



Analisis Tekno Ekonomi terhadap Pekerjaan Rekonduktoring Saluran Udara Tegangan Tinggi Penghantar Suge Dukong di PLN Ultg Belitung

Teddy Mardona*, Syamsir Abdulh

IT PLN, Indonesia

Email: teddy2310109@itpln.ac.id*, syamsir@itpln.ac.id

Abstract

The increasing electricity demand in Belitung necessitates enhanced reliability of the 66 kV Suge–Dukong overhead transmission line (OHTL), which functions as the primary power evacuation corridor from the Suge subsystem. With the Belitung system peak load reaching 62 MW and total installed generation capacity in Suge amounting to 58 MW, the existing conductor—rated at 400 A (43 MW) per circuit—has limited capability to support optimal power transfer and fails to fully meet the N-1 reliability criterion. This condition results in a high risk of system unreliability and restricted generation dispatch. This study analyzes the technical condition of the existing conductor, evaluates capacity and reliability improvements through a reconductoring scheme, and assesses the economic feasibility of the proposed project. The methodology includes the collection of conductor technical data, power flow simulations of the Belitung system using DIgSILENT PowerFactory, and financial analysis based on Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit–Cost Ratio (BCR), and Payback Period indicators. The results show that the ACCC Helsinki conductor is the most suitable alternative, achieving an evaluation score of 4.1 out of 5 due to its high current-carrying capacity (802 A), lightweight design, maximum operating temperature of 180 °C, low sag characteristics, and compatibility with existing tower structures. Simulation results indicate significant post-reconductoring improvements, including reduced conductor loading to 24–39%, improved voltage profiles, and decreased power losses—from 1,128 kW to 997.3 kW under double-circuit operation and from 2,172 kW to 1,189.4 kW under single-circuit operation. Financial analysis confirms project feasibility with an investment cost of IDR 53.95 billion, positive NPV, IRR above 9.7%, BCR greater than 1, and a relatively short payback period. These findings demonstrate that reconductoring using the ACCC Helsinki conductor is technically and economically viable.

Keywords:

Reconductoring, HTLS, ACCC Helsinki, Sag, Digsilent, NPV

Abstrak

Kebutuhan listrik di Belitung yang meningkat menuntut keandalan pada sistem transmisi SUTT 66 kV Suge–Dukong sebagai jalur utama evakuasi daya dari subsistem Suge. Dengan beban puncak Sistem Belitung mencapai 62 MW, dan total kapasitas pembangkit di Suge sebesar 58 MW, saluran eksisting dengan kuat hantar arus (KHA) 400 A (43 MW) per penghantar kurang mampu mendukung optimalisasi penyaluran daya serta kurang memenuhi persyaratan keandalan N-1. Kondisi ini mengakibatkan tingginya risiko ketidakandalan sistem, dan keterbatasan evakuasi daya pembangkit. Penelitian ini bertujuan menganalisis kondisi teknis penghantar eksisting, mengevaluasi peningkatan kapasitas, dan keandalan sistem melalui rencana rekonduktoring, serta menganalisa kelayakan ekonomi proyek. Metodologi penelitian meliputi pengumpulan data teknis konduktor, simulasi aliran daya Sistem

Kata Kunci:

Rekonduktoring, HTLS, ACCC Helsinki, Sag, Digsilent, NPV

Belitung dengan DigSILENT PowerFactory, serta analisis finansial menggunakan indikator NPV, IRR, BCR, dan Payback Period. Hasil studi menunjukkan bahwa konduktor ACCC Helsinki merupakan alternatif paling unggul dengan nilai evaluasi 4,1 dari 5, didukung kapasitas arus tinggi (802 A), bobot yang ringan, suhu operasi 180°C, andongan rendah, dan kompatibilitas struktur menara. Simulasi DigSILENT menunjukkan peningkatan signifikan pasca rekonduktoring, termasuk penurunan pembebanan penghantar menjadi 24–39%, peningkatan profil tegangan, serta penurunan susut daya saat operasi 2 penghantar 1128 kW ke 997,3 kW dan saat operasi 1 penghantar dari 2172 kW ke 1189,4 kW. Dari analisis finansial, proyek dinyatakan layak dengan investasi Rp 53,95 miliar, menghasilkan NPV positif, IRR di atas 9,7%, BCR > 1, dan Payback Period yang relatif singkat. Hal ini mengindikasikan rekonduktoring menggunakan ACCC Helsinki merupakan proyek yang layak secara teknis dan ekonomis.

PENDAHULUAN

Pertumbuhan permintaan energi listrik di Pulau Belitung menunjukkan tren peningkatan seiring dengan perkembangan industri, pariwisata, dan aktivitas ekonomi masyarakat setempat. Hal ini menuntut PT. PLN (Persero) Wilayah Bangka Belitung untuk terus mengembangkan sistem kelistrikan guna menjaga keandalan dan kontinuitas suplai energi listrik. Pada sistem kelistrikan Belitung konfigurasi transmisi saat ini masih terhubung secara radial, sehingga keandalan transmisi sangat diperlukan terutama keandalan jaringan Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) (PLN, 2021).

Saluran transmisi yang digunakan pada sistem kelistrikan Belitung saat ini adalah Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 66 kV dengan jenis konduktor terpasang yaitu Aluminum Conductor Steel Reinforced (ACSR). Seiring dengan pertumbuhan beban dan bertambahnya kapasitas pembangkit pada sistem Belitung menyebabkan perubahan kebutuhan kapasitas daya pada saluran transmisi yang sudah ada. Salah satu langkah strategis dalam pengembangan tersebut adalah dengan meningkatkan kapasitas penghantar pada jaringan transmisi, khususnya pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) yang ada di Belitung ((Persero), 2024).

Berdasarkan kondisi operasi sistem Belitung pada tahun 2024, beban Puncak Sistem Belitung mencapai 62 MW dan pembangkit yang beroperasi di Belitung terpusat di sub sistem Suge sehingga menyebabkan evakuasi daya dari Gardu Induk Suge ke Gardu Induk Dukong mengalami kenaikan dan berpengaruh terhadap pembebanan pada penghantar Suge-Dukong. Kapasitas Kuat Hantar Arus (KHA) SUTT Suge – Dukong saat ini yaitu sebesar 400 A atau sebesar 43 MW per 1 penghantar. Dengan kondisi ini akan menjadi kendala dalam melakukan optimalisasi evakuasi daya pembangkit pada subsistem Suge yaitu PLTU Suge #1 (16,5 MW), PLTU Suge #2 (16,5 MW) dan MPP Suge (25 MW) total sebesar 58 MW dan menyebabkan kondisi N-1 penghantar Suge-Dukong tidak terpenuhi (Ahsan et al., 2025; Duanaputri et al., 2023; Iqbal & Armono, 2023; Parvizi et al., 2025).

Upaya optimalisasi berupa rekonduktoring pada segmen penghantar Suge Dukong dinilai sebagai solusi efektif untuk meningkatkan kapasitas transmisi tanpa harus membangun jaringan baru, yang umumnya menghadapi tantangan sosial dan biaya investasi yang besar (Fan et al., 2024; Riba et al., 2020; Utomo, 2019). Rekonduktoring dapat meningkatkan kapasitas hantar jaringan eksisting dengan efisien dan efektif serta mengurangi potensi

gangguan yang menyebabkan pemadaman (Glaum & Hofmann, 2023; Jalilian et al., 2025; Karimi et al., 2024). Penelitian ini membutuhkan analisa tekno ekonomi yang komprehensif untuk mengetahui kelayakan secara teknis maupun ekonomis. Analisa ini mencakup perhitungan biaya investasi, perhitungan durasi pelaksanaan pekerjaan, dan analisis aliran daya sistem kelistrikan menggunakan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory. Selain itu, kajian ini juga mempertimbangkan aspek finansial seperti Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit to Cost Ratio (BCR), serta Payback Period (PP) guna memastikan bahwa proyek rekonduktoring ini layak secara ekonomi dan operasional.

Penelitian terdahulu telah mengkaji berbagai aspek teknis dan ekonomis dari rekonduktoring. Misalnya, penelitian oleh M. Ahsan dkk. menunjukkan bahwa konduktor HTLS memiliki keunggulan dalam meningkatkan ampacity dan mengurangi sag pada saluran transmisi tegangan tinggi. Selain itu, kajian oleh P. Parvizi menegaskan bahwa konduktor berbasis komposit seperti ACCC mampu memberikan performa termomekanik yang lebih stabil dibandingkan konduktor konvensional. Sementara itu, penelitian L. Fan mengungkapkan bahwa analisis biaya siklus hidup (life cycle cost) menunjukkan keunggulan ekonomis penggunaan konduktor hemat energi dalam jangka panjang. Di tingkat nasional, studi terkait rekonduktoring juga telah dilakukan, seperti pada sistem transmisi Paiton–Probolinggo yang menunjukkan peningkatan signifikan pada profil tegangan dan penurunan losses setelah dilakukan rekonduktoring.

Meskipun berbagai penelitian tersebut telah memberikan kontribusi penting, masih terdapat kesenjangan penelitian yang signifikan, khususnya dalam konteks sistem kelistrikan skala regional dengan konfigurasi radial seperti di Pulau Belitung. Sebagian besar studi sebelumnya berfokus pada sistem interkoneksi besar atau tegangan ekstra tinggi, sementara kajian yang mengintegrasikan analisis teknis dan ekonomi secara komprehensif pada sistem 66 kV dengan keterbatasan infrastruktur masih sangat terbatas. Selain itu, belum banyak penelitian yang secara spesifik mengevaluasi kesesuaian berbagai alternatif konduktor HTLS terhadap kondisi eksisting jaringan, termasuk aspek kompatibilitas struktur tower dan kebutuhan investasi tambahan.

Urgensi penelitian ini semakin meningkat seiring dengan kondisi aktual sistem kelistrikan Belitung yang mengalami keterbatasan kapasitas transmisi akibat peningkatan beban dan terpusatnya pembangkit di subsistem tertentu. Berdasarkan data operasional, kapasitas hantar arus penghantar eksisting tidak lagi mampu mengakomodasi kebutuhan evakuasi daya secara optimal, bahkan berpotensi melanggar kriteria keandalan N-1. Kondisi ini tidak hanya berdampak pada efisiensi sistem, tetapi juga meningkatkan risiko gangguan dan pemadaman listrik, sehingga diperlukan solusi yang cepat, tepat, dan ekonomis tanpa harus membangun infrastruktur baru yang memerlukan biaya besar serta waktu yang panjang.

Kebaruan (novelty) dalam penelitian ini terletak pada pendekatan integratif yang menggabungkan analisis teknis berbasis simulasi aliran daya menggunakan DIgSILENT PowerFactory dengan evaluasi kelayakan ekonomi menggunakan indikator finansial seperti Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (BCR), dan Payback Period. Selain itu, penelitian ini juga mengembangkan metode evaluasi berbobot terhadap berbagai alternatif konduktor untuk menentukan pilihan optimal berdasarkan parameter teknis dan kesesuaian infrastruktur eksisting. Pendekatan ini memberikan

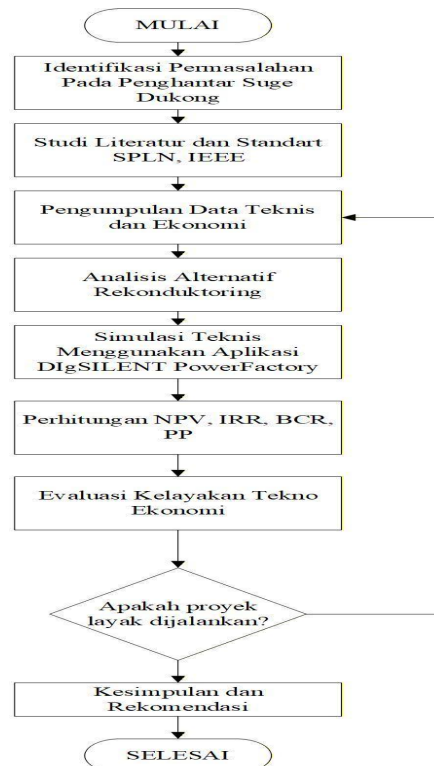
kontribusi baru dalam pengambilan keputusan investasi pada proyek rekonduktoring, khususnya pada sistem transmisi skala menengah.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis kondisi teknis penghantar eksisting pada saluran transmisi Suge–Dukong, mengevaluasi peningkatan kapasitas dan keandalan sistem melalui skenario rekonduktoring, serta menilai kelayakan ekonomi dari proyek yang diusulkan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berfokus pada aspek teknis peningkatan performa jaringan, tetapi juga memastikan bahwa solusi yang dipilih memberikan manfaat ekonomi yang optimal bagi perusahaan penyedia tenaga listrik.

Manfaat penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis dan akademis. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar pengambilan keputusan bagi PT PLN (Persero) dalam merencanakan pengembangan jaringan transmisi yang efisien dan berkelanjutan, khususnya di wilayah dengan karakteristik sistem yang serupa. Secara akademis, penelitian ini memperkaya literatur dalam bidang teknik tenaga listrik, terutama terkait implementasi teknologi HTLS dan analisis tekno-ekonomi pada proyek rekonduktoring. Selain itu, penelitian ini juga dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya dalam mengembangkan model evaluasi yang lebih komprehensif dan adaptif terhadap berbagai kondisi sistem kelistrikan.

METODE PENELITIAN

Untuk mempermudah dalam memahami dan melakukan penelitian, maka digunakan flow chart pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Flow chart tahapan penelitian

Pada tahapan pertama yaitu melakukan identifikasi permasalahan pada penghantar Suge Dukong. Penelitian dan pengumpulan data berlokasi di ULTG Belitung PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangkitan Bangka Belitung Dusun Suge, Desa Pegantungan, Kecamatan Badau, Kabupaten Belitung, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung. Sistem Transmisi Belitung beroperasi pada tegangan 66 kV memiliki panjang jaringan transmisi 180,48 kms dengan jumlah tower 469. Saluran Udara Tegangan Tinggi di Belitung terbagi menjadi 2 segmen yaitu segmen Suge Dukong dan segmen Dukong Manggar yang mana memiliki peran yang penting dan vital dalam penyaluran tenaga listrik. Penghantar Suge - Dukong merupakan jalur backbone dalam sistem transmisi Pulau Belitung (Duque et al., 2025; Huang et al., 2025). Kondisi eksisting saat ini Penghantar Suge - Dukong adalah single conductor dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 1. Spesifikasi teknis penghantar Suge Dukong [2]

Segmen Penghan tar	Asset Yang Dikelola									Tanggal Operasi
	Konduktor 66 kV									
	SUTT		Diameter	Jumlah		Route	Sirkuit	I Nom	Tower	
	Jenis	Tipe	mm²	Per/Ph	Sirkuit	Km	Kms	Amp	Bh	
Suge Dukong	ACS R	-	124	1	2	20,24	40,48	400	83	1 Maret 2015

Kondisi eksisting penghantar Suge - Dukong mempunyai 2 circuit dengan konfigurasi single konduktor dimana masing – masing circuit mempunyai Kuat Hantar Arus (KHA) SUTT Suge-Dukong adalah sebesar 400 A / sebesar 45 MW per 1 penghantar, dengan besar penampang per 1 penghantar segment Suge- Dukong sebesar 1x124 mm². Dari data pembebanan transmisi di Gardu Induk Suge pada tanggal 18 Februari 2025 pada waktu beban puncak, dapat diketahui untuk pembebanan transmisi tertinggi yaitu pada pukul 18.00 WIB dengan pembebanan penghantar 19,44 MW di penghantar Dukong 1 dan 19,6 MW di penghantar Dukong 2 dengan kapasitas hantar arus sebesar 400 A (43 MW) per masing – masing penghantar ((Persero), 2025). Sehingga secara kondisi N-1 untuk penghantar Suge Dukong masih terpenuhi tetapi sudah dalam batas maksimal. Untuk pembangkit yang beroperasi di sub sistem Suge dengan waktu yang sama yaitu sebesar 42,7 MW dari total kapasitas 58 MW. Dengan kondisi pembebanan penghantar di GI Suge waktu beban puncak sudah hampir maksimal menjadikan terbatasnya operasi pembangkit di subsistem GI Suge dan tidak bisa beroperasi dengan optimal (Alnaser & Ochoa, 2021; Karimi et al., 2023).

Tahapan selanjutnya yaitu penulis mempelajari jurnal penelitian tentang rekonduktoring Saluran Udara Tegangan Tinggi, standart SPLN dan IEEE yang berhubungan dengan transmisi tenaga listrik, data referensi – referensi harga terkait rekonduktoring. Hal tersebut digunakan sebagai data pendukung dalam penyusunan penelitian. Kemudian melakukan pengamatan secara langsung pada penghantar Suge Dukong di ULTG Belitung untuk memperoleh data yang akurat guna mendukung data penelitian yang berhubungan dengan rencana pekerjaan rekonduktoring. Penulis melakukan wawancara secara langsung kepada para Operator atau Teknisi di bidang Jaringan dan Transmisi Gardu Induk Belitung.

Pengolahan data merupakan bagian yang sangat penting dalam penelitian karena dari pengolahan data dapat digunakan untuk memecahkan masalah penelitian. Dalam teknik

pengolahan data ini penulis akan menjabarkan Langkah-langkah yang digunakan untuk mengolah data tersebut agar bisa digunakan untuk melanjutkan penulisan tesis ini. Berikut langkah-langkah dalam pengolahan data:

- Identifikasi dan verifikasi data lapangan yaitu dengan mengolah data kondisi eksisting seperti jenis konduktor, panjang saluran, tinggi tower, dan jenis isolator, kemudian mengukur elevasi dan clearance aktual untuk menentukan potensi sag berlebih, dan data ini dicatat dalam bentuk tabel spesifikasi teknis jalur eksisting.
- Melakukan perbandingan alternatif konduktor yaitu simulasi dilakukan untuk berbagai alternatif konduktor (ACSR/AS, ACCC, ACFR/TW). Setiap konduktor dinilai berdasarkan kapasitas arus, suhu maksimum, andongan, dan kesesuaian terhadap standar SPLN dan IEEE.
- Pemodelan sistem di digsilent powerfactory yaitu data teknis dimasukkan ke dalam perangkat lunak untuk memodelkan sistem transmisi Suge–Dukong. Simulasi dilakukan untuk melihat arus yang mengalir dalam berbagai kondisi beban, suhu operasi konduktor, simulasi sag-tension berdasarkan karakteristik konduktor.
- Pengolahan data ekonomi/finansial yaitu data ekonomi diolah untuk menilai kelayakan investasi proyek rekonduktoring menggunakan rumus – rumus Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit to Cost Ratio (BCR), dan Payback Period (PP).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam pekerjaan rekonduktoring SUTT 66 kV segmen Suge Dukong di wilayah kerja PLN ULTG Belitung, pemilihan konduktor menjadi aspek utama untuk menentukan keberhasilan peningkatan kapasitas transmisi tanpa menimbulkan konsekuensi struktural dan ekonomi yang signifikan. Lima jenis konduktor yang menjadi alternatif akan dibandingkan dalam kajian ini yaitu jenis konduktor ACSR 250, ACCC Helsinki, ACCC Copenhagen, ACFR 365/40, dan ACFR 415/40 (Fernández et al., 2016; Soto et al., 2019). Analisis ini memfokuskan pada parameter teknis utama seperti kapasitas arus, suhu operasi, berat, kekuatan tarik, dan resistansi listrik.

Tabel 2. Data teknis konduktor yang terpasang dan konduktor HTLS alternatif [2]

Parameter	ACSR 125	ACSR 250	ACCC Helsinki	ACCC Copenhagen	ACFR 365/40	ACFR 415/40
Jenis Konduktor	Al + Steel	Al + Steel	Al + Composite	Al + Composite	Al + Fiber Core	Al + Fiber Core
Konstruksi Inti (jumlah)	7/1,92 mm	7/2,67 mm	1/5,97 mm	1/5,97 mm	7/2,8 mm	7/2,8 mm
Diameter keseluruhan (mm)	15,7	21,7	15,65	18,28	24,2	25,3
Luas penampang total (mm ²)	144,8	279	180,9	251,5	409	459
• Aluminium (mm ²)	124,6	240	152,9	223,5	365	414,8
• Inti (mm ²)	20,3	39,1	28	28	44,0	44,1
Breaking load (kN)	44,27	86,58	68,9	72,8	115	118,2
Berat nominal (kg/km)	506	921,5	471	661	1077	1214

DC Resistance @ 20°C (Ω/km)	0,23	0,11	0,1861	0,1279	0,0763	0,0674
Suhu kerja maksimum (°C)	80	80	180	180	180	180
Kapasitas arus (A)	558	634	802	1021	1460	1578
Berat (kg/km)	506	921,5	471	661	1077	1214
Modulus Elastisitas (GPa)	–	–	–	–	126	126
Koefisien muai panjang (°C)	–	–	–	–	$1,00 \times 10^{-6}$	$1,00 \times 10^{-6}$
Suhu kerja maks (°C)	80	80	180	180	180	180

Berikut merupakan kajian individual dan komparatif konduktor yang akan digunakan dalam proyek rekonduktoring segmen Suge Dukong:

1. ACSR 250

ACSR 250 adalah konduktor aluminium-konvensional yang saat ini digunakan secara luas di jaringan transmisi 66 kV. Keunggulannya:

- a. Kekuatan tarik tinggi (86,58 kN)
- b. Harga relatif lebih murah, namun ACSR 250 memiliki beberapa keterbatasan teknis yang memerlukan perhatian diantaranya :
 - 1) Suhu kerja maksimum hanya 80°C, menyebabkan peningkatan sag (andongan) signifikan saat overload.
 - 2) Kapasitas arus rendah (634 A), kurang cocok untuk kebutuhan rekonduktoring dengan proyeksi beban meningkat.
 - 3) Konduktor yang berat (921,5 kg/km) akan membatasi kapasitas struktur lama dan meningkatkan tekanan pada tower dan memerlukan penguatan struktur maupun pondasi.

Sehingga kurang direkomendasikan untuk rekonduktoring pada jalur eksisting dengan keterbatasan struktural dan permintaan beban yang meningkat.

2. ACCC Helsinki

Konduktor ACCC Helsinki memiliki opsi seimbang antara performa teknis, kompatibilitas dengan infrastruktur eksisting, dan efisiensi biaya proyek. Beberapa alasan utama pemilihannya adalah sebagai berikut:

- a. Berat konduktor yang ringan (471 kg/km) dan merupakan bobot konduktor paling ringan dalam daftar, mengurangi beban tarik dan vertikal pada struktur tower eksisting, sehingga minim kebutuhan penguatan struktur.
- b. Kapasitas arus cukup besar (802 A) yang mana dapat meningkatkan kapasitas hantar arus $\pm 50,12\%$ dari ACSR 125 (400 A), cukup untuk mengakomodasi proyeksi pertumbuhan beban sistem di Belitung tanpa overdesign.
- c. Suhu operasi hingga 180°C yang memungkinkan operasi pada beban puncak tanpa risiko sag berlebih atau kehilangan clearance minimum.
- d. Inti komposit (composite core) memberikan karakteristik termomekanik stabil terhadap fluktuasi suhu dan mencegah deformasi permanen.

Kendati breaking load (68,9 kN) lebih rendah dari ACSR maupun ACFR, nilainya masih mencukupi untuk kondisi bentang 200 – 250 meter yang lazim di jalur SUTT Suge

Dukong. ACCC Helsinki ideal digunakan pada sistem eksisting yang memerlukan peningkatan kapasitas sedang hingga tinggi, tanpa perlu investasi tambahan pada struktur tower atau ROW.

3. ACCC Copenhagen

ACCC Copenhagen menawarkan kapasitas arus lebih tinggi dari ACCC Helsinki (1021 A), menjadikannya kandidat kuat untuk sistem yang memerlukan peningkatan ampacity besar. Keunggulannya:

- a. Suhu kerja 180°C (HTLS class)
- b. Inti komposit ringan (661 kg/km) masih dalam batas toleransi tower lama

Namun, diameter keseluruhan (18,28 mm) dan berat lebih besar dari Helsinki, serta breaking load (72,8 kN) masih di bawah kebutuhan untuk bentang ekstrem. Konduktor ACCC Copenhagen cocok untuk rekonduktoring pada jalur dengan struktur yang cukup kuat dan beban tumbuh cepat, tetapi lebih berat dan mahal dibandingkan Helsinki sehingga hanya dipilih jika kebutuhan kapasitas lebih tinggi diperlukan.

4. ACFR 365/40 dan ACFR 415/40

Kedua konduktor ini merupakan tipe HTLS dengan fiber core, memiliki performa tertinggi secara teknis. Namun, dua keterbatasan utama yang menjadikan ACFR kurang direkomendasikan untuk proyek ini:

- a. Konduktornya sangat berat bahkan melampaui ACSR 250 yang tentunya membutuhkan penguatan tower, re-desain pondasi, dan meningkatkan biaya sipil secara signifikan.
- b. Overdesign untuk kebutuhan sistem saat ini yaitu dengan kapasitas 1.578 A tidak relevan untuk beban sistem 70 kV yang hanya membutuhkan peningkatan moderat.

Sehingga ACFR sangat cocok untuk sistem EHV (Extra High Voltage) atau proyek greenfield, namun kurang sesuai untuk rekonduktoring jalur eksisting di Belitung karena keterbatasan struktur.

Selanjutnya penulis membuat matriks evaluasi dan penilaian teknis. Adapun kriteria penilaian skornya yaitu sebagai berikut :

Tabel 3. Kriteria penilaian skor konduktor

Nilai	Kategori	Keterangan
5	Sangat Baik	Kinerja optimal, paling cocok untuk proyek
4	Baik	Kinerja sangat baik, bisa diterapkan dengan catatan kecil
3	Cukup	Layak dipertimbangkan, tapi ada beberapa keterbatasan
2	Kurang	Tidak ideal, hanya cocok jika opsi lain tidak memungkinkan
1	Tidak Memenuhi	Kinerja teknis buruk untuk kriteria tersebut

Berikut adalah ringkasan evaluasi berbobot terhadap masing-masing konduktor:

Tabel 4. Evaluasi bobot konduktor

Kriteria Evaluasi	Bobot	ACSR 250	ACCC Helsinki	ACCC Copenhagen	ACFR 365/40	ACFR 415/40
Kapasitas Arus	30%	1	3	4	5	5
Berat Konduktor	25%	2	5	4	2	1
Suhu Operasi Maksimum	15%	1	5	5	5	5
Breaking Load	10%	3	2	3	4	5
Kesesuaian Infrastruktur	20%	4	5	3	2	1
Total	100%	2,05	4,1	3,85	3,55	3,2

Skor akhir tertinggi diperoleh ACCC Helsinki (nilai total: 4,1/5), menjadikannya pilihan paling layak secara teknis dan praktis. Selanjutnya evaluasi bobot teknis bisa dilihat pada gambar 4.2. Evaluasi teknis terhadap lima jenis konduktor, yaitu ACSR 250, ACCC Helsinki, ACCC Copenhagen, ACFR 365/40, dan ACFR 415/40 adalah sebagai berikut :

a. Kapasitas arus (Ampacity)

Kapasitas arus menjadi salah satu indikator paling krusial dalam menentukan kinerja konduktor, khususnya dalam konteks rekonduktoring untuk peningkatan daya hantar. Berdasarkan radar chart, konduktor ACCC Helsinki, ACFR 365/40, dan ACFR 415/40 memperoleh skor maksimum (5), menandakan superioritasnya dalam hal kapasitas hantar arus. Sebaliknya, ACSR 250 menunjukkan keterbatasan pada aspek ini dengan skor lebih rendah. Hal ini menegaskan bahwa konduktor HTLS memiliki keunggulan signifikan dalam upaya meningkatkan kapasitas jaringan tanpa menambah jumlah sirkuit atau membangun tower baru.

b. Berat konduktor

Bobot konduktor memiliki implikasi langsung terhadap beban struktural pada menara transmisi dan komponen penunjang lainnya. Konduktor ACCC Copenhagen dan ACCC Helsinki menunjukkan skor lebih tinggi dibandingkan jenis ACFR dan ACSR, mencerminkan keunggulan dari sisi ringan-nya material komposit yang digunakan. Bobot yang lebih rendah akan mempermudah proses instalasi dan mengurangi stres mekanik pada struktur eksisting.

c. Suhu operasi maksimum

Kemampuan konduktor untuk beroperasi pada suhu tinggi menjadi parameter vital dalam pengoperasian beban puncak. Seluruh konduktor jenis HTLS menunjukkan skor optimal (5) pada kategori ini, menandakan kemampuannya untuk bekerja hingga 160 °C tanpa mengalami deformasi atau penurunan performa. ACSR 250, sebagai konduktor konvensional, memiliki batas suhu operasi yang lebih rendah sehingga tidak memperoleh skor maksimum.

d. Breaking load (Kekuatan tarik maksimum)

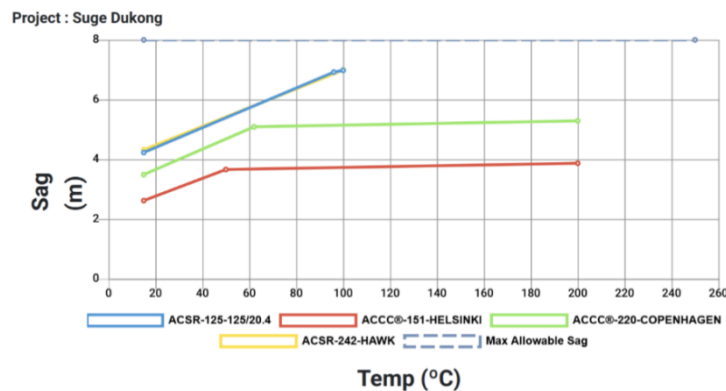
Breaking load menggambarkan kekuatan mekanik konduktor untuk menahan beban tarik akibat bentang panjang dan kondisi lingkungan ekstrem. Dalam hal ini, ACFR 415/40 menunjukkan performa terbaik dengan skor 5, diikuti oleh ACFR 365/40. Sebaliknya, konduktor berbasis ACSR dan ACCC menunjukkan nilai yang lebih rendah, mengindikasikan keterbatasan dalam hal kekuatan tarik dan ketahanan terhadap gaya eksternal.

e. Kesesuaian infrastruktur

Kesesuaian terhadap infrastruktur eksisting menjadi pertimbangan penting dalam proyek rekonduktoring. Konduktor ACSR 250 dan ACCC Helsinki memperoleh nilai tertinggi, menunjukkan bahwa penggunaan konduktor ini meminimalkan kebutuhan modifikasi terhadap tower, insulator, dan hardware lainnya. Sebaliknya, konduktor ACFR menunjukkan nilai yang lebih rendah karena memerlukan penyesuaian infrastruktur untuk instalasi dan pengoperasian optimal.

Konduktor ACCC Helsinki adalah pilihan paling seimbang untuk proyek rekonduktoring Suge–Dukong mengingat kapasitas hampir 2 kali lipat dari ACSR lama, selanjutnya andongan (sag) rendah, aman untuk clearance, beban menara lebih ringan serta

tidak perlu banyak modifikasi struktur, dan efisien untuk rekonduktoring tanpa penguatan tower. Sedangkan konduktor ACCC Copenhagen cocok bila proyeksi beban jangka panjang sangat tinggi, tapi konsekuensi beban menara lebih besar, dan konduktor ACSR Hawk kurang optimal karena meski kapasitas besar, bobot dan sag tinggi sehingga risiko terhadap struktur tower existing.



Gambar 2. Hubungan temperature dengan andongan (sag)

Kemudian dari analisa grafik CCP (Conductor Comparison Plot) yang menggambarkan hubungan antara temperatur konduktor ($^{\circ}\text{C}$) terhadap sag (andongan) dalam meter untuk beberapa jenis konduktor pada proyek Rekonduktoring SUTT Suge Dukong, untuk konduktor ACCC Helsinki merupakan konduktor terbaik dari sisi performa termomekanik (sag vs. suhu), karena menunjukkan sag paling rendah dan stabil bahkan pada suhu kerja maksimum 180°C . Penggunaan konduktor ini sangat direkomendasikan untuk rekonduktoring tanpa rekayasa ulang struktur tower, menjaga jarak aman terhadap ground clearance, dan mengakomodasi pertumbuhan beban masa depan.

Dengan demikian, pada pekerjaan rekonduktoring jalur transmisi terpasang dimungkinkan tidak diperlukannya perkuatan struktur tower beserta pondasinya. Selain itu, persyaratan jarak bebas di sepanjang jalur transmisi tetap masih bisa memenuhi persyaratan Permen ESDM No.13 Tahun 2025 (Mineral, 2025). Dengan mempertimbangkan parameter teknis, keterbatasan infrastruktur eksisting, serta proyeksi pertumbuhan beban, konduktor ACCC Helsinki direkomendasikan sebagai pilihan utama untuk proyek rekonduktoring SUTT Segmen Suge Dukong. Solusi ini:

- 1) Memenuhi kapasitas beban masa depan tanpa overdesign
- 2) Menjaga keandalan sistem dan efisiensi energi
- 3) Meminimalkan investasi struktural tambahan

Evaluasi teknis ini akan ditindaklanjuti pada analisis kelayakan ekonomi untuk memastikan keputusan pemilihan konduktor memberikan nilai keekonomian terbaik bagi PLN.

Penelitian yang dilakukan mengambil sampel kondisi aktual Sistem Kelistrikan Belitung pada waktu tertentu. Waktu dilakukannya simulasi ini berdasarkan pada waktu beban puncak yang mengacu pada data yang diperoleh dari PT PLN (Persero) ULTG Belitung yaitu terjadi pada tanggal 18 Februari 2025 pukul 18.00 WIB dengan total beban sistem 60,91 MW.

Tabel 5. Parameter pembangkit dan penghantar untuk simulasi

Parameter:	Parameter:
Generation: 60.91 MW	PLTD Pilang : 6,4 MW,
PLTU Suge #1 : 15 MW,	PLTD Padang : 7,95 MW,
PLTU Suge #2: 14,7 MW,	PLTBg Austindo : 1,38 MW,
MPP: 13 MW,	Megapower: 2,47 MW.
Beban Penghantar	Arus/Beban
PHT Suge – Dukong #1	176 A / 19.44 MW
PHT Suge – Dukong #2	176 A / 19.60 MW
PHT Dukong – Manggar #1	54 A / 5.91 MW
PHT Dukong – Manggar #2	54 A / 5.91 MW

Tabel 6. Parameter tegangan 66 kV dan 20 kV untuk simulasi

Gardu Induk	Tegangan
GI Suge	66.4 KV
GI Dukong	64.5 KV
GI Manggar	64.4 KV
GI Suge 20KV Rel A	20.3 KV
GI Suge 20KV Rel B	19.70 KV
GI Suge 20KV Rel C (MPP)	20.90 KV
GI Dukong 20KV Rel A	20.66 KV
GI Dukong 20KV Rel B	20.76 KV
GI Manggar 20KV Rel A	20.87 KV

Selanjutnya penulis menyamakan data realtime dengan model digsilent.

Name	Grid	Terminal StaCubic	Terminal Busbar	Bus T.	Active Power kW	Reactive Power kvar	Apparent Power kVA
PLTU SUGE 1	BELI...		BUS PLTU SU...	PV	15000.0	4790.9	15746.5
PLTU SUGE 2	BELI...		BUS PLTU SU...	PV	14700.0	3273.5	15060.1
MPP SUGE	BELI...		Terminal(2574)	PQ	13858.6	1539.4	13943.9
PLTD PILANG 10_CATERPILLAR 10	BELI...		Terminal(2635)	PQ	3000.0	609.2	3061.2
PLTD PADANG 02 - NIGATA 2	BELI...		A(3)	PQ	2000.0	1363.4	2420.5
PLTD PILANG 07_NIGATA 7	BELI...		Terminal(8)	PQ	1700.0	365.5	1738.8
PLTBG AUSTINDO JANGKANG 1	BELI...		Terminal(2575)	PQ	1150.0	1300.4	1735.9
PLTD PADANG 06 - CUMMINS 6	BELI...		A(10)	PQ	900.0	557.8	1058.8
PLTD PADANG 13 - CAT 13	BELI...		A(1)	PQ	850.0	526.8	1000.0
PLTD PADANG 15 - CAT 15	BELI...		A(8)	PQ	850.0	526.8	1000.0
PLTD PADANG 08 - CUMMINS 8	BELI...		A(2)	PQ	700.0	433.8	823.5
PLTD PADANG 09 - CUMMINS 9	BELI...		A(4)	PQ	700.0	433.8	823.5
MEGAPOWER PILANG 1	BELI...		Terminal(2)	PQ	500.0	242.2	555.6
MEGAPOWER PILANG 2	BELI...		Terminal(5)	PQ	500.0	242.2	555.6
MEGAPOWER PILANG 4	BELI...		Terminal(2588)	PQ	500.0	242.2	555.6
MEGAPOWER PILANG 5	BELI...		Terminal(2589)	PQ	500.0	242.2	555.6
MEGAPOWER PILANG 6	BELI...		Terminal(2590)	PQ	500.0	242.2	555.6
PLTD PADANG 10 - KOMATSU 10	BELI...		Terminal(2636)	PQ	500.0	309.9	588.2
PLTD PADANG 11 - KOMATSU 11	BELI...		Terminal(2637)	PQ	500.0	309.9	588.2
PLTD PILANG 01_KOMATSU 1	BELI...		Terminal(4)	PQ	500.0	101.5	510.2
PLTD PILANG 02_KOMATSU 2	BELI...		Terminal(3)	PQ	500.0	101.5	510.2
PLTD PADANG 03 - KOMATSU 3	BELI...		Terminal(2629)	PQ	500.0	309.9	588.2
PLTD PADANG 04 - KOMATSU 4	BELI...		Terminal(2630)	PQ	500.0	309.9	588.2

Gambar 3. Data real time yang diinput ke aplikasi digsilent

Berikut merupakan beberapa skenario simulasi menggunakan aplikasi digsilent yang mana ada dilakukan 4 simulasi Analisa aliran daya yang dilakukan.

- Simulasi untuk kondisi sebelum dilakukan rekonduktoring SUTT 66 kV Suge Dukong (operasi 2 penghantar Suge Dukong)

Hasil simulasi aliran daya Sistem Belitung sebelum rekonduktoring SUTT 66 kV Suge Dukong 1,2 pada tahun 2025 pada waktu beban puncak pembebanan pada penghantar Suge Dukong 1,2 masing – masing sebesar 44,29 % dan memenuhi kriteria keandalan N-1 dari kapasitas nominalnya. Berdasarkan hasil simulasi loadflow kondisi eksisting dengan beroperasinya penghantar Suge Dukong 1,2, tegangan pada sistem 66 kV GI Suge adalah 65,8 kV, kemudian GI Dukong adalah 64,2 kV dan tegangan di GI Manggar adalah 63,5 kV. Dan dari hasil simulasi digsilent diperoleh nilai susut daya yang dihasilkan sebesar 1128 kW.

b. Simulasi Untuk Kondisi Sebelum dilakukan Rekonduktoring SUTT 66 kV Suge Dukong (Operasi 1 Penghantar)

Hasil simulasi aliran daya Sistem Belitung sebelum rekonduktoring SUTT 66 kV Suge Dukong pada tahun 2025 pada waktu beban puncak pembebanan pada penghantar Suge Dukong beroperasi satu penghantar maka pembebanan di penghantar Suge Dukong mencapai sebesar 91,12 %. Kondisi pembebanan saat beroperasinya 1 penghantar Suge Dukong sudah mendekati overload sehingga perlu pembatasan pembebanan pada penghantar Suge Dukong. Mengingat penghantar SUTT Suge Dukong merupakan bukan barang baru dan sudah beroperasi dalam waktu yang lama maka untuk pola pembebanan pada satu penghantar harus menjadi perhatian dan dibatasi agar tidak terjadi kerusakan pada konduktor. Berdasarkan hasil simulasi loadflow kondisi eksisting dengan beroperasinya 1 penghantar Suge Dukong, tegangan pada sistem 66 kV GI Suge adalah 65,5 kV, kemudian GI Dukong adalah 62 kV dan tegangan di GI Manggar adalah 61,5 kV. Dan dari hasil simulasi digsilent diperoleh nilai susut daya yang dihasilkan sebesar 2172,2 kW.

c. Simulasi Untuk Kondisi Setelah dilakukan Rekonduktoring SUTT 66 kV Suge Dukong (Operasi 2 Penghantar)

Hasil simulasi aliran daya Sistem Belitung setelah rekonduktoring SUTT 66 kV Suge Dukong 1,2 pada tahun 2027 yaitu pada waktu beban puncak pembebanan pada penghantar Suge Dukong 1,2 masing – masing sebesar 24,38 % dan memenuhi kriteria keandalan N-1 dari kapasitas nominalnya. Berdasarkan hasil simulasi loadflow kondisi setelah rekonduktoring menggunakan konduktor ACCC Helsinki dengan beroperasinya penghantar Suge Dukong 1,2, tegangan pada sistem 66 kV GI Suge adalah 66,3 kV, kemudian GI Dukong adalah 64,9 kV dan tegangan di GI Manggar adalah 64,5 kV. Dan dari hasil simulasi digsilent diperoleh nilai susut daya yang dihasilkan sebesar 997,3 kW.

d. Simulasi Untuk Kondisi Setelah dilakukan Rekonduktoring SUTT 66 kV Suge Dukong (Operasi 1 Penghantar)

Hasil simulasi aliran daya Sistem Belitung setelah rekonduktoring SUTT 66 kV Suge Dukong pada tahun 2027 pada waktu beban puncak pembebanan pada penghantar Suge Dukong beroperasi satu penghantar maka pembebanan di penghantar Suge Dukong mencapai sebesar 38,7 %. Berdasarkan hasil simulasi loadflow kondisi setelah rekonduktoring menggunakan konduktor ACCC Helsinki dengan beroperasinya 1 penghantar Suge Dukong, tegangan pada sistem 66 kV GI Suge adalah 66,3 kV, kemudian GI Dukong adalah 64,2 kV dan tegangan di GI Manggar adalah 64,1 kV. Dan dari hasil simulasi digsilent diperoleh nilai susut daya yang dihasilkan sebesar 1189,4 kW.

Evaluasi Kelayakan Tekno Ekonomi Pada segmen transmisi 66 kV Suge – Dukong, dengan panjang jalur ± 20 kmr menggunakan konduktor existing ACSR 125 mm² dan earthwire GSW 55. Rencana konduktor akan dilakukan penggantian dengan konduktor

ACCC Helsinki. Dari hasil analisa yang telah dilakukan apabila dilakukan penggantian konduktor dengan ACCC Helsinki maka tower tidak diperlukan perkuatan.

Evaluasi kelayakan ekonomi merupakan tahap penting dalam menganalisis suatu proyek infrastruktur ketenagalistrikan. Analisis ini bertujuan menilai apakah investasi yang dilakukan akan memberikan keuntungan finansial dalam horizon umur proyek. Beberapa indikator yang digunakan dalam kajian ini adalah Net Present Value (NPV), Benefit Cost Ratio (BCR), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period (PBP).

Berikut merupakan data awal yang menjadi bahan evaluasi

1. Investasi awal (PVCO) : Rp 53.949.604.995
2. Present Value Benefit (PVCB) : Rp 71.626.749.552
3. Net Present Value (NPV) : Rp 17.677.144.557
4. Cash Inflow tahunan : Rp 6.856.865.321
5. Horizon analisis : 40 tahun
6. Discount rate (i) : $\pm 9,7\%$

Dari data di atas kita dapatkan analisisnya sebagai berikut :

- a. Net Present Value (NPV) yang diperoleh sebesar Rp 17,68 miliar (positif). Hal ini menunjukkan bahwa setelah memperhitungkan nilai waktu uang, proyek masih memberikan keuntungan finansial. NPV positif menandakan bahwa proyek ini lebih menguntungkan dibandingkan menempatkan modal pada investasi alternatif dengan tingkat diskonto yang sama.
- b. Benefit Cost Ratio (BCR) dari hasil perhitungan BCR adalah 1,33. Artinya, setiap Rp 1 biaya yang dikeluarkan mampu menghasilkan Rp 1,33 manfaat dalam nilai sekarang. Karena $BCR > 1$, proyek dapat dinyatakan ekonomis dan layak untuk dijalankan.
- c. Internal Rate of Return (IRR) berada pada kisaran $11,5\% - 12\%$, yang lebih tinggi daripada tingkat diskonto yang digunakan ($\pm 9,7\%$). Kondisi ini menunjukkan bahwa proyek dapat memberikan tingkat pengembalian yang lebih baik daripada biaya modal (cost of capital), sehingga layak secara finansial.
- d. Payback Period (PBP) tercapai pada 7,87 tahun (± 7 tahun 10 bulan). Artinya, modal awal akan kembali sebelum tahun ke-8. Meskipun PBP relatif panjang, namun masih dapat diterima mengingat umur proyek mencapai 40 tahun.

Evaluasi kelayakan menunjukkan bahwa proyek rekonduktoring ini layak secara finansial. NPV positif dan IRR di atas discount rate menegaskan adanya keuntungan jangka panjang. BCR yang lebih besar dari 1 memperkuat hasil bahwa proyek ini memberikan manfaat bersih. Walaupun payback period relatif lama, hal ini masih sejalan dengan karakteristik investasi infrastruktur transmisi yang memang berorientasi pada jangka panjang. Selain manfaat finansial, proyek rekonduktoring juga membawa benefit non-finansial seperti peningkatan kapasitas transfer daya, pengurangan risiko defisit energi, serta penurunan losses transmisi yang pada akhirnya mendukung keandalan sistem kelistrikan di Belitung.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penghantar ACSR 124 mm² yang saat ini digunakan pada segmen SUTT Suge–Dukong untuk pembebanannya sudah mendekati batas maksimal, khususnya pada kondisi operasi satu sirkuit (N-1) yang mencapai 91%, dan dapat mengancam keandalan suplai listrik di Sistem Belitung. Kondisi ini membuktikan bahwa

peningkatan kapasitas melalui rekonduktoring menjadi kebutuhan mendesak. Dari lima alternatif konduktor (ACSR 250, ACCC Helsinki, ACCC Copenhagen, ACFR 365/40, ACFR 415/40), hasil penilaian multi-kriteria menunjukkan bahwa ACCC Helsinki memperoleh nilai tertinggi (4,1/5). Konduktor ini unggul pada aspek kapasitas arus cukup besar (802 A), bobot paling ringan (471 kg/km), suhu operasi tinggi hingga 180°C, sag rendah dan sangat stabil, kesesuaian terbaik untuk tower eksisting tanpa memerlukan penguatan struktur, sehingga ACCC Helsinki merupakan pilihan paling ideal untuk rekonduktoring penghantar tanpa meningkatkan beban struktural menara. Hasil perhitungan sag–tension menunjukkan bahwa ACCC Helsinki tidak melampaui sag ACSR lama pada seluruh skenario suhu. Grafik CCP memperlihatkan kestabilan sag yang lebih baik dibandingkan alternatif lain sehingga memenuhi persyaratan jarak bebas (clearance) sesuai Permen ESDM No. 13/2025. Hal ini memastikan bahwa rekonduktoring dapat dilakukan tanpa penguatan tower atau modifikasi ROW. Simulasi aliran daya sebelum dan sesudah rekonduktoring menunjukkan hasil bahwa pembebanan penghantar setelah rekonduktoring turun drastis menjadi 24–39%, jauh di bawah kondisi overload sebelumnya, kemudian tegangan sistem membaik dan lebih stabil di seluruh GI, nilai susut daya menurun saat operasi 2 penghantar 1128 kW ke 997,3 kW dan saat operasi 1 penghantar dari 2172 kW ke 1189,4 kW, keandalan operasi N-1 meningkat signifikan sehingga proyek rekonduktoring memberikan dampak nyata terhadap peningkatan efisiensi, stabilitas tegangan, dan keandalan sistem transmisi Belitung. Dengan biaya investasi sebesar Rp 53,95 miliar, proyek ini menghasilkan manfaat finansial berupa pengurangan ENS, penurunan susut transmisi, penghematan biaya operasi sehingga didapat perhitungan NPV yang diperoleh sebesar Rp 17,68 miliar (positif), hasil perhitungan BCR adalah 1,33 (BCR > 1), hasil IRR berada pada kisaran 11,5% – 12%, yang lebih tinggi daripada tingkat diskonto yang digunakan ($\pm 9,7\%$), dan Payback Period tercapai pada 7,87 tahun hal ini membuktikan bahwa proyek ini sangat layak secara ekonomis dan memberikan return yang signifikan bagi PLN.

DAFTAR PUSTAKA

- (Persero), P. T. P. L. N. (2024). *Data PLN UPK Bangka Belitung*. PT. PLN (Persero).
- (Persero), P. T. P. L. N. (2025). *Data PLN ULTG Belitung*. PT. PLN (Persero).
- Ahsan, M., Baharom, M. N. R., Khalil, I. U., & Zainal, Z. (2025). Analysis of High Ampacity and Low Sag Conductors of 275 kV Overhead Transmission Lines Using Reconductoring Technique. *Electric Power Systems Research*, 246, 111719. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111719>
- Alnaser, S. W., & Ochoa, L. F. (2021). Optimal Transmission Switching in Power Systems. *Overhead Transmission Lines Dynamic Rating Estimation for Renewable Energy Integration Using Machine Learning*, 12, 100550. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.074>
- Duanaputri, R., Hermawan, A., & Arifah, Z. (2023). Analisis Aliran Daya Reconductoring Saluran Transmisi Paiton Kraksaan-Probolinggo 150 kV Terhadap Saluran Yang Terimbas. *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, 9(2), 64–69. <https://doi.org/10.33795/elposys.v9i2.618>
- Duque, A. J., Domínguez-García, J. L., Gemine, Q., & Gomis-Bellmunt, O. (2025). A Cost–Benefit Framework to Evaluate Capacity Upgrade Options in Overhead Line Transmission Planning. *Electric Power Systems Research*, 244, 111617. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111617>

- Fan, L., Chen, H., Zhao, S., & Wang, Y. (2024). Comparative Economic Analysis of Transmission Lines Adopted for Energy-Saving Conductors Considering Life Cycle Cost. *Inventions*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/inventions9040075>
- Fernández, E., Albizu, I., Bedialauneta, M. T., Mazon, A. J., & Leite, P. T. (2016). Dynamic Thermal Rating of Transmission Lines: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 634–654. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.109>
- Glaum, P., & Hofmann, F. (2023). Leveraging the Existing German Transmission Grid with Dynamic Line Rating. *Applied Energy*, 344, 121219. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121219>
- Huang, S., Wang, Y., Tang, Y., Ding, Y., & Ye, C. (2025). Dynamic Thermal Rating in Power Systems: A Comprehensive Review of Techniques, Implementation and Reliability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 215, 115576. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115576>
- Iqbal, M., & Armono, H. D. (2023). Pemakaian Temporary Tower untuk Optimalisasi Penyelesaian Rekonduktoring dan Penggantian Tower Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 KV. *Rekayasa*, 16(2), 257–264. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v16i2.21105>
- Jalilian, M., Parvizi, P., & Riba, J.-R. (2025). Evaluating the Mechanical and Thermal Performance of High-Temperature Low Sag (HTLS) Conductors: A Comparative Study of ACCC, ACSS, and ACSR Conductors. *Results in Engineering*, 25, 103808. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103808>
- Karimi, S., Nazarpour, D., & Golshannavaz, S. (2023). On Static vs. Dynamic Line Ratings in Renewable Energy Zones. *Energy Economics*, 128, 107139. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107139>
- Karimi, S., Nazarpour, D., & Golshannavaz, S. (2024). Dynamic Line Rating and Optimal Transmission Switching for Maximizing Renewable Energy Sources Injection with Voltage Stability Constraint. *Applied Energy*, 379, 124885. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124885>
- Mineral, K. E. dan S. D. (2025). *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 13 Tahun 2025*.
- Parvizi, P., Jalilian, M., & Dearn, K. D. (2025). Beyond Traditional Conductors: Aluminium Conductor Composite Core's Role in Next-Generation High Temperature-Low Sag Technologies – A Review. *Electric Power Systems Research*, 239, 111251. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111251>
- PLN. (2021). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030*. PT PLN (Persero).
- Riba, J.-R., Bogarra, S., Gómez-Pau, Á., & Moreno-Eguilaz, M. (2020). Upgrading of Transmission Lines by Means of HTLS Conductors for a Sustainable Growth: Challenges, Opportunities, and Research Needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110334. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110334>
- Soto, F., Riquelme, J., García-Triviño, P., & Palacios-García, E. J. (2019). Case Study of the Increase in Capacity of Transmission Lines in the Chilean System Through Probabilistic Calculation Model Based on Dynamic Thermal Rating. *Electric Power Systems Research*, 172, 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.03.007>
- Utomo, N. H. (2019). *Perencanaan dan Desain Saluran Transmisi 500 kV Tj. Redeb - Sabah Sehubungan dengan Ekspor Energi Listrik*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.