

Analisis Teknis dan Keekonomian Perubahan Desain SUTET 500 kV dari Tower Normal Menjadi Tower Compact Lattice

(Studi Kasus: SUTET 500 kV Balaraja - Cikupa)

Mohammad Faldi Fauzi¹, Ahsin Sidqi²

^{1,2}) Magister Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN

Jl. Lingkar Luar Barat, Duri Kosambi, Cengkareng, Jakarta Barat, DKI Jakarta, 11750

Email: ¹mfaldi2310062@itpln.ac.id, ²ahsin@itpln.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara teknis dan keekonomian perubahan desain Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV dari tower normal menjadi tower compact lattice pada proyek SUTET 500 kV Balaraja–Cikupa. Permasalahan utama yang dihadapi dalam pembangunan jaringan transmisi di kawasan urban adalah keterbatasan lahan, potensi konflik sosial, dan biaya pembebasan tanah yang tinggi. Desain tower compact lattice hadir sebagai solusi dengan dimensi lebih ringkas dan kebutuhan lahan yang lebih kecil, namun dengan biaya konstruksi yang relatif lebih tinggi. Kajian ini membandingkan karakteristik teknis, estimasi biaya konstruksi, biaya pembebasan lahan, dan biaya kompensasi jalur bebas (*Right of Way/ROW*) antara kedua desain, serta mengevaluasi indikator kelayakan investasi seperti Net Present Value (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Benefit-Cost Ratio* (B/C), dan *Payback Period* (PP). Hasil analisis menunjukkan bahwa meskipun tower compact lattice memerlukan investasi awal yang lebih tinggi dengan nilai NPV Rp. 4.674.720.270, IRR 13,63%, B/C ratio 1,02 dan PP 7.8 tahun, penghematan signifikan pada biaya lahan dan kompensasi ROW menjadikannya lebih ekonomis dalam konteks keterbatasan lahan. Penelitian ini merekomendasikan penerapan tower compact lattice sebagai alternatif optimal dalam pembangunan jaringan transmisi di kawasan padat penduduk.

Kata kunci: tower compact lattice, SUTET 500 kV, keekonomian proyek, NPV, IRR, B/C, PP

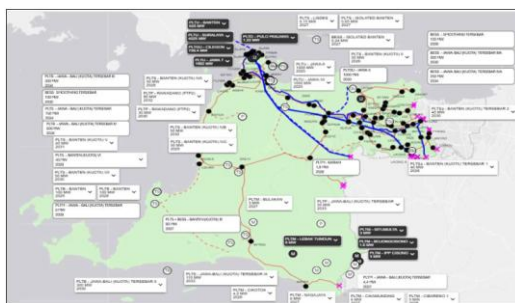
ABSTRACT

This study aims to analyze the economic feasibility of modifying the design of the 500 kV Extra High Voltage Overhead Transmission Line (SUTET) from a normal tower to a compact lattice tower on the Balaraja–Cikupa transmission project. Key challenges in urban transmission development include land constraints, potential social conflicts, and high land acquisition costs. The compact lattice tower design offers a more space-efficient alternative with a smaller footprint, yet it incurs relatively higher construction costs. This research compares the technical specifications, construction costs, land acquisition expenses, and Right of Way (ROW) compensation between both designs, and evaluates investment feasibility using indicators such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit-Cost Ratio (B/C), and Payback Period (PP). The results indicate that while compact lattice towers require a higher upfront investment, NPV Rp. 4.674.720.270, IRR 13,63%, B/C ratio 1,02 and PP 7.8 years, substantial savings in land and ROW compensation costs make them more economical under land-limited conditions. The study recommends adopting compact lattice towers as an optimal alternative for transmission infrastructure development in densely populated areas.

Keywords: compact lattice tower, 500 kV transmission, project economics, NPV, IRR, B/C, PP

Pendahuluan

Kebutuhan akan energi listrik yang andal, efisien, dan berkelanjutan terus meningkat seiring pertumbuhan ekonomi dan urbanisasi, khususnya di wilayah metropolitan seperti Provinsi Banten dan daerah sekitarnya. Sebagai pusat kegiatan ekonomi, pemerintahan, dan industri nasional, Banten dan wilayah penyangganya memiliki tingkat konsumsi listrik yang sangat tinggi dan terus mengalami peningkatan setiap tahunnya. Menurut Dokumen Kajian Kelayakan Pembangunan SUTET Balaraja – Kembangan tahun 2018 disampaikan bahwa terdapat rencana pembangkit baru di Provinsi Banten dengan kapasitas total sampai dengan 4.600 MW sebagaimana tertuang dalam dokumen RUPTL 2018 – 2027 pada saat itu. Gambar peta sistem tenaga listrik di Provinsi Banten dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Sistem Tenaga Listrik Provinsi Banten
Sumber : (PLN, 2018)

Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, sistem transmisi listrik bertegangan ekstra tinggi menjadi solusi utama guna menyalurkan daya dalam jumlah besar dari pusat-pusat pembangkitan ke pusat-pusat beban. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV Balaraja – Kembangan dirancang untuk meningkatkan efisiensi penyaluran energi listrik, mengurangi rugi-rugi daya, serta menjaga kestabilan dan keandalan sistem ketenagalistrikan nasional [1]. Pembangunan proyek SUTET 500 kV Balaraja – Kembangan dibagi kedalam 2 paket Pekerjaan yaitu paket pekerjaan LOT 1 SUTET 500 kV Balaraja Cikupa dan paket pekerjaan LOT 2 SUTET 500 kV Cikupa - Kembangan, kedua proyek tersebut menghadapi tantangan signifikan, antara lain keterbatasan ruang, keterbatasan lahan, konflik sosial, dan penolakan masyarakat terhadap pembangunan tower di area permukiman. Permasalahan dalam pelaksanaan jaringan SUTET yang melewati permukiman penduduk telah menjadi persoalan nasional yang harus segera diatasi. Hal ini menyebabkan meningkatnya biaya pembebasan lahan dan memperlambat proses konstruksi jaringan transmisi [2].

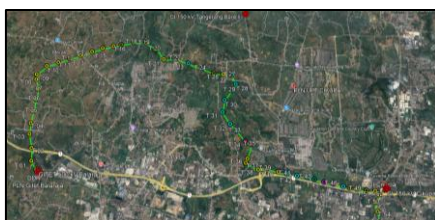
Penelitian ini membahas mengenai proyek pembangunan LOT 1 SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa telah beroperasi pada sejak tahun 2021. Nilai kontrak pembangunan SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa adalah Rp. 482.840.144.870,-. Memiliki panjang jalur transmisi 25 kilometer dengan jumlah tower 53 buah, desain tower SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa menggunakan desain tower normal SUTET 500kV dengan konduktor 4xACSR 450 [3].

Salah satu solusi yang berkembang untuk menyelesaikan tantangan keterbatasan ruang, keterbatasan lahan dan konflik sosial adalah penggunaan desain SUTET 500 kV *Tower Compact Lattice*. *Tower Compact Lattice* adalah tower yang didesain dengan panjang lengan lebih pendek dan luas tapak lebih kecil dari tower dengan tegangan saluran yang sama, tetapi tetap memenuhi persyaratan jarak aman minimum standar yang berlaku. Meskipun demikian, desain *Tower Compact Lattice* memiliki biaya material dan konstruksi yang umumnya lebih tinggi karena struktur yang lebih kompleks [4]. Oleh karena itu, diperlukan analisis keekonomian yang mendalam untuk menilai kelayakan penggantian desain dari tower normal menjadi *Tower Compact Lattice*, khususnya pada proyek strategis seperti SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan keekonomian antara tower normal dan *Tower Compact Lattice* dari sisi biaya konstruksi, biaya pembebasan lahan dan biaya kompensasi jalur bebas / *right of way* (ROW). Kajian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi desain tower yang lebih efisien dan adaptif terhadap tantangan pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan di wilayah urban. Berdasarkan pada uraian latar belakang tersebut, tujuan penelitian yang menjadi fokus utama dalam penelitian ini adalah Menganalisis dan membandingkan karakteristik teknis yang terpengaruh oleh perubahan desain tower antara tower normal dan *Tower Compact Lattice* pada pembangunan SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa. Mengetahui hasil evaluasi finansial dari proyek pembangunan SUTET 500 kV Balaraja - Cikupa, berdasarkan nilai investasi aktual serta penyesuaian terhadap perubahan struktur biaya yang terjadi dikarenakan perubahan desain tower, dan Memberikan rekomendasi desain tower yang paling optimal secara teknis dan ekonomis dalam konteks pembangunan jaringan SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa dalam menghadapi keterbatasan lahan dan tantangan pembangunan di wilayah urban dan semi-urban.

Metode Penelitian

Objek dalam penelitian adalah proyek Pembangunan SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa yang berada di wilayah Provinsi Banten. Peta lokasi dan foto udara dapat dilihat pada Gambar 2. Penelitian ini akan dilaksanakan selama 6 bulan, dimulai dari bulan Januari 2025 sampai dengan Juni 2025 dengan waktu pengumpulan data selama 3 bulan, analisis data 3 bulan.



Gambar 2. Foto Udara Lokasi Pembangunan SUTET 500 kV Balaraja - Cikupa

Pengumpulan data dilakukan dengan merujuk pada ruang lingkup dan batasan masalah pada penelitian ini. Data data yang dikumpulkan merupakan data sekunder meliputi dokumen KKP Pembangunan SUTET 500 kV Balaraja - Kembangan, dokumen SPLN, data – data proyek Pembangunan SUTET 500 kV Balaraja - Cikupa. Setelah seluruh data sekunder yang relevan terkumpul, tahapan selanjutnya adalah melakukan analisis dan pengolahan data. Proses ini dilakukan secara sistematis untuk mengidentifikasi dan menghitung komponen biaya yang terpengaruh oleh perubahan desain tower, termasuk biaya konstruksi, pembebasan lahan dan kompensasi ROW pada pembangunan SUTET 500 kV Balarja – Cikupa. Penilaian kelayakan investasi dilakukan dengan menerapkan metode analisis kelayakan finansial yang meliputi *Net Present Value* (NPV), *Payback Period* (PP), *Internal Rate of Return* (IRR), *Net Benefit-Cost Ratio* (Net B/C) [5], [6].

Hasil Dan Pembahasan

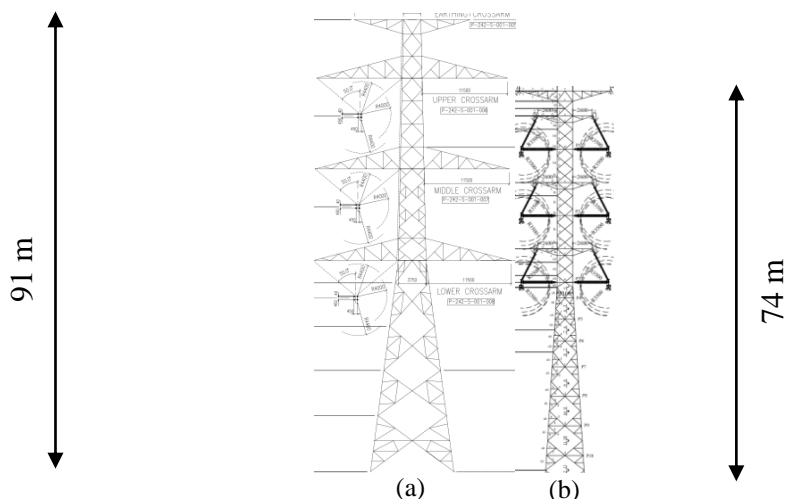
Berdasarkan hasil analisis dari Dokumen Kajian Kelayakan Proyek Pembangunan SUTET 500 kV Balaraja - Kembangan Tahun 2018, proyek tersebut dinyatakan memenuhi kriteria kelayakan baik dari sisi operasional maupun finansial. Dengan pendekatan prinsip biaya paling rendah (*least cost*), diperoleh hasil evaluasi keuangan yang menunjukkan bahwa investasi ini layak untuk dilaksanakan [7].

Penelitian pada bab ini membahas tentang pengumpulan dan pengolahan data untuk melakukan analisis dampak perubahan desain dari tower normal menjadi tower Compact Lattice terhadap biaya konstruksi, biaya pembebasan lahan, biaya kompensasi ROW, dan analisis finansial proyek yang sudah dilakukan penyesuaian terhadap nilai investasi aktual dan perubahan pada komponen biaya pada proyek Pembangunan LOT 1 SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa.

Analisis Perbandingan Desain Tower

Desain tower normal SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa mengacu pada dokumen PLN perihal Standardisasi Gambar *Outline* dan *Arrangement Tower Transmisi 2 Sirkuit 500 kV*, sedangkan desain tower *compact lattice* mengacu pada proyek pembangunan SUTET 500 kV Cikupa – Kembangan. Perbandingan gambar outline SUTET 500 kV tower normal dengan tower *compact lattice* dapat dilihat pada Gambar 3. Secara umum perbedaan antara desain tower normal dengan tower *compact lattice* adalah sebagai berikut [8]:

1. Jarak *back to back* tower normal lebih besar dibandingkan dengan tower *compact lattice*
2. Jarak antar lengan tower normal lebih besar dibandingkan dengan tower *compact lattice*
3. Panjang lengan tower normal lebih besar dibandingkan dengan tower *compact lattice*
4. Tinggi tower normal lebih besar dibandingkan dengan tower *compact lattice*
5. Tower normal menggunakan isolator keramik atau kaca sedangkan tower *compact lattice* menggunakan isolator polimer



Gambar 3. Outline SUTET 500 kV Tower Normal Tipe AA+15 (a) dan SUTET 500 kV Tower Compact Lattice Tipe AA+15 (b)

Sumber : PLN, 2019

Berdasarkan SPLN T5.014-1: 2021 perbandingan teknis lain antara tower normal dengan tower *compact lattice* seperti jarak antar *cross arm*, jarak antara *cross arm* kawat fasa dan kawat tanah, jarak bebas vertikal, rentang dasar, rentang berat, rentang angin, tarikan kerja maksimum dan metode analisis struktur dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Teknis Desain Tower Normal dengan Tower Compact Lattice

Kriteria Desain	SUTET 500 kV Tower Normal	SUTET 500 kV-Tower Compact Lattice
-----------------	---------------------------	------------------------------------

<i>Electrical Clearance minimum (phase to earth)</i>	4.400 mm	3.500 mm
Jarak minimum antara <i>cross arm</i> fasa	12.200 mm (tower gantung) 11.450 mm (tower sudut)	9.000 mm (tower gantung dan tower sudut)
Jarak antara <i>cross arm</i> kawat fasa dan kawa tanah	7.915 mm (tower gantung) 11.500 mm (tower sudut)	3.350 mm (tower gantung) 8.500 mm (tower sudut)
Rentang Dasar	450 m	320 m
Rentang Berat	Tower gantung, tower sudut & tower ujung = 1.350 mm Minimum weight condition = 0 Maksimum weight condition = 3.000 mm Uplift condition = -900 mm (tower sudut saja)	Tower gantung 640 mm Tower sudut 960 mm
Rentang Angin	495 mm	400 mm
Tarikan Kerja Maksimum	5.000 kg	3.400 kg
Metode Analisis Struktur	Elastis Linier	Elastik Non Linier

Sumber: SPLN T5.014-1, 2021

Hasil analisis desain yang mengacu pada Gambar 3, *outline* SUTET tower normal dan SUTET tower *compact lattice*, dan Tabel 1 perbandingan teknis kriteria desain tower normal dan tower *compact lattice* menunjukkan adanya perbedaan *back-to-back*, berat tower, dan kebutuhan luas lahan pembangunan proyek SUTET 500 kV. Perbandingan jarak *back-to-back*, berat tower, dan kebutuhan luas lahan antara tower normal dan tower dapat dilihat pada Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4.

Tabel 2. Jarak *Back to Back* Tower Normal dan Tower *Compact Lattice*

No	Type Tower	Jarak <i>Back to Back</i> (m)	
		Tower Normal	Tower <i>Compact Lattice</i>
1	AA+15	20 x 20	8 x 8
2	BB+15	21 x 21	9 x 9
3	CC+15	25 x 25	10 x 10
4	DD+15	30 x 30	11 x 11
5	EE+15	33 x 33	12 x 12
6	FF+15	33 x 33	12 x 12

Sumber : PLN, 2019

Berdasarkan Tabel 2, menunjukkan perbandingan jarak *Back to Back* antara tower jenis Normal dan *compact lattice* untuk berbagai tipe tower SUTET 500 kV. Jarak *back-to-back* merupakan parameter penting dalam desain jaringan transmisi karena berpengaruh langsung terhadap kebutuhan lahan dan tata letak sistem transmisi. Semakin besar jarak antar tower, maka semakin luas lahan yang diperlukan, yang pada akhirnya berdampak pada biaya pengadaan tanah serta kompleksitas konstruksi.

Berdasarkan tabel tersebut, terlihat bahwa penggunaan tower tipe *compact lattice* memberikan efisiensi ruang yang signifikan dibandingkan dengan tower Normal. Sebagai contoh, untuk tipe tower AA+15, jarak *back-to-back* pada tower Normal adalah 20 x 20 meter, sedangkan pada tower *compact lattice* hanya 8 x 8 meter. Efisiensi ini konsisten pada seluruh tipe tower, di mana *compact lattice* menunjukkan pengurangan jarak sekitar 55–65% dibandingkan dengan tower Normal [9].

Tabel 3. Berat Tower Normal dan Tower *Compact Lattice*

No	Type Tower	Berat Tower (kg)	
		Tower Normal	Tower <i>Compact Lattice</i>
1	AA+15	52.725	71.567
2	BB+15	74.066	81.782
3	CC+15	78.585	104.802
4	DD+15	121.924	121.681
5	EE+15	148.390	131.638
6	FF+15	148.390	119.619

Tabel 3 menyajikan perbandingan berat struktur antara tower tipe Normal dan *compact lattice* pada berbagai jenis tower transmisi SUTET 500 kV, ditunjukkan dalam satuan kilogram (kg). Bobot tower merupakan faktor penting yang berpengaruh terhadap aspek teknis dan biaya dalam pembangunan jaringan transmisi, khususnya dalam hal pengangkutan, pondasi, dan metode ereksi di lapangan. Dari data yang ditampilkan, terlihat adanya variasi berat antara kedua jenis tower, dengan kecenderungan bahwa tower *compact lattice* memiliki berat yang lebih tinggi dibanding tower Normal pada tipe-tipe kecil hingga menengah (AA+15, BB+15, dan CC+15). Sebagai contoh, untuk tipe tower AA+15, berat tower Normal adalah 52.725 kg, sedangkan tower *compact lattice* mencapai 71.567 kg, atau mengalami peningkatan sekitar 35,7%. Hal serupa juga terlihat pada tipe BB+15 dan CC+15 yang masing-masing menunjukkan peningkatan sebesar 10,4% dan 33,3%. Namun, pada tipe tower yang lebih besar, seperti DD+15, EE+15, dan FF+15, terjadi kecenderungan sebaliknya, di mana berat tower *compact lattice* relatif setara atau bahkan lebih ringan dibandingkan tower Normal. Pada tipe FF+15 misalnya, tower *compact lattice* justru memiliki berat lebih rendah, yaitu 119.619 kg, dibandingkan tower Normal yang mencapai 148.390 kg, menandakan efisiensi struktural dalam desain *compact lattice* untuk tower dengan kapasitas besar. Perbedaan ini mencerminkan bahwa pada tower *compact lattice* meskipun dimensi tapaknya lebih kecil dan bentuknya lebih ringkas, namun sistem struktur harus didesain untuk tetap menjamin kekakuan dan stabilitas [10].

Tabel 4. Perbandingan Kebutuhan Luas Lahan Tower Normal dan Tower *Compact Lattice*

No	Tipe Tower	Luas Lahan (m)	
		Tower Normal	Tower <i>Compact Lattice</i>
1	AA+15	25 x 25	15 x 15
2	BB+15	25 x 25	16 x 16
3	CC+15	30 x 30	17 x 17
4	DD+15	35 x 35	18 x 18
5	EE+15	42 x 42	20 x 20
6	FF+15	42 x 42	20 x 20

Tabel 4 memperlihatkan perbandingan kebutuhan luas lahan antara tower Normal dan *compact lattice* untuk masing-masing tipe tower pada jaringan transmisi SUTET 500 kV. Luas lahan yang dibutuhkan oleh setiap tower dihitung berdasarkan dimensi tapak yang umumnya mencerminkan area yang harus dibebaskan (land clearing) serta disiapkan sebagai pondasi dan area kerja tower. Dari data pada tabel, terlihat bahwa tower *compact lattice* membutuhkan lahan yang secara signifikan lebih kecil dibandingkan tower Normal, dengan pengurangan rata-rata lebih dari 50%. Sebagai contoh, pada tipe tower AA+15, kebutuhan luas lahan untuk tower Normal adalah 25 x 25 m² (625 m²), sedangkan untuk tower Compact Lattice hanya 15 x 15 m² (225 m²). Pola pengurangan lahan ini konsisten pada seluruh tipe tower, dengan rasio pengurangan lahan berkisar antara 51% hingga 77% tergantung jenis towernya [11]. Efisiensi ini memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap aspek perencanaan dan keekonomian proyek transmisi, terutama dalam konteks pengadaan lahan dan pembebasan tanah yang merupakan salah satu komponen biaya terbesar dalam proyek SUTET. Di daerah padat penduduk atau dengan nilai tanah yang tinggi, penggunaan tower *compact lattice* menjadi solusi strategis untuk menekan biaya dan meminimalkan gangguan sosial. Selain itu, pengurangan kebutuhan lahan ini juga berdampak pada penyederhanaan proses perizinan dan pengurangan konflik sosial yang sering terjadi akibat pembebasan lahan [12], [13].

Analisis Biaya Konstruksi

Besaran biaya konstruksi tower normal mengacu pada dokumen kontrak Proyek Pembangunan SUTET 500 kV LOT 1 Balaraja – Cikupa tahun 2019 dengan nilai sebesar Rp. 438.946.131.700,- (empat ratus tiga puluh delapan milyar sembilan ratus empat puluh enam juta seratus tiga puluh satu ribu tujuh ratus rupiah). Dengan menggunakan tower *compact lattice* secara umum terdapat perubahan nilai biaya untuk item pekerjaan seperti isolator, berat tower dan pondasi tower. Rincian perubahan item pekerjaan dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Biaya Konstruksi Tower Normal dengan Tower *Compact Lattice*

No	Uraian Pekerjaan	Harga (Rupiah)	
		Tower Normal	Tower <i>Compact Lattice</i>
1	<i>Conductors, including all joint and jumper connections</i>	86.687.381.700	86.687.381.700
2	<i>Damping systems</i>	2.370.080.000	2.370.080.000
3	<i>Tower earthing including excavation, reinstatement, compression jointing and connection to tower (gantry)</i>	205.375.000	205.375.000
4	<i>Insulator string sets complete with all fittings between tower and conductors</i>	43.324.866.000	42.935.952.000
5	<i>Earth conductor attachments, complete with all fittings between tower and conductors</i>	457.354.000	457.354.000

6	<i>Check survey and tower allocation</i>	1.558.000.000	2.292.905.660
7	<i>Tower 2cct 500 kV</i>	100.580.756.444	120.473.493.324
8	<i>Foundation tower</i>	181.462.076.000	183.276.696.760
9	<i>Dismantling and storing in pln storage of tower, conductor, insulator, earthwire and accessories, including identification steel members, numbering, packing, ...etc</i>	1.993.725.000	1.993.725.000
10	<i>Miscellaneous, testing, tower accessories</i>	19.938.517.556	19.938.517.556
11	<i>Comissioning, engineering</i>	368.000.000	368.000.000
Total Harga		438.946.131.700	460.999.481.000

Tabel 5 menyajikan perbandingan rinci antara biaya konstruksi Tower Normal dan Tower Compact Lattice berdasarkan berbagai komponen pekerjaan dalam proyek transmisi tenaga listrik. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi elemen biaya utama yang memengaruhi total pengeluaran dan memahami efisiensi ekonomi dari masing-masing jenis tower. Dari hasil perhitungan, total biaya konstruksi untuk Tower Normal mencapai Rp 438.946.131.700, sedangkan untuk Tower Compact Lattice sebesar Rp 460.999.481.000. Perbedaan total biaya sebesar Rp 22.053.349.300 menunjukkan bahwa penggunaan tower *Compact Lattice* membutuhkan investasi awal yang lebih tinggi dibandingkan tower konvensional. Namun demikian, keunggulan struktural dan efisiensi lahan dari tower Compact Lattice dapat memberikan kompensasi jangka panjang terhadap biaya tambahan tersebut [14], [15]. Secara rinci, beberapa komponen biaya mengalami peningkatan signifikan pada tower Compact Lattice, antara lain:

Check Survey and Tower Allocation

Biaya untuk kegiatan survei dan alokasi tower meningkat dari Rp1.558.000.000 pada Tower Normal menjadi Rp2.292.905.660 pada tower *compact lattice*. Pada pekerjaan *rec check survey* terdapat juga pekerjaan penyelidikan tanah. Salah satu indikator yang bertambah adalah bertambahnya jumlah titik pengambilan data tanah dikarenakan jumlah tower *compact lattice* lebih banyak daripada tower normal.

Tower 2cct 500 kV

Komponen ini menunjukkan kenaikan yang cukup tajam dari Rp 100.580.756.444 menjadi Rp 120.473.493.324. Kenaikan ini berkaitan langsung dengan desain struktur, berat dan jumlah tower *compact lattice* yang lebih banyak daripada tower normal.

Foundation Tower

Biaya pondasi juga mengalami peningkatan signifikan sebesar ± Rp 2 Miliar. tower *compact lattice*. Tower *compact lattice* mempunyai nilai pembebanan yang lebih besar daripada tower normal. Desain pondasi tower *compact lattice* menggunakan desain *combine pile raft foundation* (CPRF). Dengan menggunakan pondasi CPRF volume pedestal dan chimney pondasi tower menjadi lebih besar namun penggunaan jumlah titik bore pile cenderung memiliki jumlah yang lebih sedikit.

Insulator String Sets

Perbedaan biaya pada komponen ini dikarenakan oleh penggunaan material insulator yang awalnya menggunakan isolator kaca / keramik menjadi isolator polimer. Harga material suspension isolator polimer lebih tinggi daripada isolator kaca / keramik, penggunaan material isolator polimer ini dipilih karena dimensi isolator polimer lebih pendek dan juga berat isolator polimer lebih ringan daripada isolator kaca / keramik. Namun demikian untuk total harga material *double tension* isolator polimer lebih rendah dari harga material quadruple tension isolator, sehingga secara total harga pekerjaan isolator yang menggunakan polimer menjadi lebih rendah sebesar Rp 388.914.000. Beberapa biaya lainnya menunjukkan kesamaan atau tidak mengalami perubahan yang signifikan, seperti biaya *conductors, damping systems, earth conductor attachments*, serta biaya *dismantling and commissioning*. Hal ini menandakan bahwa perbedaan utama terletak pada struktur tower dan pondasinya, bukan pada jaringan atau komponen pendukung lainnya [16].

Analisis Biaya Pembebasan Lahan dan Right Of Way (ROW)

Analisis Biaya Pembebasan Lahan

Berdasarkan data primer yang bersumber dari Laporan Penilaian Kompensasi Jalur Transmisi (*Right of Way*) yang disusun oleh Kantor Jasa Penilai Publik (KJPP) Agus, Ali, Firdaus dan Rekan pada periode 2018-2019, ditetapkan Nilai Penggantian Wajar (NPW) untuk pembebasan tanah tapak transmisi. Dokumen tersebut memaparkan bahwa total biaya yang diperlukan untuk pembebasan lahan dengan menggunakan desain tower normal adalah sebesar Rp 25.745.205.350. Nilai ini menjadi basis acuan (baseline) untuk mengevaluasi efektivitas biaya dari penerapan teknologi tower alternatif. Sebagai alternatif, dilakukan analisis estimasi biaya dengan mengasumsikan penggunaan desain tower *compact lattice*. Desain ini secara teoretis memerlukan luas tapak yang lebih kecil dibandingkan dengan tower konvensional. Hasil estimasi menunjukkan bahwa total nilai biaya pembebasan lahan untuk tapak tower dapat direduksi menjadi Rp 19.102.042.350.

Perlu dicatat bahwa nilai ini merupakan hasil perhitungan estimatif yang didasarkan pada pengurangan kebutuhan luas lahan dari desain tower compact.

Perbandingan antara biaya aktual pembebasan lahan untuk tower konvensional dengan estimasi biaya untuk tower compact lattice menunjukkan adanya potensi efisiensi yang signifikan. Selisih biaya antara kedua desain tersebut adalah sebagai berikut =Rp 6.643.163.000. Dari perhitungan tersebut, teridentifikasi adanya potensi penghematan biaya pembebasan lahan sebesar Rp 6.643.163.000. Apabila dipersentasekan terhadap biaya awal, penggunaan tower compact lattice mampu menekan biaya pembebasan lahan tapak tower hingga sekitar 25,8%. Penurunan biaya yang substansial ini secara fundamental disebabkan oleh karakteristik desain tower *compact lattice* yang memiliki dimensi tapak (pondasi) lebih ramping. Kebutuhan lahan yang lebih sedikit secara langsung berimplikasi pada penurunan volume tanah yang harus dibebaskan, sehingga Nilai Penggantian Wajar (NPW) yang harus dibayarkan kepada pemilik lahan menjadi lebih rendah [17]. Temuan ini mengindikasikan bahwa pemilihan teknologi dan desain tower memiliki dampak finansial yang sangat signifikan pada fase pengadaan tanah dalam sebuah proyek SUTET.

Analisis Biaya Right of Way

Menurut Peraturan Menteri Energi Sumber Daya dan Mineral Nomor 13 tahun 2025, *Right Of Way* (ROW) untuk tower normal adalah 17 meter. Nilai kompensasi jalur transmisi / ROW pembangunan SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa didapatkan dari *Laporan Penilaian Kompensasi Jalur Transmisi (Right of Way) Atas Tanah, Tanaman dan Bangunan Untuk Pembangunan Transmisi SUTET 500 kV Balaraja - Cikupa yang dibuat oleh Kantor Jasa Penilai Publik (KJPP) Agus, Ali, Firdaus dan Rekan* pada tahun 2019 - 2021. Berdasarkan laporan tersebut diketahui bahwa nilai pasar tanah di area proyek berkisar antara Rp500.000,- hingga Rp3.900.000,- per meter persegi. Variasi harga tersebut dipengaruhi oleh faktor lokasi, aksesibilitas, peruntukan lahan, serta tingkat perkembangan ekonomi kawasan tersebut. Total nilai kompensasi jalur transmisi / ROW menggunakan desain tower normal adalah sebesar Rp 61.652.421.400,-. Tower *compact lattice* memiliki desain yang lebih ramping dibandingkan dengan tower normal. Sesuai dengan PERMEN ESDM Nomor 13 Tahun 2025 besaran nilai ROW untuk tower *compact lattice* adalah 14 meter. Total nilai kompensasi jalur transmisi / ROW menggunakan desain tower *compact lattice* adalah Rp.50.772.582.329.

Analisis Finansial

Untuk mengevaluasi kelayakan investasi pada proyek pembangunan SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa dilakukan sebuah analisis finansial yang komprehensif. Kajian ini didasarkan pada serangkaian asumsi serta parameter finansial yang telah divalidasi dan disesuaikan dengan data empiris dan kondisi faktual di lapangan. Kelayakan proyek secara kuantitatif diukur melalui tiga indikator investasi utama, yaitu *Net Present Value* (NPV), *Payback Period* (PP), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Benefit/Cost Ratio* (B/C). Hasil dari keempat indikator ini akan menjadi dasar untuk memberikan penilaian objektif terhadap viabilitas dan potensi pengembalian investasi dari proyek tersebut. SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa telah beroperasi sejak tahun 2021, pada penelitian ini dilakukan evaluasi kelayakan finansial dengan membandingkan hasil kajian kelayakan finansial pada tahun 2018 dimana biaya pembangunan SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa masih menggunakan desain tower normal dengan biaya pembangunan SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa masih menggunakan desain tower *compact lattice*.

Analisis Finansial Desain Tower Normal

Hasil analisis finansial pembangunan SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa desain tower normal dengan indikator IRR, NPV, B/C dan PP dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Analisis Finansial Desain Tower Normal SUTET 500 kV Balaraja - Cikupa

Deskripsi	Satuan	Output	Kesimpulan
IRR	Persen	13,64%	> 7,38% Layak
NPV	Rp. (ribuan)	4.674.643.018	> Rp. 0 Layak
B/C Ratio	Ratio	1,12	> 1,00 Layak
Payback Period	Tahun	7,8	

Berdasarkan hasil perhitungan yang disajikan pada Tabel 7, desain Tower Normal menghasilkan nilai IRR sebesar 13,64%, yang secara signifikan berada di atas tingkat diskonto yang digunakan (7,38%). Hal ini menunjukkan bahwa proyek dapat memberikan tingkat pengembalian yang lebih tinggi dibandingkan dengan biaya modalnya. Nilai NPV sebesar Rp. 4.674.643.018 (ribuan) atau setara dengan sekitar Rp 4,68 triliun mengindikasikan bahwa proyek ini menghasilkan keuntungan bersih dalam jangka waktu proyek. Nilai B/C Ratio sebesar 1,12 juga menegaskan bahwa setiap satuan biaya yang dikeluarkan dapat memberikan manfaat ekonomi yang lebih besar, sehingga layak untuk direalisasikan. Sementara itu, periode pengembalian investasi (payback period) tercatat selama 7,8 tahun, yang dapat dikategorikan cukup untuk proyek transmisi berkapasitas ekstra tinggi [18], [19].

Analisis Finansial Desain Tower Compact

Hasil analisis finansial pembangunan SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa antara desain tower compact lattice dengan indikator IRR, NPV, B/C dan PP dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Analisis Finansial Desain Tower Compact SUTET 500 kV Balaraja - Cikupa

Deskripsi	Satuan	Output	Kesimpulan
IRR	Persen	13.63%	> 7.38% Layak
NPV	Rp. (ribuan)	4.674.720.720	> Rp. 0 Layak
B/C Ratio	Ratio	1,12	> 1,00 Layak
Payback Period	Tahun	7.8	

Sebagaimana ditampilkan pada Tabel 9, alternatif desain menggunakan Tower Compact menunjukkan hasil yang sangat kompetitif dibandingkan dengan Tower Normal. IRR yang diperoleh sebesar 13,63%, hanya terpaut 0,01% lebih rendah dibanding desain Tower Normal, namun tetap di atas tingkat diskonto yang ditentukan. NPV tercatat sebesar Rp. 4.674.720.270 (ribuan) atau sekitar Rp 4,68 triliun, yang meskipun sedikit lebih rendah dari desain Tower Normal, masih menunjukkan kelayakan finansial yang kuat. Nilai B/C Ratio tetap berada di angka 1,12, serta payback period yang identik yakni 7,8 tahun.

Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas adalah metode evaluasi yang digunakan untuk melihat sejauh mana hasil dari suatu studi kelayakan finansial akan berubah ketika terjadi perubahan pada satu atau lebih variabel input yang bersifat tidak pasti. Tabel 10 menjelaskan hasil analisis sensitivitas terhadap perubahan investasi dan additional *Salable Energy* pada Tower Normal, sedangkan untuk hasil analisis sensitivitas terhadap perubahan investasi dan additional *Salable Energy* disampaikan *Tower Compact* pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Analisis Sensitivitas Tower Normal

Skenario	Δ Sensitivitas Investment Cost (Persen)	Δ Sensitivitas Additional Salable Energy (Persen)	Output Analysis			
			IRR	NPV	BCR	PBP
			(Persen)	Rupiah (x1000)		(Tahun)
Case - 1 (Basecase)	0%	0,00%	13,64%	4.679.643.018	1,02	8 Tahun
Case - 2	-10,00%	0,00%	14,97%	5.186.581.743	1,02	7 Tahun
Case - 3	+10,00%	0,00%	12,53%	4.172.704.294	1,01	9 Tahun
Case - 4	+92,32%	0,00%	7,38%	(415.284)	1,00	14 Tahun
Case - 5	0,00%	+10,00%	14,47%	5.150.686.385	1,02	7 Tahun
Case - 6	0,00%	-10,00%	12,78%	4.146.204.715	1,02	9 Tahun
Case - 7	0,00%	-63,78%	7,38%	(955.566)	1,00	16 Tahun

Tabel 9. Hasil Analisis Sensitivitas Tower Compact

Skenario	Δ Sensitivitas Investment Cost (Persen)	Δ Sensitivitas Additional Salable Energy (Persen)	Output Analysis			
			IRR	NPV	BCR	PBP
			(Persen)	Rupiah (x1000)		(Tahun)
Case - 1 (Basecase)	0%	0,00%	13,63%	4.674.720.270	1,02	8 Tahun
Case - 2	-10,00%	0,00%	14,96%	5.182.008.967	1,02	7 Tahun
Case - 3	+10,00%	0,00%	12,52%	4.167.431.572	1,01	9 Tahun
Case - 4	+92,17%	0,00%	7,38%	(959.656)	1,00	14 Tahun
Case - 5	0,00%	+10,00%	14,45%	5.145.763.636	1,02	7 Tahun
Case - 6	0,00%	-10,00%	12,77%	4.141.281.967	1,02	9 Tahun
Case - 7	0,00%	-63,73%	7,38%	(796.609)	1,00	16 Tahun

Hasil analisis sensitivitas untuk kedua alternatif desain, dapat disimpulkan bahwa proyek pembangunan SUTET 500 kV pada jalur Balaraja – Cikupa diperoleh batasan kenaikan investasi proyek sebesar 92.17% terhadap investasi awal dan batasan penurunan *Salable Energy* sebesar 63.73% terhadap nilai additional *Salable Energy* awal. Kedua desain memiliki tren output yang hampir identik dan tetap menunjukkan hasil yang layak secara finansial dalam hampir seluruh skenario [20].

Analisis Komparatif

Secara umum pada studi kasus proyek pembangunan SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa, kedua alternatif desain dinyatakan layak secara finansial berdasarkan keempat indikator analisis. Meskipun terdapat perbedaan nilai IRR dan NPV

yang sangat kecil, hal ini tidak memberikan dampak signifikan terhadap keputusan investasi. Namun, dari sisi efisiensi penggunaan lahan, kemudahan konstruksi di daerah padat penduduk, serta potensi pengurangan tapak lahan dan ROW (*Right of Way*), desain Tower Compact dapat menjadi alternatif yang lebih unggul secara teknis dan sosial, meskipun perbedaan finansialnya sangat marginal.

Simpulan

Berdasarkan hasil analisis teknis dan finansial terhadap perubahan desain tower dari tipe normal ke tipe compact lattice pada pembangunan SUTET 500 kV Balaraja – Cikupa, maka diperoleh beberapa kesimpulan yakni Tower *compact lattice* memiliki dimensi fisik yang lebih kecil dibanding tower normal, dengan lengan yang lebih pendek dan kebutuhan luas tapak yang lebih efisien, penggunaan tower *compact lattice* terbukti mampu mengurangi kebutuhan lahan untuk setiap titik tower, hasil analisis kelayakan finansial menunjukkan bahwa kedua desain, baik tower normal maupun *compact lattice*, sama-sama layak untuk diimplementasikan dengan IRR > 27%, NPV positif, B/C Ratio > 1, dan Payback Period < 4 tahun. Namun, nilai IRR dan NPV pada desain tower normal sedikit lebih tinggi secara absolut, meskipun selisihnya sangat kecil dan tidak signifikan secara ekonomi serta dengan mempertimbangkan tantangan sosial dan spasial di wilayah padat penduduk, serta efisiensi biaya jangka panjang, desain tower *compact lattice* dinilai lebih adaptif dan layak direkomendasikan untuk proyek transmisi di kawasan urban dan semi-urban.

Daftar Pustaka

- [1] E. Tapia-Hernández and D. De-León-Escobedo, "Vulnerability of transmission towers under intense wind loads," *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 18, no. 9, pp. 1235–1250, 2022, doi: 10.1080/15732479.2021.1894183.
- [2] F. Fitriani, I. Rivai, D. Tri, and R. Utama, "Pembangunan Tower Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV TX (Ungaran-Pedan)-Mandirancan," *J. Penelit. Dan Pengabd. Masy.*, vol. 01, pp. 110–117, 2025, [Online]. Available: <https://doi.org/10.54564/pkmc.v1i02.15>
- [3] I. Mozakka, M. Zeynalian, and M. Hashemi, "A feasibility study on construction methods of high voltage transmission towers' foundations," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 21, no. 2, 2021, doi: 10.1007/s43452-021-00197-4.
- [4] G. Vettoretto, Z. Li, and C. Affolter, "Evaluation of the Ultimate Collapse Load of a High-Voltage Transmission Tower under Excessive Wind Loads," *Buildings*, vol. 13, no. 2, 2023, doi: 10.3390/buildings13020513.
- [5] V. K. Bansal, P. Kumar, and V. S. Kumar, "Location and Structural Optimization of Transmission Tower in Hilly Region," vol. 6, no. 4, pp. 67–85, 2022.
- [6] S. Shrivastava, V. K. Srivastava, S. Khalid, I. A. Khan, and D.K.Nishad, "Improving the efficiency and reliability of India's power grid through targeted EHV transmission line investments: a case of UPPCL," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–27, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-78572-3.
- [7] S. F. M. Nor, M. Z. A. Ab Kadir, A. M. Ariffin, M. Osman, M. S. A. Rahman, and N. M. Zainuddin, "Systematic approaches and analyses on voltage uprating of 132 kv transmission lines: A case study in malaysia," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 19, 2021, doi: 10.3390/app11199087.
- [8] S. F. M. Nor, M. Z. A. Ab Kadir, A. M. Ariffin, M. Osman, M. S. A. Rahman, and N. M. Zainuddin, "Issues and challenges in voltage uprating for sustainable power operation: A case study of a 132 kv transmission line system in malaysia," *Sustain.*, vol. 13, no. 19, 2021, doi: 10.3390/su131910776.
- [9] J. Li *et al.*, "Collapse Mechanism of Transmission Tower Subjected to Strong Wind Load and Dynamic Response of Tower-Line System," *Energies*, vol. 15, no. 11, 2022, doi: 10.3390/en15113925.
- [10] C. Huang, K. Yin, X. Liang, L. Gui, B. Zhao, and Y. Liu, "Study of direct and indirect risk assessment of landslide impacts on ultrahigh-voltage electricity transmission lines," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–17, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-76726-x.
- [11] M. Ahsan *et al.*, "Historical Review of Advancements in Insulated Cross-Arm Technology," *Energies*, vol. 15, no. 21, 2022, doi: 10.3390/en15218221.
- [12] X. Liu, M. Gu, Y. Zhang, B. Yi, and S. Lei, "Static Structural Analysis of Floating Overhead Power Transmission Tower-Line System With Six-Degree-of-Freedom Motion," *IEEE Access*, vol. 14, no. December 2025, pp. 272–280, 2026, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3647546.
- [13] B. Li *et al.*, "A Review of the Developments in Capacity-Uprating Conductors for Overhead Transmission Lines," *Coatings*, vol. 15, no. 10, pp. 1–27, 2025, doi: 10.3390/coatings15101203.
- [14] V. Křivý, Z. Vašek, M. Vacek, and L. Mynarzová, "Corrosion Damage to Joints of Lattice Towers Designed from Weathering Steels," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 9, 2022, doi: 10.3390/ma15093397.
- [15] A. Swain, E. Abdellatif, A. Mousa, and P. W. T. Pong, "Sensor Technologies for Transmission and

- Distribution Systems: A Review of the Latest Developments,” *Energies*, vol. 15, no. 19, 2022, doi: 10.3390/en15197339.
- [16] Z. Abd Latif *et al.*, “Optimization of power transmission line location at tropical forest area in avoiding endangered tree species,” *Arab. J. Geosci.*, vol. 15, no. 9, pp. 1–14, 2022, doi: 10.1007/s12517-022-10007-7.
- [17] A. Siswanto, “Analisis load flow sutet 500 kV Jawa-Bali menggunakan power word simulation,” *Semin. Nas. Tek. Elektro dan Inform.*, vol. 8, no. 1, pp. 332–337, 2022.
- [18] F. Ardin, “Kebijakan Pembangunan Akses Listrik Berbasis Stasiun Pengisian untuk Desa Tertinggal dalam Peningkatan Rasio Elektrifikasi di Indonesia,” *J. Pembang. dan Adm. Publik*, pp. 1–23, 2025, doi: 10.32834/jpap.v7i2.1000.
- [19] T. E. S, I. Teknologi, N. Malang, and M. Indonesia, “Analisis Rugi Daya Pada Feeder 20kv Meliau Di Pt Pln Sanggau Kota Kalimantan Barat Dengan Bantuan Software Etap,” vol. 09, pp. 245–256, 2025.
- [20] R. Doni, H. Purwanto, and A. Setiobudi, “Analisis Efisiensi Penerapan Leg Extension Tower pada Konstruksi SUTT 150 kV Manna-Bintuhan,” *J. Deform.*, vol. 10, no. 2, pp. 213–224, 2025, doi: 10.31851/deformasi.v10i2.19946.