BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memuat penelitian yang relevan, landasan teori, dan kerangka berpikir yang mendasari penelitian tentang analisis tekno-ekonomi perencanaan saluran kabel tegangan tinggi 150 kV berbasis kapasitas hantar arus dan risiko investasi. Susunan bab diselaraskan dengan alur penelitian yang meliputi pengumpulan data, pembentukan alternatif, pemodelan termal kapasitas hantar arus, estimasi biaya, pembuatan model regresi, penyusunan model risiko terintegrasi, simulasi Monte Carlo, dan penetapan rekomendasi akhir.

2.1 Penelitian yang Relevan

Kebutuhan pasokan energi listrik di wilayah perkotaan padat penduduk terus meningkat seiring dengan pertumbuhan infrastruktur dan ekonomi, mendorong penggunaan Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 150 kV bawah tanah sebagai solusi yang lebih disukai dibandingkan saluran udara konvensional di kawasan dengan keterbatasan ruang. Penelitian ini menempatkan diri dalam konteks tersebut dengan fokus spesifik pada evaluasi tekno-ekonomi instalasi SKTT pada kondisi instalasi HDD yang memiliki karakteristik termal berbeda dari instalasi konvensional.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengevaluasi kapasitas hantar arus (KHA) kabel bawah tanah dengan mempertimbangkan variasi resistivitas termal dan kedalaman tanam. Studi eksperimental dan numerik oleh Bustamante dkk. terhadap kabel tegangan menengah bawah tanah pada berbagai resistivitas dan kedalaman tanam mengonfirmasi bahwa nilai KHA menurun secara konsisten seiring meningkatnya resistivitas termal tanah, dengan tingkat akurasi standar IEC 60287-1 yang lebih tinggi dibandingkan standar sederhana seperti UNE 211435 pada kondisi kedalaman dangkal (Bustamante et al., 2019). Sejalan dengan itu, studi Rosdi, Rameli, dan Abdul Rahman mengenai analisis KHA kabel transmisi bawah tanah untuk aplikasi on-site menunjukkan bahwa penentuan

kapasitas hantar arus yang akurat menjadi prasyarat sebelum keputusan pemilihan metode instalasi dapat diambil secara tepat (Rosdi et al., 2024).

Pada kondisi lingkungan termal yang tidak homogen sepanjang jalur kabel — sebagaimana terjadi pada instalasi HDD dengan profil kedalaman bervariasi — Callender, Goddard, Dix, dan Lewin mengembangkan model ampacity fleksibel berbasis pemetaan konformal yang mampu menghitung distribusi suhu kabel pada lingkungan tanah berstratifikasi tanpa memerlukan simulasi numerik berbiaya komputasi tinggi (Callender et al., 2022). Model tersebut menegaskan bahwa ketidakseragaman sifat termal sepanjang jalur kabel bawah tanah merupakan tantangan analitis tersendiri yang memerlukan pendekatan khusus — sejalan dengan karakteristik jalur HDD Tambun II – Tx. Poncol yang menjadi objek penelitian ini. Kajian oleh Tang, Fang, Luo, dan kawan-kawan yang membandingkan metode analitik (standar IEC dan teori nm) dengan metode numerik (elemen hingga, elemen batas, beda hingga, dan volume hingga) dalam perhitungan ampacity kabel daya turut menegaskan bahwa koefisien resistansi termal tanah sangat sensitif terhadap kadar air dan dapat berubah signifikan seiring waktu, sementara metode analitik seperti IEC cenderung mengasumsikan permukaan tanah sebagai bidang isotermal dan resistivitas tanah sebagai nilai konstan — asumsi yang tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi lapangan aktual (J. Tang et al., 2022). Temuan ini memperkuat argumen bahwa pendekatan deterministik tunggal terhadap resistivitas termal tanah, sebagaimana lazim digunakan pada standar IEC 60287, berpotensi kurang merepresentasikan variabilitas kondisi lapangan — celah yang diisi oleh pendekatan probabilistik pada penelitian ini.

Tinjauan menyeluruh mengenai penilaian termal kabel dan dampaknya terhadap current rating oleh Enescu, Colella, dan Russo turut menegaskan bahwa akurasi penentuan ampacity sangat bergantung pada representasi kondisi termal aktual di lapangan, bukan sekadar asumsi nilai referensi standar (Enescu et al., 2020). Landasan metodologis serupa juga tercermin dalam pemetaan sistematis oleh Fariz, Nik Ali, Mohd Noor, dan kawan-kawan mengenai state-of-the-art dynamic thermal rating pada kabel bawah tanah, yang menyimpulkan bahwa sebagian besar penelitian dynamic thermal rating masih berfokus pada kondisi instalasi konvensional dan belum banyak menyentuh

kompleksitas instalasi trenchless seperti HDD (Fariz et al., 2026) — celah yang turut menjadi salah satu kebaruan penelitian ini.

Pada sisi mitigasi termal, studi Atoccsa dkk. mengenai optimasi ampacity kabel bawah tanah tegangan tinggi dengan thermal backfill menggunakan algoritma dynamic PSO dan strategi adaptif menunjukkan bahwa penggunaan material timbunan khusus secara signifikan dapat meningkatkan nilai KHA melalui penurunan resistivitas termal lokal (Atoccsa et al., 2024). Sejalan dengan itu, studi eksperimental Ocłoń, Bittelli, Cisek, dan kawan-kawan mengenai kinerja material thermal backfill baru untuk sistem kabel daya bawah tanah menunjukkan bahwa pemilihan formulasi material timbunan yang tepat dapat menurunkan resistivitas termal secara konsisten pada berbagai kondisi kadar air tanah (Ocłoń et al., 2016). Yang secara khusus relevan dengan penelitian ini adalah studi Czapp dan Ratkowski mengenai optimasi konfigurasi thermal backfill untuk mencapai target ampacity kabel tegangan tinggi tertentu, yang tidak hanya mengevaluasi aspek termal tetapi juga menyertakan analisis biaya material dan konstruksi sebagai fungsi dari geometri backfill yang digunakan (Czapp & Ratkowski, 2021). Pendekatan tekno-ekonomi terintegrasi semacam ini menjadi rujukan langsung bagi evaluasi thermal grout sebagai salah satu variabel desain dalam penelitian ini, meskipun Czapp dan Ratkowski (2021) tetap menggunakan pendekatan biaya deterministik, berbeda dengan pendekatan probabilistik berbasis Monte Carlo yang digunakan pada penelitian ini.

Pada aspek ketidakpastian teknis, studi Abootorabi Zarchi dan Vahidi menggunakan metode Hong Point Estimate untuk menganalisis ketidakpastian suhu kabel bawah tanah akibat variasi parameter tanah dan beban, dan menunjukkan bahwa pendekatan probabilistik memberikan gambaran risiko termal yang jauh lebih komprehensif dibandingkan perhitungan titik tunggal (Abootorabi Zarchi & Vahidi, 2021). Penelitian ini sejalan dengan pendekatan tersebut namun menggunakan simulasi Monte Carlo berbasis model regresi hasil CYMCAP sebagai alternatif terhadap metode Point Estimate, sehingga dapat mengakomodasi variabel ketidakpastian dalam jumlah lebih besar sekaligus terintegrasi dengan analisis finansial. Studi probabilistik lain oleh Shabani dan Vahidi menggunakan Monte Carlo dengan metode optimasi heuristik untuk menentukan kapasitas ampere optimal kabel daya dengan mempertimbangkan kendala ekonomi (Shabani & Vahidi, 2019); namun penelitian tersebut tidak menggunakan CYMCAP

sebagai engine termal berbasis IEC 60287 yang terintegrasi dalam satu alur evaluasi tekno-ekonomi, sebagaimana dilakukan pada penelitian ini.

Dari sisi ketidakpastian finansial, penerapan simulasi Monte Carlo telah direkomendasikan secara luas sebagai metode analitik untuk estimasi biaya proyek yang tidak pasti. Studi Peleskei, Dorca, Munteanu, dan Munteanu mengenai pertimbangan risiko dan estimasi biaya proyek konstruksi menggunakan simulasi Monte Carlo menunjukkan bahwa pendekatan ini secara efektif memitigasi risiko pembengkakan biaya dengan mengubah estimasi titik tunggal menjadi rentang probabilitas yang dapat diaudit (Peleskei et al., 2015). Studi penilaian risiko keuangan investasi pembangkit listrik dengan simulasi Monte Carlo turut menegaskan relevansi pendekatan ini pada sektor ketenagalistrikan secara spesifik, karena mampu mengakomodasi ketidakpastian harga bahan bakar, permintaan beban, dan biaya konstruksi secara simultan (Albana & Andrian Saputra, 2019). Sejalan dengan itu, studi Satria Surya dkk. mengenai penilaian investasi proyek ketenagalistrikan di sistem Jawa-Madura-Bali menunjukkan bahwa simulasi Monte Carlo mampu merepresentasikan ketidakpastian dari berbagai variabel seperti biaya investasi, faktor kapasitas pembebanan, dan tarif listrik dalam satu model probabilistik, menghasilkan rentang distribusi kelayakan yang lebih informatif dibandingkan kalkulasi deterministik (Satria Surya et al., 2021). Meski demikian, penelitian tersebut tidak menyertakan model termal kabel sama sekali — sebuah keterbatasan yang menjadi salah satu celah utama yang diisi oleh penelitian ini.

Pada konteks proyek instalasi HDD secara spesifik, studi Ratchapan mengenai analisis ampacity dan biaya modal untuk berbagai metode konstruksi kabel bawah tanah tegangan tinggi menunjukkan bahwa anggaran investasi metode pengeboran HDD bernilai sangat tinggi dan ultra-sensitif terhadap variansi harga material serta durasi pengerjaan, dengan titik terdalam jalur berperan sebagai bottleneck termal utama yang mendikte batasan kapasitas hantar seluruh sirkuit (Ratchapan et al., 2024). Penelitian tersebut memberikan dasar kuantitatif penting mengenai hubungan ampacity dan biaya modal pada instalasi HDD, namun belum mengintegrasikan analisis risiko stokastik ke dalam evaluasinya.

Penerapan pendekatan probabilistik dalam sistem tenaga listrik Indonesia sendiri telah dibuktikan relevansinya oleh Marbun, Atma, dan Surya, yang menggunakan

pendekatan stokastik untuk menentukan nilai kehilangan beban (value of lost load/VoLL) pada sistem Jawa-Madura-Bali, dan menunjukkan bahwa pemodelan probabilistik berbasis sampel acak mampu merepresentasikan ketidakpastian operasi sistem secara lebih menyeluruh dibandingkan pendekatan determinan konvensional (Marbun et al., 2023). Kerangka metodologis ini memperkuat relevansi simulasi Monte Carlo yang digunakan dalam penelitian ini — khususnya dalam mengintegrasikan ketidakpastian parameter termal (resistivitas tanah) dan ketidakpastian komponen biaya ke dalam satu model probabilistik yang koheren.

Perlu dibedakan pula posisi penelitian ini terhadap kajian keandalan kabel bawah tanah berbasis Monte Carlo yang berfokus pada risiko operasional pasca-instalasi. Studi Zhang, Wang, Ma, He, Wang, dan Zhang mengusulkan kerangka Monte Carlo dua-tahap (double sequence) untuk mengkuantifikasi risiko kegagalan akibat penuaan termal (thermal aging) pada kabel bawah tanah yang telah terpasang dan dioperasikan pada kondisi beban darurat (emergency loading) (Zhang et al., 2025). Penelitian tersebut menegaskan pentingnya pendekatan probabilistik dalam menilai keandalan kabel sepanjang masa operasinya, namun berada pada tahap siklus hidup proyek yang berbeda dari penelitian ini — yaitu evaluasi *in-service* setelah kabel terpasang, bukan evaluasi *pre-investment* pada tahap pemilihan desain sebelum konstruksi dilakukan. Penelitian ini justru menerapkan simulasi Monte Carlo pada tahap sebelum instalasi, secara simultan terhadap kriteria teknis (KHA) dan finansial (biaya investasi), sehingga kedua lini penelitian ini bersifat saling melengkapi: kerangka pre-investment yang dikembangkan dalam penelitian ini berpotensi menjadi masukan awal (*feed forward*) bagi model risiko penuaan semacam itu setelah desain kabel dipilih dan dipasang.

Sintesis dari tinjauan literatur yang dirangkum dalam Tabel 2.1, menggarisbawahi urgensi peleburan evaluasi teknis dan finansial yang sebelumnya terpisah menjadi satu kerangka evaluasi saluran kabel tegangan tinggi. Berbeda dari penelitian Atoccsa dkk. (2024) dan Czapp serta Ratkowski (2021) yang hanya mengevaluasi aspek termal dan biaya deterministik tanpa risiko stokastik, penelitian Satria Surya dkk. (2021) yang hanya mengevaluasi kelayakan investasi tanpa model termal spesifik, penelitian Abootorabi Zarchi dan Vahidi (2021) yang mengevaluasi ketidakpastian termal namun tanpa dimensi finansial, serta penelitian Ratchapan dkk. (2024) yang belum mengintegrasikan analisis

risiko stokastik, penelitian ini bermaksud mengisi celah riset tersebut dengan menempatkan pemodelan ketahanan termal KHA berbasis model non-homogen sebagaimana ditegaskan oleh Callender dkk. (2022), mitigasi panas pada instalasi HDD berbasis CYMCAP, serta struktur pembiayaan probabilistik ke dalam satu model analitik terintegrasi. Dengan memanfaatkan metodologi probabilitas Monte Carlo untuk menilai tingkat keyakinan tiap alternatif, studi ini akan memformulasikan rekomendasi konfigurasi SKTT 150 kV yang tangguh secara keandalan termoelektrik sekaligus rasional dipertanggungjawabkan secara estimasi finansial.

Tabel 2.1 Ringkasan penelitian yang relevan

No	Penulis (tahun)	Fokus penelitian	Penerbit	Kontribusi utama	Posisi penelitian ini
1	Bustamante dkk. (2019)	Perilaku termal kabel MV bawah tanah pada berbagai resistivitas dan kedalaman	Applied Thermal Engineering	KHA menurun konsisten seiring naiknya resistivitas termal; IEC 60287-1 lebih akurat dari UNE 211435	Dasar pemilihan resistivitas termal sebagai variabel acak utama
2	Rosdi, Rameli, & Abdul Rahman (2024)	Analisis KHA kabel transmisi bawah tanah untuk aplikasi on-site	Journal of Electrical & Electronic Systems Research	KHA akurat sebagai prasyarat keputusan metode instalasi	Mendukung keterkaitan teknis-finansial yang diukur kuantitatif pada penelitian ini
3	Callender, Goddard, Dix, & Lewin (2022)	Model fleksibel ampacity kabel tertanam pada lingkungan kompleks/berstratifikasi	IEEE Transactions on Power Delivery	Model konformal untuk menghitung ampacity pada lingkungan termal tidak homogen tanpa simulasi berat	Memperkuat justifikasi evaluasi termal segmental pada profil kedalaman HDD yang non-seragam
4	Tang, Fang, Luo, dkk. (2022)	Perbandingan metode analitik (IEC, nm) dan numerik (FEM, elemen batas, beda hingga, volume	Journal of Physics: Conference Series	Menegaskan koefisien resistansi termal tanah sangat sensitif terhadap kadar air dan berubah	Memperkuat argumen keterbatasan pendekatan deterministik tunggal pada resistivitas termal;

No	Penulis (tahun)	Fokus penelitian	Penerbit	Kontribusi utama	Posisi penelitian ini
		hingga) untuk ampacity kabel		seiring waktu; metode analitik IEC mengasumsikan resistivitas tanah konstan	mendasari pendekatan probabilistik pada penelitian ini
5	Enescu, Colella, & Russo (2020)	Overview penilaian termal kabel dan dampaknya terhadap current rating	Energies	Menegaskan akurasi ampacity bergantung pada representasi kondisi termal aktual lapangan	Melandasi urgensi pemodelan spesifik-kondisi via CYMCAP, bukan nilai referensi standar
6	Fariz, Nik Ali, Mohd Noor, dkk. (2026)	Pemetaan sistematis dynamic thermal rating kabel bawah tanah	IEEE Access	Menunjukkan riset DTR belum banyak menyentuh kompleksitas instalasi trenchless/HDD	Menegaskan celah riset yang diisi penelitian ini pada konteks HDD
7	Atoccsa dkk. (2024)	Optimasi ampacity dengan thermal backfill via dynamic PSO adaptif	Energies	Material timbunan khusus meningkatkan KHA secara signifikan	Dasar evaluasi thermal grout sebagai variabel desain; hanya aspek termal, tanpa dimensi finansial
8	Ocłoń, Bittelli, Cisek, dkk. (2016)	Kinerja material thermal backfill baru untuk sistem kabel daya bawah tanah	Applied Thermal Engineering	Formulasi material backfill menurunkan resistivitas	Memperkuat dasar pemilihan material thermal

No	Penulis (tahun)	Fokus penelitian	Penerbit	Kontribusi utama	Posisi penelitian ini
				termal konsisten pada berbagai kadar air	grout dalam alternatif desain penelitian ini
9	Czapp & Ratkowski (2021)	Optimasi konfigurasi thermal backfill untuk target ampacity, termasuk analisis biaya	Energies	Mengintegrasikan geometri backfill dengan biaya material-konstruksi (deterministik)	Rujukan langsung integrasi termal-biaya; penelitian ini mengubahnya menjadi probabilistik via Monte Carlo
10	Abootorabi Zarchi & Vahidi (2021)	Metode Hong Point Estimate untuk ketidakpastian suhu kabel bawah tanah	International Journal of Electrical Power & Energy Systems	Pendekatan probabilistik memberi gambaran risiko termal lebih komprehensif	Pembanding metode ketidakpastian termal; penelitian ini pakai Monte Carlo berbasis regresi CYMCAP
11	Shabani & Vahidi (2019)	Optimasi ampacity probabilistik dengan kendala ekonomi	International Journal of Electrical Power & Energy Systems	Monte Carlo dengan optimasi heuristik untuk kapasitas ampere optimal	Tidak menggunakan CYMCAP berbasis IEC 60287; penelitian ini mengintegrasikan keduanya

No	Penulis (tahun)	Fokus penelitian	Penerbit	Kontribusi utama	Posisi penelitian ini
12	Peleskei, Dorca, Munteanu, & Munteanu (2015)	Risiko dan estimasi biaya proyek konstruksi dengan Monte Carlo	Management	Mengubah estimasi titik tunggal menjadi rentang probabilitas yang dapat diaudit	Mendukung metodologi Monte Carlo sisi biaya; diintegrasikan dengan sisi teknis pada penelitian ini
13	Albana & Andrian Saputra (2019)	Risiko keuangan investasi pembangkit listrik dengan Monte Carlo	IEEE Conference on Technologies and Policies in Electric Power & Energy	Mengakomodasi ketidakpastian bahan bakar, beban, dan biaya konstruksi simultan	Memperkuat relevansi Monte Carlo di sektor kelistrikan; diadaptasi untuk SKTT-HDD
14	Satria Surya dkk. (2021)	Penilaian investasi proyek ketenagalistrikan Jawa-Madura-Bali via Monte Carlo	ICHVEPS 2021	Ketidakpastian biaya investasi, kapasitas, dan tarif dalam satu model probabilistik	Tidak menyertakan model termal; penelitian ini menambahkan dimensi termal terintegrasi
15	Ratchapan dkk. (2024)	Ampacity dan biaya modal metode konstruksi kabel bawah tanah tegangan tinggi	Przegląd Elektrotechniczny	Sensitivitas biaya HDD dan titik terdalam sebagai bottleneck termal	Dasar kuantitatif ampacity-biaya HDD; belum mengintegrasikan risiko stokastik

No	Penulis (tahun)	Fokus penelitian	Penerbit	Kontribusi utama	Posisi penelitian ini
16	Marbun, Atma, & Surya (2023)	Pendekatan stokastik VoLL sistem Jawa-Madura-Bali	ICHVEPS 2023	Pemodelan probabilistik lebih representatif dibanding deterministik pada sistem tenaga	Memperkuat justifikasi metodologis sampel acak pada level desain kabel
17	Zhang J., Wang, Ma, He, Wang, & Zhang (2025)	Evaluasi keandalan kabel bawah tanah berbasis Monte Carlo dua-tahap akibat penuaan termal pada kondisi beban darurat	Processes	Mengkuantifikasi risiko kegagalan kabel terpasang akibat thermal aging di bawah beban darurat menggunakan simulasi Monte Carlo dua-tahap	Fokus pada risiko *in-service* pasca-instalasi; penelitian ini menerapkan Monte Carlo pada tahap pre-investment (pemilihan desain), sehingga saling melengkapi sebagai potensi kelanjutan pasca-pemilihan desain

2.2 Landasan Teori

Bagian ini memuat landasan teori yang mendasari penelitian tentang analisis tekno-ekonomi perencanaan saluran kabel tegangan tinggi 150 kV.

2.2.1. Saluran Kabel Tegangan Tinggi 150 kV

Saluran kabel tegangan tinggi 150 kV merupakan salah satu infrastruktur utama pada sistem transmisi tenaga listrik, khususnya di wilayah yang menuntut keterbatasan ruang, keandalan operasi, serta pengendalian aspek keselamatan dan estetika. Penggunaan kabel tanah atau kabel bawah tanah pada sistem 150 kV meningkat pada kawasan perkotaan dan area tertentu yang tidak memungkinkan penggunaan saluran udara.

Dalam perencanaan saluran kabel 150 kV, pemilihan alternatif pemasangan tidak hanya ditentukan oleh kemampuan menghantarkan arus, tetapi juga oleh metode instalasi, kondisi termal lingkungan, serta kebutuhan investasi. Oleh karena itu, pendekatan tekno-ekonomi menjadi penting agar alternatif yang dipilih tidak hanya memenuhi secara teknis, tetapi juga efisien secara biaya dan risiko.

Penelitian oleh Fransisco Pabón dkk menunjukkan bahwa pemilihan metode instalasi kabel bawah tanah dalam jaringan distribusi listrik sering kali difokuskan untuk meminimalkan biaya visual dan operasional. Pendekatan ini dilakukan dengan memanfaatkan data geospasial untuk menentukan lokasi optimal, namun tetap menjaga efisiensi energi dan cakupan penuh layanan listrik. Penekanan pada pengurangan biaya tersebut mencerminkan bagaimana aspek finansial menjadi salah satu faktor utama yang diprioritaskan dalam pengambilan keputusan terkait instalasi kabel bawah tanah di daerah perkotaan yang padat (Pabón et al., 2022). Studi Rosdi, Rameli, dan Abdul Rahman mengenai analisis KHA kabel transmisi bawah tanah untuk aplikasi on-site turut menunjukkan bahwa penentuan kapasitas hantar arus yang akurat menjadi prasyarat sebelum keputusan pemilihan metode instalasi dapat diambil secara tepat, sehingga aspek teknis dan finansial saling berkaitan erat dalam praktiknya (Rosdi et al., 2024). Studi optimasi rute SKTT di Phnom Penh oleh Saing dkk. turut menunjukkan bahwa biaya instalasi yang substansial menjadi kendala utama perluasan kabel bawah tanah, sehingga mendorong pengembangan perangkat otomatis untuk menentukan rute teknologi paling

hemat biaya antar gardu induk (Saing et al., 2025). Studi perbandingan siklus hidup oleh Ahmed dkk. terhadap saluran udara dan kabel bawah tanah 33 kV di India turut mengonfirmasi bahwa sistem bawah tanah memiliki belanja modal dan dampak material awal yang lebih tinggi dibandingkan saluran udara, meskipun menawarkan keandalan operasional yang lebih baik dalam jangka panjang (Ahmed et al., 2026).

2.2.2. Konstruksi Kabel

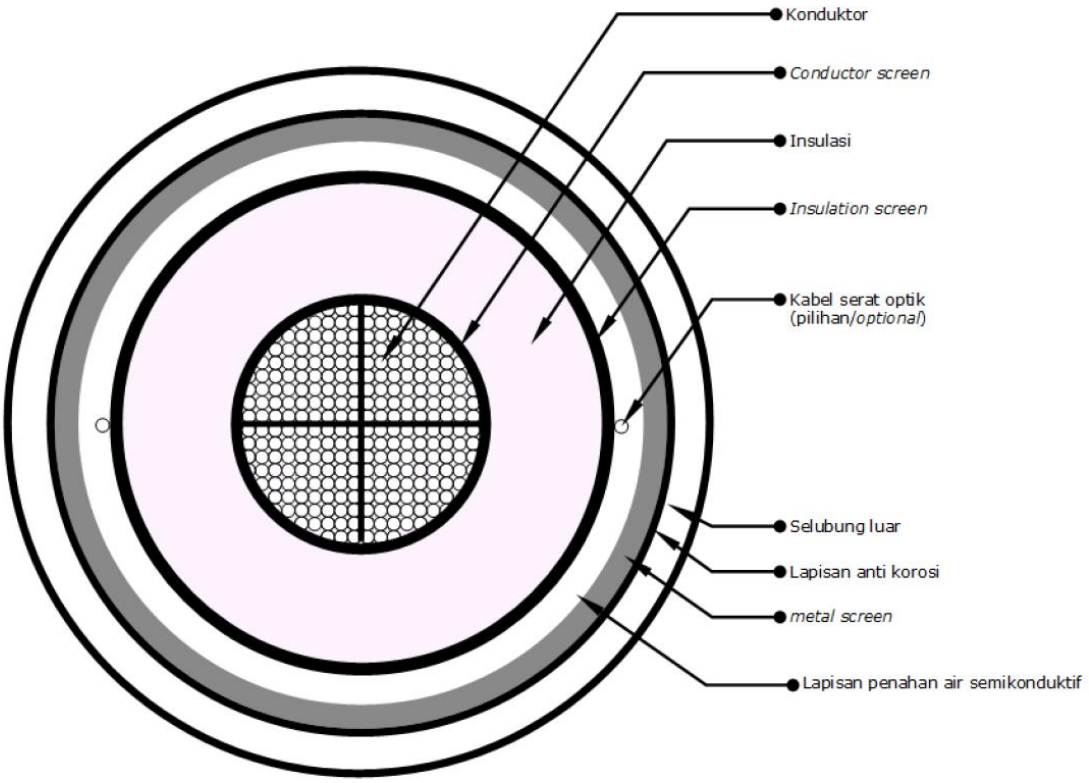
Bagian utama dari kabel tanah adalah penghantar (conductor), isolasi (insulation), tabir (screen) dan selubung (sheath). Bagian pelengkap kabel adalah bagian yang hanya melengkapi kabel jika dipergunakan untuk memperkuat atau memperbaiki sifat-sifat kabel untuk melindungi kabel. Bagian-bagian tersebut adalah bantalan (bedding), bahan pengisi (filler), perisai (armour), sarung kabel (serving). Gambar 2.1 menunjukkan gambaran umum konstruksi kabel tegangan tinggi. Beberapa lapisan pada kabel yang menjadi perhatian utama antara lain insulasi, metal screen dan selubung luar.

Material insulasi adalah super clean crosslinked polyethylene (XLPE) dan harus memenuhi persyaratan dalam ANSI/ICEA S-108-720-2004. Material insulasi ini memiliki faktor rugi dielektrik yang rendah dan kapasitansi yang hampir tidak tergantung pada suhu. Sedangkan material selubung luar adalah material dari high density polyethylene (HDPE). yang dilengkapi dengan lapisan semikonduktif sebagai fasilitas untuk memverifikasi integritas selubung tersebut (PT PLN (Persero), 2019).

Material metal screen dapat berbeda sesuai dengan tipenya. Tipe yang umum saat ini adalah Lead Sheath dan Corrugated Aluminium Sheath. Pada tipe Lead Sheath, metal screen merupakan material kombinasi antara kawat tembaga konsentris dengan pita tembaga pengikat dan timah campuran PKS021S (E) berdasarkan BS EN 50307: 2002 (PT PLN (Persero), 2019). Sedangkan pada tipe Corrugated Aluminium Sheath, material metal screen merupakan material aluminium corrugated yang dibuat dengan metode direct extrusion process berdasarkan IEEE Std 635-2003 (PT PLN (Persero), 2015).

Dalam konteks analisis termal, setiap lapisan konstruksi kabel berkontribusi terhadap resistansi termal internal total (T1, T2, T3 dalam persamaan IEC 60287). Material XLPE sebagai isolasi utama memiliki batas suhu operasi yang menjadi parameter kritis dalam penentuan KHA. Karakteristik termal tiap lapisan ini akan

dimodelkan secara spesifik pada masing-masing alternatif desain yang dievaluasi dalam penelitian ini. Sejalan dengan itu, studi karakteristik material inti dan belitan transformator menunjukkan bahwa pemilihan material secara khusus dapat meminimalkan rugi-rugi inti dan rugi tembaga, sehingga meningkatkan kinerja termal dan efisiensi peralatan tenaga listrik (Aziz et al., 2021). Temuan tersebut menegaskan bahwa sifat material konduktor dan elemen pendukungnya berperan langsung terhadap disipasi panas dan batas operasi termal, prinsip yang juga diadopsi dalam analisis KHA kabel tegangan tinggi pada penelitian ini.



Gambar 2.1 Konstruksi kabel tegangan tinggi (Sumber: (PT PLN (Persero), 2019))

2.2.3. Kapasitas Hantar Arus Kabel

Kapasitas hantar arus atau KHA adalah arus maksimum yang dapat dihantarkan kabel secara kontinu tanpa melampaui batas temperatur operasi maksimum yang diizinkan oleh material isolasinya, seperti polimer XLPE (Enescu et al., 2021). Nilai KHA dipengaruhi oleh parameter internal kabel dan kondisi eksternal, seperti kedalaman pemasangan, konfigurasi peletakan, resistansi termal luar, temperatur tanah, dan resistivitas termal tanah. Kegagalan dalam menjaga arus operasi di bawah batas KHA

dapat menyebabkan degradasi termal pada isolasi yang dipercepat, peningkatan rugi-rugi daya yang berpotensi merusak, dan dalam kasus terburuk, kegagalan sistem kelistrikan secara permanen. Perbandingan hasil perhitungan elemen hingga dengan standar IEC 60287 oleh Dubitsky, Greshnyakov, dan Korovkin menegaskan bahwa nilai KHA yang diturunkan dari pendekatan rangkaian termal ekuivalen standar dapat berbeda dari hasil simulasi medan elektromagnetik-termal yang lebih rinci, tergantung pada konfigurasi peletakan kabel (Dubitsky et al., 2016). Selain resistivitas tanah, temperatur lingkungan udara (ambient) dan temperatur tanah aktual turut memainkan peran krusial dalam membatasi KHA; penelitian Kim, Nguyen Cong, Dinh, dan Kim menunjukkan bahwa kapasitas hantar arus berkurang secara nyata seiring peningkatan suhu tanah, dan kapasitas arus kritis sangat dipengaruhi oleh suhu aktual di lapangan, alih-alih sekadar mengandalkan nilai referensi standar 20 °C (Kim et al., 2025). Konfigurasi pemasangan dan geometri penempatan kabel juga menjadi penentu utama performa termis; penelitian Hadi yang memanfaatkan metode elemen hingga menunjukkan bahwa variasi konfigurasi penempatan dan material sekitar kabel menghasilkan distribusi suhu konduktor yang berbeda signifikan dibandingkan perhitungan analitis konvensional (Hadi, 2019).

Pada kabel bawah tanah, proses perpindahan panas dari konduktor ke lingkungan sekitar menjadi faktor utama yang menentukan KHA. Jika pelepasan panas ke tanah tidak efektif, temperatur kabel akan meningkat dan arus yang aman untuk dihantarkan menjadi lebih kecil.

Untuk melakukan perhitungan kapasitas kuat hantar arus, dibutuhkan beberapa spesifikasi kabel XLPE yang didapatkan dari data sekunder yang antara lain meliputi tegangan antar fasa, jumlah konduktor, jenis konduktor dan luas penampang konduktor (Sekararum Adianita Putri et al., 2021). Standar IEC 60287-1-1 menyediakan metode perhitungan untuk operasi steady-state kabel di bawah semua kondisi tegangan bolak-balik (AC) dan tegangan searah (DC) hingga 5 kV. Hal ini mencakup kabel yang ditanam langsung di tanah, diletakkan dalam saluran, selokan, atau pipa baja, dengan atau tanpa pengeringan sebagian pada tanah, serta kabel yang dipasang di udara. Istilah "steady state" mengacu pada kondisi arus konstan secara kontinu (faktor beban 100%) yang cukup untuk mencapai suhu maksimum konduktor secara asimtotik, dengan asumsi kondisi lingkungan sekitar tetap (International Electrotechnical Commission, 2001).

Pendekatan ini mencakup analisis rugi-rugi panas pada kabel, pelepasan panas ke lingkungan, serta kondisi sekitar yang memengaruhi distribusi panas. Perhitungan ini berlaku untuk kabel arus bolak-balik (AC), dengan memperhitungkan efek tambahan seperti rugi-rugi induktif dan kapasitif yang terjadi pada kabel AC.

Persamaan (2.1) menunjukkan perhitungan arus yang diizinkan untuk kabel daya dalam sistem AC sesuai dengan standar IEC 60287-1-1, sebagai berikut:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - \mathrm{Wd}\left[\frac{1}{2}T1 + nT2 + n(T3 + T4)\right]}{RT1 + nR(1 + \lambda1)T2 + nR(1 + \lambda1 + \lambda2)(T3 + T4)} \right]^{0,5} \quad (2.1)$$

dimana:

- I: arus dalam satu konduktor (nilai r.m.s.) (A).
- Δθ: kenaikan suhu maksimum yang diizinkan pada konduktor di atas suhu lingkungan (K).
- Wd: rugi-rugi dielektrik per satuan panjang untuk isolasi yang mengelilingi konduktor (W/m).
- R: resistansi arus bolak-balik per satuan panjang konduktor pada suhu operasi maksimum (Ω/m).
- T1: resistansi termal per satuan panjang antara satu konduktor dan selubung (K.m/W).
- T2: resistansi termal per satuan panjang dari lapisan bedding (alas) antara selubung dan pelindung (armour) (K.m/W).
- T3: resistansi termal per satuan panjang dari lapisan luar kabel (external serving) (K.m/W).
- T4: resistansi termal per satuan panjang antara permukaan kabel dan medium sekitarnya (K.m/W).
- n: jumlah konduktor pembawa arus dalam kabel (konduktor dengan ukuran yang sama dan membawa beban yang sama).

- $\lambda 1$: rasio rugi-rugi pada selubung logam terhadap total rugi-rugi pada semua konduktor dalam kabel tersebut.
- $\lambda 2$: rasio rugi-rugi pada pelindung (armouring) terhadap total rugi-rugi pada semua konduktor dalam kabel tersebut.

Perlu dicatat bahwa persamaan di atas berlaku dalam kondisi steady-state dengan asumsi kondisi lingkungan yang seragam sepanjang jalur kabel. Pada instalasi HDD, variasi kedalaman penanaman di sepanjang jalur menciptakan kondisi yang tidak seragam, sehingga evaluasi perlu dilakukan secara segmental dengan mengidentifikasi titik terpanas (hotspot) sebagai acuan pembatas KHA keseluruhan sirkuit. Pendekatan ini akan diterapkan dalam pemodelan CYMCAP pada penelitian ini.

2.2.4. Resistivitas Termal Tanah

Resistivitas termal tanah menggambarkan hambatan yang diberikan medium tanah terhadap aliran panas yang dipancarkan oleh rugi-rugi kabel; nilai resistivitas yang tinggi menyebabkan panas terperangkap dan memicu lonjakan suhu konduktor, sehingga nilai KHA cenderung menurun (de Lieto Vollaro et al., 2014). Nilai resistivitas termal tanah tidak selalu konstan karena dipengaruhi oleh jenis tanah, kadar air, kepadatan, dan kondisi lingkungan setempat. Oleh sebab itu, penggunaan satu nilai deterministik dalam seluruh evaluasi dapat menyederhanakan perhitungan, tetapi belum tentu mewakili kondisi lapangan secara menyeluruh.

Studi laboratorium skala besar oleh Ahmad, Rizvi, dan Wuttke terhadap perilaku termal tanah di sekitar kabel tegangan ultra tinggi turut menegaskan bahwa kandungan kelembapan tanah dan pembebanan termal siklik secara signifikan memengaruhi disipasi panas kabel bawah tanah, sehingga memperkuat urgensi pemodelan termal spesifik-kondisi dalam perencanaan SKTT (Ahmad et al., 2025).

2.2.5. Metode Horizontal Directional Drilling (HDD) dan Pengaruhnya terhadap Profil Termal Kabel

Horizontal Directional Drilling (HDD) adalah metode instalasi trenchless yang memungkinkan penanaman kabel di bawah tanah tanpa penggalian terbuka (open-cut).

Metode ini digunakan ketika jalur instalasi melewati infrastruktur eksisting yang padat, seperti jalan raya, utilitas bawah tanah, atau bangunan, sehingga tidak memungkinkan penggunaan metode konvensional.

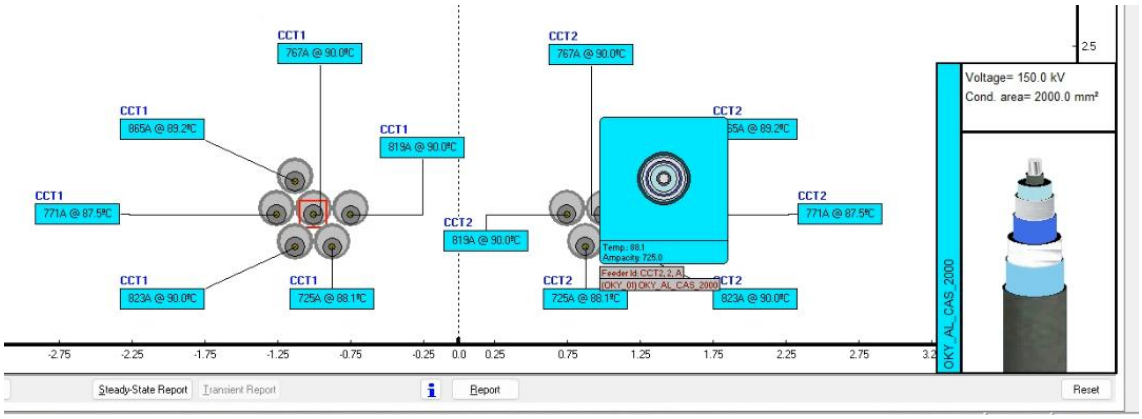
Tinjauan komprehensif oleh Yan, Ariaratnam, Dong, dan Zeng mengenai state-of-the-art teori dan aplikasi Horizontal Directional Drilling menegaskan bahwa profil beban tarik (pull load) dan tekanan fluida pengeboran yang bervariasi sepanjang lintasan HDD turut menciptakan kompleksitas tambahan yang tidak dijumpai pada metode open-cut konvensional, sejalan dengan kompleksitas termal yang dibahas dalam konteks SKTT (Yan et al., 2018). Studi numerik oleh Qian dkk. mengenai proses pullback kabel bawah laut berbasis HDD turut memperkuat bahwa tegangan mekanis dan profil kedalaman non-seragam sepanjang jalur pengeboran menjadi parameter kritis yang harus diperhitungkan secara terpisah dari instalasi tanam langsung (Qian et al., 2025).

Dari perspektif termal, instalasi HDD memiliki implikasi yang signifikan terhadap nilai KHA. Pertama, kabel pada jalur HDD umumnya ditanam pada kedalaman yang lebih besar dibandingkan instalasi langsung, sehingga resistansi termal eksternal (T_4) menjadi lebih tinggi akibat kolom tanah yang lebih tebal di atas kabel. Kedua, profil kedalaman sepanjang jalur HDD tidak seragam — kabel mengikuti jalur lengkung yang berubah-ubah dari titik masuk (entry point) hingga titik keluar (exit point), menciptakan titik terdalam yang berperan sebagai bottleneck termal (Ratchapan et al., 2024). Ketiga, penggunaan pipa konduit sebagai pelindung pada instalasi HDD menambahkan lapisan resistansi termal antara kabel dan tanah, berbeda dari instalasi direct burial.

Oleh karena itu, evaluasi KHA pada jalur HDD harus mempertimbangkan variasi geometri penanaman secara detail, dan pemodelan menggunakan CYMCAP pada penelitian ini akan merepresentasikan kondisi termal nyata jalur HDD Tambun II – Tx. Poncol berdasarkan profil kedalaman yang tercantum dalam Line Schedule (Tabel 3.3). Hal ini sejalan dengan temuan pada instalasi HDD kabel tegangan tinggi di fasilitas petrokimia yang menegaskan bahwa uji penetrasi tanah (soil boring), pengujian konduktivitas termal tanah, dan efek kulit (skin effect) sepanjang jalur pengeboran merupakan parameter yang wajib dievaluasi secara menyeluruh sebelum desain ampacity ditetapkan (Smith, 2021).

2.2.6. Pemodelan Termal dan Regresi

Kalkulasi matematis konvensional memiliki batasan signifikan ketika dihadapkan pada dinamisnya parameter geoteknik di sepanjang rute transmisi, sehingga menjadikan perangkat lunak pemodelan tingkat lanjut seperti CYMCAP sebagai instrumen esensial. Platform CYMCAP, yang dirancang spesifik untuk evaluasi termal sirkuit kabel daya, memungkinkan komputasi simulasi iteratif yang akurat untuk beragam model instalasi hibrid, hingga simulasi profil aliran panas dalam skenario steady-state maupun transien (EATON CYME, n.d.). Studi analisis termal-fluida-elektromagnetik terintegrasi oleh Fan dkk. terhadap sistem transmisi bawah tanah berbasis terowongan pada kawasan pegunungan turut menunjukkan bahwa pemodelan multi-fisika semacam ini esensial untuk mengoptimalkan desain konduktor dan kapasitas hantar arus pada kondisi instalasi non-konvensional (Fan et al., 2026). Visualisasi komprehensif sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.2 yang dihasilkan perangkat CYMCAP memvalidasi bahwa desain ampacity berjalan sesuai regulasi keselamatan ketat, sekaligus menjaga kabel dari risiko deteriorasi termal dini.



Gambar 2.2 Tampilan hasil simulasi CYMCAP

Pemodelan termal dilakukan untuk memperoleh hubungan antara variabel termal, khususnya resistivitas termal tanah, dengan keluaran teknis berupa KHA pada setiap alternatif. Dalam penelitian ini, hasil simulasi termal dari beberapa titik data digunakan untuk membentuk model regresi atau kurva aproksimasi, sehingga hubungan resistivitas termal dan KHA dapat direpresentasikan secara matematis.

Model regresi diperlukan karena simulasi termal detail untuk ribuan iterasi Monte Carlo tidak efisien dilakukan secara langsung. Dengan adanya model regresi, proses simulasi probabilistik dapat dilakukan lebih cepat tanpa kehilangan hubungan dasar antara parameter input dan output teknis.

Validitas model regresi akan diukur menggunakan koefisien determinasi (R^2) serta uji residual untuk memastikan tidak terdapat pola sistematik yang menunjukkan ketidaksesuaian model. Hanya model dengan R^2 di atas ambang batas yang ditetapkan yang akan digunakan dalam simulasi Monte Carlo.

Sebagai tambahan, penelitian oleh Hamed Shabani dkk yang menggunakan pendekatan probabilistik juga menunjukkan bahwa parameter biaya menjadi salah satu variabel utama dalam proses pengambilan keputusan. Penelitian ini menyoroti pentingnya mempertimbangkan ketidakpastian parameter teknis dan kendala ekonomi untuk menentukan kapasitas ampere optimal dari kabel daya. Fokus pada aspek biaya ini mencerminkan bagaimana prioritas finansial mendominasi analisis teknis dalam perencanaan instalasi kabel bawah tanah (Shabani & Vahidi, 2019). Pada konteks sistem ketenagalistrikan Indonesia, penerapan metode statistik juga telah dimanfaatkan untuk menjaga kualitas data operasional, misalnya melalui penggunaan uji Z untuk mendeteksi anomali pengukuran energi antara kWh meter utama dan meter pembanding (Hery Diansyah & I Made Indradjaja Marcus Brunner, 2026). Pendekatan ini menegaskan bahwa validasi statistik terhadap data menjadi langkah krusial sebelum digunakan dalam pemodelan lanjutan, dan prinsip yang sama diadopsi dalam penelitian ini ketika membangun model regresi sebagai dasar simulasi Monte Carlo.

2.2.7. Estimasi Biaya dan Risiko Investasi

Estimasi biaya merupakan proses perhitungan kebutuhan dana untuk mewujudkan suatu alternatif proyek berdasarkan komponen-komponen pekerjaan, material, metode pelaksanaan, dan asumsi harga. Pada tahap awal, estimasi biaya sering disusun secara deterministik melalui RAB, tetapi dalam praktiknya biaya aktual dapat berubah akibat variasi harga material, diskon vendor, negosiasi kontrak, maupun hasil lelang.

Pemodelan ekonomi deterministik tunggal yang secara konvensional dipakai di banyak proyek sering kali gagal mengidentifikasi spektrum ketidakpastian secara utuh,

mengabaikan volatilitas indeks harga utilitas, tak terprediksinya rintangan geoteknik bawah tanah selama pengeboran, dan risiko administrasi lahan (Fuqaha et al., 2026). Kekosongan fungsionalitas analitik dalam instrumen klasik ini mendorong urgensi implementasi model ekonomi probabilistik yang secara matematis mampu menyajikan rentang probabilitas risiko maupun simpangan anggaran riil (Zavala et al., 2025). Konversi ketidakpastian teknis menjadi persentase metrik finansial ini sangat krusial bagi perencana teknis dalam menyiapkan cadangan kontinjensi proyek secara presisi (Fuqaha et al., 2026).

Risiko investasi dalam penelitian ini dipahami sebagai ketidakpastian terhadap biaya akhir setiap alternatif ketika variabel penting berubah dari asumsi awal. Dengan demikian, evaluasi investasi tidak cukup hanya didasarkan pada satu angka estimasi biaya, tetapi perlu mempertimbangkan rentang kemungkinan biaya yang dapat terjadi.

2.2.8. Simulasi Monte Carlo

Monte Carlo merupakan metode simulasi numerik yang menggunakan pengambilan sampel acak berulang untuk mempelajari sistem dengan ketidakpastian. Landau dan Binder menegaskan penggunaannya sebagai sarana utama untuk mempelajari sistem kompleks melalui simulasi komputer pada fisika statistik dan ilmu rekayasa (Landau & Binder, 2000). Penerapan simulasi Monte Carlo untuk analisis risiko biaya siklus hidup pada proyek investasi turut menunjukkan bahwa pendekatan ini secara efektif memitigasi risiko pembengkakan biaya dengan mengubah estimasi titik tunggal menjadi rentang probabilitas yang dapat diaudit (Wieke, 2024).

Studi yang dilakukan Satria Surya dkk. (2021) mengenai penilaian investasi proyek ketenagalistrikan di sistem Jawa-Madura-Bali menunjukkan bahwa simulasi Monte Carlo mampu merepresentasikan kondisi ketidakpastian dari berbagai variabel seperti biaya investasi, faktor kapasitas pembebanan, dan tarif listrik dalam satu model probabilistik. Hasil penilaian menghasilkan rentang distribusi kelayakan yang lebih informatif dibandingkan kalkulasi deterministik. (Satria Surya et al., 2021).

Dalam konteks penelitian ini, Monte Carlo digunakan untuk mengintegrasikan dua sumber ketidakpastian utama, yaitu ketidakpastian parameter termal yang memengaruhi KHA dan ketidakpastian komponen biaya yang memengaruhi nilai investasi. Hasil

simulasi tidak hanya berupa satu nilai tunggal, tetapi distribusi hasil yang dapat digunakan untuk menilai peluang setiap alternatif memenuhi kriteria teknis dan ekonomi. Pendekatan ini memberikan dasar evaluasi yang lebih realistis dibandingkan perhitungan deterministik semata.

2.3 Kerangka Pemikiran

Kerangka berpikir penelitian ini berangkat dari permasalahan bahwa perencanaan saluran kabel tegangan tinggi 150 kV tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan satu indikator. Alternatif pemasangan yang memiliki biaya lebih rendah belum tentu memenuhi kebutuhan kapasitas hantar arus, sedangkan alternatif yang unggul secara teknis belum tentu memberikan risiko investasi yang paling baik.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian dimulai dengan pengumpulan data yang meliputi data teknis, kebutuhan sistem, regulasi, metode kerja, data quotation atau kontrak, serta data untuk membentuk alternatif pemasangan. Setiap alternatif kemudian dievaluasi melalui dua jalur utama, yaitu jalur teknis melalui pemodelan termal kapasitas hantar arus dan jalur ekonomi melalui perhitungan estimasi biaya.

Pada jalur teknis, data parameter termal digunakan untuk mensimulasikan KHA pada tiap alternatif. Hasil simulasi selanjutnya digunakan untuk membentuk model regresi agar hubungan antara resistivitas termal dan KHA dapat digunakan secara efisien pada tahap analisis risiko.

Pada jalur ekonomi, estimasi biaya deterministik disusun dari komponen biaya tiap alternatif dengan mempertimbangkan quotation, kontrak, atau data historis biaya yang relevan. Karena biaya aktual berpotensi berubah akibat diskon, variasi harga, atau kondisi pelaksanaan, maka hasil estimasi biaya ini tidak diperlakukan sebagai nilai tunggal absolut, melainkan sebagai basis pembentukan model risiko biaya.

Kedua jalur tersebut kemudian digabungkan dalam model risiko terintegrasi. Model ini menempatkan keluaran teknis dan ekonomi sebagai bagian dari satu kerangka evaluasi, sehingga tiap alternatif dapat diuji bukan hanya dari nilai nominalnya, tetapi juga dari tingkat ketidakpastiannya.

Setelah seluruh alternatif dibentuk, dilakukan simulasi Monte Carlo sampai hasil simulasi menunjukkan konvergensi yang memadai. Dari hasil simulasi ini diperoleh

distribusi KHA, distribusi biaya, peluang pemenuhan kriteria, serta tingkat risiko masing-masing alternatif.

Tahap terakhir adalah evaluasi apakah suatu alternatif memenuhi kriteria teknis dan ekonomi yang ditetapkan. Jika terdapat alternatif yang memenuhi kriteria, maka penelitian menghasilkan rekomendasi final alternatif terbaik. Jika tidak ada alternatif yang memenuhi seluruh kriteria, penelitian akan menyimpulkan hal tersebut dan memberikan rekomendasi arah revisi desain yang perlu ditindaklanjuti — misalnya perluasan opsi material, penyesuaian konfigurasi, atau peninjauan ulang target KHA sistem.

Secara konseptual, kerangka berpikir penelitian ini dapat diringkas sebagai berikut: masukan berupa data teknis dan ekonomi diolah menjadi beberapa alternatif; alternatif tersebut dinilai melalui analisis KHA dan estimasi biaya; hasil keduanya diintegrasikan ke dalam model risiko; dan keputusan akhir ditetapkan berdasarkan hasil simulasi Monte Carlo serta pemenuhan kriteria keputusan.

Berdasarkan landasan teori dan kerangka pemikiran yang telah diuraikan pada Bab II, penelitian ini selanjutnya merancang metode penelitian yang sistematis sebagaimana dijabarkan pada Bab III.