

ANALISIS PERHITUNGAN JARAK ANTAR KAWAT DAN CLEARANCE SALURAN TRANSMISI UDARA

Heru Sumarsono (L2F 004 485)¹

Ir. Tedjo Sukmadi, M.T. – Susatyo Handoko, S.T., M.T.²
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

ABSTRAK

Saluran transmisi udara merupakan salah satu komponen penting dalam penyaluran energi listrik pada sistem tenaga listrik. Seiring dengan peningkatan kebutuhan listrik, selain perlu pembangunan pembangkit yang baru juga diperlukan pembangunan saluran transmisi yang baru untuk keperluan penyaluran energi listrik dari pembangkit. Untuk itu, perlu dilakukan perencanaan yang matang dalam pembangunan saluran transmisi dengan mempertimbangkan aspek mekanis, elektris, maupun ekonomis.

Hal-hal yang penting dalam perencanaan saluran transmisi adalah penentuan tegangan, isolator yang dipakai, pemilihan jenis konduktor, perhitungan andongan, serta konstruksi menara. Selain itu juga perlu diperhatikan tentang penentuan jarak antar kawat dan juga clearance pada saluran. Perhitungan jarak antar kawat penting untuk mengantisipasi terjadinya persinggungan antar konduktor saat terjadi ayunan konduktor. Sedangkan clearance penting untuk keamanan lingkungan sekitar.

Dalam Tugas Akhir ini akan dibahas mengenai penentuan jarak minimum antar kawat serta clearance pada saluran transmisi udara di mana hal tersebut sangat dipengaruhi oleh tegangan sistem, jenis konduktor yang dipakai, dan nilai andongan. Dengan adanya perencanaan yang tepat diharapkan dapat diperoleh hasil yang optimal dalam pembangunan saluran transmisi udara.

Kata kunci : jarak antar kawat, andongan, clearance

I. PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Kebutuhan akan energi listrik setiap tahun semakin meningkat sehingga penyediaan dan suplai energi listrik harus ditingkatkan. Untuk itu perlu adanya pembangunan atau perluasan pusat-pusat pembangkit. Dengan adanya pembangkit baru tentu diperlukan juga pembangunan jaringan transmisi, gardu induk dan jaringan distribusi sebagai penyalur energi listrik sehingga dapat memenuhi dan meningkatkan kontinuitas pelayanan energi listrik kepada konsumen.

Pembangunan saluran transmisi memerlukan perencanaan yang matang agar penyaluran energi listrik dapat optimal. Perencanaan dalam pembangunan saluran transmisi daya listrik ini harus mempertimbangkan hal-hal yang meliputi perencanaan secara teknis, baik mekanis maupun elektris, dan ekonomis.

Dengan adanya perencanaan saluran transmisi daya listrik yang baik diharapkan agar dalam pembangunan saluran transmisi dapat menjadi lebih optimal sehingga setelah saluran transmisi beroperasi untuk menyalurkan daya listrik akan menjadi andal, efektif, dan efisien, serta aman bagi lingkungan di sekitarnya.

1.2 TUJUAN

Tujuan pembuatan tugas akhir ini adalah :

1. Menghitung jarak antar kawat dan *clearance* pada perencanaan saluran transmisi udara.
2. Menganalisis hasil perhitungan jarak antar kawat dan *clearance* dengan beberapa metode.
3. Membandingkan hasil perhitungan jarak antar kawat dan *clearance* terhadap standar yang ada
4. Menganalisis faktor yang berpengaruh terhadap perhitungan jarak antar kawat dan *clearance* saluran transmisi udara.

1.3 PEMBATASAN MASALAH

Untuk menyederhanakan permasalahan dalam Tugas Akhir ini diperlukan adanya batasan-batasan, yaitu:

1. Tidak membahas konstruksi menara transmisi, isolator-isolator, maupun peralatan-peralatan pada menara.
2. Nilai induktansi dan kapasitansi akibat pengaruh GMD, GMR, dan bundled diabaikan.
3. Tidak membahas perhitungan medan listrik dan medan elektromagnet yang terjadi pada saluran udara.

¹ Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro UNDIP

² Dosen Jurusan Teknik Elektro UNDIP

II. DASAR TEORI

2.1 Pendahuluan

Perencanaan saluran transmisi meliputi beberapa tahap yang sangat terkait antara satu tahapan dengan tahapan atau bagian lainnya. Di antaranya adalah penentuan tegangan, pemilihan jenis kawat konduktor, perhitungan nilai andongan, penentuan jarak minimum antar kawat konduktor, serta *clearance* pada saluran.

2.2 Pemilihan Tegangan Transmisi

Ada beberapa metode yang dapat digunakan dalam pemilihan tegangan kerja sistem. Namun, dalam tugas akhir ini hanya akan menggunakan beberapa metode saja, yaitu penentuan tegangan berdasarkan perhitungan daya natural serta penentuan tegangan dengan rumus empiris yang diformulasikan oleh Alfred Still^[4].

Untuk penentuan tegangan kerja berdasarkan daya natural digunakan rumus sebagai berikut :

$$V = \sqrt{\frac{P_N}{Z_0}} \text{ KV} \quad (2.1)$$

di mana

$$\begin{aligned} V &= \text{tegangan} \\ P_N &= \text{daya natural} \\ Z_0 &= \text{impedansi karakteristik} \end{aligned}$$

Sedangkan jika digunakan pendekatan rumus yang diformulasikan oleh Alfred Still :

$$V = 5,5 + \sqrt{l + \frac{KW_{maks}}{100}} \text{ KV} \quad (2.2)$$

atau

$$V = 5,5 + \sqrt{l + \frac{KVA}{150}} \text{ KV} \quad (2.3)$$

di mana

$$l = \text{panjang kawat dalam mil}$$

2.3 Pemilihan Jenis Konduktor

Konduktor atau penghantar yang digunakan dalam saluran transmisi dapat berupa kawat tembaga tarikan, kawat aluminium tarikan, *alloy* (misal ACSR, AAAC, ACCR, ACFR, dll). Pemilihan jenis konduktor ini erat kaitannya dengan daya yang disalurkan, tegangan kerja saluran, arus yang mengalir, serta rugi-rugi daya yang

mungkin terjadi. Hal-hal yang penting dalam pemilihan jenis konduktor adalah luas penampang, berat, kekuatan mekanis, panjang, ketersediaan konduktor yang ada di pasaran, juga aspek ekonomis.

Perhitungan luas penampang konduktor dapat dilakukan dengan beberapa cara, salah satunya adalah dengan rumus berikut :

$$A = \frac{P^2 \rho L}{P_L V^2 \cos^2 \phi} \quad (2.4)$$

di mana

P	=	daya
V	=	tegangan
I	=	arus
R	=	tahanan kawat
cos φ	=	faktor daya
A	=	luas penampang konduktor
ρ	=	tahanan jenis kawat
L	=	panjang saluran
P _L	=	rugi-rugi

Selain itu dapat juga digunakan rumus pendekatan untuk menentukan penampang kawat optimum, dengan memperhatikan faktor-faktor seperti : biaya yang ekonomis, kapasitas hantar kawat (faktor termis), pengaturan tegangan, dan kuat tarik kawat^[4]. Persamaan yang diformulasikan untuk penampang kawat optimum adalah

$$A = I_m \sqrt{\frac{\rho C_f C_e}{1000 w C_e F}} \quad (2.5)$$

di mana

I _m	=	arus maksimum
w	=	berat kawat per CM-foot (CM = Circular Mil)
	=	3,03 x 10 ⁻⁶ untuk kawat tembaga
A	=	penampang kawat dalam CM
√C _f	=	9 + 0,8459K
ρ	=	tahanan jenis kawat
K	=	faktor beban tahunan dalam persen
C _e	=	harga kawat per pound
C _e	=	harga energi per Kwh
F	=	biaya tetap tahunan, termasuk pajak-pajak, asuransi, biaya modal, dan depreciasi (kira-kira = 15%) ^[4]

Kapasitas hantar arus dari konduktor juga merupakan faktor yang penting dalam pemilihan jenis konduktor. Rumus empiris untuk menghitung kapasitas hantar arus dari SCHURIG dan FRICK^[4] adalah

$$I = \sqrt{\frac{A \Delta t}{R} \left(0,0025 + \frac{0,009}{\sqrt{d}} \right)} \text{ Ampere} \quad (2.6)$$

dimana

I	=	arus kawat (ampere)
R	=	tahanan kawat (ohm/foot)
A	=	luas permukaan kawat (inchi ² /foot panjang kawat)
d	=	diameter kawat (inchi)
Δt	=	kenaikan temperatur (°C)

2.4 Andongan (Sag) dan Tegangan Tarik

Karena beratnya, maka penghantar yang direntangkan antara dua tiang transmisi mempunyai bentuk lengkung tertentu (*catenary curve*) yang dapat dinyatakan

oleh persamaan-persamaan tertentu^[1,3]. Andongan dan tegangan tarik pada suatu rentang kawat penghantar antar menara dalam saluran udara dipengaruhi oleh faktor-faktor sebagai berikut : berat kawat per satuan panjang, modulus elastisitas, koefisien perubahan panjang, *ultimate strength*, diameter kawat, jarak antara dua menara (*span*), dan kondisi lingkungan sekitar yang mungkin berpengaruh, misalnya angin, es, debu, dan suhu. Berat efektif maksimum dari kawat penghantar adalah jumlah vektor dari berat vertikal dan tekanan angin horisontal.

Nilai andongan dapat dicari dengan menggunakan pendekatan *catenary* seperti berikut :

$$d = \frac{H}{w} \left(\cosh \frac{wL}{2H} - 1 \right) \quad (2.7)$$

atau dengan pendekatan secara parabola berikut :

$$d = \frac{wL^2}{8H} \quad (2.8)$$

Panjang kawat dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut ini :

$$l = \frac{2H}{w} \sinh \frac{wL}{2H} \quad (2.9)$$

Sedang perhitungan tegangan tarik yang dipengaruhi kondisi lingkungan adalah

$$T_2^2 \left[T_2 - \left(T_1 - \frac{w_1^2 L^2 MA}{24T_1^2} - \alpha \Delta t MA \right) \right] = \frac{w_2^2 L^2 MA}{24} \quad (2.10)$$

Di mana

H	=	tegangan tarik horisontal (kg)
w	=	berat total konduktor per satuan panjang (kg/m)
L	=	panjang <i>span</i> (m)
d	=	andongan (m)
l	=	panjang kawat konduktor (m)
T ₂	=	tegangan tarik akhir (kg)
T ₁	=	tegangan tarik awal (kg)
w ₁	=	berat awal (kg/m)
w ₂	=	berat akhir (kg/m)
M	=	modulus elastisitas
A	=	luas penampang kawat (mm ²)
α	=	koefisien muai panjang (°C)
Δt	=	perubahan suhu (°C)

2.5 Jarak Antar Kawat

Jarak antar kawat konduktor dipengaruhi oleh beberapa hal, terutama hal-hal mekanis dari kawat konduktor. Bahan material dan diameter konduktor harus diperhatikan dalam perhitungan, karena untuk konduktor yang kecil, khususnya yang terbuat dari aluminium, memiliki berat yang lebih ringan, sehingga jika terdapat tekanan angin akan lebih mengayun secara vertikal dibandingkan dengan konduktor dengan luas penampang yang lebih besar dan bahan yang lebih berat. Biasanya konduktor akan mengayun secara sinkron dengan angin, tetapi untuk *span* yang panjang dan kawat yang kecil, ada kemungkinan konduktor mengayun dengan tidak sinkron, dan ukuran konduktor serta andongan maksimum pada titik tengah *span* adalah faktor yang harus diperhitungkan dalam menentukan jarak antar kawat konduktor.

Ada beberapa rumus empiris yang digunakan untuk menghitung jarak minimum antar kawat konduktor

yang telah berhasil dalam pengujiannya, salah satu di antaranya adalah perhitungan menurut *Mecomb's formula*^[16]. Rumusnya adalah sebagai berikut

$$a = 0,3048 V + 4.010 \frac{D}{w} \sqrt{S} \text{ cm} \quad (2.11)$$

Perhitungan menurut *VDE (Verbandes Deutscher Electrotechnischer)*^[16] adalah sebagai berikut :

$$a = 7.5\sqrt{S} + \frac{V^2}{200} \text{ cm} \quad (2.12)$$

Metode perhitungan menurut *Swedish formula*^[16] adalah sebagai berikut :

$$a = 6.5\sqrt{S} + 0.7 V \text{ cm} \quad (2.13)$$

Metode perhitungan menurut *French formula*^[16] adalah sebagai berikut :

$$a = 8\sqrt{S+L} + \frac{V}{1.5} \text{ cm} \quad (2.14)$$

Di mana

- a = jarak antar kawat dalam cm
- V = tegangan dalam kV
- S = andongan dalam cm
- L = panjang renteng isolator dalam cm
- D = diameter konduktor dalam cm
- w = berat konduktor dalam kg/m

Rumus jarak minimum antar kawat menurut *Midlands Electricity*^[20] adalah sebagai berikut :

$$a = 0.65 \times d_{\max} \text{ m} \quad (2.15)$$

di mana

- a = jarak antar kawat dalam m
- d_{max} = andongan pada suhu maksimum

Metode perhitungan lain juga telah diformulasikan oleh *NESC (National Electric Safety Code)*^[4,16] dan digunakan sebagai standar di Amerika Serikat. Rumus dari NESC adalah sebagai berikut :

$$a = 0,3 \text{ inchi per kV} + 8 \sqrt{\frac{S}{12}} \text{ inchi} \quad (2.16)$$

Di mana

- a = jarak antar kawat dalam inchi
- V = tegangan dalam kV
- S = andongan dalam inchi

Rumus lain hasil formulasi NESC adalah sebagai berikut

$$a = 0.762 \text{ cm per kV} + 3.681\sqrt{S} + \frac{L}{\sqrt{2}} \text{ cm} \quad (2.17)$$

2.6 Clearance

Pengertian *clearance* sebenarnya meliputi *clearance* secara vertikal dan horisontal. *Clearance* secara horisontal berhubungan dengan jarak bebas terhadap kaki-kaki menara. Sedangkan *clearance* secara vertikal adalah jarak bebas terhadap kawat konduktor terendah. Dalam tugas akhir ini *clearance* yang dimaksud adalah *clearance* secara vertikal. Tinggi kawat minimum di atas tanah menurut *Safety Code Formula*^[4] adalah :

$$h = 20 \text{ ft} + (kV - 50)0,5'' + 0,75(d_{\max} - d_{\text{kerja}}) \text{ inchi} \quad (2.18)$$

di mana

- kV = tegangan

d_{max} = andongan pada suhu maksimum

d_{kerja} = andongan pada suhu kerja

Sedang nilai *clearance* menurut *IER*^[16] adalah

$$h = 5.182 + \left[0.305 \times \frac{(kV - 33)}{33} \right] \text{ m} \quad (2.19)$$

III. PERANCANGAN PERANGKAT LUNAK

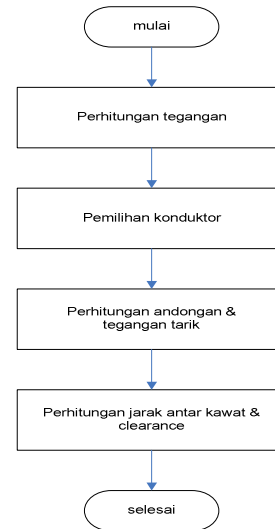
3.1 Algoritma Program

Algoritma program adalah sebagai berikut

1. Mulai program.
2. Hitung nilai tegangan berdasar rumus atau tentukan nilainya.
3. Pilih jenis konduktor yang digunakan.
4. Hitung luas penampang minimum dan luas penampang konduktor terpilih
5. Jika luas penampang konduktor terpilih tidak kurang dari luas penampang minimum berarti memenuhi syarat.
6. Hitung kapasitas hantar arus.
7. Pilih metode perhitungan andongan.
8. Hitung nilai andongan, jarak antar kawat, dan *clearance*.
9. Selesai

3.2 Flowchart Program

Flowchart program adalah seperti berikut :



Gambar 3.1 *Flowchart* program secara keseluruhan

IV. PENGUJIAN PERANGKAT LUNAK DAN ANALISIS

4.1 Perhitungan Program

Perhitungan program berdasarkan persamaan-persamaan di atas adalah sebagai berikut

Tabel 4.1 Data masukan perhitungan program

Parameter	Nilai	Satuan
Daya	1000	MW
Faktor Daya	0.86	
Panjang Saluran	200	m
Tegangan	500	kV
Jenis konduktor	ACSR Gannet	
Jumlah bundle	1	
Diameter	25.76	mm ²

Tabel 4.1 Data masukan perhitungan program (lanjutan)

Parameter	Nilai	Satuan
Luas Penampang	392,8	mm ²
Berat kawat	1,408	Kg/m
Tahanan jenis	0.033588	ohm mm ² /m
Resistansi	0.08551	ohm/km
KHA	805	Ampere
Harga kawat	1250	Rp/Kg
Harga energi	650	Rp/KWh
Faktor beban tahunan	45	%
Biaya tetap tahunan	15	%
Suhu konduktor	50	°C
Suhu lingkungan	15	°C
Kuat tarik	11986	Kg
Suhu standar	15	°C
Tebal es	0	mm ²
Kecepatan angin	0	Km/jam
Faktor bentuk	100	%
Faktor ketidaksamaan	1	
Span	400	M
Horizontal tension	2398.3	Kg
Sudut pergeseran rute	5	°
Panjang isolator	2.5	M

Tabel 4.2 Hasil perhitungan program

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan	500	kV
Jenis konduktor	ACSR Gannet	
Luas minimum	392.79	mm ²
Luas penampang konduktor	392.8	mm ²
KHA	778.39723	Ampere
Andongan	11.755146	m
Tegangan tarik maksimum	2414.85125	Kg
Panjang kawat	400.919109	m
Gaya pada menara	210.66866	Kg
FOS	4.99771	
Mecomb's	4.03937	m
VDE	15.07143	m
NESC 1	5.07152	m
NESC 2	6.48627	m
Swedish	5.72858	m
French	6.30037	m
Midlands Electricity	9.281077	m
Clearance NESC	11.85907	m
Clearance IER	9.49821	m

4.2 Analisis Jarak Antar Kawat dan Clearance

Perhitungan jarak antar kawat dan clearance pada saluran transmisi udara terutama dipengaruhi oleh tegangan dan juga nilai andongannya. Nilai tegangan dapat dipengaruhi oleh daya yang disalurkan, nilai impedansi karakteristik saluran, panjang total saluran, dan faktor daya. Sedangkan nilai andongan dipengaruhi oleh pemilihan jenis konduktor dan kondisi lingkungan. Setiap jenis konduktor tentunya memiliki spesifikasi yang berbeda-beda, misalnya saja berat tiap satuan panjang, diameter, luas penampang, hambatan jenis, resistansi, koefisien muai, modulus elastis, dan sebagainya. Kondisi lingkungan yang berpengaruh meliputi pengaruh suhu, angin, dan es yang menutupi permukaan konduktor. Suhu berpengaruh pada pemuaian bahan konduktor tersebut, sedangkan angin dan es berpengaruh terhadap berat total konduktor. Di samping itu,

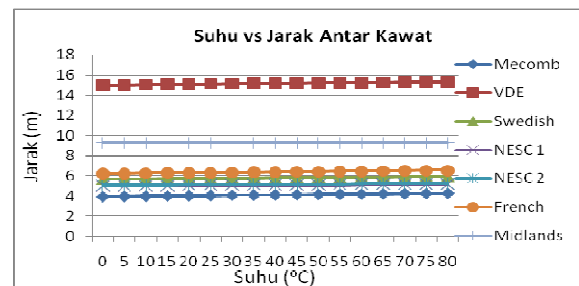
panjang *span* juga berpengaruh terhadap andongan di mana semakin panjang *span* maka ada kemungkinan terjadi andongan yang lebih besar.

Berikut ini tabel hasil perhitungan jarak antar kawat dengan variasi suhu, andongan, dan tegangan.

Tabel 4.3 Hasil perhitungan jarak antar kawat dengan variasi suhu

Suhu (°C)	Jarak Mecomb (m)	Jarak VDE (m)	Jarak Swedish (m)
0	3.971	15.002	5.668
5	3.994	15.025	5.689
10	4.017	15.049	5.709
15	4.039	15.071	5.729
20	4.061	15.094	5.748
25	4.083	15.116	5.767
30	4.104	15.137	5.786
35	4.125	15.159	5.804
40	4.145	15.179	5.822
45	4.165	15.200	5.840
50	4.185	15.220	5.857
55	4.204	15.240	5.875
60	4.223	15.259	5.891
65	4.242	15.278	5.908
70	4.260	15.297	5.924
75	4.278	15.316	5.940
80	4.296	15.334	5.956

Suhu (°C)	Jarak NESC 1 (m)	Jarak NESC 2 (m)	Jarak French (m)	Jarak Midlands (m)
0	5.037	6.452	6.232	9.281
5	5.049	6.464	6.255	9.281
10	5.060	6.475	6.278	9.281
15	5.072	6.486	6.300	9.281
20	5.083	6.497	6.322	9.281
25	5.093	6.508	6.344	9.281
30	5.104	6.519	6.366	9.281
35	5.114	6.529	6.387	9.281
40	5.125	6.539	6.407	9.281
45	5.135	6.549	6.428	9.281
50	5.144	6.559	6.448	9.281
55	5.154	6.569	6.467	9.281
60	5.164	6.578	6.487	9.281
65	5.173	6.588	6.506	9.281
70	5.182	6.597	6.524	9.281
75	5.191	6.606	6.543	9.281
80	5.200	6.615	6.561	9.281



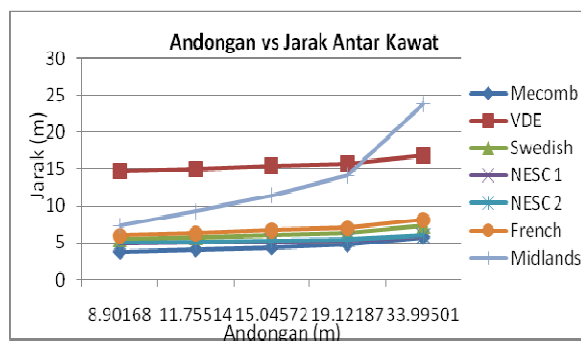
Gambar 4.1 Grafik hubungan suhu dan jarak antar kawat

Berdasar tabel hasil perhitungan tampak bahwa semakin tinggi suhu maka jarak antar kawat pun akan semakin besar.

Tabel 4.4 Hasil perhitungan jarak antar kawat dengan variasi nilai andongan

Andongan (m)	Jarak Mecom (m)	Jarak VDE (m)	Jarak Swedish (m)
8.902	3.713	14.738	5.439
11.755	4.039	15.071	5.729
15.046	4.370	15.409	6.021
19.122	4.732	15.780	6.342
33.995	5.802	16.873	7.290

Andongan (m)	Jarak NESC 1 (m)	Jarak NESC 2 (m)	Jarak French (m)	Jarak Midlands (m)
8.902	4.908	6.322	5.975	7.355
11.755	5.072	6.486	6.300	9.281
15.046	5.237	6.652	6.636	11.472
19.122	5.419	6.834	7.010	14.139
33.995	5.955	7.370	8.133	23.837



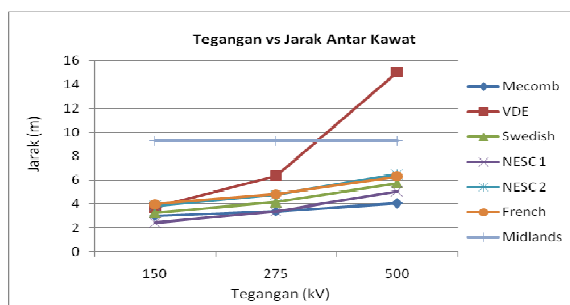
Gambar 4.2 Grafik hubungan andongan dan jarak antar kawat

Dari grafik tampak bahwa jarak minimum antar kawat sebanding dengan nilai andongannya.

Tabel 4.5 Hasil perhitungan jarak antar kawat dengan variasi nilai tegangan

Tegangan (kV)	Jarak Mecom (m)	Jarak VDE (m)	Jarak Swedish (m)
150	2.973	3.696	3.279
275	3.354	6.353	4.154
500	4.039	15.071	5.729

Tegangan (kV)	Jarak NESC 1 (m)	Jarak NESC 2 (m)	Jarak French (m)	Jarak Midlands (m)
2.405	3.819	3.967	9.281	2.405
3.357	4.772	4.800	9.281	3.357
5.072	6.486	6.300	9.281	5.072



Gambar 4.3 Grafik hubungan tegangan dan jarak antar kawat

Dari grafik tampak bahwa jarak minimum antar kawat sebanding dengan nilai tegangannya

Berikut perbandingan hasil perhitungan jarak antar kawat dan *clearance* antara tiga jenis konduktor dengan standar yang ada pada tegangan 500 kV dan 150 kV.

Tabel 4.6 Data masukan perhitungan variasi jenis konduktor

Parameter	Nilai	Satuan
Jumlah bundle	1	
Diameter	25.76	mm ²
Suhu standar	15	°C
Suhu	15	°C
Tebal es	0	mm ²
Kecepatan angin	0	Km/jam
Faktor bentuk	100	%
Faktor ketidaksamaan	1	
Span	400	m
Horizontal tension Gannet	2398.3	Kg
Horizontal tension Zebra	2605.143	Kg
Horizontal tension Hawk	1766.118	Kg
Sudut pergesean Rute	5	°
Panjang isolator	2	m

Tabel 4.7 Hasil perhitungan andongan

Jenis konduktor	Sag (m)	Tension (kg)	Panjang kawat (m)	Gaya (kg)
Gannet	11.76	2414.85	400.92	210.67
Hawk	11.08	1776.94	400.82	155.02
Zebra	12.46	2625.34	401.03	229.03

Tabel 4.8 Perbandingan jarak antar kawat untuk SUTET 500 kV sirkit tunggal menurut perhitungan dan SNI

Jenis Konduktor	SNI (m)	Jarak Mecom (m)	Jarak VDE (m)	Jarak Swedish (m)
Gannet	12	4.04	15.07	5.73
Hawk		4.50	14.99	5.66
Zebra		4.02	15.15	5.79

Jenis Konduktor	SNI (m)	Jarak NESC 1 (m)	Jarak NESC 2 (m)	Jarak French (m)	Jarak Midlands (m)
Gannet	12	5.07	6.49	6.30	9.28
Hawk		5.03	6.45	6.23	8.90
Zebra		5.11	6.52	6.38	9.71

Tabel 4.9 Perbandingan jarak antar kawat untuk SUTET 500 kV sirkit ganda menurut perhitungan dan SNI

Jenis Konduktor	SNI (m)	Jarak Mecom (m)	Jarak VDE (m)	Jarak Swedish (m)
Gannet	7.30	4.04	15.07	5.73
Hawk		4.50	14.99	5.66
Zebra		4.02	15.15	5.79

Jenis Konduktor	SNI (m)	Jarak NESC 1 (m)	Jarak NESC 2 (m)	Jarak French (m)	Jarak Midlands (m)
Gannet	7.30	5.07	6.49	6.30	9.28
Hawk		5.03	6.45	6.23	8.90
Zebra		5.11	6.52	6.38	9.71

Tabel 4.10 Perbandingan jarak antar kawat untuk SUTT 150 kV dengan tiang baja atau beton menurut perhitungan dan SNI

Jenis Konduktor	SNI (m)	Jarak Mecomb (m)	Jarak VDE (m)	Jarak Swedish (m)
Gannet	2.25	2.97	3.70	3.29
Hawk		3.43	3.62	3.21
Zebra		2.96	3.77	3.34

Jenis Konduktor	SNI (m)	Jarak NESC 1 (m)	Jarak NESC 2 (m)	Jarak French (m)	Jarak Mid lands (m)
Gannet	2.25	2.40	3.82	3.97	9.28
Hawk		2.37	3.78	3.89	8.90
Zebra		2.44	3.86	4.04	9.71

Tabel 4.11 Perbandingan jarak antar kawat untuk SUTT 150 kV menara menurut perhitungan dan SNI

Jenis Konduktor	SNI (m)	Jarak Mecomb (m)	Jarak VDE (m)	Jarak Swedish (m)
Gannet	4.20	2.97	3.70	3.29
Hawk		3.43	3.62	3.21
Zebra		2.96	3.77	3.34

Jenis Konduktor	SNI (m)	Jarak NESC 1 (m)	Jarak NESC 2 (m)	Jarak French (m)	Jarak Mid lands (m)
Gannet	4.20	2.40	3.82	3.97	9.28
Hawk		2.37	3.78	3.89	8.90
Zebra		2.44	3.86	4.04	9.71

Secara keseluruhan, perhitungan yang memberikan hasil paling mendekati dan memenuhi standar SNI 04-6918-2002 adalah metode VDE dan NESC. Kedua metode tersebut memberikan hasil perhitungan mendekati standar SNI 04-6918-2002 baik pada tegangan tinggi ataupun ekstra tinggi. Metode yang diformulasikan oleh *Midlands Electricity* sebenarnya memberikan hasil yang memenuhi standar SNI 04-6918-2002, namun nilainya berbeda jauh dari standar. Untuk SUTET 500 kV sirkit ganda, perhitungan dengan *French Formula* memberikan hasil yang paling mendekati dengan standar SNI 04-6918-2002. Namun, berdasar data yang diperoleh dari PT PLN (Persero) PIKITRING di mana terdapat saluran sirkit ganda yang jarak antar kawatnya 12,28 m dan 12,25 m, untuk tegangan ekstra tinggi perhitungan dengan metode VDE memberikan hasil yang memenuhi standar.

Dari beberapa metode di atas, tidak dapat dikatakan bahwa satu metode salah sedang metode lainnya benar. Semuanya, baik perhitungan maupun standar yang ada memiliki pertimbangan tentang faktor-faktor yang harus diperhitungkan yang dapat mempengaruhi jarak minimum antar kawat. Faktor-faktor tersebut antara lain andongan, tegangan, jenis konduktor, kondisi lingkungan, lokasi penerapan metode tersebut, letak geografis, ataupun hasil pengujian yang telah dilakukan. Yang tidak kalah pentingnya dalam penentuan jarak minimum antar kawat adalah standar yang digunakan dalam suatu wilayah atau negara.

Tabel 4.12 Perbandingan *clearance* pada tegangan 500 kV menurut perhitungan dan standar

Jenis konduktor	Standar		Clearance	
	SNI (m)	NESC (m)	NESC (m)	IER (m)
ACSR Gannet	9-18	7.32-11.58	11.859	9.498
ACSR Hawk			11.861	9.498
ACSR Zebra			11.858	9.498

Tabel 4.13 Perbandingan *clearance* pada tegangan 150 kV menurut perhitungan dan standar

Jenis konduktor	Standar		Clearance	
	SNI (m)	NESC (m)	NESC (m)	IER (m)
ACSR Gannet	5-13.5	5.63-9.45	7.414	6.263
ACSR Hawk			7.416	6.263
ACSR Zebra			7.413	6.263

Dari tabel perbandingan terlihat bahwa nilai *clearance* hasil perhitungan berada pada jangkauan dari standar yang ada. Mengingat penentuan standar *clearance* yang didasarkan pada kondisi lokasi lingkungan di bawah saluran, maka nilai *clearance* yang ada pada standar bervariasi nilainya pada jangkauan tertentu. Sedangkan nilai *clearance* hasil perhitungan dapat dianggap sebagai pendekatan untuk menghitung *clearance* pada kondisi yang umum. Sehingga dari tabel di atas dapat disimpulkan bahwa hasil perhitungan *clearance* dengan kedua metode telah memenuhi syarat.

Dari peraturan standar *clearance* yang telah ada, faktor-faktor yang dijadikan pertimbangan adalah tegangan, andongan, dan kondisi lokasi lingkungan sekitar saluran. Yang perlu diingat adalah meskipun hasil perhitungan dan peraturan standar berbeda, tidak dapat dikatakan bahwa kedua metode perhitungan salah ataupun peraturan tersebut yang salah. Setiap peraturan ataupun metode memiliki dasar pertimbangan mengenai faktor-faktor yang perlu diperhitungkan, di mana terdapat kemungkinan perbedaan antar satu dengan lainnya. Misalkan saja untuk standar peraturan di atas adalah penentuan nilai *clearance* yang didasarkan pada pertimbangan kondisi lokasi lingkungan sekitar saluran, sehingga tidak hanya *clearance* minimum saja yang dipakai, akan tetapi ditetapkan nilai yang lebih besar daripada nilai minimumnya untuk lebih menjamin faktor keamanan. Sedang untuk rumus berdasar dua metode di atas, sangat sulit untuk ikut menyertakan kondisi tersebut dalam rumus empiris perhitungan.

V. PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari Tugas Akhir ini diantaranya adalah

1. Berdasar hasil perhitungan pada tabel 4.8 hingga tabel 4.11, dari beberapa metode perhitungan jarak minimum antar kawat, yang memberikan hasil paling mendekati dan memenuhi dengan standar jarak antar kawat yang diterapkan di Indonesia adalah metode VDE.
2. Penentuan *clearance* selain dipengaruhi oleh tegangan dan andongan, juga harus memperhatikan kondisi lokasi sekitar saluran.
3. Berdasar hasil perhitungan pada tabel 4.12 dan tabel 4.13, perhitungan *clearance* yang paling mendekati dan memenuhi dengan standar di Indonesia adalah metode NESC.

5.2 SARAN

1. Perhitungan jarak antar kawat maupun *clearance* perlu mempertimbangkan kondisi lokasi di sekitar saluran.
2. Dalam melakukan perhitungan jarak antar kawat maupun *clearance* akan lebih baik jika ikut mempertimbangkan efek medan elektromagnet dan medan elektrostatik pada saluran.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arismunandar, A. dan Kuwahara, S. "Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid II : Saluran Transmisi", cetakan kelima, Pradnya Paramita, Jakarta, 1982.
- [2] Deshpande, M.V. "Electrical Power System Design", Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd, New Delhi. 1984.
- [3] Gönen, Turan. "Electric Power Transmission System Engineering : Analysis & Design". John Wiley and Sons, Inc. Toronto. 1988.
- [4] Hutauruk, T. S. "Transmisi Daya Listrik," cetakan keempat, Erlangga, Jakarta, 1996.
- [5] Saadat, Hadi. "Power System Analysis". Mc Graw Hill Inc, Singapore, 1999.
- [6] Sulasno, Ir. "Analisis Sistem Tenaga Listrik". Edisi kedua, Badan Penerbit Universitas Diponegoro, Semarang. 2001.
- [7] Sulasno, Ir. "Teknik Distribusi Daya Listrik". Edisi kedua, Badan Penerbit Universitas Diponegoro, Semarang. 2001.
- [8] -----"Pedoman Penyuluhan Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi No. 01.P/47/MPE/1992", Jakarta, 1992.
- [9] -----"SPLN I", PT PLN (Persero), Jakarta, 1995.
- [10] -----"SPLN 41-7-1981 : Hantaran Aluminium Berpenguat Baja (ACSR)", PT PLN (Persero), Jakarta, 1981.
- [11] -----"SPLN 41-10-1991 : Penghantar Aluminium Paduan Berselubung Polietilen Ikat Silang (AAC-S)", PT PLN (Persero), Jakarta, 1991.
- [12] -----"SNI 04-6918-2002 : Ruang Bebas dan Jarak Bebas Minimum pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET)", BSN, Jakarta, 2002.
- [13] Fauzi, Akhmad. "Studi Analisis Pemilihan Tegangan Optimal Untuk Saluran Transmisi Daya Listrik". Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro Semarang, 2006.
- [14] Pambudi, Kukuh. "Simulasi Perhitungan Andongan Dan Tegangan Tarik Pada Saluran Udara". Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro Semarang, 2001.
- [15] Kumar, S.R. Satish dan A.R. Santha Kumar. "Transmission Tower", http://nptel.iitm.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Design_Steel_Structures_II/7_transmission_towers/1_introduction.pdf, Desember 2008.
- [16] Kumar, S.R. Satish dan A.R. Santha Kumar. "Material Properties, Clearances and Tower Configurations", http://nptel.iitm.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Design_Steel_Structures_II/7_transmission_towers/2_material_properties.pdf, Oktober 2008.
- [17] Kumar, S.R. Satish dan A.R. Santha Kumar. "Factor of Safety and Load", http://nptel.iitm.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Design_Steel_Structures_II/7_transmission_towers/3_safety_and_loads.pdf, Desember 2008.
- [18] Kumar, S.R. Satish dan A.R. Santha Kumar. "Tower Design", http://nptel.iitm.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Design_Steel_Structures_II/7_transmission_towers/4_tower_design.pdf, Desember 2008.
- [19] Ananda, Stephanus Antonius dkk. "Pengaruh Perubahan Arus Saluran Terhadap Tegangan Tari Dan Andongan pada SUTET 500 KV di Zona Krian", <http://puslit.petra.ac.id/~puslit/journals/pdf.php?PublishedID=ELK06060102>, Agustus 2008.
- [20] -----"Overhead Lines Reference Manual", <http://www.eon-uk.com/distribution/CiCdocs/01%20Technical%20Documents/CN%20West/OHL%20REFERENCE%20MANUAL.pdf>, Desember 2008.
- [21] -----, <http://www.lasercables.com/aac-acsr-aaac-conductors/lumino-acsr-conductors.htm>, Oktober 2008.
- [22] -----, <http://www.migas-indonesia.com/index.php?module=article&sub=article&act=view&id=3669>, Desember 2008.
- [23] -----, <http://www.nationalgrid.com/>, November 2008.
- [24] Prasetyono, Suprihadi. "Analisis Unjuk Kerja Mekanis Konduktor ACCR Akibat Perubahan Arus Saluran", <http://www.petra.ac.id/~puslit/journals/pdf.php?PublishedID=ELK07070104>, Agustus 2008.
- [25] -----"PPL Design Criteria and Safety Practices", <http://www.pplreliablepower.com/NR/rdonlyres/DE65C1DF-A8FD-4B84-B26A-39CB554006B7/0/E7PPLDesignCriteriaandSafetyPractices.pdf>, Januari 2009.
- [26] -----"Design Manual for High Voltage Transmission Lines", <http://www.usda.gov/rus/electric/pubs/1724e-200.pdf>, November 2008.



Heru Sumarsono (L2F 004 485)

Lahir di Magelang, menyelesaikan pendidikan dasar hingga pendidikan menengah di Magelang. Saat ini sedang menempuh pendidikan di jurusan Teknik Elektro Undip Bidang Konsentrasi Teknik Energi Listrik

Semarang, Maret 2009
Menyetujui

Pembimbing I

Pembimbing II

Ir. Tedjo Sukmadi, M.T.
NIP 131 764 876

Susatyo Handoko, S.T., M.T.
NIP 132 282 683