

**ANALISIS ANDONGAN PADA KONDUKTOR ACSR 2 X 435/55 MM² DI
TRANSMISI 275 KV**

(Skripsi)

Oleh

**UNEDO PARDAMEAN SIMANJUNTAK
NPM 2115031066**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

ANALISIS ANDONGAN PADA KONDUKTOR ACSR 2 X 435/55 MM² DI TRANSMISI 275 KV

Oleh

UNEDO PARDAMEAN SIMANJUNTAK

Penelitian ini membahas analisis *thermal-sag* pada konduktor ACSR 2 x 435/55 mm² di transmisi 275 kV dengan menggunakan metode *catenary*. Fokus utama penelitian adalah untuk menentukan pengaruh temperatur akibat arus pembebanan terhadap andongan (*sag*) dan tegangan konduktor. Perhitungan dilakukan pada dua kondisi utama, yaitu tower sama tinggi dan tower beda tinggi, dengan mempertimbangkan distribusi temperatur yang merata. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur konduktor menyebabkan peningkatan panjang efektif konduktor serta penurunan tegangan horizontal. Untuk kondisi tower dengan perbedaan ketinggian, perubahan sudut kemiringan tower berpengaruh signifikan terhadap panjang konduktor, lendutan maksimum, dan tegangan tarik horizontal. Metode *catenary* berhasil memodelkan hubungan antara arus, temperatur, panjang konduktor, dan tegangan horizontal secara matematis dan komputasional. Penelitian ini diharapkan menjadi acuan dalam perencanaan saluran transmisi yang lebih aman dan efisien.

Kata kunci: ACSR 2 x 435/55 mm², metode *catenary*, transmisi 275 kV, andongan maksimum, tegangan horizontal, perbedaan ketinggian tower, temperatur konduktor.

ABSTRACT

ANALYSIS OF SAG ON ACSR 2 X 435/55 MM² CONDUCTOR IN 275 KV TRANSMISSION

By

UNEDO PARDAMEAN SIMANJUNTAK

This research discusses the thermal-sag analysis of the ACSR 2 x 435/55 mm² conductor in a 275 kV transmission line using the catenary method. The primary focus of this study is to determine the impact of temperature due to load current on the sag and tension of the conductor. Calculations were carried out under two main conditions: towers with equal height and towers with unequal height, considering uniform temperature distribution. The results show that an increase in conductor temperature leads to an increase in the effective length of the conductor and a decrease in horizontal tension. For towers with height differences, changes in tower inclination angles significantly affect the conductor length, maximum sag, and horizontal tension. The catenary method successfully models the relationship between current, temperature, conductor length, and horizontal tension mathematically and computationally. This research is expected to serve as a reference in designing safer and more efficient transmission lines.

Keywords: ACSR 2 x 435/55 mm², catenary method, 275 kV transmission, maximum sag, horizontal tension, tower height difference, conductor temperature.

**ANALISIS ANDONGAN PADA KONDUKTOR ACSR 2 X 435/55 MM² DI
TRANSMISI 275 KV**

Oleh

UNEDO PARDAMEAN SIMANJUNTAK

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Skripsi : ANALISIS ANDONGAN PADA KONDUKTOR
ACSR 2 X 435/55 MM² DI TRANSMISI 275 KV
Nama Mahasiswa : UNEDO PARDAMEAN SIMANJUNTAK
Nomor Pokok Mahasiswa : 2115031066
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik



1. Komisi Pembimbing

Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc., I.P.M.

NIP 19720923 200012 1 002

Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng.

NIP 19880624 201903 1 015

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Herlinawati, S.T., M.T.

NIP 19710314 199903 2 001

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Sumadi, S.T., M.T.

NIP 19731104 200003 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc., I.P.M.



Sekretaris

: Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng.



Penguji,
Bukan Pembimbing

: Dr. Eng., Ir. Khairudin, S.T., M.Sc.



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi

: 22 Januari 2025

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 13 Maret 2025



Unedo Pardamean Simanjuntak

NPM. 2115031066

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Tarutung, Sumatera Utara pada tanggal 17 Oktober 2003, sebagai anak pertama dari empat bersaudara, dari bapak Sangkot Maruli Pangihutan Simanjuntak dan Ibu Nenny Martini Sitikitika Sihotang.

Riwayat pendidikan penulis dimulai dari Sekolah Dasar (SD) Swasta Methodist Lubuk Pakam, pada tahun 2009 hingga tahun 2015, Sekolah Menengah Pertama (SMP) Swasta RK Deli Murni Bandar Baru, pada tahun 2015 hingga tahun 2018, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) Swasta Methodist-2 Rantauprapat pada tahun 2018 hingga tahun 2021.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2021 melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis berkesempatan menjadi asisten dosen mata kuliah Praktikum Pengukuran Besaran Listrik dan Praktikum Rangkaian Listrik tahun 2023-2024 dan tergabung dalam keanggotaan asisten Laboratorium Pengukuran Besaran Listrik dari tahun 2023. Selain itu, penulis juga tergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Himatro) yang pada tahun 2022 diamanahkan sebagai Anggota Divisi Sosial, Departemen Pendidikan dan Pengembangan Diri dan pada tahun 2023 diamanahkan sebagai Anggota Divisi Pendidikan, Departemen Pendidikan dan Pengembangan Diri. Penulis melaksanakan kerja praktik di PT. PLN (Persero) UP3 Tanjung Karang, Lampung dalam Satuan Kerja Divisi Jaringan dan Konstruksi serta membuat laporan yang berjudul “Analisis *Spesific Fuel Consumption* (SFC) PLTD Pulau Sebesi di PT. PLN (Persero) UP3 Tanjung Karang”.

PERSEMBAHAN

Segala Puji Syukur dan Hormat bagi Tuhan Yesus Kristus

Karya ini Kupersembahkan untuk

Bapak Tercinta dan Mamak Tercinta

Sangkot Maruli Pangihutan Simanjuntak

&

Nenny Martini Sitikitika Sihotang

Terima kasih atas kasih sayang dan segala hal yang telah tulus ikhlas kalian berikan dan lakukan untukku. Terima kasih senantiasa bersabar dan berkorban dalam mendidikku, membesarkanku dengan penuh cinta dan kasih sayang, selalu berusaha memberikan yang terbaik untukku dan selalu mendoakan untuk keberhasilan dan kebahagiaanku

Tak lupa juga untuk adek-adek tersayang:

Hotman Yesaya Simanjuntak

Ju Anggi Neysauli br Simanjuntak

Hezkiel Sanneymar Simanjuntak

Keluarga Besar, Dosen, Teman, dan Almamater

MOTTO

“Mintalah, maka akan diberikan kepadamu; carilah, maka kamu akan mendapat; ketoklah, maka pintu akan dibukakan bagimu”

Matius 7: 7

“Segala perkara dapat kutanggung di dalam Dia yang memberi kekuatan kepadaku”

Filipi 4: 13

“Takut akan Tuhan adalah permulaan pengetahuan, tetapi orang bodoh menghina hikmat dan didikan”

Amsal 1: 7

“Semakin aku banyak membaca, semakin aku banyak berpikir, semakin aku banyak belajar, semakin aku sadar bahwa aku tak mengetahui apa pun”

Voltaire

SANWACANA

Segala puji dan syukur kepada Tuhan Yesus Kristus, atas berkat-Nya yang diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Tugas Akhir dengan judul “Analisis Andongan pada Konduktor ACSR 2 x 435/55 mm² di Transmisi 275 kV” ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc., I.P.M. selaku dosen pembimbing utama yang selalu memberikan motivasi dan pandangan kehidupan, mengarahkan dan membimbing dengan tulus dan penuh kesabaran.
5. Bapak Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan saran, bimbingan dan arahan dengan baik dan ramah
6. Bapak Ir. Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D.Eng., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, kritik dan arahan.
7. Ibu Dr. Sri Purwiyanti, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan, bimbingan dengan baik dan tulus bagi penulis selama perkuliahan.

8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan pengajaran dan pandangan hidup selama perkuliahan.
9. Staff administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
10. Kepada Bapak, Mamak, Adek Hotman, Adek Anggi, Adek Hezekiel, yang selalu memberikan semangat, cinta, dan kasih sayang kepada penulis.
11. Keluarga RAMBAON, Jamed, Alex, Daniel, Rizky, Benyamin yang selalu menemani hari-hari penulis.
12. Keluarga besar Angkatan EXCALTO 2021, yang telah memberikan banyak motivasi, nilai-nilai sosial dan bantuan dalam berbagai hal.
13. Keluarga besar HIMATRO UNILA, yang telah menjadi wadah dalam mengembangkan nilai-nilai organisasi bagi penulis.
14. Keluarga KKN Desa Penengahan, Amanda, Regita, Firly, Nadhira, Elyana, dan Nabila, terimakasih atas 40 harinya.
15. Keluarga besar Paguyuban KSE (Karya Salemba Empat) Unila, yang telah menjadi wadah dalam pengembangan diri dan membantu dalam memberikan beasiswa kepada penulis.
16. Keluarga besar GMI Wesley Labuhandalam yang sudah menjadi tempat pelayanan penulis dalam menjalani perkuliahan di Lampung.
17. Kepada orang terspesial, Sari Esa Sipahutar yang selalu ada baik suka maupun duka dan selalu membantu dan mensupport penulis.
18. Kepada Unedo Pardamean Simanjuntak, yang selalu pantang menyerah dalam melakukan semua yang terbaik, semangat terus dan jangan pernah letih dalam melakukan yang terbaik dalam hidupmu.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Penulis mengharapkan kritik dan saran konstruktif dari semua pihak demi kemajuan bersama. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Bandarlampung, 13 Maret 2025

Unedo Pardamean Simanjuntak

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
SURAT PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
PERSEMBAHAN	viii
SANWACANA	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Rumusan Masalah	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Hipotesis	4
1.7 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Terdahulu.....	6
2.2 Sistem Tenaga Listrik.....	7
2.3 Sistem Transmisi Listrik di Indonesia.....	8
2.4 Konduktor ACSR 435/55 mm ²	9
2.5 Andongan (<i>Sag</i>).....	10

2.5.1 Tower Sama Tinggi	12
2.5.2 Tower Beda Tinggi	13
2.6 <i>Dynamic Line Rating</i>	15
2.6.1 Pemanasan Joule (<i>Joule Heating</i>)	16
2.6.2 Pemanasan Sinar Matahari (<i>Solar Heating</i>)	16
2.6.3 Pendinginan Konvektif	16
2.6.4 Pendinginan Radiatif	20
2.7 Perubahan Andongan Akibat Efek Termal dan Elastis	21
2.8 Jarak Bebas	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Waktu dan Tempat	25
3.2 Alat dan Bahan	26
3.3 Metodologi Penelitian	26
3.4 Diagram Pelaksanaan Penelitian	27
3.5 Analisis <i>Thermal-Sag</i> pada Konduktor ACSR 2 x 435 mm ² di Transmisi 275 kV	28
3.5.1 Perhitungan Kondisi Tower Sama Tinggi	28
3.5.2 Perhitungan Kondisi Tower Beda Tinggi	28
3.5.3 Perhitungan <i>Dynamic Line Rating</i>	29
3.5.4 Perhitungan Perubahan Andongan akibat Efek Termal dan Elastis	30
3.6 Proses Komputasi	30
3.7 Diagram Alir Komputasi Andongan	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Data Parameter	33
4.2 <i>Dynamic Line Rating</i>	34
4.3 Andongan	35
4.3.1 Andongan pada Kondisi Tower Sama Tinggi	35
4.3.2 Andongan pada Kondisi Tower Beda Tinggi	36
4.4 Analisa Andongan	45
BAB V PENUTUP	48
5.1 Kesimpulan	48
5.2 Saran	48
DAFTAR PUSTAKA	50
LAMPIRAN	51

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Skema Sistem Tenaga Listrik.....	7
Gambar 2.2 Kurva <i>Catenary</i> untuk Gawang Datar.....	12
Gambar 2.3 Kurva <i>Catenary</i> pada Gawang Miring.....	14
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir	27
Gambar 3.2 Diagram Alir Komputasi <i>Thermal-Sag</i>	32
Gambar 4.1 Grafik hubungan antara suhu dan arus.....	7
Gambar 4.1 Grafik hubungan antara andongan dan arus.....	35
Gambar 4.2 Grafik Hubungan antara <i>Tension</i> dengan arus	36
Gambar 4.3 Andongan pada Kondisi Tower Sama Tinggi.....	36
Gambar 4.4 Grafik Hubungan antara Andongan (<i>sag</i>) dan Arus.....	37
Gambar 4.5 Grafik Hubungan antara <i>Tension</i> dan Arus.....	38
Gambar 4.6 Andongan pada Kondisi Tower Beda Tinggi dengan Sudut Kemiringan (α) 1°	38
Gambar 4.7 Grafik Hubungan antara Andongan (<i>sag</i>) dan Arus.....	39
Gambar 4.8 Grafik Hubungan antara <i>Tension</i> dan Arus.....	39
Gambar 4.9 Andongan pada Kondisi Tower Sama Tinggi dengan Sudut Kemiringan (α) 2°	40
Gambar 4.10 Grafik Hubungan antara Andongan (<i>sag</i>) dan Arus.....	41
Gambar 4.11 Grafik Hubungan antara <i>Tension</i> dan Arus.....	41
Gambar 4.12 Andongan pada Kondisi Tower Sama Tinggi dengan Sudut Kemiringan (α) 3°	41
Gambar 4.13 Grafik Hubungan antara Andongan (<i>sag</i>) dan Arus.....	42
Gambar 4.14 Grafik Hubungan antara <i>Tension</i> dan Arus.....	43
Gambar 4.15 Andongan pada Kondisi Tower Sama Tinggi dengan Sudut Kemiringan 4°	43

Gambar 4.16 Grafik Hubungan antara Andongan (<i>sag</i>) dan Arus	44
Gambar 4.17 Grafik Hubungan antara <i>Tension</i> dan Arus.....	44
Gambar 4.18 Andongan pada Kondisi Tower Sama Tinggi dengan Sudut Kemiringan (α) 4°	45

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Tabel Spesifikasi Konduktor ACSR 435 mm ² Berdasarkan SPLN 41-7: 1981	9
Tabel 2.2 Tabel Jarak Gawang Dasar, Jenis Konduktor, dan Nilai :Lendutan Konduktor Maksimum Berdasarkan SPLN T5.006: 2019	10
Tabel 2.3 Tabel Koefisien untuk Menghitung Transfer Panas Konveksi Paksa dari Konduktor	18
Tabel 2.4 Tabel Koefisien untuk Menghitung Perpindahan Panas Konveksi Alami	20
Tabel 4.1 Data Konduktor.....	33
Tabel 4.2 Data Lingkungan.....	33
Tabel 4.3 Data Operasi.....	34
Tabel 4.4 Tabel Andongan pada kondisi tower sama tinggi.....	36
Tabel 4.5 Sudut kemiringan (α) dan perbedaan ketinggian (h).....	37
Tabel 4.6 Tabel Andongan pada kondisi tower beda tinggi dengan sudut kemiringan (α) 1°	38
Tabel 4.7 Tabel Andongan pada kondisi tower beda tinggi dengan sudut kemiringan (α) 2°	40
Tabel 4.8 Tabel Andongan pada kondisi tower beda tinggi dengan sudut kemiringan (α) 3°	42
Tabel 4.9 Tabel Andongan pada kondisi tower beda tinggi dengan sudut kemiringan 4°	43
Tabel 4.10 Tabel Andongan pada kondisi tower beda tinggi dengan sudut kemiringan (α) 5°	45
Tabel 4.11 Hasil data studi kasus dari tower sama tinggi dan tower beda tinggi ..	45

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Energi listrik merupakan bentuk energi yang sangat bermanfaat. Tidak dapat dipungkiri lagi bahwa manusia dewasa ini sudah demikian besar tingkat ketergantungannya terhadap energi listrik. Sehingga energi listrik bagi kehidupan hidup manusia dewasa ini sudah hampir “setara” dengan oksigen [1]. Dalam suatu sistem ketenagalistrikan dimulai dari pusat-pusat pembangkit, jaringan transmisi dan sistem-sistem distribusi hingga sampai ke pelanggan-pelanggan. Suatu saluran transmisi dapat menghubungkan antara gardu pembangkit dengan gardu transmisi atau gardu induk (berfungsi sebagai bebannya). Transmisi saluran udara harus ditopang oleh tower supaya objek-objek di bawahnya dapat terlindungi terhadap bahaya induksi dan hubung singkat listrik secara langsung [2].

Dalam analisis atau perancangan suatu saluran transmisi harus berpatokan pada lengkungan konduktor di antara dua tower berdekatan, dimana bila sudah diketahui lengkungan ini maka nilai lendutan (*sag value*) dengan mudah dapat ditentukan dan jarak aman ke objek-objek dapat juga ditentukan. Objek-objek di bawah konduktor harus dipastikan berada pada jarak aman dari konduktor supaya bahaya listrik dapat dihindari. Jadi, lengkungan konduktor akan berpengaruh terhadap jarak aman (*clearance distance*), yaitu suatu jarak aman antara konduktor 1 dengan objek-objek di sekitarnya, yaitu benda atau makhluk hidup disekitar konduktor tersebut [2].

Berdasarkan pengalaman *Black Out* di Italia pada 28 September 2003. Blackout di Italia ini diperkirakan berdampak terhadap 60 juta orang dengan perkiraan *energy not supplied* adalah 177 GWh dan waktu yang diperlukan untuk *reenergize* seluruh

jaringan transmisi yang relevan adalah 13 jam 30 menit. Penyebab awal terjadinya blackout ini adalah trip pada *tie-line* 380 kV Mettlen-Lavorgo, antara Italia dan Swiss, dikarenakan adanya *tree flashover* yang diduga akibat lendutan saluran karena *overheating*. Kejadian berikutnya adalah *trip* pada saluran transmisi 380 kV Sils-Soazza ini akibat *tree flashover* juga. Kontak dengan pohon ini diperkirakan terjadi karena lendutan (*sag*) pada saluran akibat *overheating* konduktor [3].

Suatu saluran transmisi menggunakan konduktor yang dibentangkan antara dua tower. Penggunaan konduktor tersebut memberi suatu konsekuensi dimana konduktor tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satunya temperatur. Adanya perubahan temperatur pada suatu material konduktor dapat menyebabkan terjadinya deformasi atau perubahan bentuknya, salah satunya adalah deformasi linear dalam bentuk penambahan atau pengurangan panjang pada suatu material yang berubah temperaturnya. Penambahan panjang pada konduktor akan menimbulkan perubahan lengkungan konduktor yang semakin melendut kebawah sehingga mendekati objek-objek dibawahnya. Untuk mengatasi ini perlu tinggi tower ditinggikan lagi sampai standar batas aman terpenuhi [2].

Menurut Hukum Stokes, beban dari tegangan tarik ini akan menyebabkan peningkatan panjang kawat berdasarkan modulus elastisitas. Hal lain yang akan menyebabkan pemuaian adalah suhu tinggi yang terjadi pada konduktor. Peningkatan suhu ini dapat disebabkan oleh berbagai hal, salah satunya adalah kerugian tembaga akibat arus beban yang melewati konduktor. Semakin tinggi arus beban yang melewati konduktor, semakin besar kerugian panas yang terjadi, yang pada akhirnya akan menambah beban pada kawat konduktor. *Sag* akan meningkat ketika konduktor memanjang akibat kenaikan suhu yang tinggi serta beban mekanis dari angin [4].

Penelitian ini akan mengembangkan metode untuk menentukan analisis *thermal-sag* pada konduktor ACSR 2 x 435 mm² di transmisi 275 kV. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode catenary. Metode *catenary* adalah fungsi dari persamaan berat konduktor, tegangan tarik maksimum konduktor, bentang panjang, dan *sag* maksimum konduktor [5]. Metode pengolahan akan digunakan untuk mengidentifikasi nilai *sag* dan tegangan dengan desain model

menggunakan perangkat lunak dan menilai nilai sag dan tegangan dari pengaruh suhu konduktor karena arus pembebanan.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari pelaksanaan tugas akhir ini adalah menentukan pengaruh arus pembebanan dalam menganalisis atau mendesain saluran transmisi. Lendutan konduktor dengan pengaruh temperatur dimodelkan dengan metode *catenary*, sehingga perilaku konduktor dapat dianalisis akibat naiknya temperatur yang disebabkan oleh arus pembebanan.

1.3 Rumusan Masalah

Andongan konduktor harus dihitung dengan tepat dalam perencanaan saluran transmisi. Andongan konduktor dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya lingkungan dan arus pembebanan. Temperatur merupakan faktor yang menunjukkan ukuran panas dan dingin suatu benda. Temperatur merupakan suatu nilai yang dinamis, sehingga nilainya dapat berubah-ubah bergantung pada berbagai hal. Arus pembebanan dapat mempengaruhi temperatur. Pada saluran transmisi, adanya pengaruh temperatur dapat menyebabkan pemanjangan dan perubahan lengkungan konduktor, dimana hal ini juga berpengaruh terhadap lendutan dan kuat tariknya. Parameter tersebut perlu diketahui dalam menganalisis kinerja saluran transmisi.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam pelaksanaan tugas akhir ini dituliskan sebagai berikut. Diasumsikan temperatur terdistribusi merata sepanjang konduktor. Konduktor yang digunakan adalah berjenis ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced). Perhitungan lengkungan konduktor menggunakan metode *catenary*. Penelitian dilakukan menggunakan data dari studi kasus jaringan transmisi 275 kV.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah memberikan pemahaman mengenai pengaruh arus pembebanan terhadap temperatur pada konduktor ACSR 2 x 435

mm² di transmisi 275 kV dan memberikan pemahaman mengenai pengaruh temperatur terhadap andongan konduktor dan kekuatan tegangan konduktor ACSR 2 x 435/55 mm² di transmisi 275 kV. Dengan menganalisis pengaruh pembebanan terhadap kelendutan konduktor, dapat menjadi bahan pertimbangan dalam merencanakan atau menganalisis suatu saluran transmisi.

1.6 Hipotesis

Adapun hipotesis pada penelitian ini adalah adanya peningkatan arus pembebanan membuat temperatur konduktor menjadi meningkat, sehingga mempengaruhi kondisi andongan dan kekuatan tegangan konduktor ACSR 2 x 435/55 mm² pada transmisi 275 kV.

1.7 Sistematika Penulisan

Penulisan tugas akhir ini dibagi ke dalam lima bab dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini berisikan tentang latar belakang masalah yang mendasari penelitian ini, tujuan penelitian yang ingin dicapai, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat penelitian, hipotesis, serta sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas teori-teori dan referensi yang relevan yang digunakan dalam penelitian ini, termasuk analisis hubungan antara arus, suhu, dan pemanjangan konduktor ACSR, serta faktor-faktor yang mempengaruhi lendutan (*sag*) pada saluran transmisi.

BAB III. METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan yang digunakan, metode penelitian yang diterapkan, serta diagram penelitian yang menunjukkan alur kerja dalam menyelesaikan tugas akhir.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memaparkan hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan, termasuk analisis data mengenai hubungan arus dengan suhu, pemanjangan konduktor, dan pengaruh

sagging terhadap jarak aman antara konduktor dan objek di sekitarnya. Pembahasan akan mencakup interpretasi hasil serta relevansi dengan hipotesis yang diajukan.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab terakhir ini berisi kesimpulan dari penelitian yang dilakukan berdasarkan hasil dan pembahasan, serta memberikan saran untuk penelitian lebih lanjut atau implementasi praktis dari hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Seiring perkembangan teknologi, terdapat beberapa penelitian-penelitian lain yang berhubungan dengan perencanaan saluran transmisi. (Abdul Halim, Yusmartato, Akhiruddin, 2019) melakukan perhitungan dalam perencanaan saluran transmisi khususnya dalam menghitung lendutan kawat saluran transmisi 150 KV. Dari perhitungan lendutan diperoleh hasil untuk saluran transmisi 150 KV pada jarak antar tiang 300 meter adalah 13,873 meter untuk tower sama tinggi. Pada penelitian ini, perhitungan lendutan hanya dilakukan pada kondisi kedua tower memiliki tinggi yang sama, belum memperhitungkan lendutan ketika kondisi kedua tower memiliki tinggi yang berbeda [6].

(Novriandi, Zakri dan Ervianto, 2019) melakukan penelitian perhitungan lendutan dan kuat tarik pada saluran transmisi 275 kV dengan metode catenary. Hasilnya didapat untuk tower sama tinggi, nilai lendutan sebesar 6,86 m dan tegangan tarik 4610,83 kg dengan panjang konduktor 401,06 m. sedangkan untuk tower yang tidak sama tinggi, didapat nilai lendutan sebesar 8,14 m dan tegangan tarik 4612,84 kg dengan panjang konduktor 401,6 m. Tetapi penelitian ini lebih berfokus pada temperatur lingkungan dan bukan pada temperatur operasi dari konduktor di saluran transmisi. Pada penelitian ini nilai batas aman belum diketahui dan lengkungan konduktornya belum ditentukan [7].

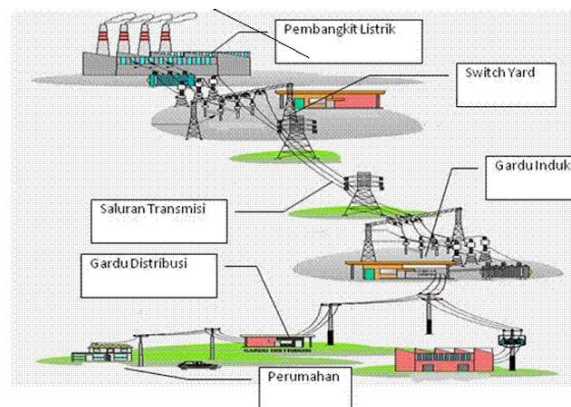
(Hermagasantos Zein, Sri Utami, Siti Saodah, dan Conny K. Wachjoe, 2019) melakukan perhitungan lendutan dan tegangan tarik dengan pendekatan kuadratik dengan adanya pengaruh temperatur dan tekanan angin. Hasilnya menunjukkan

bahwa lengkungan konduktor dapat dimodelkan dengan persamaan kuadrat, sehingga diperoleh lendutan dan tegangan tarik pada titik terendahnya. Metode kuadrat yang dilakukan oleh (Zein, 2019) memodelkan suatu lengkungan konduktor sebagai persamaan kuadrat sederhana $y = ax^2 + bx + c$. Tetapi kajian ini belum menentukan lendutan konduktor terhadap pengaruh temperatur secara rinci [8].

2.2 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah sekumpulan pusat listrik dan gardu induk (pusat beban) yang satu dengan yang lain dihubungkan oleh jaringan transmisi dan distribusi sehingga merupakan sebuah satu kesatuan yang terinterkoneksi. Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama, yaitu: pusat pembangkit listrik, saluran transmisi, dan sistem distribusi [9]. Fungsi dari komponen sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut:

1. Pembangkitan merupakan komponen yang berfungsi membangkitkan tenaga listrik, yaitu mengubah energi yang berasal dari sumber energi lain misalnya: air, batu bara, panas bumi, minyak bumi dll. menjadi energi listrik.
2. Transmisi merupakan komponen yang berfungsi menyalurkan daya atau energi dari pusat pembangkitan ke pusat beban.
3. Distribusi merupakan komponen yang berfungsi mendistribusikan energi listrik ke lokasi konsumen energi listrik
4. Beban adalah konsumsi energi listrik oleh pengguna akhir, seperti peralatan rumah tangga, industri, atau komersial. [9].



Gambar 2.1 Skema Sistem Tenaga Listrik

2.3 Sistem Transmisi Listrik di Indonesia

Sistem transmisi listrik merupakan bagian penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai penyalur energi listrik dari pembangkit ke jaringan distribusi. Keberadaan transmisi sangat krusial dalam menjamin kelangsungan suplai listrik ke konsumen. Gangguan pada sistem transmisi dapat menyebabkan kerugian yang signifikan, baik bagi konsumen maupun penyedia listrik [1].

Dalam sistem tenaga listrik di Indonesia, terdapat dua jenis utama saluran transmisi berdasarkan media penyalurannya, yaitu:

1. Saluran Udara (*Overhead Line*)

Saluran ini menyalurkan tenaga listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada tiang-tiang transmisi dengan bantuan isolator.

2. Saluran Bawah Tanah (*Underground Line*)

Energi listrik disalurkan melalui kawat-kawat yang ditanam di bawah permukaan tanah, yang umumnya digunakan di kawasan perkotaan untuk alasan estetika dan keamanan [1].

Selain itu, berdasarkan jenis arus yang digunakan, sistem transmisi terbagi menjadi dua, yaitu sistem arus bolak-balik (*Alternating Current*) dan sistem arus searah (*Direct Current*). Sistem AC lebih umum digunakan karena proses penaikan dan penurunan tegangannya lebih mudah dilakukan menggunakan transformator [1].

Sistem transmisi listrik juga dapat diklasifikasikan berdasarkan tingkat tegangannya [10]:

1. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET): 200 kV – 500 kV
2. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT): 30 kV – 150 kV
3. Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT): 30 kV – 150 kV
4. Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM): 6 kV – 30 kV
5. Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM): 6 kV – 20 kV
6. Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR): 40 Volt – 1.000 Volt

Nominal Size	Cross Sectional Area	No. of Wire/Diameter			Max. DC Conductor		Current Carrying
	Actual						

	Al	St	Tot	Al	St	Approx. Overall Diameter	Approx. Net Weight	Resistance at 20° C	Calculated Breaking Force	g Capacit y
mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	pcs/m m	pcs/mm	mm	kg/km	Ohm/km	N	A
435/55	434,3	56,3	490,6	54/3.2	7/3.2	28.8	1653	0,06656	136.450	900

2.5 Andongan (*Sag*)

Andongan (*sag*) adalah jarak proyeksi yang diukur dari tinggi tower saluran transmisi terhadap jarak lengkungan penghantar yang terendah. Hal ini terjadi karena beratnya penghantar yang direntangkan antara dua tiang transmisi. Karena kondisi permukaan tanah yang tidak rata akan menyebabkan tiang tower mempunyai perbedaan tinggi antara satu dengan yang lainnya. Faktor-faktor yang mempengaruhi andongan pada suatu rentang kawat penghantar antar tower dalam saluran udara antara lain berat konduktor per satuan panjang, modulus elastisitas, koefisien perubahan panjang, *tensile strength*, diameter kawat, jarak antara dua tower (*span*), kondisi lingkungan sekitar yang mungkin berpengaruh, misalnya angin, es, debu dan suhu [12].

Berdasarkan SPLN T5.006: 2019, nilai andongan konduktor maksimum pada beberapa tipe tower/tiang dapat dilihat pada tabel 2.2. Nilai lendutan maksimum ini dapat berbeda tergantung dari jawak gawang dasar dan jenis konduktor yang digunakan. Lendutan konduktor maksimum didasarkan pada suhu konduktor maksimum (80° C bila menggunakan konduktor jenis ACSR/AS atau konduktor aluminium berpenguat baja) [13].

Tabel 2.2 Tabel Jarak Gawang Dasar, Jenis Konduktor, dan Nilai :Lendutan Konduktor Maksimum Berdasarkan SPLN T5.006: 2019

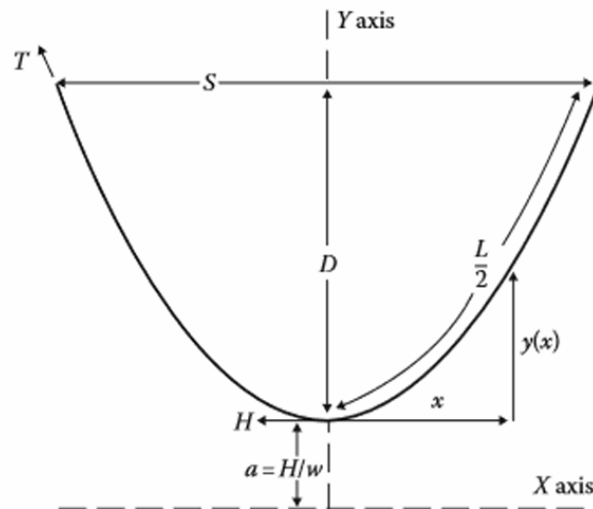
No	Tipe Tower / Tiang	Jarak Gawang Dasar (Meter)	Jenis Konduktor	Nilai Lendutan Maksimum (D) (Meter)
1	SUTT 66 kV Tiang Baja	160	A1/S2A atau A1/S2B	4,00
2	SUTT 66 kV Tiang Beton	60	(ACSR) atau A1/SA1A	2,00

3	SUTT 66 kV Tower Rangka Baja	300	(ACSR/AS) berukuran maksimum sampai dengan 125 mm ² - 26/7	8,00
4	SUTT 150 kV Tiang Baja	200	A1/S2A atau A1/S2B (ACSR) atau A1/SA1A (ACSR/AS) berukuran maksimum sampai dengan 450 mm ² - 54/7	6,00
5	SUTT 150 kV Tiang Beton	80		2,50
6	SUTT 150 kV Tower Rangka dua Sirkuit	350		11,00
7	SUTT 150 kV Tower Rangka Baja empat Sirkuit	350		11,00
8	SUTET 275 kV Tower Rangka Baja dua Sirkuit	400	A1/S2A atau A1/S2B (ACSR) atau A1/SA1A (ACSR/AS) berukuran maksimum sampai dengan 450 mm ² - 54/7	15,00
9	SUTET 500 kV Tower Rangka Baja Sirkuit Tunggal	450	A1/S2A atau A1/S2B (ACSR) atau A1/SA1A (ACSR/AS) berukuran maksimum sampai dengan 450 mm ² - 54/7	18,00
10	SUTET 500 kV Tower Rangka Baja Dua Sirkuit	450		18,00
11	SUTET 500 kV Tower Rangka Baja Empat Sirkuit Vertikal	450		18,00
12	SUTET 500 kV Tower Rangka Baja Empat Sirkuit Horizontal	450		18,00
13	SUTET 500 kV Compact Tower Rangka Baja Dua Sirkuit	320		14,69
14	SUTET 500 kV Compact Tower Rangka Baja Empat Sirkuit	320		14,69
15	SUTET 500 kV Tiang Baja Dua Sirkuit	320		14,69

16	SUTET 500 kV Tiang Baja Empat Sirkuit	320		14,69
17	SUTTAS 250 kV Sirkuit Dwikutub	400	ACSR, ZEBRA 428,9/55,59 mm ²	12,57
18	SUTTAS 500 kV Sirkuit Dwikutub	450	ACSR/AS, FALCON 806,2/102,4 mm ²	15,50

Berikut ini dijelaskan mengenai andongan di dua kondisi, yakni saat tower sama tinggi dan tower beda tinggi.

2.5.1 Tower Sama Tinggi



Gambar 2.2 Kurva *catenary* untuk gawang datar [5]

Bentuk kurva kabel (*catenary*) merupakan fungsi dari berat konduktor per satuan panjang (w), tegangan horizontal (H), panjang gawang (S), dan jarak kendur maksimum konduktor, (D). Jarak kendur konduktor dan panjang gawang diilustrasikan dalam Gambar 2.2 untuk gawang yang datar [5].

Persamaan *catenary* yang tepat menggunakan fungsi hiperbolik. Berkenaan dengan titik terendah pada kurva *catenary* yang ditunjukkan pada Gambar 3.1, ketinggian konduktor ($y(x)$) diatas titik terendah ini diberikan oleh persamaan berikut [5]:

$$y(x) = \frac{H}{w} \cosh \left(\left(\frac{w}{H} x \right) - 1 \right) \quad (2.1)$$

Dimana:

$y(x)$ = Ketinggian konduktor di titik terendah (m)

H = Tegangan horizontal (kg)

D = Lendutan konduktor (m)

w = Berat konduktor per satuan panjang (kg/m)

H/w = Konstanta *catenary*

Substitusi $x = S/2$, sehingga diperoleh persamaan (2.2) [5].

$$D = \frac{H}{w} \cosh \left(\left(\frac{w \cdot S}{2 \cdot H} \right) - 1 \right) \quad (2.2)$$

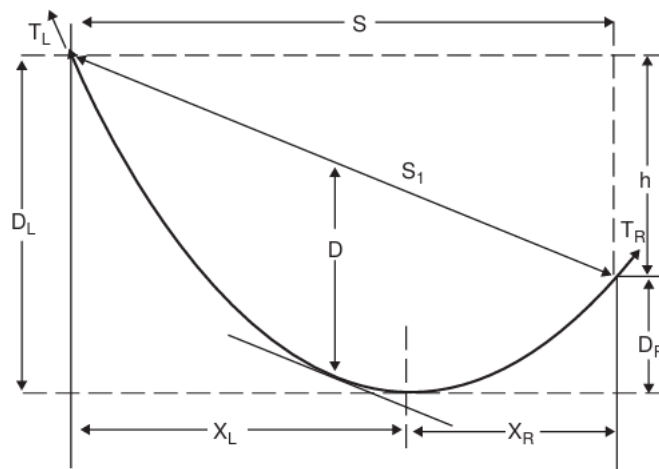
Persamaan untuk menghitung tegangan (T) dalam kg pada tower sama tinggi dapat menggunakan persamaan (2.3) [5].

$$T = H + wD \quad (2.3)$$

Untuk menghitung perubahan panjang akibat lendutan (L) konduktor dapat menggunakan persamaan (2.4) [5].

$$L(S) = \frac{H}{w} \sinh \left(\frac{w \cdot S}{H} \right) \quad (2.4)$$

2.5.2 Tower Beda Tinggi



Gambar 2.3 Kurva *catenary* pada gawang miring [5]

Untuk menghitung x_L , jarak dari tower kiri ke titik terendah kurva

$$x_L = \frac{S}{2} \left(1 - \frac{h}{4D} \right) \quad (2.5)$$

Untuk menghitung x_R , jarak dari tower kanan ke titik terendah kurva

$$x_R = \frac{S}{2} \left(1 + \frac{h}{4D} \right) \quad (2.6)$$

Dimana :

S = Jarak horizontal antara tower.

h = Jarak vertikal antara tower.

Sl = Jarak garis lurus antara titik-titik penyangga.

D = sag (kelendutan) yang diukur secara vertikal dari garis yang melalui titik-titik penyangga konduktor ke garis konduktor.

Sag di titik tengah, D , kira-kira sama dengan sag dalam bentang horizontal yang memiliki panjang sama dengan bentang miring, Sl , yakni sebagai berikut.

$$D = \frac{H}{w} \cosh \left(\left(\frac{w \cdot Sl}{2 \cdot H} \right) - 1 \right) \quad (2.7)$$

Untuk menghitung nilai L , panjang konduktor dapat menggunakan persamaan berikut:

$$L = S + (x_R^3 + x_L^3) \left(\frac{w^2}{6H^2} \right) \quad (2.8)$$

Selain itu, perhitungan untuk kondisi tower beda tinggi juga dapat menggunakan pendekatan sebagai berikut [14]:

$$Sl = \sqrt{(S^2 + h^2)} \quad (2.9)$$

Dimana:

Sl = *straight line*, garis lurus antara kedua tower

S = *span* (bentangan)

h = perbedaan ketinggian

Persamaan untuk menghitung tegangan pada tower sebelah kanan dapat menggunakan persamaan (2.15) [5].

$$T_R = H + wD_R \quad (2.10)$$

Persamaan untuk menghitung tegangan pada tower sebelah kiri dapat menggunakan persamaan (2.15) [5].

$$T_L = H + wD_L \quad (2.11)$$

Persamaan untuk menghitung tegangan (T) di titik D pada tower beda tinggi dapat menggunakan persamaan (2.3) [5].

$$T = H + wD \quad (2.12)$$

2.6 Dynamic Line Rating

Panas yang tersimpan dalam konduktor menghasilkan variasi suhu selama periode waktu tertentu yang bergantung pada sifat material, dan lain-lain. Kenaikan dan kehilangan panas dihitung seperti pada kasus keadaan tunak, dengan mempertimbangkan karakteristik yang mungkin bergantung pada waktu. Kasus-kasus khusus dari keadaan transien dapat dipelajari. Salah satu yang telah banyak dipelajari adalah perubahan langkah pada arus. Dengan mengasumsikan bahwa kondisi ambient tetap konstan, waktu yang dibutuhkan konduktor untuk mencapai suhu tertentu setelah perubahan arus dapat dihitung dan digunakan untuk memprediksi rating darurat. Dengan juga mempertimbangkan perubahan parameter cuaca (kecepatan dan arah angin, suhu ambient, radiasi matahari), perilaku suhu konduktor seiring waktu, atau pemanasan atau pendinginan yang bergantung pada waktu, dapat dipelajari. Dengan mengukur parameter cuaca ini sepanjang saluran, dan variasi arus seiring waktu, maka memungkinkan untuk melacak suhu konduktor selama periode waktu untuk digunakan dalam metode *dynamic line rating* [15].

Persamaan keseimbangan panas kemudian dapat dituliskan sebagai [15]:

$$Heat\ gain = Heat\ loss$$

$$P_J + P_S = P_C + P_R \quad (2.13)$$

Dimana:

P_J = Pemanasan Joule (*Joule heating*, W/m)

P_S = Pemanasan akibat sinar matahari (*Solar Heating*, W/m)

P_C = Pendinginan konvektif (angin) (*Convective Cooling*, W/m)

P_R = Pendinginan radiasi (*Radiative Cooling*, W/m)

2.6.1 Pemanasan Joule (*Joule Heating*)

Pemanasan Joule merujuk pada energi yang dihasilkan oleh aliran arus melalui konduktor. Untuk menghitung nilai resistansi pada suhu T (ohm) dapat ditulis dalam persamaan[15]:

$$R_{ac}(T) = R_{ac}(T_1) + (T - T_1) \cdot \frac{R_{ac}(T_2) - R_{ac}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (2.14)$$

Untuk menghitung nilai arus (I) dalam Ampere pada konduktor dapat menggunakan persamaan[15]:

$$I = \sqrt{\frac{P_r + P_c - P_s}{R_{ac}}} \quad (2.15)$$

Sehingga, dengan demikian nilai P_J dapat ditentukan melalui persamaan berikut[15]:

$$P_J = I^2 \cdot R_{ac}(T) \quad (2.16)$$

2.6.2 Pemanasan Sinar Matahari (*Solar Heating*)

Untuk menghitung pemanasan sinar matahari dapat diketahui dengan rumus berikut [15]:

$$P_S = \alpha_S \cdot I_T \cdot D \quad (2.17)$$

2.6.3 Pendinginan Konvektif

Untuk menghitung suhu lapisan udara yang bersentuhan dengan permukaan[15]:

$$T_f = 0.5 \cdot (T_s + T_a) \quad (2.18)$$

Dimana:

T_f = Temperature film ($^{\circ}\text{C}$)

T_s = Suhu permukaan konduktor ($^{\circ}\text{C}$)

T_f = Suhu udara ($^{\circ}\text{C}$)

Untuk menghitung konduktivitas termal udara ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) pada suhu T_f [15]:

$$\lambda_f = 2.368 \cdot 10^{-2} + 7.23 \cdot 10^{-5} \cdot T_f - 2.763 \cdot 10^{-8} \cdot T_f^2 \quad (2.19)$$

Dimana:

λ_f = konduktivitas termal udara pada suhu T_f ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

Untuk menghitung densitas udara (kg/m^3) pada ketinggian konduktor [15]:

$$\gamma = \frac{1.293 - 1.525 \cdot 10^{-4}}{1 + 0.00367 \cdot T_f} \quad (2.20)$$

Dimana:

γ = densitas udara pada ketinggian konduktor (kg/m^3)

Untuk menghitung viskositas dinamis udara ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) pada suhu film [15]:

$$\mu_f = (17.239 + 4.635 \cdot 10^{-2} \cdot T_f - 2.03 \cdot 10^{-5} \cdot T_f^2) \cdot 10^{-6} \quad (2.21)$$

Dimana:

μ_f = viskositas dinamis udara pada suhu film ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Untuk menghitung viskositas kinematik udara (m^2/s) [15]:

$$v_f = \mu_f / \gamma \quad (2.22)$$

Dimana:

v_f = viskositas kinematik udara (m^2/s):

Untuk menghitung kekasaran (*Roughness*) konduktor [15]:

$$R_s = d/2 \cdot (D - d) \quad (2.23)$$

Dimana:

R_s = Kekasaran konduktor

d = Diameter kawat pada lapisan paling luar (m)

D = Diameter keseluruhan (m)

Untuk menghitung bilangan Reynolds [15]:

$$Re = V \cdot \frac{D}{v_f} \quad (2.24)$$

Dimana:

Re = Bilangan Reynolds

V = *Wind speed* (m/s)

Untuk menentukan koefisien B dan n dapat menggunakan tabel berikut.

Tabel 2.3 Tabel Koefisien untuk Menghitung Transfer Panas Konveksi Paksa dari Konduktor [15]

Smooth Conductors			Stranded Conductors, $R_s \leq 0.05$			Stranded Conductors, $R_s > 0.05$		
Re	B	n	Re	B	n	Re	B	n
35 - 5,000	0.583	0.471	100 - 2,650	0.641	0.471	100 - 2,650	0.641	0.471
5,000 - 50,000	0.148	0.633	2,650 - 50,000	0.178	0.633	2,650 - 50,000	0.048	0.8
50,000 - 200,000	0.0208	0.814						

Untuk menghitung nilai Nusselt sudut antara arah angin dan arah garis sebesar 90° [15]:

$$Nu_{90} = B \cdot Re^n \quad (2.25)$$

Untuk menghitung nilai Nusselt pada sudut antara arah angin dan arah garis sebesar δ [15]:

$$Nu_\delta = Nu_{90} \cdot (\sin^2(\delta) + 0.0169 \cdot \cos^2(\delta))^{0.225} \text{ untuk smooth conductors}$$

$Nu_{\delta} = Nu_{90} \cdot (0.42 + 0.68 \cdot \sin(\delta)^{1.08})$ untuk *stranded conductors* dengan $\delta \leq 24^{\circ}$

$Nu_{\delta} = Nu_{90} \cdot (0.42 + 0.58 \cdot \sin(\delta)^{0.90})$ untuk *stranded conductors* dengan $\delta > 24^{\circ}$

(2.26)

Dimana:

Nu_{δ} = nilai Nusselt pada sudut antara arah angin dan arah garis sebesar δ

δ = sudut antara arah angin dan arah garis (deg)

Untuk menghitung pendinginan konvektif dipaksa (W/m) dapat dihitung menggunakan persamaan [15]:

$$P_{c,forced} = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_s - T_a) \cdot Nu_{\delta} \quad (2.27)$$

Dimana:

$P_{c,forced}$ = pendinginan konvektif dipaksa (W/m)

Untuk menghitung nilai Grashof menggunakan persamaan [15]:

$$Gr = \frac{D^3 \cdot (T_s - T_a) \cdot g}{(T_f + 273) \cdot \nu_f^2} \quad (2.28)$$

Dimana:

Gr = nilai Grashof

g = percepatan gravitasi, 9.807 m/s²

Untuk menghitung nilai Prandtl menggunakan persamaan [15]:

$$Pr = c_f \cdot \frac{\mu_f}{\lambda_f} \quad (2.29)$$

Dimana:

Pr = nilai Prandtl

c_f = kapasitas panas jenis udara (J. kg⁻¹. K⁻¹)

Untuk menentukan koefisien untuk menghitung perpindahan panas konveksi alami menggunakan tabel berikut.

Tabel 2.4 Tabel Koefisien untuk Menghitung Perpindahan Panas Konveksi Alami [15]

Range of $Gr \cdot Pr$		A	m
from	to		
10^{-1}	10^2	1.02	0.148
10^2	10^4	0.850	0.188
10^4	10^7	0.480	0.250
10^7	10^{12}	0.125	0.333

Untuk menghitung nilai Nusselt alami [15]:

$$Nu_{nat} = A \cdot (Gr \cdot Pr)^m \quad (2.30)$$

Dimana:

Nu_{nat} = Nilai Nusset alami

Untuk menghitung nilai Nusselt pada sudut inklinasi [15]:

$$Nu_{\beta} = Nu_{nat} \cdot (1 - 6.76 \cdot 10^{-6} \cdot \beta^{2.5}) \quad (2.31)$$

Dimana:

Nu_{β} = nilai Nusselt pada sudut inklinasi

β = sudut inklinasi (deg)

Untuk menghitung pendinginan konvektif alami (W/m) dapat dihitung menggunakan persamaan [15]:

$$P_{c,nat} = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_s - T_a) \cdot Nu_{\beta} \quad (2.32)$$

Maka untuk menghitung pendinginan konvektif final (W/m) adalah menggunakan nilai maksimal antara nilai pendinginan konvektif dipaksa dan nilai pendinginan konvektif alami [15].

$$P_c = \max(P_{c,forced}; P_{c,nat}) \quad (2.33)$$

2.6.4 Pendinginan Radiatif

Untuk menghitung nilai pendinginan radiatif [15]:

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot \varepsilon_S \cdot [(T_S + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (2.34)$$

Dimana:

P_r = Pendinginan Radiatif (W/m)

σ_B = Konstanta Stefan-Boltzmann

ε_S = emisivitas permukaan konduktor

2.7 Perubahan Andongan Akibat Efek Termal dan Elastis

Konduktor ACSR dan AAC memanjang seiring dengan peningkatan suhu konduktor. Laju pemuaian termal linier untuk konduktor komposit ACSR lebih rendah dibandingkan dengan konduktor AAC karena serat baja pada ACSR memanjang dengan laju sekitar setengah dari laju aluminium. Koefisien pemuaian termal linier efektif dari konduktor tidak homogen, seperti ACSR, dapat ditemukan dari persamaan berikut [14]:

$$E_{AS} = E_{AL} \left(\frac{A_{AL}}{A_{TOTAL}} \right) + E_{ST} \left(\frac{A_{ST}}{A_{TOTAL}} \right) \quad (2.35)$$

$$\alpha_{AS} = \alpha_{AL} \left(\frac{E_{AL}}{E_{AS}} \right) \left(\frac{A_{AL}}{A_{TOTAL}} \right) + \alpha_{ST} \left(\frac{E_{ST}}{E_{AS}} \right) \left(\frac{A_{ST}}{A_{TOTAL}} \right) \quad (2.36)$$

Dimana:

E_{AL} = Modulus elastisitas aluminium, dalam satuan psi

E_{ST} = Modulus elastisitas baja, dalam satuan psi

E_{AS} = Modulus elastisitas komposit aluminium-baja, dalam satuan psi

A_{AL} = Luas penampang kawat aluminium, dalam satuan luas

A_{ST} = Luas penampang kawat baja, dalam satuan luas

A_{TOTAL} = Total luas penampang melintang, dalam satuan luas

α_{AL} = Koefisien muai linear aluminium, per °C

α_{ST} = Koefisien muai termal baja, per °C

α_{TOTAL} = Koefisien muai termal komposit aluminium-baja, per °C

Jika suhu konduktor berubah dari suhu referensi, T_{REF} , ke suhu lain, T , maka panjang konduktor, L , akan berubah secara proporsional terhadap hasil kali dari

koefisien pemuaian termal efektif konduktor, α_{AS} , dan perubahan suhu, $T - T_{REF}$, sebagaimana ditunjukkan di bawah ini [14]:

$$L_T = L_{T_{REF}}(1 + \alpha_{AS}(T - T_{REF})) \quad (2.37)$$

Dengan berubah panjang (L) dapat dihitung nilai kendur yang berubah juga dengan persamaan [14]:

$$D = \sqrt{\frac{3S(L - S)}{8}} \quad (2.38)$$

Dengan meningkatnya nilai kendur (*sag*) maka nilai tegangan (*tension*) akan menurun, nilai tegangan (H) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [14].

$$H = \frac{W(S^2)}{8D} \quad (2.39)$$

Dengan mempertimbangkan elastisitas dan tegangan, maka hubungan antara panjang dan tegangan dapat dilihat dari persamaan berikut [14]:

$$L_H = L_{H_{REF}} \left(1 + \frac{H - H_{REF}}{E_C A} \right) \quad (2.40)$$

Dimana:

L_H = Panjang konduktor di bawah tegangan horizontal, H

$L_{H_{REF}}$ = Panjang konduktor di bawah tegangan referensi horizontal, H_{REF}

E_C = Modulus elastisitas dari konduktor, psi

A = Luas penampang, dalam inci persegi (in^2)

2.8 Jarak Bebas

Berdasarkan Permen ESDM No. 13 Tahun 2021, Ruang bebas (jarak bebas) adalah ruang yang dibatasi oleh bidang vertikal dan horizontal di sekeliling dan di sepanjang konduktor jaringan transmisi tenaga listrik di mana tidak boleh ada benda di dalamnya demi keselamatan manusia, makhluk hidup, dan benda lainnya serta keamanan operasi jaringan transmisi tenaga listrik [16].

Berikut ini merupakan tabel jarak bebas minimum vertical pada konduktor berdasarkan SPLN T5.006: 2019 tentang ruang bebas dan jarak bebas minimum pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT), Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET), dan Saluran Udara Tegangan Tinggi Arus Searah (SUTTAS) [13].

Tabel Jarak Bebas Minimum Vertikal pada Konduktor Berdasarkan SPLN T5.006: 2019

No.	Lokasi	SUTT		SUTET		SUTTAS	
		66 kV (m)	150 kV (m)	275 kV (m)	500 kV (m)	250 kV (m)	500 kV (m)
1	Lapangan terbuka atau daerah terbuka ^a	7,5	8,5	10,5	12,5	7	12,5
2	Daerah dengan keadaan tertentu						
	- Bangunan jembatan ^b	4,5	5,0	7,0	9,0	6	9
	- Tanaman / tumbuhan, hutan, perkebunan ^b	4,5	5,0	7,0	9,0	6	9
	- Jalan / jalan raya / rel kereta api ^a	8,0	9,0	11,0	15,0	10	15
	- Lapangan umum ^a	12,5	13,5	15,0	18,0	13	17
	- SUTT lain, saluran udara tegangan rendah (SUTR), saluran udara tegangan menengah (SUTM), saluran suara komunikasi, antena dan kereta api gantung ^b	3,0	4,0	5,0	8,5	6	7

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian tugas akhir ini dimulai sejak Agustus 2024 dan selesai pada Januari 2025, bertempat di Laboratorium Konversi Energi Elektrik, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Adapun Jadwal penelitian seperti pada tabel berikut.

Tabel 3.1 Tabel Jadwal Penelitian

Agenda	Bulan					
	Agu	Sep	Okt	Nov	Des	Jan
Studi Literatur dan Studi Bimbingan						
Pengumpulan Data						
Perancangan Program						
Pengajuan Proposal Penelitian						
Pembuatan Program						
Simulasi Program						
Analisis Hasil						
Pengajuan Hasil Penelitian						
Ujian Komprehensif						

3.2 Alat dan Bahan

Penelitian tugas akhir ini menggunakan satu unit laptop dengan spesifikasi; *Processor Intel (R) Core i5 @1.70 GHz* (4 CPUs), memori sebesar 8 GB RAM, dengan *Operating System Windows 11 64-bit*; perangkat lunak *Visual Studio Code v.1.95.2* sebagai *editor* dan *compiler*; perangkat lunak *python v.3.11.9* sebagai bahasa pemrograman komputasi beserta *library-library* seperti *Numpy* dan *Matplotlib*; dan data yang diolah yaitu menggunakan studi kasus PT. PLN (Persero).

3.3 Metodologi Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan dan mempelajari serta mengkaji literatur yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir, yaitu mengenai metode perhitungan lendutan konduktor akibat pengaruh temperatur dan arus. Literatur tersebut diambil dari berbagai sumber, seperti buku manual analisa sistem tenaga listrik, jurnal ilmiah dan laporan-laporan penelitian terdahulu.

2. Studi Bimbingan

Studi bimbingan dilakukan dengan diskusi untuk menyelesaikan persoalan-persoalan selama penelitian bersama dosen pembimbing. Diskusi dilakukan secara berkala, mulai dari diskusi mengenai perhitungan hubungan arus dan temperatur hingga metode yang digunakan penulis untuk melakukan analisis temperatur terhadap lendutan (*sag*) konduktor. Dengan adanya studi bimbingan, penulis banyak mendapatkan pengetahuan serta arahan dalam pengerjaan penelitian tugas akhir.

3. Pengumpulan dan Pengolahan Data

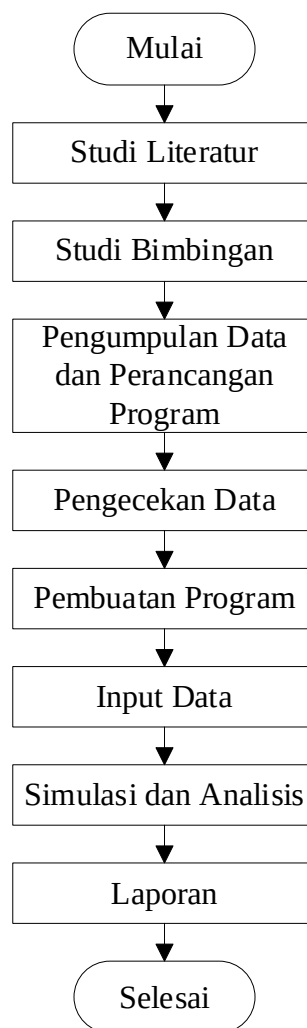
4. Pengumpulan data berasal dari skenario studi kasus yang digunakan, lalu data tersebut diolah dan disesuaikan menjadi data masukan dari program komputasi yang telah dibuat menggunakan perangkat lunak *python*.

5. Penulisan Laporan

Perancangan penelitian ini dituangkan kedalam sebuah laporan proposal penelitian. Lalu, hasil penelitian ini dituangkan kedalam sebuah laporan akhir penelitian/skripsi. Laporan ini merupakan dokumentasi pengerjaan penelitian tugas akhir dan dapat dipertanggungjawabkan sebagaimana mestinya.

3.4 Diagram Pelaksanaan Penelitian

Pada Gambar berikut merupakan tahap-tahap pelaksanaan kegiatan penelitian tugas akhir.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir

3.5 Analisis *Thermal-Sag* pada Konduktor ACSR 2 x 435 mm² di Transmisi 275 kV

3.5.1 Perhitungan Kondisi Tower Sama Tinggi

Pada bab sebelumnya, telah dijelaskan mengenai kurva *catenary* pada kondisi tower sama tinggi. Berikut ini adalah persamaan yang digunakan dalam perhitungan kondisi tower sama tinggi pada kondisi awal.

$$y(x) = \frac{H}{w} \cosh \left(\left(\frac{w}{H} x \right) - 1 \right) \quad (3.1)$$

$$D = \frac{H}{w} \cosh \left(\left(\frac{w \cdot S}{2 \cdot H} \right) - 1 \right) \quad (3.2)$$

$$T = H + wD \quad (3.3)$$

$$L(S) = \frac{H}{w} \sinh \left(\frac{w \cdot S}{H} \right) \quad (3.4)$$

Parameter yang telah diperoleh di atas akan dijadikan sebagai kondisi awal konduktor pada tower sama tinggi.

3.5.2 Perhitungan Kondisi Tower Beda Tinggi

Pada bab sebelumnya, telah dijelaskan mengenai kurva *catenary* pada kondisi tower beda tinggi. Berikut ini adalah persamaan yang digunakan dalam perhitungan kondisi tower beda tinggi.

$$Sl = \sqrt{(S^2 + \Delta h^2)} \quad (3.5)$$

$$D = \frac{H}{w} \cosh \left(\left(\frac{w \cdot Sl}{2 \cdot H} \right) - 1 \right) \quad (3.6)$$

$$xL = \frac{S}{2} \left(1 - \frac{h}{4D} \right) \quad (3.7)$$

$$xR = \frac{S}{2} \left(1 + \frac{h}{4D} \right) \quad (3.8)$$

$$L = S + (x_R^3 + x_L^3) \left(\frac{w^2}{6H^2} \right) \quad (3.9)$$

$$T_L = H + wD_L \quad (3.10)$$

$$T_R = H + wD_R \quad (3.11)$$

$$T = H + wD \quad (3.12)$$

3.5.3 Perhitungan *Dynamic Line Rating*

Pada bab sebelumnya, telah dijelaskan mengenai *dynamic line rating*.. Berikut ini adalah persamaan yang digunakan dalam perhitungan keseimbangan panas (*heat balance*). Persamaan ini digunakan dalam kedua kondisi yakni tower sama tinggi dan tower beda tinggi.

Untuk menghitung P_J (Pemanasan Joule) menggunakan persamaan berikut.

$$R_{ac}(T) = R_{ac}(T_1) + (T - T_1) \cdot \frac{R_{ac}(T_2) - R_{ac}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (3.13)$$

$$I = \sqrt{\frac{P_r + P_c - P_s}{R_{ac}}} \quad (3.14)$$

$$P_J = I^2 \cdot R_{ac}(T) \quad (3.15)$$

Untuk menghitung P_s (Pemanasan Sinar Matahari) menggunakan persamaan berikut.

$$P_s = \alpha_s \cdot I_T \cdot D \quad (3.16)$$

Untuk menghitung P_c (Pendinginan Konvektif) menggunakan persamaan berikut.

$$T_f = 0.5 \cdot (T_s + T_a) \quad (3.17)$$

$$\lambda_f = 2.368 \cdot 10^{-2} + 7.23 \cdot 10^{-5} \cdot T_f - 2.763 \cdot 10^{-8} \cdot T_f^2 \quad (3.18)$$

$$\gamma = \frac{1.293 - 1.525 \cdot 10^{-4}}{1 + 0.00367 \cdot T_f} \quad (3.19)$$

$$\mu_f = (17.239 + 4.635 \cdot 10^{-2} \cdot T_f - 2.03 \cdot 10^{-5} \cdot T_f^2) \cdot 10^{-6} \quad (3.20)$$

$$v_f = \mu_f / \gamma \quad (3.21)$$

$$R_s = d/2 \cdot (D - d) \quad (3.22)$$

$$Re = V \cdot \frac{D}{v_f} \quad (3.23)$$

$$Nu_{90} = B \cdot Re^n \quad (3.24)$$

$$P_{c,forced} = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_S - T_a) \cdot Nu_\delta \quad (3.25)$$

$$Gr = \frac{D^3 \cdot (T_S - T_a) \cdot g}{(T_f + 273) \cdot v_f^2} \quad (3.26)$$

$$Pr = c_f \cdot \frac{\mu_f}{\lambda_f} \quad (3.27)$$

$$Nu_{nat} = A \cdot (Gr \cdot Pr)^m \quad (3.28)$$

$$Nu_\beta = Nu_{nat} \cdot (1 - 6.76 \cdot 10^{-6} \cdot \beta^{2.5}) \quad (3.29)$$

$$P_{c,nat} = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_S - T_a) \cdot Nu_\beta \quad (3.30)$$

$$P_c = \max(P_{c,forced}; P_{c,nat}) \quad (3.31)$$

Untuk menghitung P_R (Pendinginan Radiatif) menggunakan persamaan berikut.

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot \varepsilon_S \cdot [(T_S + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (3.32)$$

3.5.4 Perhitungan Perubahan Andongan akibat Efek Termal dan Elastis

Untuk menghitung perubahan lendutan akibat efek thermal dan elastis menggunakan persamaan berikut. Persamaan ini digunakan dalam kedua kondisi yakni tower sama tinggi dan tower beda tinggi.

$$L_T = L_{T_{REF}} (1 + \alpha_{AS} (T - T_{REF})) \quad (3.33)$$

$$D = \sqrt{\frac{3S(L - S)}{8}} \quad (3.34)$$

$$H = \frac{W(S^2)}{8D} \quad (3.35)$$

$$T = H + wD \quad (3.36)$$

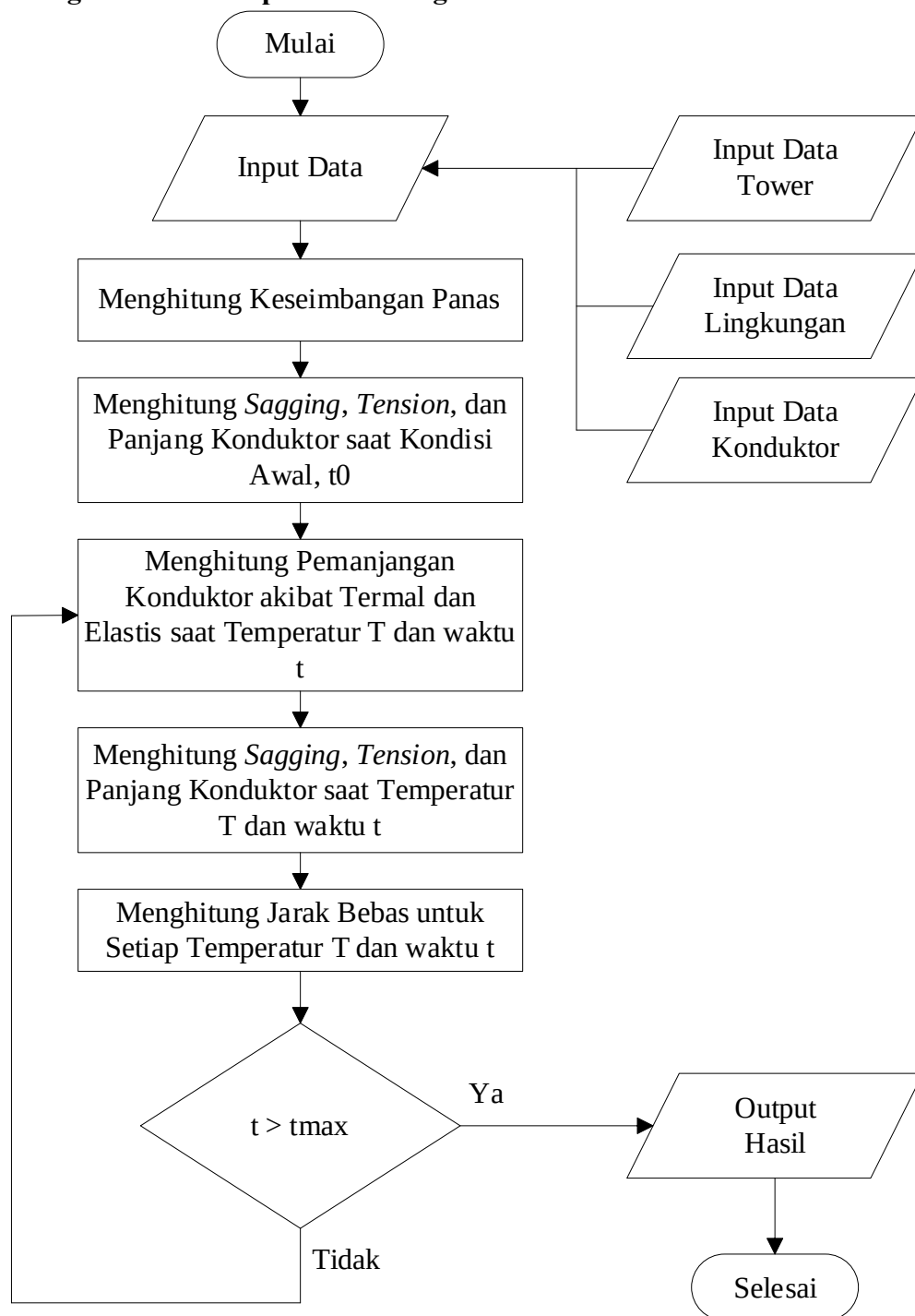
3.6 Proses Komputasi

Berikut adalah proses komputasi dari program yang telah dibuat,

1. Mengubah format data menjadi bentuk fungsi agar dapat dibaca oleh program

2. Menghitung parameter ($y(x)$, D , T , $L(S)$) untuk tower sama tinggi dan ($X_{\min}$, $Y_{\min}$, $y(x)$, D , $D(S/2)$, $D(X_{\min})$, T , $L(S)$) untuk tower beda tinggi pada kondisi awal, t_0 .
3. Menghitung keseimbangan panas (*heat balance*) dengan menggunakan parameter P_J , P_S , P_R , P_C yang telah didapatkan, sehingga diperoleh suhu konduktor untuk setiap t .
4. Menghitung besarnya perubahan lendutan akibat efek termal dan elastis terhadap suhu konduktor untuk setiap t .
5. Menghitung tegangan (*tension*), lengkungan (*sag*), dan panjang konduktor untuk setiap t .
6. $t > t_{\max}$
7. Lakukan langkah nomor 3 sampai nomor 5 hingga $t > t_{\max}$
8. Menampilkan hasil komputasi dalam bentuk tabel.

3.7 Diagram Alir Komputasi Andongan



Gambar 3.2 Diagram Alir Komputasi *Thermal-Sag*

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil analisis menunjukkan bahwa arus pembebanan berkontribusi signifikan terhadap kenaikan suhu konduktor. Peningkatan arus pembebanan secara langsung meningkatkan suhu konduktor, dengan pengaruh dominan dibandingkan faktor lingkungan seperti suhu udara, radiasi matahari, dan kecepatan angin.
2. Hasil analisis menunjukkan meningkatnya suhu konduktor menyebabkan ekspansi termal pada material konduktor, sehingga panjang konduktor bertambah. Penambahan panjang ini meningkatkan *sagging* karena gaya mekanis yang bekerja pada konduktor berkurang. Fenomena ini menunjukkan bahwa kenaikan suhu, baik akibat arus pembebanan maupun pengaruh lingkungan, secara langsung memengaruhi tingkat melendutnya konduktor (*sagging*).
3. Metode *catenary* dan *Dynamic Line Rating* dapat digunakan untuk memodelkan suhu konduktor dan perubahan *sagging* secara dinamis dengan memperhitungkan arus pembebanan dan parameter lingkungan, baik pada tower sama tinggi maupun beda tinggi.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan penulis untuk penelitian berikutnya adalah:

1. Melakukan pengukuran lapangan yang lebih mendalam untuk mengukur andongan (D), panjang konduktor (L), dan tegangan horizontal (H) di saluran

transmisi nyata. Hasil pengukuran ini akan membantu membandingkan data dengan perhitungan teoritis dan meningkatkan validitas hasil penelitian.

2. Menambahkan analisis aliran daya agar analisis lebih dalam lagi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Syafriyudin, “TRANSMISI DAYA LISTRIK,” 2012.
- [2] Muhammad Farid Muttaqin, “IMPLEMENTASI PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP LENGKUNGAN KONDUKTOR DALAM MENDESAIN SALURAN TRANSMISI,” 2020.
- [3] M. Sforza and M. Delfanti, “Overview of the events and causes of the 2003 Italian blackout,” in *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2006 - Proceedings*, 2006, pp. 301–308. doi: 10.1109/PSCE.2006.296323.
- [4] E. Lindberg, “The Overhead Line Sag Dependence on Weather Parameters and Line Current,” 2011.
- [5] CIGRE, *324 SAG-TENSION CALCULATION METHODS FOR OVERHEAD LINES*. 2007.
- [6] A. Halim, “Menghitung Andongan Kawat Saluran Transmisi 150 Kv,” 2019.
- [7] D. Novriandi, A. A. Zakri, and E. Ervianto, “Sag and Tension of 275 kV Transmission Line using Catenary,” 2019.
- [8] A. Hatibovic, “Derivation of equations for conductor and sag curves of an overhead line based on a given catenary constant,” *Periodica polytechnica Electrical engineering and computer science*, vol. 58, no. 1, pp. 23–27, 2014, doi: 10.3311/PPee.6993.
- [9] S. Suripto, J. Teknik, and E. Fakultas Teknik, “SISTEM TENAGA LISTRIK Oleh: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.”
- [10] Dunia Listrik, “Klasifikasi Transmisi Berdasarkan Tegangan.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://dunia-listrik.blogspot.com/2009/11/klasifikasi-saluran-transmisi.html>
- [11] PT. PLN (Persero), “SPLN ttl-7:1981,” 1981.

- [12] A. Azis and A. Nurdin, "PENGARUH ANDONGAN TERHADAP KAPASITANSI KE TANAH PADA SALURAN TRANSMISI 150 KV DARI GARDU INDUK KERAMASAN KE GARDU INDUK MARIANA," *JURNAL AMPERE* Volume, vol. 4, no. 1, 2019.
- [13] PT. PLN (Persero), "SPLN T5.006_2019 final+locked," 2019.
- [14] L. L. Grigsby, J. H. Harlow, and J. D. McDonald, "Electric Power Engineering Handbook Second Edition Electric Power Generation, Transmission, and Distribution Electric Power Transformer Engineering, Second Edition Electric Power Substations Engineering, Second Edition Power System Stability and Control," 2006. [Online]. Available: www.TechnicalBooksPdf.com
- [15] CIGRE, *GUIDE FOR THERMAL RATING CALCULATIONS OF OVERHEAD LINES Working Group B2.43*. 2014.
- [16] Kementerian ESDM, "BERITA NEGARA REPUBLIK INDONESIA," 2021. [Online]. Available: www.peraturan.go.id