

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurnal, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut :

1. Rahman dan Wijaya (2023), penelitian mengenai pengaruh konfigurasi dan susunan konduktor terhadap parameter kelistrikan pada saluran transmisi tegangan tinggi 150 kV. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan posisi geometris konduktor dan jarak antar fasa menyebabkan variasi nilai impedansi saluran, khususnya induktansi dan kapasitansi, yang berdampak pada ketidakseimbangan tegangan antar fasa. Penelitian ini menegaskan bahwa konfigurasi konduktor yang tidak simetris dapat menurunkan kualitas tegangan sistem transmisi, sehingga diperlukan pengaturan susunan konduktor yang tepat untuk menjaga kestabilan tegangan. Namun demikian, penelitian tersebut belum membahas penerapan transposisi konduktor secara spesifik sebagai metode mitigasi ketidakseimbangan tegangan pada saluran transmisi jarak panjang [2]
2. Penelitian oleh Rosyidi, Supriadi, dan Sugianto (2023), penelitian ini membahas pengaruh susunan konduktor terhadap karakteristik listrik pada saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET). Hasil kajian menunjukkan bahwa perbedaan posisi geometris konduktor terhadap tanah dan antar fasa menyebabkan variasi nilai impedansi per fasa. Penelitian ini menyimpulkan bahwa konfigurasi susunan konduktor yang tidak simetris dapat meningkatkan risiko ketidakseimbangan tegangan, sehingga diperlukan rekayasa teknis seperti transposisi konduktor untuk meratakan impedansi saluran [3]
3. Penelitian oleh Nurdin dan Azis (2018), Nurdin dan Azis mengkaji pengaruh jarak antar sub-konduktor berkas terhadap reaktansi induktif pada saluran transmisi 150 kV. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi jarak antar konduktor berpengaruh langsung terhadap nilai induktansi saluran. Meskipun dilakukan pada level tegangan yang lebih

rendah, penelitian ini relevan karena membuktikan bahwa faktor geometri konduktor sangat mempengaruhi keseimbangan parameter listrik, sebagaimana yang terjadi pada sistem SUTET 275 kV [4]

4. Penelitian oleh Afrianda, Samsurizal, dan Nurul (2020), penelitian ini menganalisis dampak ketidakseimbangan beban terhadap efisiensi transformator distribusi. Hasilnya menunjukkan bahwa ketidakseimbangan tegangan dan arus dapat menimbulkan pemanasan berlebih pada peralatan listrik serta menurunkan umur operasi transformator. Temuan ini memperkuat urgensi pengendalian ketidakseimbangan tegangan di sisi transmisi, karena gangguan yang terjadi di jaringan transmisi akan berdampak langsung pada kinerja peralatan di sisi distribusi [5]
5. Penelitian oleh Santoso (2025), melakukan studi penerapan sistem auto-reclose terhadap stabilitas sistem tenaga listrik pada outlet PLTU. Penelitian ini menekankan pentingnya validasi kondisi steady-state dan dinamis dalam simulasi sistem tenaga listrik agar hasil analisis merepresentasikan kondisi aktual. Metodologi ini relevan dengan penelitian tugas akhir ini, khususnya dalam penggunaan perangkat lunak simulasi (ETAP) untuk mengevaluasi pengaruh konfigurasi teknis, termasuk penerapan tower transposisi, terhadap kestabilan sistem [6]

Tabel 2. 1 Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1	Rahman & Wijaya (2023) Pengaruh Konfigurasi Konduktor terhadap Parameter Saluran Transmisi 150 kV	Ketidakseimbangan parameter listrik pada saluran transmisi akibat perbedaan susunan dan posisi geometris konduktor	Analisis parameter saluran transmisi dan perhitungan impedansi berdasarkan konfigurasi konduktor	Konfigurasi konduktor yang tidak simetris menyebabkan perbedaan nilai induktansi dan kapasitansi antar fasa sehingga berpotensi menimbulkan ketidakseimbangan tegangan	Penelitian belum mengkaji penerapan tower transposisi sebagai metode mitigasi ketidakseimbangan tegangan pada saluran transmisi jarak panjang dan tegangan ekstra tinggi (275 kV)

2	Rosyidi, Supriadi, & Sugianto (2023) – Pengaruh Susunan Konduktor pada SUTET	Perbedaan susunan konduktor menyebabkan variasi impedansi antar fasa	Studi analisis konfigurasi konduktor dan perhitungan parameter saluran	Susunan konduktor yang tidak simetris meningkatkan potensi ketidakseimbangan tegangan	Belum mengevaluasi efektivitas tower transposisi pada lintasan transmisi jarak jauh
3	Nurdin & Azis (2018) – Pengaruh Jarak Antar Sub Konduktor terhadap Reaktansi Induktif	Variasi jarak sub-konduktor memengaruhi nilai induktansi saluran transmisi	Perhitungan analitis dan studi kasus pada sistem 150 kV	Jarak antar sub-konduktor berpengaruh langsung terhadap reaktansi induktif saluran	Penelitian dilakukan pada level 150 kV dan belum membahas ketidakseimbangan tegangan pada SUTET
4	Afrianda, Samsurizal, & Nurul (2020) – Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Efisiensi Transformator	Ketidakseimbangan beban menurunkan efisiensi dan mempercepat kerusakan peralatan	Pengukuran lapangan dan analisis kinerja transformator distribusi	Ketidakseimbangan meningkatkan rugi-rugi dan pemanasan peralatan	Tidak mengkaji sumber ketidakseimbangan dari sisi transmisi
5	Santoso (2025) – Studi Penerapan Auto-Reclose terhadap Stabilitas Sistem	Gangguan sistem mempengaruhi kestabilan operasi jaringan tenaga listrik	Pemodelan sistem, validasi steady-state dan dinamis	Auto-reclose meningkatkan kestabilan sistem tenaga	Fokus penelitian pada proteksi sistem, bukan pada ketidakseimbangan tegangan akibat konfigurasi saluran

2.2 Landasan Teori

Landasan teori pada penelitian ini disusun untuk memberikan dasar konseptual terhadap analisis yang dilakukan.

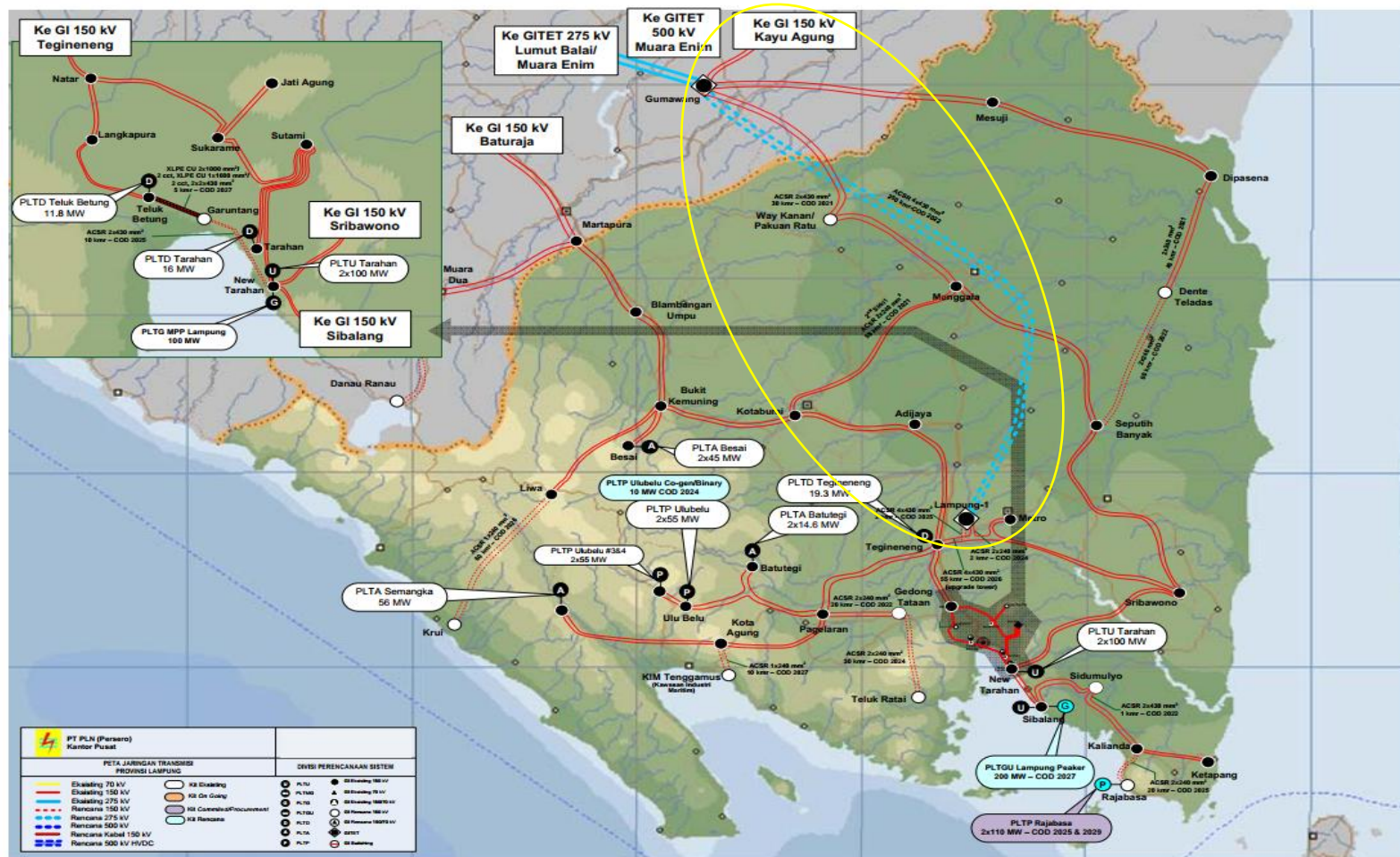
2.1.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah suatu kesatuan yang terdiri dari pembangkit, transmisi, dan distribusi, yang berfungsi untuk menyalurkan energi Listrik dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban melalui jaringan tegangan tinggi dan jaringan ekstra tinggi yang selanjutnya dari pusat beban disalurkan ke konsumen dengan mutu dan keandalan yang baik berdasarkan PERMEN ESDM No 13 Tahun 2021 Standard sistem transmisi di Indonesia yaitu tegangan tinggi (HV) diatas 35 kV – 150 kV dan tegangan ekstra tinggi diatas 150 kV – 500 kV [7], agar penyaluran energi Listrik tetap efisien, digunakan tegangan tinggi hingga ekstra tinggi untuk mengurangi rugi daya akibat aliran arus yang besar pada jarak transmisi yang panjang.

Sistem Transmisi Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) Adalah saluran transmisi udara yang beroperasi pada tegangan lebih dari 245 kV, sesuai SPLN No.1 thn.1995 Tegangan Standar. Dimana tujuan utama penggunaan SUTET adalah untuk menyalurkan daya Listrik dalam jumlah besar dari pembangkit ke gardu induk secara efisien. Dalam penelitian ini sistem transmisi yang dikaji yaitu SUTET 275 kV.

Berikut beberapa karakteristik secara umum sistem SUTET :

1. Tegangan operasi : 275 kV dan 500 kV
2. Daya hantar besar dengan rugi daya rendah
3. Menggunakan konduktor single atau lebih per fasa
4. Penyaluran antar wilayah ataupun antar pulau (seperti Jawa-Bali)



Gambar 2. 1 Peta Jalur Transmisi SUTET 275 kV Gumawang – Lampung 1

2.1.2 Tower Transmisi

Tower transmisi (menara transmisi) adalah struktur penopang yang dirancang untuk menyangga konduktor (penghantar), kawat pelindung (shield/earth wire), dan peralatan isolasi pada saluran udara tegangan tinggi/ekstra tinggi. Fungsinya memastikan konduktor berada pada posisi dan jarak aman terhadap tanah, bangunan, dan antar fasa agar transmisi daya listrik dapat berjalan andal dan aman [9]. Tiang Tower menurut fungsi :

2.1.2.1 Tiang Penegang (*tension tower*)

Tiang penegang disamping menahan gaya berat juga menahan gaya tarik dari konduktor konduktor saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) atau Ekstra Tinggi (SUTET) [9]. Tiang penegang terdiri dari:

- a. Tiang sudut (*angle tower*). Tiang sudut adalah tiang penegang yang berfungsi menerima gaya tarik akibat perubahan arah Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) atau Ekstra Tinggi (SUTET).
- b. Tiang akhir (*dead end tower*). Tiang akhir adalah tiang penegang yang direncanakan sedemikian rupa sehingga kuat untuk menahan gaya tarik konduktor konduktor dari satu arah saja. Tiang akhir ditempatkan di ujung Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) atau Ekstra Tinggi (SUTET) yang akan masuk ke *switch yard* Gardu Induk.

2.1.2.2 Tiang penyangga (*suspension tower*)

Tiang penyangga untuk mendukung/menyangga dan harus kuat terhadap gaya berat dari peralatan listrik yang ada pada tiang tersebut.

2.1.2.3 Tiang Penyekat (*section tower*)

Yaitu tiang penyekat antara sejumlah tower penyangga dengan sejumlah tower penyangga lainnya karena alasan kemudahan saat pembangunan (penarikan konduktor) [9], umumnya mempunyai sudut belokan yang kecil.

2.1.2.4 Tiang Transposisi

Adalah tiang penegang yang berfungsi sebagai tempat perpindahan letak susunan phasa konduktor-konduktor Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) atau Saluran Udara Ekstra Tinggi (SUTET) [9].

2.1.2.5 Tiang Portal (*gantry tower*)

Yaitu tower berbentuk portal digunakan pada persilangan antara dua saluran transmisi yang membutuhkan ketinggian yang lebih rendah untuk alasan tertentu (bandara, tiang crossing).Tiang ini dibangun di bawah saluran transmisi eksisting (Sofyan et al., 2018a).

2.1.2.5 Tiang Kombinasi (*combined tower*)

Yaitu tower yang digunakan oleh dua buah saluran transmisi yang berbeda tegangan operasinya [9].

2.1.3 Kawat Penghantar/Konduktor Transmisi

Kawat penghantar pada saluran transmisi yang berfungsi menghantarkan listrik bertegangan tinggi diatas 35 kV dan ekstra tinggi diatas 150 kV dari pusat pembangkit ke gardu induk dalam jarak jauh, menggunakan jenis konduktor seperti aluminium berinti baja (ACSR) atau aluminium paduan, yang dirancang tanpa isolasi dengan isolasi udara. Kawat penghantar ini disusun secara berkas/serabut dan dipilin untuk meningkatkan kapasitas penyaluran listrik, serta ditempatkan di atas menara transmisi menggunakan isolator untuk memisahkan kawat dari tower dan dilindungi oleh kawat tanah di bagian atasnya [10]. Tujuannya adalah mengurangi rugi-rugi daya selama transmisi, sehingga energi listrik dapat dikirim secara efisien

Jenis – jenis kawat penghantar :

- a. ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced), Konduktor jenis ini disebut ACSR yang terdiri dari konduktor aluminium dan Baja(steel). Kawat baja sebagai berfungsi memikul kekuatan mekanikal sedangkan aluminium berfungsi sebagai penghantar. Hal ini sesuai dengan fenomena skin effect (efek kulit) yaitu apabila suatu konduktor dialiri arus bolak

balik maka terdapat kecenderungan bahwa arus lebih berkonsentrasi pada permukaan konduktor, paling umum digunakan pada SUTT 70 kV – 500 kV [11].

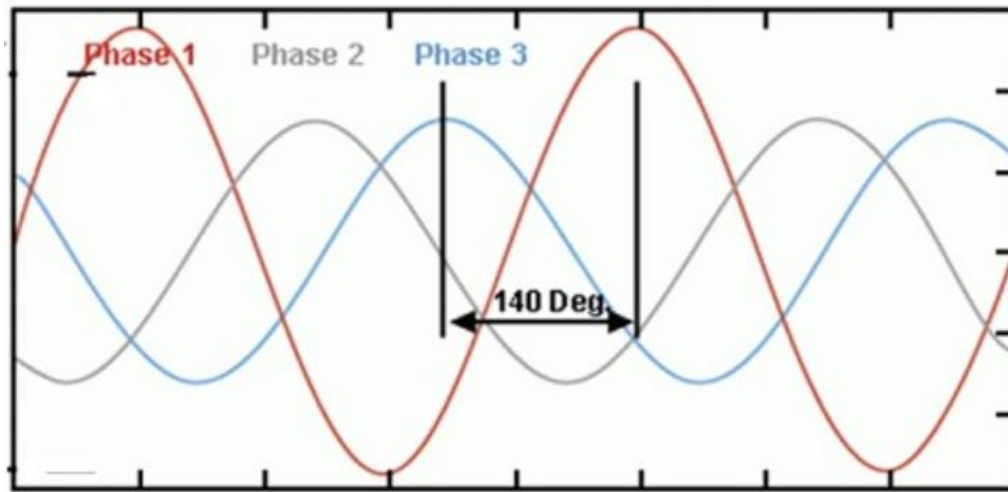
- b. AAC (All-Aluminium Conductor), Kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium memberikan konduktivitas listrik dan ketahanan korosi, tetapi memiliki kekuatan mekanik (tensile) yang lebih rendah dibanding konduktor bertulang baja [11].
- c. AAAC (All-Aluminium-Alloy Conductor): Inti komposit (carbon/glass fiber) memberikan kuat tarik tinggi dan konduktivitas lebih baik per massa, mengurangi sag pada beban termal tinggi [11].
- d. ACCC / ACCR (Aluminium Conductor Composite Core / Reinforced). Inti komposit (carbon/glass fiber) memberikan kuat tarik tinggi dan konduktivitas lebih baik per massa; mengurangi sag pada beban termal tinggi [11].

2.1.4 Ketidakseimbangan Tegangan

Ketidakseimbangan tegangan didefinisikan oleh IEEE sebagai rasio komponen urutan negatif atau nol ke komponen urutan positif.

2.1.4.1 Pengertian Ketidakseimbangan Tegangan

Ketidakseimbangan tegangan adalah terjadinya variasi tegangan dalam sistem tenaga listrik di mana besaran tegangan antar ketiga fasa tidak sama akibat perbedaan sudut antara fasa R, S dan T. Oleh karena itu, masalah tegangan tak seimbang ini hanya mempengaruhi sistem tiga fasa. Kondisi keseimbangan normal adalah ketika tegangan tiga fasa identik besarnya dan sudut fasa bergeser 120 derajat secara vektor [12]. Ketidakseimbangan dapat disebabkan karena perbedaan besaran tegangan atau sudut fasa atau keduanya.



Gambar 2. 2 Ketidakseimbangan Tegangan Fasa

2.1.4.2 Ketidakseimbangan Akibat Panjang Jalur Transmisi 275 kV

Ketidakseimbangan tegangan pada saluran transmisi 275 kV karena panjangnya jalur transmisi dari gardu induk pengirim ke gardu induk penerima dan posisi geometris konduktor yaitu kondisi dimana tegangan antar fasa pada ujung gardu induk penerima tidak lagi sama besar dan sudut fasa tidak tepat 120° secara vektor, akibat impedansi antar fasa (R,L,C) yang terakumulasi sepanjang jalur lintasan saluran yang panjang [13].

Pada sistem transmisi tegangan ekstra tinggi (SUTET) 275 kV, panjang lintasan saluran yang mencapai ratusan kilometer menyebabkan setiap konduktor fasa mengalami kondisi geometris yang berbeda terhadap tanah dan terhadap fasa lainnya.

2.1.5 Transposisi Konduktor

Transposisi konduktor dalam saluran transmisi adalah pertukaran posisi fisik konduktor antar fasa (R,S,T) secara berkala di sepanjang jalur untuk menyeimbangkan impedansi dan mengurangi efek induktansi yang tidak diinginkan antar fasa. Hal ini memastikan bahwa setiap konduktor mengalami jarak rata-rata yang sama dari konduktor fasa lainnya, sehingga mengurangi reaktansi, mendistribusikan arus secara merata, dan menghasilkan transmisi daya yang lebih efisien dan stabil [14].

Tujuan utama transposisi adalah meratakan efek geometri konduktor sehingga setiap

fasa secara rata-rata menempati posisi atas, tengah, dan bawah sepanjang lintasan. Dalam praktik perencanaan untuk saluran jarak panjang — termasuk saluran SUTET 275 kV — pola transposisi yang sering dianjurkan adalah full transposition: membagi lintasan menjadi tiga segmen hampir sama panjang dan menempatkan dua tower transposisi pada titik $\sim 1/3$ dan $\sim 2/3$ panjang lintasan. Dengan pola ini, setiap fasa mengalami ketiga posisi geometris secara seimbang sehingga nilai rata-rata induktansi dan kapasitansi per fasa menjadi hampir identik.

Transposisi pada saluran transmisi tenaga listrik dilakukan untuk mengurangi ketidakseimbangan impedansi antar fasa yang timbul akibat konfigurasi geometris konduktor terhadap tanah maupun terhadap konduktor lainnya. Pada saluran tiga fasa yang tidak ditransposisi, jarak antar fasa yang berbeda menyebabkan nilai induktansi dan kapasitansi tiap fasa tidak identik, sehingga menghasilkan ketidakseimbangan tegangan, arus, serta komponen urutan (sequence components). Oleh karena itu, berdasarkan prinsip teori saluran transmisi (short line, medium line, dan long line), transposisi diterapkan dengan cara memutar posisi konduktor secara periodik agar setiap fasa menempati semua posisi fisik secara merata sepanjang lintasan. Praktik ini direkomendasikan dalam standar perencanaan sistem tenaga seperti pedoman teknis dari IEEE dan IEC, yang menekankan pentingnya keseimbangan parameter saluran untuk menjaga kualitas daya dan stabilitas sistem.

Pada saluran transmisi jalur pendek (short line), yang secara teori memiliki panjang kurang dari ± 80 km dan pengaruh kapasitansi relatif kecil, kebutuhan transposisi umumnya minimal. Dalam praktik perencanaan, transposisi dapat dilakukan satu siklus penuh (3 section) sepanjang lintasan, sehingga biasanya diperlukan 2–3 tower transposisi untuk memastikan setiap fasa menempati ketiga posisi secara bergantian.

Pada saluran transmisi jalur menengah (medium line), dengan panjang sekitar 80–250 km dan pengaruh kapasitansi mulai signifikan, ketidakseimbangan parameter menjadi lebih berpengaruh terhadap profil tegangan dan regulasi daya. Oleh karena itu, standar praktik umum menerapkan minimal satu siklus transposisi penuh pada setiap interval tertentu (misalnya tiap 80–100 km), sehingga dalam satu lintasan dapat diperlukan sekitar 3–6 tower transposisi, tergantung panjang total dan konfigurasi menara [37].

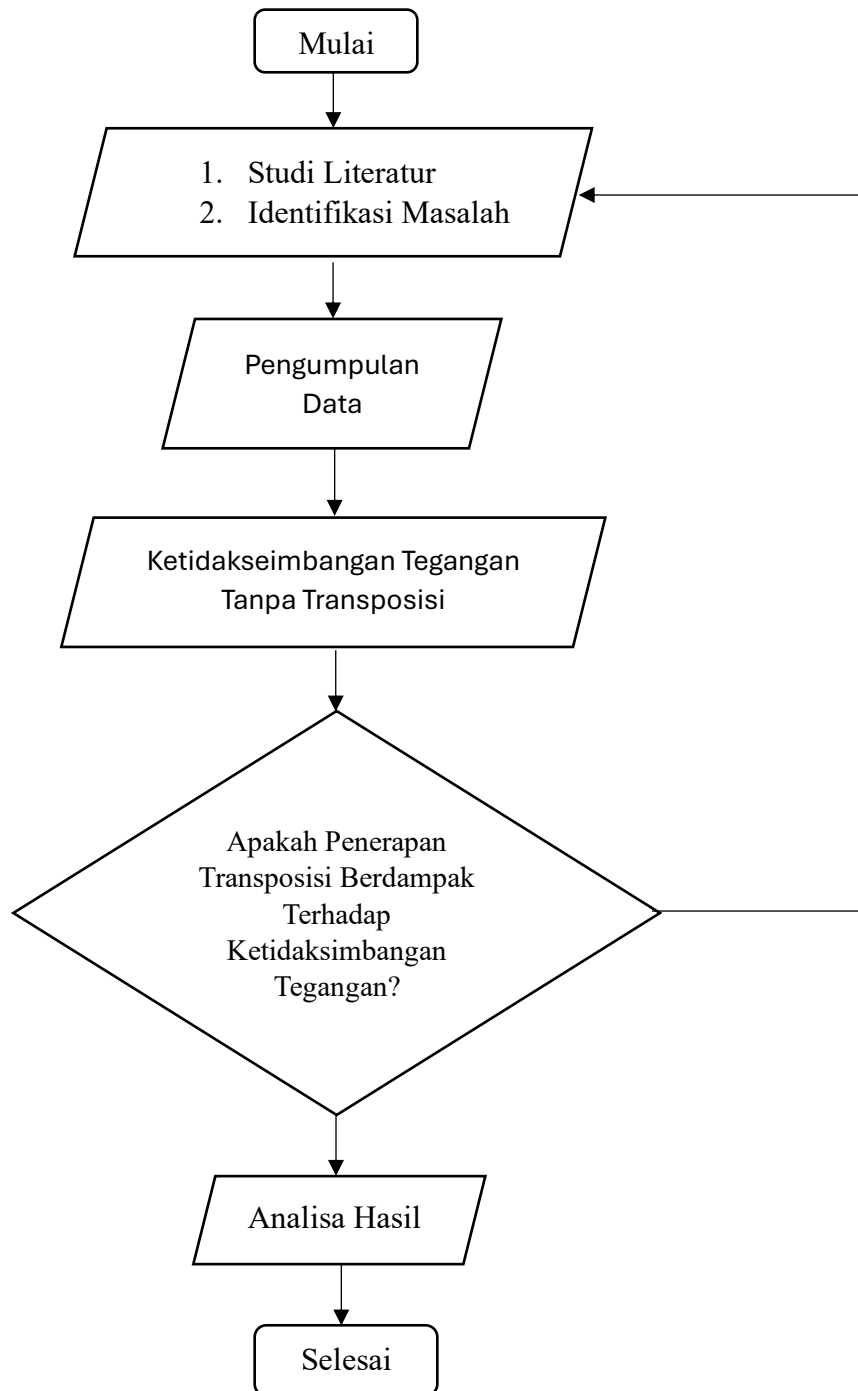
Sementara itu, pada saluran transmisi jalur panjang (long line), dengan panjang di atas 100 km dan efek distribusi parameter (distributed parameters) sangat dominan, transposisi menjadi lebih krusial untuk menjaga keseimbangan impedansi dan meminimalkan arus urutan negatif maupun gangguan komunikasi akibat kopling induktif. Pada jalur panjang, transposisi dilakukan secara periodik dalam beberapa siklus penuh sepanjang lintasan, sehingga jumlah tower transposisi dapat melebihi 6 titik, disesuaikan dengan panjang total saluran dan kriteria desain sistem.

Dengan demikian, secara teoritis dan sesuai praktik standar internasional, semakin panjang saluran transmisi maka semakin besar kebutuhan jumlah titik transposisi untuk menjamin keseimbangan parameter listrik antar fasa, meningkatkan kualitas daya, serta menjaga keandalan dan stabilitas sistem tenaga listrik [38].

Secara teoritis, induktansi dan kapasitansi tiap fasa bergantung pada Geometric Mean Distance (GMD) terhadap konduktor lainnya. Jika posisi konduktor tidak diubah sepanjang lintasan, maka nilai reaktansi dan susceptansi tiap fasa menjadi berbeda. Oleh karena itu, saluran dibagi menjadi tiga bagian sama panjang dengan rotasi siklik urutan fasa dari R-S-T menjadi T-R-S dan berakhir pada S-T-R, sehingga setiap fasa menempati seluruh posisi fisik secara bergantian. Rotasi siklik merupakan metode permutasi teratur di mana urutan fasa digeser secara melingkar tanpa mengubah komposisi elemen. Dengan metode ini diperoleh impedansi rata-rata yang sama untuk setiap fasa, sehingga sistem menjadi seimbang dan analisis komponen simetris dapat diterapkan secara valid.

Dari sisi perhitungan, pengaruh transposisi tampak pada perhitungan GMD/GMR yang digunakan untuk menentukan induktansi per fasa dan pada metode pembentukan matriks kapasitansi saluran. Setelah dilakukan transposisi yang tepat, perhitungan ulang parameter saluran menunjukkan penurunan selisih antar fasa pada nilai L dan C, yang berimplikasi pada pengurangan komponen urutan negatif dan penurunan *unbalance factor*. Studi-studi terkini menegaskan bahwa kecermatan menghitung parameter R, L, C (mengikutsertakan GMR/GMD aktual dan efek bundling) serta memasukkan skema transposisi pada model adalah kunci agar simulasi ETAP memberikan hasil yang mencerminkan kondisi lapangan [38].

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2. 3 Kerangka Pemikiran