurkan daya dalam kapasitas besar secara efisien. Peningkatan level tegangan memungkinkan transfer daya yang lebih besar dengan arus yang lebih rendah, sehingga rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada saluran dapat diminimalkan serta keandalan operasi sistem tenaga listrik dapat ditingkatkan [11], [15].

B. Desain Tower Transmisi dan Kelayakan Teknis

Tower transmisi merupakan struktur penyangga konduktor yang dirancang untuk memenuhi persyaratan keselamatan dan keandalan sistem tenaga listrik [11], [14], [15]. Karakteristik desain tower memengaruhi beberapa parameter teknis saluran, seperti kapasitas penyaluran daya, *electrical clearance*, *ground clearance*, kebutuhan *right of way* (ROW), serta tingkat paparan medan listrik dan medan magnet.

Electrical clearance dan *ground clearance* digunakan untuk memastikan terpenuhinya jarak aman penghantar terhadap objek di sekitarnya dan permukaan tanah sesuai standar keselamatan yang berlaku [14], [15]. Selain itu, kebutuhan ROW berpengaruh terhadap ruang koridor transmisi dan kebutuhan lahan, sedangkan medan listrik dan medan magnet digunakan untuk mengevaluasi tingkat paparan elektromagnetik di sekitar saluran transmisi [6], [7], [10], [13].

C. Indikator Kelayakan Finansial

Evaluasi kelayakan investasi dilakukan menggunakan indikator Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit-Cost Ratio (B/C), dan Payback Period (PBP) [2], [8], [18]. NPV digunakan untuk mengukur nilai tambah ekonomi proyek berdasarkan selisih antara nilai kini manfaat dan biaya, sedangkan IRR menunjukkan tingkat pengembalian investasi yang diperoleh pada kondisi NPV sama dengan nol. B/C Ratio menggambarkan rasio antara manfaat dan biaya yang telah didiskontokan, sementara PBP menunjukkan waktu yang diperlukan untuk memulihkan investasi awal. Proyek dinyatakan layak apabila memiliki NPV positif, IRR yang lebih tinggi daripada tingkat diskonto, B/C Ratio lebih besar dari satu, serta PBP yang lebih pendek dari umur ekonomis proyek [18].

$$NPV = \sum_{t=0}^{N} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \tag{2}$$

$$\sum_{t=0}^{N} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} = 0 \tag{3}$$

$$B/C\ Ratio = \frac{Present\ Worth\ of\ Benefits}{Present\ Worth\ of\ Costs} \tag{4}$$

$$Payback\ Period = \text{Jumlah tahun sebelum pelunasan penuh} + \frac{Biaya\ yang\ belum\ dilunasi\ pada\ awal\ tahun}{Arus\ kas\ sepanjang\ tahun\ pelunasan\ penuh} \tag{5}$$

CF_t adalah arus kas (*cash flow*) pada tahun ke-t, r adalah tingkat diskonto (*discount rate*), t adalah tahun ke-t selama umur proyek dan N adalah umur proyek.

Dalam penelitian ini, evaluasi kelayakan finansial dilakukan menggunakan pendekatan discounted cash flow (DCF) selama umur ekonomis aset transmisi 40 tahun. Arus kas tahunan dihitung dengan menggunakan tingkat diskonto (discount rate) sebesar 6,19%. Biaya operasi dan pemeliharaan meliputi biaya pemeliharaan, kepegawaian, dan administrasi dengan asumsi eskalasi sebesar 2,8% per tahun. Sementara itu, manfaat proyek diperoleh dari pendapatan jasa penyaluran energi listrik, yang dihitung berdasarkan energi tersalur tahun pertama sebesar 3.714,24 GWh, pertumbuhan beban tahunan sebesar 3,64%, dan tarif penyaluran sebesar Rp55/kWh.

D. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas digunakan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan suatu variabel terhadap kinerja investasi proyek. Metode ini membantu mengidentifikasi variabel yang paling berpengaruh terhadap indikator kelayakan finansial serta menilai ketahanan proyek terhadap kondisi yang tidak pasti [4], [5], [9], [16].

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif komparatif untuk mengevaluasi kelayakan teknis dan finansial dua alternatif desain tower pada koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi, yaitu Tower Standar dan Compact Lattice Tower. Evaluasi dilakukan untuk menganalisis pengaruh perbedaan karakteristik geometris kedua desain tower terhadap kemampuan penyaluran daya, kebutuhan ruang, biaya investasi, dan kelayakan finansial proyek.

Data penelitian merupakan data sekunder yang diperoleh dari PT PLN (Persero), meliputi Kajian Kelayakan Proyek (KKP) SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi Tahun 2018, dokumen desain Tower Standar dan Compact Lattice Tower, dokumen kontrak proyek SUTET 500 kV Tahun 2019, Standar PLN (SPLN), serta data Zona Nilai Tanah (ZNT) dari Kementerian ATR/BPN. Data tersebut mencakup parameter teknis, karakteristik tower, kebutuhan lahan, harga tanah, dan biaya investasi. Seluruh data diverifikasi melalui pemeriksaan konsistensi antar dokumen sebelum digunakan dalam analisis.

A. Metode Analisis Teknis

Analisis kelayakan teknis dilakukan dengan membandingkan kinerja Tower Standar dan Compact Lattice Tower pada koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi menggunakan parameter operasi yang identik, sehingga perbedaan hasil analisis hanya dipengaruhi oleh karakteristik geometris masing-masing desain tower. Evaluasi meliputi kapasitas arus, kapasitas daya aktif, electrical clearance, minimum approach distance (MAD), ground clearance, kebutuhan right-of-way (ROW), medan listrik, dan medan magnet. Analisis dilakukan pada sistem transmisi 500 kV dengan frekuensi 50 Hz, konfigurasi double circuit, menggunakan konduktor 450-A1/SA1A-54/7 dengan konfigurasi quad bundle, faktor daya 0,90, serta kondisi pembebanan maksimum (maximum loading) dan lendutan konduktor maksimum (maximum sag).

Perbedaan karakteristik geometris kedua alternatif tower menyebabkan perbedaan jumlah tower, kebutuhan lahan tapak (tower footprint), dan kebutuhan right-of-way (ROW), yang selanjutnya memengaruhi biaya investasi. Jumlah tower ditentukan berdasarkan panjang koridor transmisi sebesar 18,3 km dan basic span masing-masing alternatif menggunakan Persamaan (1).

$$N = {}^{L}/_{S} \qquad (6)$$

di mana N adalah jumlah tower, L adalah panjang koridor transmisi, dan S adalah basic span. Dengan basic span sebesar 320 m untuk Compact Lattice Tower dan 450 m untuk Tower Standar, diperoleh kebutuhan masing-masing sebanyak 58 unit dan 41 unit. Perhitungan ini merupakan estimasi pada tingkat perencanaan dengan asumsi panjang trase tetap dan basic span konstan, sehingga belum mempertimbangkan penyesuaian lokasi tower akibat perubahan arah trase, kondisi topografi, maupun kendala lapangan yang umumnya ditetapkan pada tahap Detail Engineering Design (DED). Distribusi jenis tower selanjutnya ditentukan menggunakan metode *weighted average* berdasarkan komposisi jenis tower pada dokumen desain proyek SUTET 500 kV Looping Jakarta, yang mencakup koridor Muara Tawar–Bekasi. Pada kedua alternatif, jumlah tower tension tipe FF ditetapkan tetap sebanyak dua unit sebagai tower terminal, sedangkan sisa tower didistribusikan ke dalam tower suspension tipe AA serta tower tension tipe BB, CC, DD, dan EE berdasarkan proporsi rata-rata masing-masing sebesar 56%, 18%, 14%, 4%, dan 5%. Distribusi tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan kebutuhan lahan tapak, kebutuhan material, dan estimasi biaya investasi pada masing-masing alternatif.

Kapasitas arus dihitung berdasarkan kemampuan hantar arus konduktor sesuai spesifikasi desain, sedangkan kapasitas daya aktif dihitung menggunakan parameter operasi sistem tiga fasa. Selanjutnya, electrical clearance, minimum approach distance (MAD), ground clearance, kebutuhan right-of-way (ROW), medan listrik, dan medan magnet dihitung berdasarkan konfigurasi geometris masing-masing tower sesuai dokumen desain dan standar yang berlaku. Hasil perhitungan setiap parameter kemudian dibandingkan dengan kriteria evaluasi sebagaimana disajikan pada Tabel I.

Tabel I
Kriteria Evaluasi Teknis

Parameter	Kriteria Evaluasi	Acuan
Kapasitas arus	≥ 2.292 A	KKP SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi
Kapasitas daya aktif	≥ 1.786 MW	KKP SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi
Electrical Clearance	≥ 3,10 m	IEC 61936-1
Minimum Approach Distance (MAD)	≥ 3,4708 m	IEC 61472:2013
Ground Clearance	≥ 12,50 m	Permen ESDM No. 13 Tahun 2025
ROW horizontal	14 m (Compact Lattice Tower); 17 m (Tower Standar)	Permen ESDM No. 13 Tahun 2025
Medan listrik maksimum	≤ 10 kV/m	Permen ESDM No. 13 Tahun 2025
Medan magnet maksimum	≤ 1.000 μT	Permen ESDM No. 13 Tahun 2025

Suatu alternatif dinyatakan memenuhi persyaratan teknis apabila seluruh parameter hasil analisis memenuhi kriteria evaluasi yang ditetapkan dalam standar dan regulasi tersebut.

B. Model Analisis Finansial

Evaluasi kelayakan finansial dilakukan menggunakan metode Discounted Cash Flow (DCF) untuk menghitung Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (B/C), dan Payback Period (PBP). Model arus kas disusun berdasarkan investasi awal (capital expenditure), biaya operasi dan pemeliharaan (operation and maintenance), serta manfaat tahunan yang diperoleh dari jasa penyaluran energi listrik selama umur ekonomis proyek. Investasi dimodelkan menggunakan skema disbursement, sedangkan manfaat dan biaya operasi dihitung setiap tahun hingga akhir umur proyek. Seluruh parameter yang digunakan dalam model finansial ditunjukkan pada Tabel II.

Tabel II
Asumsi Dasar Analisis Finansial

Parameter	Nilai
Tahun dasar biaya	2025
Umur ekonomis proyek	40 tahun
Tingkat diskonto	6,19%
Daya saluran	530 MW
Faktor daya	0,9
Faktor utilisasi saluran	80%
Energi tersalur tahun pertama	3.714,24 GWh
Pertumbuhan beban	3,64% per tahun
Tarif jasa penyaluran	Rp55/kWh
Biaya O&M tahun pertama	Rp22,99 miliar
Eskalasi O&M	2,8% per tahun
Skema *disbursement*	20% (Year 0); 24% (Year 1); 48% (COD) (Year 3); 8% (Year 4)
Dasar arus kas	Pre-tax cash flow
Nilai sisa aset	0

Energi listrik yang disalurkan pada tahun ke-t dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$E_t = P \times 8760 \times LF \times (1+g)^{t-1} \quad (7)$$

dengan E_t adalah energi listrik yang disalurkan pada tahun ke-t (kWh), P adalah daya saluran (kW), LF adalah faktor utilisasi saluran, dan g adalah pertumbuhan beban tahunan.

Manfaat tahunan dihitung berdasarkan energi listrik yang disalurkan dan tarif jasa penyaluran sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$Benefit_t = E_t \times T \quad (8)$$

dengan $Benefit_t$ adalah manfaat pada tahun ke-t, sedangkan T adalah tarif jasa penyaluran (Rp/kWh).

Biaya operasi dan pemeliharaan dihitung menggunakan persamaan berikur.

$$O\&M_t = O\&M_0(1+i)^{t-1} \quad (9)$$

dengan $O\&M_t$ adalah biaya operasi dan pemeliharaan pada tahun ke-t, $O\&M_0$ adalah biaya operasi dan pemeliharaan tahun pertama, dan i adalah tingkat eskalasi biaya operasi tahunan.

C. Model Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan menggunakan one-way sensitivity analysis untuk mengevaluasi pengaruh perubahan harga tanah terhadap kelayakan finansial Tower Standar dan Tower Compact Lattice. Harga tanah dipilih sebagai variabel sensitivitas karena merupakan komponen biaya yang paling membedakan kedua alternatif melalui biaya pembebasan lahan tapak tower dan kompensasi right-of-way (ROW), sedangkan parameter teknis dan finansial lainnya dipertahankan konstan. Analisis dilakukan pada rentang harga tanah Rp1–6 juta/m² dengan menghitung kembali indikator Benefit Cost Ratio (B/C), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period (PBP) pada setiap skenario.

Untuk menentukan batas perubahan keunggulan ekonomi kedua alternatif, dilakukan analisis titik keseimbangan (*equilibrium point*) menggunakan interpolasi linier berdasarkan dua skenario harga tanah yang mengapit perubahan nilai NPV. Hubungan antara harga tanah dan NPV dinyatakan sebagai

$$NPV = a + bH \quad (10)$$

dengan NPV adalah *Net Present Value* (Rp), H adalah harga tanah (Rp/m²), a adalah konstanta, dan $b$adalah gradien persamaan linier yang dihitung menggunakan

$$b = \frac{NPV_2 - NPV_1}{H_2 - H_1} \quad (11)$$

sedangkan konstanta diperoleh dari

$$a = NPV_1 - bH_1 \quad (12)$$

Titik keseimbangan diperoleh ketika kedua alternatif menghasilkan nilai NPV yang sama,

$$NPV_{Compact} = NPV_{Standar} \quad (13)$$

sehingga harga tanah pada titik keseimbangan dihitung dengan

$$H = \frac{a_s - a_c}{b_c - b_s} \quad (14)$$

Nilai H menunjukkan harga tanah ketika kedua alternatif memiliki kelayakan finansial yang setara.

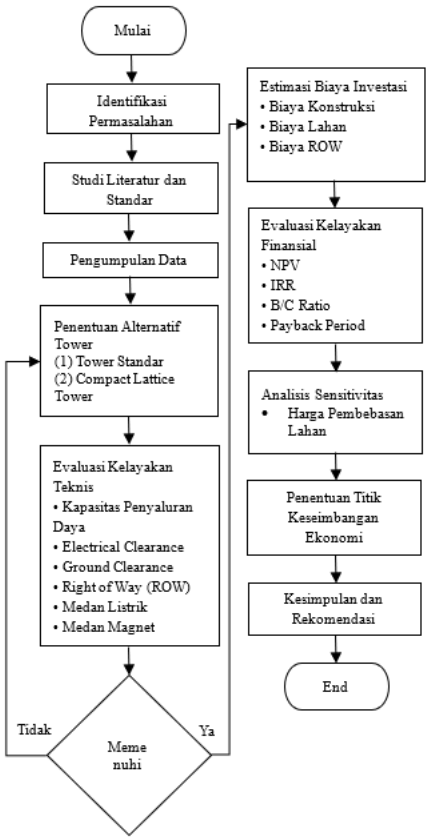
D. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian disusun secara sistematis untuk mengevaluasi kelayakan teknis dan finansial dua alternatif desain tower, yaitu Tower Standar dan Tower Compact Lattice. Alur penelitian yang digunakan dalam studi ini ditunjukkan pada Gambar 1.

Penelitian diawali dengan identifikasi permasalahan, studi literatur, serta pengumpulan data teknis dan finansial yang diperlukan. Berdasarkan data tersebut, ditetapkan dua alternatif desain tower yang menjadi objek analisis, yaitu Tower Standar dan Tower Compact Lattice. Selanjutnya, kedua alternatif dievaluasi berdasarkan aspek teknis yang meliputi kapasitas penyaluran daya, electrical clearance, ground clearance, kebutuhan right of way (ROW), serta

karakteristik medan listrik dan medan magnet untuk memastikan kesesuaiannya dengan persyaratan teknis yang berlaku.

Alternatif yang memenuhi seluruh persyaratan teknis kemudian dievaluasi dari aspek ekonomi melalui penyusunan estimasi biaya investasi yang mencakup biaya konstruksi, biaya pembebasan lahan tapak tower, dan biaya kompensasi right of way (ROW). Berdasarkan komponen biaya tersebut, disusun model arus kas menggunakan parameter finansial pada Tabel I sebagai dasar perhitungan indikator kelayakan investasi, yaitu Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (B/C), dan Payback Period (PBP).



Gambar 1. Alur Penelitian

Harga tanah dipilih sebagai variabel sensitivitas karena merupakan komponen biaya yang paling membedakan struktur investasi Tower Standar dan Tower Compact Lattice, sedangkan parameter teknis dan finansial lainnya dipertahankan tetap. Hasil analisis sensitivitas selanjutnya digunakan untuk menentukan titik keseimbangan ekonomi (*equilibrium point*), yaitu harga tanah ketika kedua alternatif menghasilkan nilai *Net Present Value* (NPV) yang sama. Hasil dari seluruh tahapan analisis menjadi dasar dalam menentukan alternatif desain tower yang paling layak secara teknis dan finansial untuk pembangunan koridor SUTET 500 kV di kawasan perkotaan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini membandingkan Tower Standar dan Tower Compact Lattice pada koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi sepanjang 18,3 km berdasarkan parameter teknis dan finansial yang telah ditetapkan pada Bab III. Evaluasi dilakukan untuk mengidentifikasi pengaruh perbedaan karakteristik kedua desain terhadap kebutuhan ruang, biaya investasi, kelayakan finansial, serta sensitivitas harga tanah pada pembangunan koridor transmisi.

Hasil analisis disajikan secara bertahap, diawali dengan evaluasi karakteristik teknis yang memengaruhi jumlah tower, kebutuhan tapak, dan lebar right-of-way (ROW). Selanjutnya dilakukan analisis biaya investasi, evaluasi kelayakan finansial menggunakan indikator Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (B/C), dan Payback Period (PBP), serta analisis sensitivitas harga tanah untuk mengevaluasi pengaruh perubahan biaya pembebasan lahan terhadap kinerja investasi kedua alternatif desain.

A. Kelayakan Teknis

Hasil evaluasi teknis kedua alternatif tower ditunjukkan pada Tabel III. Berdasarkan hasil evaluasi, Tower Standar dan Tower Compact Lattice sama-sama memenuhi seluruh persyaratan teknis yang berlaku untuk saluran transmisi 500 kV sehingga keduanya layak diterapkan pada koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi. Kedua alternatif memiliki kapasitas arus sebesar 3.497 A dan kapasitas daya aktif sebesar 2.726 MW, yang berada di atas kebutuhan sistem masing-masing sebesar 2.292 A dan 1.786 MW. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kedua desain memiliki kapasitas yang memadai untuk mendukung penyaluran daya pada koridor transmisi tanpa mengalami keterbatasan dari sisi kemampuan penghantar.

Tabel III
Hasil Evaluasi Kelayakan Teknis

Parameter	Tower Compact Lattice	Tower Standar	Kriteria
Kapasitas Arus	3.497 A	3.497 A	Memenuhi
Kapasitas Daya Aktif	2.726 MW	2.726 MW	Memenuhi
Electrical Clearance	3,5 m	4,4 m	Memenuhi
Minimum Approach Distance	3,5 m	4,4 m	Memenuhi
Ground Clearance	17,88 m	16,745 m	Memenuhi
Margin Ground Clearance	5,38 m	4,245 m	Memenuhi
ROW Horizontal	14,00 m	17,0 m	Memenuhi
Medan Listrik Maksimum	7,10 kV/m	7,51 kV/m	Memenuhi
Medan Magnet Maksimum	32,36 μT	34,62 μT	Memenuhi

Perbedaan utama kedua alternatif terletak pada karakteristik geometris struktur tower. Tower Standar memiliki electrical clearance dan minimum approach distance yang lebih besar dibandingkan Tower Compact Lattice sehingga memberikan margin keselamatan listrik yang lebih tinggi. Namun demikian, seluruh parameter

pada Tower Compact Lattice tetap memenuhi batas minimum yang dipersyaratkan, sehingga kedua alternatif memiliki tingkat kelayakan operasi yang setara.

Sebaliknya, Tower Compact Lattice menunjukkan keunggulan pada aspek efisiensi ruang. Konfigurasi struktur yang lebih kompak menghasilkan ground clearance yang lebih tinggi serta mengurangi kebutuhan right-of-way (ROW) horizontal dari 17 m menjadi 14 m (atau dari 34 m menjadi 28 m untuk konfigurasi dua sirkit). Pengurangan ROW tersebut menjadi keunggulan pada pembangunan saluran transmisi di kawasan perkotaan karena dapat mengurangi kebutuhan ruang koridor dan potensi pembebasan lahan. Hasil ini sejalan dengan penelitian Fauzi dan Sidqi [3] yang menunjukkan bahwa Tower Compact Lattice mampu mengurangi kebutuhan ruang koridor transmisi dibandingkan tower standar. Selain itu, Tower Compact Lattice menghasilkan medan listrik maksimum sebesar 7,10 kV/m dan medan magnet maksimum sebesar 32,36 μT, lebih rendah dibandingkan Tower Standar (7,51 kV/m dan 34,62 μT), meskipun seluruh nilai masih berada jauh di bawah batas yang dipersyaratkan.

Perbedaan karakteristik geometris tersebut juga memengaruhi konfigurasi koridor transmisi. Tower Compact Lattice memiliki *basic span* sebesar 320 m, sedangkan Tower Standar memiliki *basic span* sebesar 450 m, sehingga untuk panjang koridor yang sama diperlukan jumlah tower yang lebih banyak pada Tower Compact Lattice. Dengan demikian, Tower Compact Lattice menawarkan efisiensi penggunaan ruang yang lebih baik, sedangkan Tower Standar lebih efisien dari sisi jumlah tower yang dibutuhkan.

Secara keseluruhan, kedua alternatif memiliki tingkat kelayakan teknis yang setara karena seluruh parameter memenuhi persyaratan desain saluran transmisi 500 kV. Perbedaan utama keduanya bukan terletak pada kemampuan penyaluran daya, melainkan pada karakteristik geometris yang memengaruhi kebutuhan ROW dan jumlah tower. Karakteristik tersebut selanjutnya menjadi dasar dalam analisis biaya investasi dan kelayakan finansial pada subbab berikutnya.

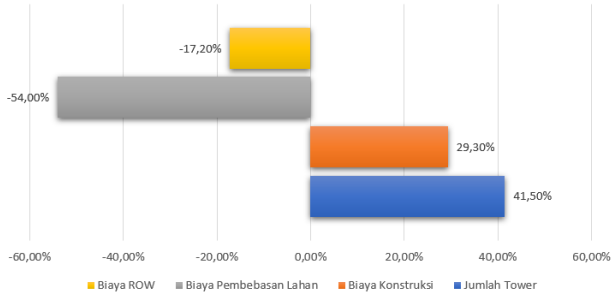
B. Biaya Investasi

Perbedaan biaya investasi antara Tower Compact Lattice dan Tower Standar dipengaruhi oleh jumlah tower, kebutuhan lahan tapak tower, dan kebutuhan *right-of-way* (ROW) pada koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi sepanjang 18,3 km. Dengan *basic span* sebesar 320 m, Tower Compact Lattice membutuhkan 58 unit tower, lebih banyak dibandingkan Tower Standar yang membutuhkan 41 unit dengan *basic span* sebesar 450 m. Namun, Tower Compact Lattice memiliki kebutuhan ROW yang lebih kecil, yaitu 28 m (14 m per sisi) dibandingkan 34 m (17 m per sisi) pada Tower Standar, serta dimensi tapak tower yang lebih kecil, yaitu 15 × 15 m hingga 20 × 20 m dibandingkan 25 × 25 m hingga 42 × 42 m pada Tower Standar.

Perbedaan karakteristik tersebut menghasilkan struktur biaya investasi yang berbeda. Basic span yang lebih pendek pada Tower Compact Lattice meningkatkan jumlah tower sebesar 41,50 %, sehingga kebutuhan fondasi, pekerjaan sipil, material struktur, dan pekerjaan erection juga meningkat. Akumulasi komponen tersebut menyebabkan biaya konstruksi Tower Compact Lattice menjadi 29,30% lebih tinggi dibandingkan Tower Standar. Sebaliknya, dimensi tapak tower yang lebih kecil dan kebutuhan ROW yang lebih sempit mengurangi total luas tapak tower sebesar 53,14% dan luas ROW sebesar 17,65%, sehingga biaya pembebasan lahan berkurang sebesar 54,0% dan biaya ROW berkurang sebesar 17,20% dibandingkan Tower Standar.

Tabel IV
Perbandingan Kebutuhan Infrastruktur, Lahan, dan Biaya

Parameter	Tower Compact Lattice	Tower Standar	Selisih
Jumlah Tower	58 unit	41 unit	41,50%
Total Luas Tapak Tower	14.945 m²	31.892 m²	-53,14%
Total Luasan ROW	512.400 m²	622.200 m²	-17,65%
Biaya Konstruksi	Rp400 Miliar	Rp309 Miliar	29,30%
Biaya Pembebasan Lahan	Rp36 Miliar	Rp79 Miliar	-54,00%
Biaya ROW	Rp189 Miliar	Rp229 Miliar	-17,20%



Gambar 2. Persentase perubahan komponen investasi dibandingkan tower standar.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa struktur biaya kedua alternatif ditentukan oleh *trade-off* antara biaya konstruksi dan biaya pengadaan lahan. Tower Compact Lattice memerlukan biaya konstruksi yang lebih tinggi akibat bertambahnya jumlah tower, namun mampu menekan biaya pengadaan lahan melalui pengurangan luas tapak tower dan ROW. Sebaliknya, Tower Standar memiliki biaya konstruksi yang lebih rendah, tetapi membutuhkan biaya lahan yang lebih besar akibat dimensi tapak dan ROW yang lebih lebar. Dengan demikian, keunggulan finansial masing-masing alternatif bergantung pada besarnya kontribusi kedua komponen biaya tersebut terhadap total investasi. Oleh karena itu, analisis sensitivitas harga tanah dilakukan untuk mengevaluasi perubahan kinerja finansial kedua alternatif serta mengidentifikasi nilai harga tanah ambang (*break-even point*) ketika preferensi investasi beralih dari Tower Standar ke Tower Compact Lattice.

C. Kelayakan Finansial

Hasil evaluasi kelayakan finansial ditunjukkan pada Tabel V. Seluruh indikator menunjukkan bahwa Tower Compact Lattice dan Tower Standar memenuhi kriteria kelayakan investasi. Kedua alternatif memiliki nilai

Benefit Cost Ratio (B/C) lebih besar dari satu, Net Present Value (NPV) bernilai positif, Internal Rate of Return (IRR) lebih tinggi daripada tingkat diskonto, serta Payback Period (PBP) yang masih berada dalam umur ekonomis proyek. Dengan demikian, kedua alternatif layak diterapkan pada koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi.

Tabel V
Hasil Evaluasi Kelayakan Finansial

Parameter	Tower Compact Lattice	Tower Standar	Selisih
Benefit Cost Ratio (B/C)	3,79	3,85	-1,58%
Net Present Value (NPV)	Rp 3.064 miliar	Rp 3.081 miliar	-0,55%
Internal Rate of Return (IRR)	19,89%	20,16%	-1,35%
Payback Period (PBP)	8 Tahun 4 Bulan	8 Tahun 3 Bulan	+ 1 Bulan

Meskipun demikian, Tower Standar menunjukkan kinerja finansial yang sedikit lebih baik dibandingkan Tower Compact Lattice. Nilai B/C Tower Standar sebesar 3,85, lebih tinggi 1,58% dibandingkan Tower Compact Lattice (3,79). Nilai NPV Tower Standar mencapai Rp3.081 miliar, lebih tinggi 0,55% dibandingkan Tower Compact Lattice sebesar Rp3.064 miliar. Demikian pula, IRR Tower Standar sebesar 20,16%, lebih tinggi 1,35% dibandingkan Tower Compact Lattice (19,89%), sedangkan PBP Tower Standar lebih cepat 1 bulan, yaitu 8 tahun 3 bulan, dibandingkan 8 tahun 4 bulan pada Tower Compact Lattice.

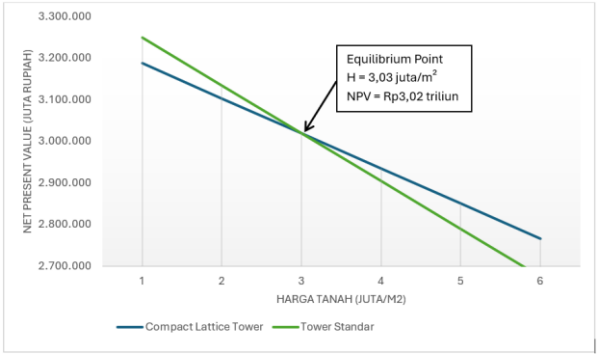
Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan biaya konstruksi akibat bertambahnya jumlah tower pada Tower Compact Lattice belum sepenuhnya dapat diimbangi oleh penghematan biaya pembebasan lahan dan biaya ROW pada kondisi dasar analisis. Meskipun demikian, selisih seluruh indikator finansial relatif kecil, yaitu kurang dari 2%, sehingga kedua alternatif masih memiliki tingkat kelayakan investasi yang hampir setara.

Hasil ini juga menunjukkan bahwa evaluasi pada kondisi dasar belum cukup untuk menentukan alternatif yang paling ekonomis karena kinerja finansial kedua desain dipengaruhi oleh struktur biaya investasi yang berbeda. Oleh karena itu, analisis sensitivitas harga tanah dilakukan untuk mengevaluasi perubahan kinerja finansial kedua alternatif terhadap variasi harga tanah serta mengidentifikasi nilai harga tanah ambang (break-even point) ketika preferensi investasi beralih dari Tower Standar ke Tower Compact Lattice.

D. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan harga tanah terhadap kelayakan finansial Tower Compact Lattice dan Tower Standar menggunakan indikator Benefit Cost Ratio (B/C), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period (PBP). Harga tanah dipilih sebagai variabel sensitivitas karena merupakan komponen biaya yang membedakan kebutuhan investasi kedua alternatif melalui biaya pembebasan lahan tapak tower dan kompensasi right-of-way (ROW), sedangkan parameter teknis dan finansial lainnya dipertahankan konstan. Hasil analisis disajikan pada Tabel VI.

Hasil analisis menunjukkan bahwa kenaikan harga tanah menurunkan kelayakan finansial kedua alternatif yang ditunjukkan oleh penurunan nilai B/C, NPV, dan IRR serta peningkatan PBP. Pada rentang harga tanah Rp1–6 juta/m², NPV Tower Compact Lattice menurun sebesar Rp422 miliar, sedangkan Tower Standar menurun sebesar Rp575 miliar, sehingga menunjukkan bahwa Tower Standar lebih sensitif terhadap kenaikan harga tanah. Perbedaan tersebut disebabkan oleh kebutuhan lahan tapak dan ROW Tower Standar yang lebih besar sehingga proporsi biaya lahan dalam investasi menjadi lebih tinggi dibandingkan Compact Lattice Tower.



Gambar 3. Hubungan harga tanah terhadap Net Present Value (NPV) Tower Standar dan Tower Compact Lattice.

Hubungan antara harga tanah dan NPV kedua alternatif pada Gambar 3 menunjukkan tren linier dengan gradien yang berbeda sehingga menghasilkan titik keseimbangan (equilibrium point). Berdasarkan interpolasi linier diperoleh titik keseimbangan pada harga tanah sekitar Rp3,03 juta/m² dengan nilai NPV sekitar Rp3,02 triliun. Pada harga tanah di bawah nilai tersebut, Tower Standar memberikan NPV yang lebih tinggi karena biaya konstruksinya lebih rendah. Sebaliknya, pada harga tanah di atas Rp3,03 juta/m², Compact Lattice Tower menghasilkan NPV yang lebih tinggi karena kebutuhan lahan yang lebih kecil mampu mengurangi peningkatan biaya investasi. Pada skenario harga tanah Rp6 juta/m², NPV Compact Lattice mencapai Rp2.765 miliar, lebih tinggi sekitar Rp91 miliar dibandingkan Tower Standar sebesar Rp2.674 miliar

Hasil ini menunjukkan bahwa karakteristik kebutuhan lahan memengaruhi keunggulan ekonomi relatif kedua alternatif pada koridor transmisi perkotaan. Namun, titik keseimbangan Rp3,03 juta/m² hanya berlaku untuk asumsi penelitian ini, termasuk konfigurasi tower, struktur biaya investasi, tarif jasa penyaluran, tingkat diskonto, dan parameter finansial lainnya. Selain itu, penelitian ini menggunakan *one-way sensitivity analysis* dengan hanya memvariasikan harga tanah, sedangkan biaya konstruksi, tingkat diskonto, inflasi, biaya operasi dan pemeliharaan, serta keterlambatan proyek diasumsikan tetap. Oleh karena itu, hasil penelitian ini merepresentasikan pengaruh perubahan harga tanah secara terisolasi dan belum menggambarkan seluruh ketidakpastian investasi.

Tabel VI
Perbandingan Sensitivitas Kelayakan Finansial terhadap Perubahan Harga Tanah

Harga Tanah	Benefit Cost Ratio		Payback Period		Net Present Value		Internal Rate of Return	
(Rp Juta/m²)	Compact Lattice	Standar	Compact Lattice (Tahun-Bulan)	Standar (Tahun-Bulan)	Compact Lattice (Miliar Rp)	Standar (Miliar Rp)	Compact Lattice (%)	Standar (%)
1	4,27	4,56	7-5	7-0	3.187	3.249	22,06%	23,37%
2	3,93	4,05	8-1	7-10	3.103	3.134	20,52%	21,06%
3	3,64	3,64	8-8	8-8	3.018	3.019	19,21%	19,22%
4	3,39	3,31	9-4	9-6	2.934	2.904	18,08%	17,71%
5	3,17	3,03	9-11	10-5	2.850	2.789	17,09%	16,45%
6	2,98	2,8	10-7	11-3	2.765	2.674	16,21%	15,37%

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi kelayakan teknis, kelayakan finansial, dan analisis sensitivitas harga tanah terhadap Tower Standar dan Tower Compact Lattice pada koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Tower Standar dan Tower Compact Lattice memenuhi seluruh persyaratan teknis untuk diterapkan pada koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi. Kedua alternatif memiliki kapasitas penyaluran daya sebesar 2.726 MW, melebihi kebutuhan sistem sebesar 1.786 MW, serta memenuhi persyaratan *electrical clearance*, *minimum approach distance* (MAD), *ground clearance*, medan listrik, dan medan magnet sesuai standar yang berlaku.
2. Tower Compact Lattice memberikan efisiensi penggunaan ruang yang lebih baik dibandingkan Tower Standar. Penggunaan Tower Compact Lattice mampu mengurangi lebar *right-of-way* (ROW) total dari 34 m menjadi 28 m, sehingga mengurangi luas tapak tower sebesar 53,1% dan kebutuhan ROW sebesar 17,7%. Namun, pengurangan kebutuhan ruang tersebut diikuti oleh bertambahnya jumlah tower akibat *basic span* yang lebih pendek.
3. Perbedaan karakteristik geometris kedua alternatif menghasilkan *trade-off* pada struktur biaya investasi. Tower Compact Lattice memerlukan biaya konstruksi 29,3% lebih tinggi, tetapi mampu menurunkan biaya pembebasan lahan sebesar 54,0% dan biaya kompensasi ROW sebesar 17,2% dibandingkan Tower Standar.
4. Kedua alternatif dinyatakan layak secara finansial pada kondisi dasar analisis. Tower Compact Lattice menghasilkan Benefit Cost Ratio (B/C) sebesar 3,79, Net Present Value (NPV) sebesar Rp3.064 miliar, Internal Rate of Return (IRR) sebesar 19,89%, dan Payback Period (PBP) selama 8 tahun 4 bulan, sedangkan Tower Standar menghasilkan B/C sebesar 3,85, NPV sebesar Rp3.081 miliar, IRR sebesar 20,16%, dan PBP selama 8 tahun 3 bulan. Perbedaan indikator finansial yang relatif kecil menunjukkan bahwa kedua alternatif memiliki tingkat kelayakan investasi yang hampir setara, meskipun pada kondisi dasar Tower Standar memberikan kinerja finansial yang sedikit lebih baik.
5. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa Tower Standar lebih sensitif terhadap kenaikan harga tanah dibandingkan Tower Compact Lattice. Pada rentang harga tanah Rp1–6 juta/m², NPV Tower Standar menurun sebesar Rp575 miliar, sedangkan Tower Compact Lattice menurun sebesar Rp422 miliar. Titik keseimbangan (*equilibrium point*) diperoleh pada harga tanah sekitar Rp3,03 juta/m², sehingga Tower Standar lebih ekonomis pada harga tanah di bawah nilai tersebut, sedangkan Tower Compact Lattice lebih ekonomis pada harga tanah di atasnya. Hasil ini menunjukkan bahwa harga tanah merupakan parameter penting dalam pemilihan desain tower pada koridor transmisi perkotaan dengan karakteristik seperti pada penelitian ini.
6. Hasil penelitian ini dapat menjadi pertimbangan dalam pemilihan desain tower SUTET 500 kV pada kawasan perkotaan berdasarkan karakteristik harga lahan. Penelitian selanjutnya disarankan mempertimbangkan parameter investasi lainnya, seperti biaya konstruksi, tingkat diskonto, inflasi, biaya operasi dan pemeliharaan, serta risiko proyek agar evaluasi investasi menjadi lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan kepada Institut Teknologi PLN (ITPLN) atas dukungan akademik yang diberikan selama proses penelitian. Penghargaan juga diberikan kepada PT PLN (Persero) Kantor Pusat atas dukungan institusional, kesempatan penelitian, serta penyediaan data dan informasi yang berperan penting dalam penyelesaian studi ini.

REFERENSI

[1] H. Nugraha, Z. O. Silalahi, and N. I. Sinisuka, “The Use of Life Cycle Cost Analysis to Determine the Most Effective Cost of Installation of 500 kV Java-Sumatra Power Interconnection System,” IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, vol. 3, no. 4, pp. 191–197, Dec. 2016.

[2] Z. Asbah and A. Assagaf, “Kelayakan Finansial PLTA Run-of-River dengan Integrasi Mekanisme Article 6: Studi

Kasus PLTA Watunohu," Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia, vol. 11, no. 4, pp. 3116–3128, Apr. 2026.

[3] M. F. Fauzi and A. Sidqi, "Analisis Teknis dan Keekonomian Perubahan Desain SUTET 500 kV dari Tower Normal Menjadi Tower Compact Lattice (Studi Kasus: SUTET 500 kV Balaraja–Cikupa)," Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan, vol. 5, no. 2, pp. 682–691, Jun. 2026.

[4] Y. Cao, M. Mohammadian, V. Pirouzfar, C.-H. Su, and A. Khan, "Break Even Point Analysis of Liquefied Natural Gas Process and Optimization of Its Refrigeration Cycles with Technical and Economic Considerations," Energy, vol. 237, Art. no. 121643, 2021.

[5] J. Garcia-Barberena, A. Monreal, and M. Sanchez, "The BEPE—Break-Even Price of Energy: A Financial Figure of Merit for Renewable Energy Projects," Renewable Energy, vol. 71, pp. 584–588, 2014.

[6] M. Syukri, S. Syukriyadin, A. Alfisyahrin, R. H. Siregar, and I. Iqbar, "Dampak Medan Magnet Pembangunan Jaringan Listrik PLTA Luteung 16 MW terhadap Kesehatan Masyarakat," JPMA: Jurnal Pengabdian Masyarakat As-Salam, vol. 3, no. 2, pp. 57–62, 2023.

[7] Yusmartato, R. Nasution, and A. Hasibuan, "Analisis Kopling Elektromagnetik pada Transmisi Tegangan Tinggi 150 kV (Aplikasi: PT PLN Persero Unit Tragi Sei Rotan)," Journal of Electrical Technology, vol. 3, no. 2, pp. 97–104, Jun. 2018.

[8] P. A. K. Ray, R. S. Wibowo, and F. A. Pamuji, "Studi Kelayakan Pemasangan PLTS 80 kW pada Sistem Kelistrikan PT Indonesia Kendaraan Terminal," Jurnal Teknik ITS, vol. 10, no. 1, pp. B1–B7, 2021.

[9] P. P. R. Tenawaheng, C. Utomo, and I P. A. Wiguna, "Analisis Sensitivitas Investasi Apartemen Begawan," Jurnal Teknik ITS, vol. 10, no. 1, pp. D25–D30, 2021.

[10] D. Fahmi, I. M. Yulistya, D. A. Asfani, and Y. Afif, "Analisis Distribusi Medan Listrik pada Isolator Gantung Jenis Polimer Akibat Pengaruh Kontaminan," Jurnal Nasional Teknik Elektro, vol. 4, no. 2, pp. 182–189, Sep. 2015.

[11] Electric Power Research Institute (EPRI), EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and above, 3rd ed. Palo Alto, CA, USA: EPRI, 2005.

[12] I. N. Khoirudin, S. Anam, and M. Pujiantara, "Studi Kelayakan Pemasangan Kabel Laut 150 kV Pakning–Bengkalis untuk Menurunkan Biaya Pokok Produksi (BPP) di Pulau Bengkalis," Jurnal Teknik ITS, vol. 12, no. 1, pp. B50–B55, 2023.

[13] J. Tarigan, U. Situmeang, and Monice, "Studi Kuat Medan Listrik Tower 213–214 Section Duri Bagan Batu," SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi dan Industri, vol. 6, no. 2, pp. 56–65, 2022.

[14] IEEE Standards Association, IEEE Guide for Overhead Alternating Current (AC) Transmission Line Design, IEEE Std 1863-2024 (Revision of IEEE Std 1863-2019). New York, NY, USA: IEEE, 2024.

[15] R. D. Begamudre, Extra High Voltage AC Transmission Engineering, 3rd ed. New Delhi, India: New Age International Publishers, 2006.

[16] A. Nur, B. T. Wijaya, H. Febriansyah, I. Riyanto, and T. Tafonao, "Analisis Sensitivitas Break Even Point terhadap Perubahan Harga dan Volume Penjualan," PT AN Consulting: Jurnal ANC, vol. 1, no. 3, pp. 51–58, May–Jun. 2025.

[17] D. Lock, Project Management, 9th ed. Aldershot, U.K.: Gower Publishing Ltd., 2007.

[18] E. F. Brigham and P. R. Daves, Intermediate Financial Management, 9th ed. Mason, OH, USA: Thomson South-Western, 2007.

[19] Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 188.K/TL.03/MEM.L/2025 tentang Pengesahan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2025–2034. Jakarta, Indonesia: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2025.