

Analisis Penerapan Metode Monte Carlo Dibandingkan Dengan Metode Deterministik Dalam Kajian Finansial Proyek Infrastruktur Ketenagalistrikan HVDC 500KV Interkoneksi Sumatera Jawa

Novan Prasetyo Wibowo¹, Iwa Garniwa²

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

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

Email: novan.pln@gmail.com, iwa.garniwa@itpln.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan listrik di Pulau Jawa tidak diimbangi oleh ketersediaan sumber energi primer yang mencukupi, sementara Pulau Sumatera memiliki potensi energi baru terbarukan (EBT) yang besar. Untuk menjembatani ketimpangan tersebut, dibutuhkan pembangunan proyek interkoneksi sistem kelistrikan melalui HVDC (High Voltage Direct Current) 500 kV antara Sumatera dan Jawa. Proyek ini merupakan bagian dari strategi transisi energi nasional dan menuntut investasi dalam skala besar, sehingga perlu dilakukan kajian kelayakan finansial yang komprehensif. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan finansial proyek Interkoneksi Sumatera–Jawa menggunakan dua pendekatan: metode deterministik dan simulasi Monte Carlo yang mempertimbangkan ketidakpastian variabel input. Hasil analisis menunjukkan tidak hanya nilai namun juga tingkat keyakinan kelayakan dari masing masing output IRR, NPV dan Payback Periode Simulasi Monte Carlo memberikan gambaran risiko yang lebih realistis dibandingkan pendekatan deterministik dan dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan investasi. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam perencanaan investasi infrastruktur ketenagalistrikan yang berkelanjutan dan berbasis risiko.

Kata kunci: HVDC, Interkoneksi Sumatera-Jawa, Kelayakan Finansial, Monte Carlo, Energi Terbarukan.

ABSTRACT

The increasing electricity demand in Java Island is not matched by sufficient availability of primary energy sources, while Sumatra Island has significant potential for renewable energy (RE). To bridge this imbalance, the development of a 500 kV High Voltage Direct Current (HVDC) interconnection project between Sumatra and Java is required. This project is part of the national energy transition strategy and demands large-scale investment, thereby necessitating a comprehensive financial feasibility study. This research aims to evaluate the financial feasibility of the Sumatra–Java Interconnection project using two approaches: the deterministic method and Monte Carlo simulation, which takes into account the uncertainty of input variables. The analysis results show not only the financial indicators but also the level of confidence in the feasibility of each output, namely IRR, NPV, and Payback Period. Monte Carlo simulation provides a more realistic depiction of risks compared to the deterministic approach and can serve as a basis for investment decision-making. This study is expected to serve as a reference for sustainable and risk-based power infrastructure investment planning.

Keywords: HVDC, Sumatra-Java Interconnection, Financial Feasibility, Monte Carlo, Renewable Energy.

Pendahuluan

Laju pertumbuhan kebutuhan energi listrik di pulau Jawa diprediksi akan terus meningkat. Oleh karena itu,antisipasi terhadap ketidak seimbangan antara tuntutan kebutuhan beban dan kemampuan pembangkitan sangat perlu dilakukan agar tidak mengganggu program pengembangan industri di pulau tersebut [1], [2]. Pulau Jawa yang merupakan pulau dengan tingkat kepadatan penduduk yang tinggi, mempunyai sumber daya energi primer yang sangat terbatas. Dalam mengantisipasi rencana pengembangan pembangkit batubara berskala besar, pulau Jawa terbentur dengan masalah ketersediaan lahan, dampak lingkungan dan tingkat polusi yang diizinkan sehingga rencana pengembangan pembangkit batubara berskala besar harus dibatasi [3], [4]. Hal ini semakin dipertegas dengan dikeluarkannya Peraturan Presiden (Perpres) No 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik yang salah satunya berisi pelarangan pengembangan PLTU baru kecuali PLTU yang telah ditetapkan dalam RUPTL sebelum berlakunya peraturan presiden ini.

Selanjutnya untuk mewujudkan energi bersih sebagai ratifikasi terhadap Paris Agreement dalam rangka mendukung pembangunan ekonomi yang berkelanjutan melalui transisi energi untuk terwujudnya emisi karbon nol bersih (NZE) [5], pengembangan sistem kelistrikan menggunakan pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT) menjadi suatu keharusan.

Namun sayangnya saat ini terdapat mismatch potensi EBT dan kebutuhan pasokan di Sistem Jawa. Potensi EBT yang ada di Pulau Jawa tidak dapat mencukupi proyeksi kebutuhan beban dimasa yang akan datang [6]. Dilain pihak, pulau Sumatera memiliki potensi pembangkitan EBT yang cukup besar dengan lokasi yang tersebar, antara lain PLTP, PLTA, PLTS, PLTB, dan PLTBio, dengan jumlah potensi pembangkitan terbesar adalah PLTA. PLTA dan PLTP merupakan pembangkit yang beroperasi stabil dan tidak memiliki emisi karbon [7], [8]. Interkoneksi Sumatera – Jawa (ISJ) merupakan proyek untuk mengevakuasi EBT, utamanya PLTA dan PLTP tersebar di pulau Sumatera, menuju pusat demand yang berada di pulau Jawa. Dengan demikian, proyek ISJ sebagai bagian dari program Green Enabling Supergrid, diharapkan dapat menjadi solusi mengatasi mismatch supply-demand yang ada di sistem Jawa sekaligus mengoptimalkan potensi EBT di luar Jawa dan Bali. Tujuan pembangunan Interkoneksi Sumatera - Jawa adalah penyediaan kebutuhan energi listrik di sistem kelistrikan Jawa – Bali, memaksimalkan bauran EBT, dan pemenuhan pembangkitan ramah lingkungan dan yang stabil dalam operasinya [9].

Interkoneksi Sumatera-Jawa merupakan bagian dari strategi besar dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUKN) 2024-2060. Proyek ini dijadwalkan untuk mulai beroperasi pada tahun 2031 dan memiliki peran penting dalam memenuhi permintaan listrik yang terus meningkat di Jawa dan Bali. Sumatera memiliki potensi energi baru dan terbarukan (EBT) yang besar, terutama panas bumi dan energi air. Interkoneksi ini memungkinkan energi tersebut disalurkan ke Jawa dan Bali, di mana permintaan energi listrik jauh lebih tinggi. Saat ini, Jawa dan Bali menyumbang sebagian besar permintaan listrik nasional, sementara potensi EBT di luar Jawa dan Bali belum dimanfaatkan secara optimal. Sistem interkoneksi ini akan membantu menyeimbangkan ketimpangan tersebut. Proyek interkoneksi Sumatera-Jawa (ISJ) menggunakan teknologi HVDC [10] memiliki keterkaitan erat dengan value framework yang telah ditetapkan dalam perencanaan investasi PT PLN (Persero). Proyek interkoneksi antara pulau masuk ke dalam program strategis jangka panjang 2024 – 2028 yang bertujuan untuk meningkatkan kapasitas EBT dalam upaya meningkatkan kontribusi pada keberlanjutan lingkungan. Dengan mengacu pada value framework, proyek ini tidak hanya relevan secara strategis dalam mendukung transisi energi, tetapi juga merepresentasikan implementasi nyata dari misi dan visi PLN dalam memenuhi kebutuhan stakeholder dan memperkuat keberlanjutan bisnis [11], [12].

Berdasarkan Kajian Kelayakan Proyek Pembangunan Interkoneksi Sumatera Jawa (PLN Divisi Perencanaan Sistem Ketenagalistrikan 2024) kondisi Sistem Saat Ini untuk menggambarkan kondisi kelistrikan Sistem Jamali dan Sumatera, maka data yang digunakan dalam kajian Interkoneksi Sumatera – Jawa adalah sebagai berikut: Data Evaluasi Operasi Bulanan (EOB) adalah data pendukung yang digunakan untuk menjelaskan kondisi kelistrikan eksisting menggunakan data Evaluasi Operasi Bulanan (EOB) bulan Mei 2024 menurut realisasi beban puncak, Evaluasi Operasi Tahunan (EOT) tahun 2023 untuk data pendukung lainnya yang belum dijelaskan di Evaluasi Operasi Bulanan (EOB) bulan Mei 2024, Rencana Operasi Tahunan (ROT) tahun 2024. Dimana kapasitas Terpasang dan Daya Mampu (Pembangkit, Transformer, Transmisi) adalah sebagai berikut:

Operasi sistem tenaga listrik Jamali dibagi menjadi 5 (lima) Unit Pelaksana Pengatur Beban (UP2B), antara lain UP2B Jakarta & Banten, UP2B Jawa Barat, UP2B Jawa Tengah dan DIY, UP2B Jawa Timur, serta UP2B Bali. Operasi sistem untuk masing-masing Area dikendalikan oleh satu *Area Control Center* (ACC), yaitu ACC Cawang untuk Area Jakarta dan Banten, ACC Cigereleng untuk Area Jawa Barat, ACC Ungaran untuk Area Jawa Tengah dan DIY, ACC Waru untuk Area Jawa Timur dan ACC Bali untuk Area Bali. Untuk seluruh sistem terdapat Jamali Control Center (JCC) di Gandul yang bertanggung jawab terhadap sekuriti sistem tenaga listrik secara keseluruhan, mengendalikan frekuensi, mengatur tegangan di sistem 500 kV, manajemen energi serta switching sistem transmisi 500 kV.

Sistem kelistrikan Sumatera dibagi ke dalam tiga region, yaitu subsistem Sumbagut (SBU), Sumbagteng (SBT), dan Sumbagsel (SBS). Subsistem Sumbagut mencakup Aceh dan Sumatera Utara, subsistem Sumbagteng mencakup Sumatera Barat, Riau dan Jambi dan subsistem Sumbagsel mencakup Sumatera Selatan, Bengkulu, Lampung dan Bangka. Pengendalian Sistem Sumatera terpadu serta pengaturan frekuensi dan switching instalasi penyaluran 275 kV oleh SCC (*Sumatera Control Center*) di Pekanbaru. Sedangkan pengendalian switching instalasi penyaluran 150 kV di Sumatera Bagian Utara dilaksanakan oleh UP2B Sumbagut di Medan, pengendalian switching instalasi penyaluran 150 kV di Sumatera Bagian Tengah dilaksanakan oleh UP2B Sumbagteng di Padang Pariaman dan pengendalian *switching* instalasi penyaluran 150 kV dan 70 kV di Sumatera Bagian Selatan oleh UP2B Sumbagsel di Palembang.

Berdasarkan Evaluasi Operasi Bulanan (EOB) pada bulan Mei 2024, cadangan Operasi 4.475 s.d. 9.929 MW. Dan mampu pasok rata-rata 36.043 MW dengan Reserve Margin rata-rata 51,73%. Komposisi DMN per energi primer mayoritas berasal dari batubara (60,4%), kemudian gas (30,1%), hidro 5,6%, panas bumi (2,7%), BBM (1%), dan surya (0,3%). Tabel di bawah memperlihatkan kapasitas DMN di Jamali dan nilai EAF (*equivalent availability factor*) pembangkit.

Tabel 0. Kapasitas DMN Berdasarkan Jenis Pembangkit di Jamali (Sumber: Evaluasi Operasi Bulanan (EOB) Mei 2024 – PLN UIP2B)

Pembangkit Per Energi Primer	Daya Mampu Neto (MW)	EAF (%)
Batubara	27.506	84,57
Gas Bumi	13.691	73,02
HSD	388	89,45
MFO	50	74,93

Air	2.552	95,16
Panas Bumi	1.207	87,64
Surya	145	99,99
Sistem Jamali	45.540	82,57

Berdasarkan Evaluasi Operasi Bulanan (EOB) pada bulan Mei 2024, Beban Puncak malam 6.901 MW s.d. 7.706 MW. Cadangan Operasi 190 MW s.d. 1.116 MW (termasuk RS) dan mampu pasok rata-rata 7.181 MW. Selama Mei 2024 pasokan daya 24 hari normal dan 7 hari siaga.

Tingkat pembebanan penghantar >50% atau sirkit tunggal radial, 4 ruas di subsistem SBU, tingkat pembebanan penghantar >50% atau sirkit tunggal radial, 7 ruas, dan tingkat pembebanan penghantar >50% atau sirkit tunggal radial, 13 ruas. Pembangunan HVDC Interkoneksi Sumatera Jawa mempunyai lingkup pekerjaan yang cukup luas, terdiri dari pembangunan Converter Station DC 500kV, SKTL 500kV, SUTTAS 500kV hal ini berdampak terhadap besarnya nilai investasi harus disiapkan oleh PT PLN (Persero) untuk dapat membangun utilitas tersebut. Nilai investasi yang cukup besar ini tentu akan memberikan dampak terhadap kondisi keuangan PT PLN (Persero), oleh karena itu perlu dilakukan kajian kelayakan finansial yang komperhensif untuk dapat memastikan investasi yang dikeluarkan oleh PT PLN (Persero) memenuhi parameter kelayakan secara finansial dan dapat memberikan benefit kepada perusahaan, akan tetapi saat ini umumnya kajian finansial yang dilakukan hanya menggunakan pendekatan deterministik, dimana parameter yang digunakan sebagai input untuk melakukan kajian finansial hanya menggunakan satu nilai data saja tanpa memperhitungkan risiko / unsur-unsur ketidakpastian pada setiap variabel input, sehingga output yang dihasilkan dari kajian finansial tersebut hanya menunjukkan nilai "best input estimate", sedangkan investasi infrastruktur ketenagalistrikan merupakan investasi jangka panjang yang kerap terhadap risiko/unsur-unsur ketidakpastian dalam realitanya. Maka tujuan penelitian ini adalah mengoptimalkan perhitungan kelayakan finansial usulan investasi dengan mempertimbangkan risiko / unsur ketidakpastian pada variabel input, membangun suatu simulasi model finansial menggunakan monte carlo untuk memastikan nilai investasi dapat memberikan benefit bagi perusahaan serta dapat menjadi referensi bagi manajemen di PT PLN (Persero) untuk mengambil keputusan pelaksanaan investasi, melakukan perbandingan hasil analisa kelayakan finansial metode deterministik dan metode monte carlo, menentukan ambang batas aman apabila terdapat perubahan variabel input akibat adanya risiko / unsur ketidakpastian.

Metode Penelitian

Metode yang akan digunakan pada penelitian ini adalah metode penelitian kuantitatif dengan melakukan pengujian terhadap hasil Kajian Kelayakan Finansial (KKF) yang terdapat dalam dokumen Kajian Kelayakan Proyek (KKP) invetasi pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan HVDC 500kV Interkoneksi Sumatera Jawa menggunakan simulasi monte carlo dengan dibantu software crystal ball. Metode monte carlo merupakan metode yang menggunakan pendekatan probabilistik sehingga metode Monte Carlo memungkinkan kita untuk memasukkan variabilitas dan ketidakpastian ke dalam model keuangan dengan menggunakan distribusi probabilitas. Dengan menjalankan simulasi ribuan kali menggunakan input variabel yang berbeda-beda, kita dapat memperoleh gambaran yang lebih lengkap tentang rentang hasil yang mungkin terjadi [13], [14]. Oleh karena ini dalam hal analisa kajian yang memiliki unsur ketidakpastian cukup tinggi, metode monte carlo merupakan alternatif yang paling tepat untuk dapat memberikan gambaran sesuai dengan realita. Adapun asumsi-asumsi yang digunakan di dalam perhitungan KKF yang dilakukan oleh PT PLN (Persero) dan terdapat didalam dokumen KKP adalah sebagai berikut:

Simulasi Monte Carlo

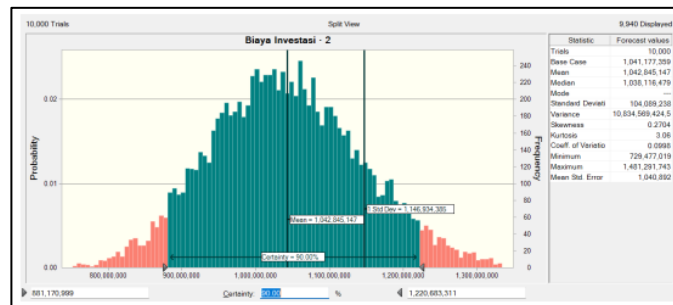
Setelah model perhitungan kelayakan finansial dibuat, maka selanjutnya akan dilakukan simulasi monte carlo terhadap model tersebut dengan menggunakan crystal ball. Simulasi ini dilakukan dengan melakukan perhitungan ulang / iterasi terhadap variabel-variabel input sebanyak 10.000 kali5 berdasarkan range nilai dan jenis distribusi probabilitas yang sudah ditentukan untuk masing-masing parameter. Hasil simulasi ini akan menghasilkan data probabilitas nilai variabel output dengan mempertimbangkan unsur-unsur ketidakpastian pada masing-masing variabel input secara bersamaan, selain itu hasil simulasi ini diharapkan dapat membantu manajemen PT PLN (Persero) dalam memahami tingkat risiko dari investasi sehingga proses pengambilan keputusan yang akan dilakukan akan semakin akurat. Pada tahapan perbandingan hasil ini akan dilakukan perbandingan hasil analisa kelayakan finansial dengan menggunakan metode monte carlo dengan analisa finansial yang menggunakan metode deterministik yang terdapat di dalam dokumen KKP. Pada analisa sensitivitas di penelitian ini akan dilakukan simulasi untuk mendapatkan prosentasei tingkat keyakinan variabel output dengan melakukan penyesuaian pada beberapa variabel input yang memiliki risiko perubahan cukup tinggi.

Hasil Dan Pembahasan

Sesuai dengan dokumen Kajian Kelayakan Proyek (KKP) Pembangunan Interkoneksi Sumatera Jawa, didapatkan hasil kelayakan finansial sesuai dengan yang ditunjukkan. Namun perhitungan kajian kelayakan finansial yang dilakukan masih menggunakan metode deterministik, sehingga perlu dilakukan pengujian apabila terdapat unsur ketidakpastian/risiko pada variabel input yang telah ditentukan.

**Parameter Statistik Variabel Input
 Biaya Investasi**

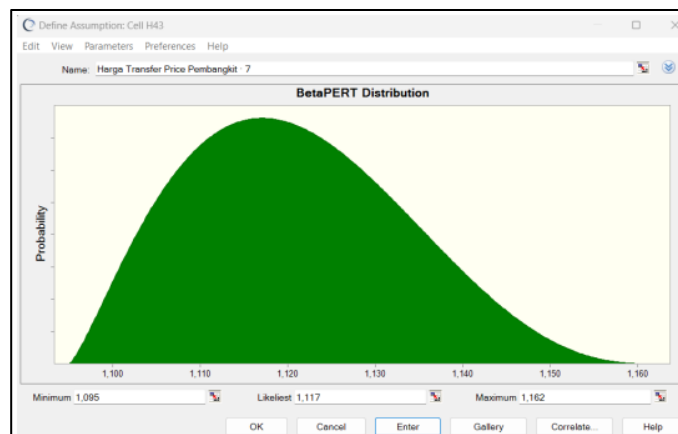
Biaya investasi yang dijadikan sebagai variabel input dalam perhitungan analisis kelayakan finansial tidak terbatas hanya pada biaya pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan, akan tetapi termasuk biaya pendukung seperti biaya pengadaan lahan, kompensasi ROW, pengurusan perizinan hingga biaya izin lingkungan (UKL/UPL/AMDAL) sebagaimana tercantum dalam tabel nilai biaya investasi ini dipengaruhi oleh berbagai risiko yang dapat berpotensi meningkatkan biaya seperti perubahan harga raw material, perubahan kebijakan pemerintah, perubahan standar teknis, hingga risiko sosial terkait proses pembebasan lahan / kompensasi ROW kepada masyarakat yang terdampak terhadap pembangunan utilitas, oleh karena itu perlu variabel ini termasuk dalam salah satu variabel yang gunakan sebagai acuan dalam analisis kelayakan finansial dengan menggunakan metode monte carlo. Nilai biaya investasi yang digunakan sebagai base case dalam perhitungan kelayakan investasi ini adalah sebesar Rp. 46.913.124.161,- dengan jenis distribusi probabilitas log-normal, sehingga dengan menetapkan certainty level pada nilai 90% didapatkan data parameter statistik untuk biaya investasi sebagai berikut.



Gambar 1. Parameter Statistik Variabel Input Biaya Investasi

Harga Penjualan Energi Listrik

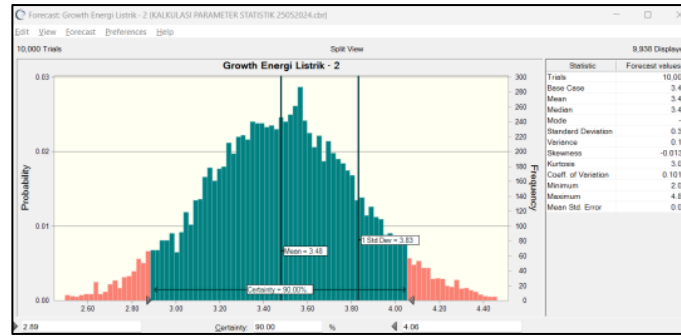
Untuk variabel input harga penjualan energi listrik dari pembangkit / harga transfer price pembangkit jenis distribusi yang digunakan adalah distribusi probabilitas Beta-PERT dengan penentuan nilai Base Case sesuai dokumen Power Purchase Agreement (PPA) / Perjanjian Jual Beli Tenaga Listrik (PJBT) dan penentuan nilai Optimistic dan Pesimistic sesuai dengan data analisa sensitivitas yang terdapat dalam dokumen KKP sebagai berikut:



Gambar 2. Distribusi Probabilitas Variabel Input Pembelian Biaya Listrik Dari Pembangkit

Kenaikan Biaya Operasional dan Pemeliharaan

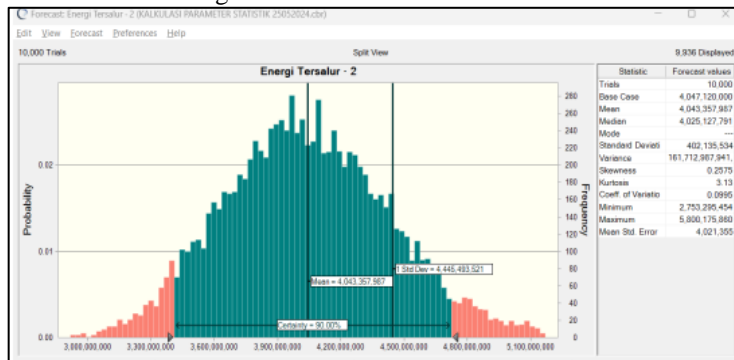
Kenaikan Biaya Operasional dan Pemeliharaan menjadi salah satu variabel input yang digunakan dalam analisis kelayakan finansial dengan menggunakan simulasi monte carlo, karena memiliki unsur ketidakpastian/risiko yang cukup tinggi. Salah satu risiko utama adalah seberapa banyak gangguan dan seberapa besar tingkat keparahan adanya kerusakan peralatan yang perlu dilakukan pergantian, Risiko ekonomi, seperti fluktuasi harga, biaya teknologi baru, risiko teknis terkait keandalan dan keamanan jaringan listrik serta integrasi sumber energi terbarukan, juga dapat mempengaruhi biaya operasional dan pemeliharaan secara keseluruhan. Distribusi probabilitas yang digunakan untuk variabel ini adalah distribusi normal sehingga dengan menetapkan certainty level 90%, didapatkan parameter nilai statistik sebagai berikut.



Gambar 3. Parameter Statistik Variabel Input Growth

Energi Listrik Tersalur

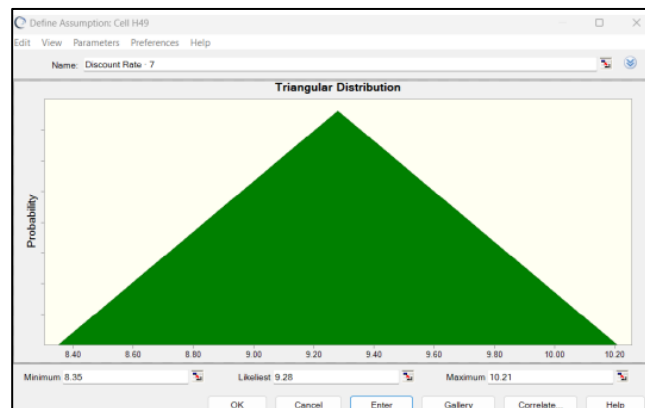
Nilai energi listrik tersalur yang digunakan dalam perhitungan kelayakan finansial disesuaikan dengan pola operasi yang terdapat dalam perhitungan Kajian Kelayakan Operasional yang terdapat dalam KKP dimana trafo IBT 1 dan IBT 2 dibebani sebesar 60%. Dalam analisa ini data energi listrik tersalur ke pelanggan digunakan untuk melakukan estimasi pendapatan dari hasil penjualan energi listrik sehingga dapat memberikan gambaran lebih akurat dalam proses pengambilan keputusan strategis. Nilai energi listrik tersalur ke pelanggan juga dipengaruhi risiko-risiko yang dapat mengganggu stabilitas dan kontinuitas pasokan listrik seperti risiko gangguan pada infrastruktur jaringan transmisi / distribusi [15], cuaca ekstrem atau bencana alam serta risiko operasional terkait manajemen dan pengelolaan jaringan yang dapat menyebabkan nilai energi listrik yang disalurkan ke pelanggan tidak sesuai dengan asumsi yang sudah ditetapkan di awal [16]. Jenis distribusi probabilitas yang digunakan dalam variabel ini adalah Log-Normal sehingga dengan menetapkan certainty level 90%, didapatkan parameter nilai statistik sebagai berikut.



Gambar 4. Parameter Statistik Variabel Input Energi Listrik Tersalur

Tingkat Suku Bunga

Tingkat suku bunga adalah salah satu variabel kunci dalam perhitungan analisa kelayakan finansial suatu proyek sebagai komponen penting dalam perhitungan nilai sekarang bersih (Net Present Value/NPV) dan tingkat pengembalian internal (Internal Rate of Return/IRR). Nilai base case yang digunakan disesuaikan dengan nilai Weighted Average Cost of Capital (WACC) PLN tahun 2022 sebesar 10,80%, fluktuasi tingkat suku bunga dalam perhitungan analisa kelayakan finansial juga dapat mempengaruhi kelayakan sebuah usulan investasi, oleh karena itu pada penelitian ini nilai optimistic dan pesimistic yang digunakan adalah 10,208% dan 8,35% berturut-turut sesuai dengan data analisa sensitivitas yang terdapat di dalam KKP dengan distribusi probabilitas triangular.



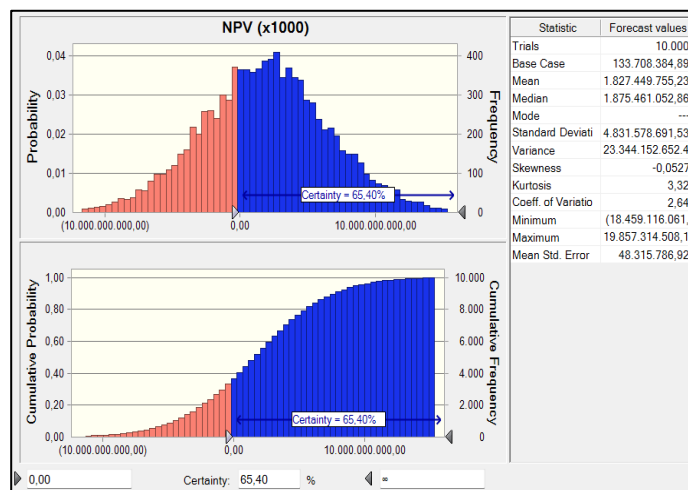
Gambar 5. Distribusi Probabilitas Variabel Input Tingkat Suku Bunga

Simulasi Monte Carlo Variabel Output

Pada penelitian ini akan dilakukan perhitungan analisa kelayakan finansial pembangunan HVDC 500 kV Interkoneksi Sumatera Jawa beserta Outlet 150 kV-nya menggunakan metode monte carlo untuk mendapatkan parameter output berupa nilai IRR, NPV dan Payback Period dengan menggunakan asumsi parameter. Simulasi dilakukan sebanyak 10.000 kali dengan menggunakan software crystal ball yang terintegrasi dengan microsoft excel. Sebelum dilakukan simulasi menggunakan metode monte carlo penulis membuat model perhitungan kajian kelayakan finansial berdasarkan parameter-parameter yang telah ditentukan, model perhitungan ini merepresentasikan nilai-nilai parameter input menjadi sebuah estimasi nilai cash in dan cash out dari rencana investasi ini.

Analisis Hasil Simulasi Nilai Net Present Value (NPV)

Perhitungan nilai NPV dilakukan dengan melakukan perubahan nilai beberapa variabel input sesuai dengan range distribusi probabilitas masing-masing variabel akibat adanya unsur ketidakpastian/risiko, hasil simulasi perhitungan NPV sebagai berikut :

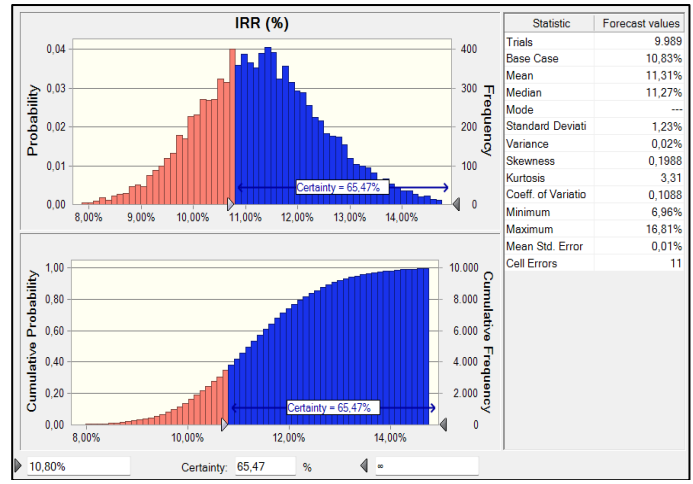


Gambar 6. Hasil Simulasi Monte Carlo Pada Parameter NPV

Pada gambar 6 terdapat bar chart yang berwarna hijau dan merah, bar chart hijau menunjukkan probabilitas nilai NPV > 0 sedangkan bar chart merah menunjukkan probabilitas nilai NPV < 0. Berdasarkan hasil simulasi tersebut dapat dilihat probabilitas nilai NPV > 0 adalah sebesar 65,40% dengan nilai NPV optimum yang ditunjukkan pada nilai mean sebesar Rp. 1.827.449.755,- sehingga dari hasil simulasi tersebut dapat disimpulkan nilai investasi ini sudah layak namun tingkat risiko masih cukup tinggi. Dengan menggunakan metode monte carlo juga dapat dilakukan kuantifikasi terhadap tingkat probabilitas nilai NPV. Selain mendapatkan nilai mean dalam simulasi monte carlo menggunakan crystal ball juga menampilkan nilai standart deviasi sebesar Rp. 4.831.578.691,- yang berarti hasil data keuntungan/ proyeksi finansial bisa berfluktuasi sekitar ± Rp 4,8 miliar dari rata-ratanya. Semakin besar angka ini relatif terhadap rata-rata, semakin tinggi pula tingkat risiko dan ketidakpastian dalam data. Selain itu dalam hasil simulasi juga menunjukkan nilai variance sebesar Rp.23.344.152.652,- yang menunjukkan tingkat penyebaran hasil finansial yang besar. Namun karena varians menggunakan satuan kuadrat, Semakin besar variance, semakin besar pula ketidakpastian hasil investasi. Dalam hasil simulasi juga terdapat data koefisien variansi yaitu seberapa besar standar deviasi dibandingkan dengan rata-ratanya. Koefisien variansi ini menunjukkan indikator risiko relatif yaitu semakin tinggi koefisien variansi maka semakin besar risiko relatif [17], [18]. Artinya hasil yang diperoleh sangat fluktuatif terhadap rata-rata yang berarti investasi/proyek tidak stabil. Dan semakin rendah koefisien variansi maka semakin kecil risiko relatif. Artinya hasil lebih konsisten terhadap rata-rata yang berarti investasi/proyek lebih stabil [19], [20].

Analisis Hasil Simulasi Nilai Internal Rate of Return (IRR)

Perhitungan IRR juga dilakukan dengan asumsi yang sama dengan perhitungan nilai NPV, simulasi monte carlo dilakukan untuk mendapatkan nilai probabilitas IRR > dari nilai WACC PT PLN (Persero) sesuai dengan dokumen KKP yaitu sebesar 10,80%. Hasil simulasi perhitungan nilai IRR sebagai berikut :

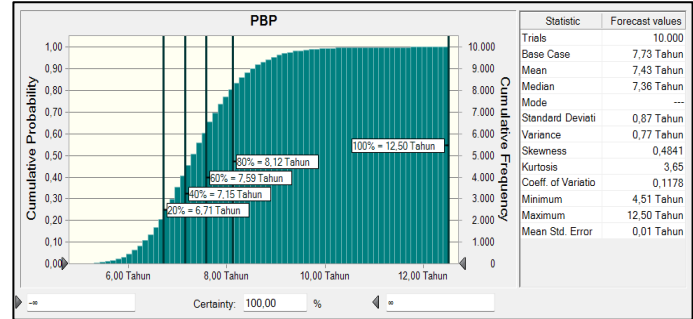


Gambar 7. Hasil Simulasi Monte Carlo Pada Parameter IRR

Berdasarkan simulasi pada gambar 7 didapatkan hasil probabilitas nilai IRR setelah dilakukan simulasi sebanyak 10.000 kali. Nilai optimum IRR adalah sebesar 11,31%, hasil simulasi menunjukkan, setelah memasukkan unsur ketidakpastian/risiko pada beberapa variabel input sesuai tabel. tingkat keyakinan IRR > WACC (10,80%) adalah sebesar 65,47%, dengan demikian dapat diartikan dari 10.000 kali percobaan perhitungan dengan kombinasi perubahan pada beberapa variabel input tingkat keyakinan investasi tersebut masih sangat berisiko terhadap adanya perubahan situasi finansial dimasa depan.

Analisis Hasil Payback Period (PbP)

Perhitungan hasil payback period juga dilakukan untuk mendapatkan waktu pengembalian investasi yang paling optimal dengan mempertimbangkan setiap potensi risiko yang akan terjadi dalam pelaksanaan investasi [21]. Data ini diperlukan untuk dijadikan salah satu pertimbangan proses untuk pengambilan keputusan pelaksanaan investasi. Hasil simulasi perhitungan payback period adalah sebagai berikut.

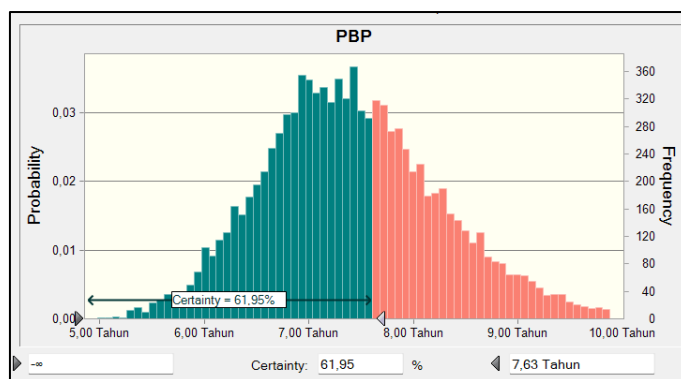


Gambar 8. Hasil Simulasi Monte Carlo Pada Parameter Payback Period

Berdasarkan hasil simulasi perhitungan Payback Period sebanyak 10.000 kali didapatkan nilai probabilitas yang dibagi kedalam percentile sebagai berikut :

1. Probabilitas nilai Payback Period selama 4,51 tahun adalah sebesar 0%
2. Probabilitas nilai Payback Period selama 6,71 tahun adalah sebesar 20%.
3. Probabilitas nilai Payback Period selama 7,15 tahun adalah sebesar 40%.
4. Probabilitas nilai Payback Period selama 7,59 tahun adalah sebesar 60%.
5. Probabilitas nilai Payback Period selama 8,12 tahun adalah sebesar 80%.
2. Probabilitas nilai Payback Period selama 12,50 tahun adalah sebesar 100%.

Dari hasil tersebut, rata-rata tingkat pengembalian investasi adalah sebesar 7,43 tahun yang masuk ke dalam percentile 60%. Nilai ini sudah mewakili mayoritas hasil simulasi sehingga apabila proyek pembangunan infrastruktur dapat diselesaikan sesuai jadwal COD pada tahun 2026, maka Break Event Point (BEP) dapat diproyeksikan pada akhir tahun 2034. Rata-rata tingkat pengembalian investasi dari hasil simulasi 10.000 kali monte carlo ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9. Rata-rata Tingkat Pengembalian Investasi

Perbandingan Metode Monte Carlo Dengan Metode Deterministik

Setelah dilakukan simulasi, perbandingan hasil analisa kelayakan finansial menggunakan metode deterministik dan metode monte carlo dapat terlihat pada Tabel 2:

Tabel 2. Perbandingan Hasil Analisa Kelayakan Finansial Metode Deterministik Dengan Metode Monte Carlo

Variabel Output	Satuan	Metode Deterministik (Dokumen KKP)	Metode Monte Carlo		Selisih
			Nilai	Tingkat Keyakinan	
Net Present Value (NPV)	IDR	133.708.384,89	1.827.449.755,23	65,40%	1.693.741.370,34
Internal Rate of Return (IRR)	%	10,38%	11,31%	65,47%	0,48%
Payback Period	Tahun	7,73	7,43	61,95%	0,3

Dari Tabel 2 di atas, didapatkan selisih nilai parameter output yang dihasilkan oleh metode deterministik dan metode monte carlo, perbedaan tersebut dikarenakan pada metode deterministik hanya menggunakan satu titik asumsi pada variabel input, sedangkan pada metode monte carlo variabel input yang diproses oleh model finansial merupakan range nilai sesuai dengan jenis distribusi probabilitas masing-masing variabel, sehingga output yang dihasilkan tidak hanya nilai optimum variabel output, namun juga prosentase tingkat keyakinan terhadap hasil tersebut.

Perhitungan Analisa Sensitivitas

Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan pada Tabel 2, dengan kondisi variabel input yang digunakan menggunakan nilai base case sesuai Tabel dapat disimpulkan investasi pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan HVDC 500 kV Interkoneksi Sumatera Jawa beserta layak dengan tingkat keyakinan >65%. Akan tetapi pada penelitian ini tetap dilakukan analisa sensitivitas dengan memperlebar range kemungkinan terjadinya ketidakpastian terhadap beberapa parameter input. Analisa sensitivitas dilakukan dengan melakukan simulasi penambahan biaya investasi, penurunan nilai jual energi listrik dan penurunan nilai energi tersalurkan ke pelanggan secara bertahap hingga total 15%. Analisa sensitivitas ini bertujuan untuk mendapatkan prosentase tingkat keyakinan nilai NPV positif dan nilai IRR lebih besar dari WACC, hasil analisa sensitivitas ditunjukkan pada Tabel 3 sebagai berikut:

Tabel 3. Hasil Analisan Sensitivitas Terhadap Perubahan Biaya Inventasi, Harga Jual dan Energi Tersalur

Variasi Output	Biaya Investasi, Harga Penjualan Listrik, Energi Tersalur	Biaya Investasi, Harga Penjualan Listrik, Energi Tersalur	Biaya Investasi, Harga Penjualan Listrik, Energi Tersalur	Biaya Investasi, Harga Penjualan Listrik, Energi Tersalur
	Base Case	Biaya Investasi + 5% Harga Jual & Energi – 5%	Biaya Investasi + 10% Harga Jual & Energi – 10%	Biaya Investasi + 15% Harga Jual & Energi – 15%
Internal Rate of Return (IRR) >	65,47%	53,15%	47,73%	38,83%

WACC				
Net Present Value (NPV) Positif	65,40%	53,12%	47,63%	38,72%

Pada simulasi analisa sensitivitas, dilakukan penambahan nilai biaya investasi, penurunan nilai growth dan penurunan estimasi energi tersalur kepelanggan secara bertahap mulai 5% hingga 15% untuk mendapatkan hasil pada nilai sensitivitas berapa prosentase tingkat keyakinan terhadap IRR dan NPV masih dapat diterima. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa investasi pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan HVDC 500 kV Interkoneksi Sumatera Jawa sangat berisiko dengan kenaikan biaya investasi mendekati 5% dan penurunan energi tersalur hingga 5%, langsung berpengaruh terhadap prosentase keyakinan yang signifikan, hal ini ditunjukkan dengan hasil probabilitas nilai IRR > WACC dan NPV positif turun signifikan pada angka < 60%, sehingga pelaksanaan investasi direkomendasikan untuk tidak dilanjutkan jika terdapat perubahan pada variable input mendekati 5%.

Untuk dokumen Kajian Kelayakan Proyek yang dibuat oleh PLN dilakukan juga pengujian sensitivitas dengan hasil bahwa Ketika biaya investasi naik sebesar 1% dari nilai rencana awal proyek, output dari IRR turun menjadi 10,80% dan nilai NPV menjadi Rp. – 8.207.085,39 dimana jika NPV < 0 dianggap proyek tersebut sudah tidak layak.

Simpulan

Penelitian ini melakukan evaluasi kelayakan finansial atas rencana investasi pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan dengan pendekatan yang berbeda dari metode yang digunakan dalam dokumen studi kelayakan proyek sebelumnya. Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah disampaikan pada bab sebelumnya, dapat disimpulkan beberapa hal yakni dengan menggunakan simulasi monte carlo dalam melakukan analisis kelayakan finansial suatu rencana investasi, dapat dilakukan kuantifikasi tingkat keyakinan hasil variabel output terhadap kriteria kelayakannya masing-masing, simulasi monte carlo terhadap beberapa variabel input secara bersamaan dapat menggambarkan kondisi yang lebih realistis pada perhitungan analisa sensitivitas dibandingkan dengan menggunakan metode deterministic, sesuai hasil perhitungan analisa sensitivitas yang telah dilakukan, ambang batas aman kenaikan biaya investasi, penurunan Growth dan penurunan energi tersalur yang masih dapat diterima adalah sebesar 5% terhadap nilai base case (asumsi awal).

Penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan memperhatikan beberapa hal, sebagai berikut yaitu perlu dilakukan analisis risiko secara komperhensif untuk mendapatkan variabel- variabel yang memiliki unsur ketidakpastian / risiko yang paling berdampak terhadap hasil perhitungan kelayakan finansial. Metode ini dapat dijadikan tools dalam menghitung kelayakan finansial rencana investasi infrastuktur ketenagalistrikan di lingkungan PT PLN (Persero).

Daftar Pustaka

- [1] N. M. P. Rahmayanti, D. A. N. Sriastuti, and P. Aryastana, "Fakultas teknik universitas wiraraja sumenep - madura," *J. "MITSU" Media Inf. Tek. Sipil*, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, 2021.
- [2] D. Olojede, S. King, and I. Jennions, *Application of machine learning in power grid fault detection and maintenance*, vol. 8, no. 1. 2025. doi: 10.1186/s42162-025-00574-w.
- [3] Y. Azmi, Y. W. Prasetyo, and D. A. Purnomo, "Penerapan Metode Monte Carlo Pada Penjadwalan Proyek Untuk Pengelolaan Risiko dan Optimasi Waktu Proyek (Studi Kasus : Renovasi Kantor Depo Mekanik Daop IX Jember)," *Media Konstr.*, vol. 10, no. 2, pp. 201–214, 2025, doi: 10.33772/jmk.v10i2.149.
- [4] F. Li *et al.*, "A Comprehensive Review on Energy Storage System Optimal Planning and Benefit Evaluation Methods in Smart Grids," *Sustain.*, vol. 15, no. 12, pp. 1–25, 2023, doi: 10.3390/su15129584.
- [5] Y. Huang *et al.*, "Linearized AC power flow model based interval total transfer capability evaluation with uncertain renewable energy integration," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 154, no. September 2022, p. 109440, 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109440.
- [6] D. Febrianti and B. D. R. Tripoli, "Penjadwalan Proyek Konstruksi Dengan Penerapan Simulasi Monte Carlo," *J. Tek. Sipil Univ. Teuku Umar*, vol. 7, no. 1, pp. 102–110, 2021, [Online]. Available: <http://jurnal.utu.ac.id/jtsipil/article/view/3274>
- [7] V. Venizelou and A. Poullikkas, "Trend Analysis of Cross-Border Electricity Trading in Pan-European Network," *Energies*, vol. 17, no. 21, 2024, doi: 10.3390/en17215318.
- [8] R. S. D. Calder, C. S. Robinson, and M. E. Borsuk, "Total Social Costs and Benefits of Long-Distance Hydropower Transmission," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 56, no. 24, pp. 17510–17522, 2022, doi: 10.1021/acs.est.2c06221.
- [9] M. Aldi Imawan and M. Nuruddin, "Teknika 18 (1): 67-80 Analisis Resiko Proyek Menggunakan Metode FMEA Dan Simulasi Monte Carlo Forest Cerme," *Julyxxxx*, vol. x, No.x, no. x, pp. 1–5, 2024.

- [10] A. A. Eajal *et al.*, “A Bayesian Approach to the Reliability Analysis of Renewables-Dominated Islanded DC Microgrids,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 5, pp. 4296–4309, 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3056314.
- [11] N. A. Brohi, G. Thirunavukkarasu, M. Seyedmahmoudian, K. Ahmed, A. Stojcevski, and S. Mekhilef, “Advances in Hosting Capacity Assessment and Enhancement Techniques for Distributed Energy Resources: A Review of Dynamic Operating Envelopes in the Australian Grid,” *Energies*, vol. 18, no. 11, pp. 1–33, 2025, doi: 10.3390/en18112922.
- [12] F. Heymann, R. Bessa, M. Liebensteiner, K. Parginos, J. C. M. Hinojar, and P. Duenas, “Scarcity events analysis in adequacy studies using CN2 rule mining,” *Energy AI*, vol. 8, no. March, p. 100154, 2022, doi: 10.1016/j.egyai.2022.100154.
- [13] C. A. Rahmada Putri and A. Wisnu Prabowo, “Simulasi Monte Carlo Dan Real Option Valuation Pada Perhitungan Kelayakan Finansial Dormitory Politeknik Astra,” *Technologic*, vol. 14, no. 1, 2023, doi: 10.52453/t.v14i1.424.
- [14] A. F. Rahman and I. N. Gita Indrawan, “Economic Potential of Renewable Energy with a Financial Feasibility Approach in Kupang, NTT,” *J. Indones. Sos. Teknol.*, vol. 5, no. 7, pp. 3196–3202, 2024, doi: 10.59141/jist.v5i7.1180.
- [15] B. Zhao, F. Han, Y. Luo, S. Lu, Y. Ji, and Z. Wang, “Probabilistic Load Forecasting for Green Marine Shore Power Systems: Enabling Efficient Port Energy Utilization Through Monte Carlo Analysis,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 14, no. 2, p. 213, 2026, doi: 10.3390/jmse14020213.
- [16] M. Useche-Arteaga, P. Gebraad, V. Lacerda, M. Cheah-Mane, and O. Gomis-Bellmunt, “Optimizing the Operation of Energy Islands with Predictive Nonlinear Programming – A case study based on the Princess Elisabeth Energy Island,” no. 2023, pp. 349–372, 2025, [Online]. Available: <https://wes.copernicus.org/preprints/wes-2025-102/>
- [17] F. Akbar, F. Anwar, and S. Widyastuti, “Implementasi Metode Monte Carlo Untuk Memprediksi Permintaan Produk Mebel Pada CV. Yoss Sindanglaut,” *INFOKOM J. Inf. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 51–59, 2023, [Online]. Available: <https://sinta.kemdikbud.go.id>
- [18] N. A. A. Rahman, S. N. Kamaruzzaman, and F. W. Akashah, “A Review of Optimization Techniques Application for Building Performance Analysis,” *Civ. Eng. J.*, vol. 8, no. 4, pp. 823–842, 2022, doi: 10.28991/CEJ-2022-08-04-014.
- [19] A. M. Hakami, K. N. Hasan, M. Alzubaidi, and M. Datta, “A Review of Uncertainty Modelling Techniques for Probabilistic Stability Analysis of Renewable-Rich Power Systems,” *Energies*, vol. 16, no. 1, 2023, doi: 10.3390/en16010112.
- [20] Guacira Costa de Oliveira, Renato Machado Monaro, Denis Vinicius Coury, Mario Oleskovicz, and Gilney Damm, “Probabilistic short circuit analysis for VSC-HVDC systems in a dedicated cloud infrastructure,” *Proceedings do XXIV Congr. Bras. Automática*, pp. 4142–4149, 2022, doi: 10.20906/cba2022/3738.
- [21] P. Colet, B. A. Carreras, J. M. Reynolds-Barredo, and D. Gomila, “Optimal Distribution Planning of Solar Plants and Storage in a Power Grid with High Penetration of Renewables,” *Energies*, vol. 18, no. 15, pp. 1–17, 2025, doi: 10.3390/en18153891.