

PERHITUNGAN KORONA, AUDIBLE NOISE DAN RADIO INTERFERENCE PADA SALURAN UDARA TEGANGAN EKSTRA TINGGI 500 KV DENGAN VARIASI JARAK ANTAR KAWAT DAN JARAK ANTAR SIRKIT

Amalia Saraswati, Tejo Sukmadi, and Susatyo Handoko

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jalan Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, Indonesia

Abstract

Electric power delivering from power plant to load needs power transmission system with low energy loss and low voltage regulation. Extra high voltage can reduce the energy loss but it results corona. Corona produces corona loss and gives negative impact to the environment such as audible noise (AN) and radio interference (RI). Space conductor is one factor that affects the corona loss. In this final project will calculate corona loss, audible noise and radio interference under extra high voltage overhead lines 500 kV. The calculation will be held in the variation of cross arm and the variation of space conductor. Then, corona loss, AN and RI value will be compare to the permission value. Analysis result shows that corona loss value in single line configuration is smaller than corona loss value in double line configuration. Conductor space change has dominant influence to modify corona loss value, AN and RI value. It is more dominant than cross arm space change. Calculation with the configuration that suitable with SNI 04-6918-2002 shows that AN and RI value is lower than Perry Criteria and SPLN 46-1-1981 about AN maximum limitation guide and IEEE Radio Noise Design Guide about RI maximum limitation.

Keyword : conductor space, cross arm space, corona, audible noise, radio interference

1. Pendahuluan

A. Latar Belakang

Penyaluran energi listrik dari pembangkit energi listrik ke beban membutuhkan saluran transmisi. Jauhnya jarak antara pembangkit energi listrik dengan pusat-pusat beban membutuhkan saluran transmisi energi listrik yang panjang. Namun semakin panjang saluran transmisi yang digunakan, maka semakin besar pula rugi daya pada saluran sehingga daya yang sampai pada tujuan telah banyak berkurang sehingga menyebabkan efisiensi saluran transmisi rendah dan regulasi tegangan saluran transmisi menjadi tinggi.

Untuk menghindari hal tersebut maka salah satu cara yang dilakukan adalah dengan menaikkan tegangan listrik pada saluran transmisi menjadi tegangan ekstra tinggi.

Namun jika digunakan tingkat tegangan yang lebih tinggi akan timbul peristiwa korona. Korona menyebabkan rugi korona dan dampak negatif terhadap lingkungan berupa *Audible noise*(AN) dan *Radio interference* (RI). Nilai AN dan nilai RI perlu diperhatikan dalam perencanaan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) karena dikhawatirkan dapat mengganggu lingkungan sekitar jalur saluran transmisi udara.

Jarak kawat antar fasa merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi nilai rugi korona. Meningkatnya jarak konduktor antar fasa berbanding terbalik dengan gradien tegangan permukaan konduktor sehingga mengurangi resiko terjadi korona. Semakin kecil rugi korona yang terjadi maka nilai AN dan RI juga dapat diperkecil.

Dalam Penelitian ini akan dilakukan perhitungan terhadap nilai rugi korona, AN dan RI pada SUTET 500 kV dengan mempertimbangkan konfigurasi Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV dan juga pengaruh jarak kawat antar fasa.

B. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menghitung rugi korona, nilai AN dan nilai RI pada saluran udara tegangan ekstra tinggi.
2. Menganalisa pengaruh konfigurasi saluran transmisi udara dan jarak kawat antar fasa terhadap rugi korona, *audible noise* dan *radio interference*.
3. Membandingkan hasil perhitungan nilai AN dan RI terhadap nilai standard yang telah ditentukan.

C. Batasan Masalah

Agar tidak menyimpang jauh dari permasalahan, maka Penelitian ini mempunyai batasan masalah sebagai berikut :

1. Saluran transmisi yang digunakan adalah saluran udara tegangan ekstra tinggi 500 KV arus bolak-balik, dengan frekuensi sistem 50 Hz.
2. Standard yang digunakan adalah SNI 04-6918-2002.
3. Saluran ganda yang dianalisis merupakan saluran yang di transposisi dengan bundled conductor berjumlah 4.
4. Nilai induktansi dan kapasitansi akibat pengaruh GMD, GMR, dan bundled diabaikan.
5. Standar batas maksimal AN mengacu pada SPLN 46-1-1981 dan Kriteria Perry.
6. Standar batas maksimal RI mengacu pada IEEE Radio Noise Design Guide.
7. Tidak membahas konstruksi menara, isolator-isolator dan peralatan-peralatan yang ada pada menara.
8. Perhitungan nilai AN dan RI dilakukan pada cuaca hujan.

2. Dasar Teori

A. Jarak Kawat Antar Fasa

Jarak kawat antar fasa sangat penting untuk menghindari singgungan kawat antar fasa yang dapat menyebabkan hubung singkat antar fasa dan juga gejala medan tinggi. Jarak antar kawat konduktor dipengaruhi oleh beberapa hal, terutama hal-hal mekanis dari kawat konduktor.

Ada beberapa rumus empiris yang digunakan untuk menghitung jarak minimum antar kawat konduktor yang telah berhasil dalam pengujiannya, salah satu diantaranya adalah perhitungan menurut *Mecomb's formula*. Rumusnya adalah sebagai berikut :

$$a = 0,3048 V + 4,010 \frac{D}{w} \sqrt{S} \text{ cm} \quad (1)$$

- Perhitungan menurut VDE (*Verbandes Deutscher Electrotechnischer*)^[12] :

$$a = 7,5 \sqrt{S} + \frac{V^2}{200} \text{ cm} \quad (2)$$

- Perhitungan menurut *Swedish Formula*:

$$a = 6,5 \sqrt{S} + 0,7 V \text{ cm} \quad (3)$$

- Perhitungan menurut *French formula*:

$$a = 8 \sqrt{S+L} + \frac{V}{1,5} \text{ cm} \quad (4)$$

- Perhitungan menurut *Midlands Electricity*:

$$a = 0,65 \times d_{\max} \text{ m} \quad (5)$$

- Perhitungan menurut NESC (*National Electric Safety Code*):

$$a = 0,3 \text{ inchi per KV} + 8 \sqrt{\frac{S}{12}} \text{ inchi} \quad (6)$$

- Rumus lain hasil formulasi NESC:

$$a = 0,762 \text{ cm per KV} + 3,681 \sqrt{S} + \frac{L}{\sqrt{2}} \text{ cm} \quad (7)$$

Dimana :

- A = jarak antar kawat
- V = tegangan dalam kV
- S = Andongan (cm)
- L = panjang renteng isolator (cm)
- D = diameter konduktor (cm)
- w = berat konduktor (kg/m)
- $d_{\max}$ = andongan pada suhu maksimum (m)

B. Korona

Korona adalah peluahan sebagian (*partial discharge*) dan terjadi pada permukaan konduktor saluran transmisi ketika tekanan listrik yaitu intensitas medan listrik (atau gradien potensial permukaan) melampaui kekuatan breakdown pada udara sekitar. Korona ditandai dengan timbulnya cahaya violet, suara mendesis (*hissing*) dan bau ozon (O_3). Korona makin nyata kelihatan pada bagian yang kasar, runcing dan kotor. Peristiwa korona akan semakin sering terjadi jika pada saluran transmisi diterapkan tegangan yang lebih tinggi daripada tegangan kritis dan udara yang lembab. Peristiwa korona menimbulkan rugi-rugi penyaluran, merusak bahan isolasi serta gejala tegangan tinggi berupa *audible noise* (AN) dan *radio interference* (RI). Ada beberapa faktor yang mempengaruhi timbulnya korona, yaitu :

1. Kondisi atmosfer
2. Konduktor
3. Jarak konduktor antar fasa
4. Tegangan saluran

C. Gradien Tegangan Permukaan Konduktor Berkas

Gradien tegangan permukaan konduktor merupakan kuat medan listrik di permukaan konduktor. Gradien tegangan permukaan adalah salah satu faktor yang mempengaruhi terjadinya korona dan efek pengaruh korona seperti *audible noise* (AN) dan *radio interference* (RI). Gradien tegangan permukaan konduktor dipengaruhi oleh jari-jari konduktor, jarak antar sub konduktor, ketinggian konduktor dan konstruksi menara.

Besar gradien tegangan permukaan konduktor pada konduktor berkas adalah :

$$E_p = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{r} \left(1 + \frac{(n-1)r}{R} \right) \quad (8)$$

$$Q = n \cdot q$$

Sedangkan besar gradien tegangan permukaan konduktor berkas dengan $n = 4$ yaitu:

$$E_p = \frac{q}{2\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{r} \left(1 + \frac{3r}{R} \right) \quad (9)$$

Keterangan :

- E_p = gradien tegangan permukaan konduktor berkas (kV rms/cm)

- Q = muatan total konduktor berkas (Coulomb)
 q = besar muatan sub konduktor (Coulomb)
 n = jumlah berkas (n = 1, 2, 3, 4, ...)
 R = jari-jari konduktor berkas (m)
 r = jari-jari sub konduktor (cm)

D. Tegangan Kritis Disruptif dan Visual

Tegangan kritis disruptif adalah tegangan minimal yang dibutuhkan untuk terjadinya ionisasi pada permukaan konduktor saat kondisi cuaca cerah. Pada tegangan kritis disruptif belum tampak cahaya violet. Kekuatan dielektrik pada kondisi udara standar dengan suhu 25°C dan tekanan 76 cmHg adalah 30 kV/cm. Kekuatan dielektrik sebanding dengan kepadatan udara. Kepadatan udara dapat dirumuskan :

$$\delta = \frac{3,92 \cdot b}{273+t} \quad (10)$$

Keterangan :

- δ = kepadatan udara
 b = tekanan udara (cmHg)
 t = suhu udara (°C)

Sedangkan besarnya tegangan kritis disruptif menurut Peek, setelah memperhitungkan kondisi permukaan konduktor dengan menggunakan faktor ketidakaturan, tegangan kritis disruptif dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$E_d = 21,1 \cdot \delta \cdot m \cdot r \ln \frac{d}{r} \quad (11)$$

Jika besar gradien tegangan permukaan konduktor tunggal adalah :

$$E_m = \frac{V}{r \ln \left(\frac{2h}{r} \right)} \quad (12)$$

Dan besar kuat medan listrik pada kondisi standar (g) adalah 21,1 kV rms/cm. Sedangkan nilai h = 0,5 d maka persamaan (11) dan (12) dapat disederhanakan menjadi :

$$E_d = \frac{21,1 \cdot m_0 \cdot \delta}{E_m} \cdot V \quad (13)$$

Tegangan kritis visual adalah tegangan minimum pada saat timbul cahaya violet di sekitar permukaan konduktor saat korona terjadi. Berdasarkan penelitian Peek :

$$E_v = 21,1 \cdot \delta \cdot m \cdot r \cdot \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right) \cdot \ln \left(\frac{d}{r} \right) \quad (14)$$

Jika kuat medan listrik pada kondisi standar (tekanan udara 760 mmHg dan 25°C) adalah 21,1 kV rms/cm maka besar tegangan kritis visual untuk sirkit ganda konfigurasi vertikal adalah :

$$E_v = \frac{21,1 \cdot m_0 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right)}{E_m} \cdot V \quad (15)$$

Keterangan :

- E_d = tegangan kritis disruptif (kV rms)
 E_v = tegangan kritis visual (kV rms)
 δ = kepadatan udara
 V = tegangan saluran fasa ke fasa (kV)
 E_m = gradien tegangan permukaan konduktor pada konduktor tunggal (kV rms/cm)
 m_0 = faktor keseragaman permukaan konduktor ($0 \leq m \leq 1$)
 = 1 untuk permukaan halus, licin, padat, konduktor silinder
 = 0,93-0,98 untuk permukaan kasar, padat, konduktor silinder
 = 0,87-0,90 untuk konduktor berpermukaan kasar dan lebih dari 7 pilinan
 = 0,80-0,87 untuk konduktor berpermukaan kasar dan sampai 7 pilinan

E. Rugi Korona

Rugi-rugi korona akan semakin besar jika tegangan saluran terus dinaikkan melebihi tegangan kritis disruptif. Besar rugi korona pada kondisi cuaca hujan akan menghasilkan rugi korona yang lebih besar yaitu :

$$P_c = P_{FW} + [0,3606 \cdot K \cdot V \cdot r^2 \cdot \ln(1+10\rho) \sum_1^n E^5] \quad (16)$$

Keterangan :

- P_c = rugi-rugi korona per 3 fasa (kW/km)
 P_{FW} = rugi korona pada cuaca baik (kW/km)
 = 1-5 kW/km untuk tegangan 500 kV
 = 3-20 kW/km untuk tegangan 700 kV
 K = $7,04 \cdot 10^{-10}$ untuk 400 kV
 = $5,35 \cdot 10^{-10}$ untuk 500 kV sampai dengan 700 kV
 ρ = curah hujan (mm/jam)
 10 = koefisien kebasahan
 r = jari-jari konduktor (cm)
 V = tegangan saluran V_{L-L} (kV)
 E = gradien tegangan permukaan konduktor puncak (kV peak/cm)
 n = jumlah konduktor
 0,3606 = faktor konversi mil ke km dan tegangan dari V_{L-N} ke V_{L-L}

F. Audible noise (AN) dan Radio interference (RI)

Audible noise adalah bunyi yang kontinyu baik yang merata, tak teratur serta tidak nyaman didengar oleh rasa pendengaran manusia normal yang disebabkan karena suara mesin industri, transportasi maupun suara akibat korona pada saluran transmisi. Tingkat AN diukur dalam satuan dBA yang sesuai dengan satuan pendengaran manusia. Batas AN menurut kriteria Perry berdasarkan

tingkat ketidaknyamanan masyarakat dibedakan menjadi tiga, yaitu :

1. Tanpa teguran : $AN < 52,5$ dBA
2. Teguran sedang : $52,5 \text{ dBA} < AN < 59$ dBA
3. Banyak teguran : $AN > 59$ dBA

Secara khusus PT. PLN tidak mengeluarkan peraturan khusus mengenai besar AN pada saluran transmisi. Namun, pada SPLN 46-1 tahun 1981 tentang pembatasan tingkat bising dapat dijadikan salah satu acuan tentang tingkat bising.

Tabel 1 Tingkat bising menurut SPLN 46-1-1981^[20]

Kriteria Pendengaran	Tingkat Bising (dB(A))	Ilustrasi
Menulikan	$100 < AN \leq 120$	Halilintar, meriam
Sangat hiruk	$80 < AN \leq 100$	Jalan hiruk pikuk, perusahaan sangat gaduh, pluit polisi
Kuat	$60 < AN \leq 80$	Kantor gaduh, jalan pada umumnya, radio, perusahaan
Sedang	$40 < AN \leq 60$	Rumah gaduh, kantor umumnya, percakapan kuat, radio pelahan
Tenang	$20 < AN \leq 40$	Rumah tenang, kantor perorangan, auditorium, percakapan
Sangat tenang	$0 < AN \leq 20$	Suara daun-daun, berbisik, batas dengar terendah

Berdasarkan rumus empiris BPA, perhitungan AN adalah sebagai berikut :

$$AN_{(i)} = 120 \log_{10} E_{om(i)} + 55 \log_{10} d - 11,4 \log_{10} D_{(i)} + 26,4 \log_{10} N - 128,4 \quad (17)$$

Rumus AN berdasarkan program TLALC 2001 adalah sebagai berikut :

$$SLT_{L50}(i) = 122,68 \log G(i) + 24,99 \log N + 58,68 \log d(i) - 10,53 \log D(i) - 133,89 \quad (18)$$

Keterangan :

- $AN_{(i)}$ = AN pada konduktor berkas -i pada kondisi rata-rata hujan (dBA)
 $E_{om(i)}$ = rata-rata gradien tegangan permukaan konduktor pada konduktor (i) (kV rms/cm)
 $SLT_{L50}(i)$ = AN pada konduktor berkas -i pada kondisi rata-rata hujan (dBA)
 $G(i)$ = rata-rata gradien tegangan permukaan konduktor pada konduktor (i) (kV rms/cm)
 i = 1, 2, 3,...n
 d = diameter sub konduktor (cm)
 N = jumlah berkas

$D(i)$ = jarak radial fasa (i) ke lokasi yang diamati (m)

Korona yang terjadi dalam saluran transmisi menghasilkan gangguan elektromagnetik yang menyebabkan gangguan penerimaan gelombang radio. Gelombang AM dipancarkan gelombang pembawa (*carrier*) pada frekuensi 0,5-1,6 MHz. Daerah frekuensi ini memiliki kecenderungan terganggu oleh *radio interference* (RI) korona. Satuan RI dinyatakan dalam nilai $\mu V/m$ atau dalam satuan desibel (dB) dengan acuan 1 $\mu V/m$.

Perhitungan RI dengan rumus empiris CIGRE pada kondisi cuaca baik dengan frekuensi alat ukur 0,5 MHz adalah sebagai berikut :

$$RI_i = 3,5 \cdot E_m + 12 \cdot r - 33 \log_{10} \left(\frac{D_i}{20} \right) - 30 \quad (19)$$

Keterangan :

- RI_i = RI pada konduktor i terhadap antenna (dB $\mu V/m$)
 E_m = gradien tegangan permukaan konduktor berkas (kV rms/cm)
 r = jari-jari sub konduktor (cm)
 D_i = jarak antara konduktor i dengan antenna (m)
 $D = \sqrt{h^2 + R^2}$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$
 h = ketinggian konduktor i dari tanah (m)
 R = jarak lateral dari antenna ke konduktor i (m)

Perhitungan RI dengan rumus empiris TLALC 2001 yaitu :

RI pada cuaca hujan

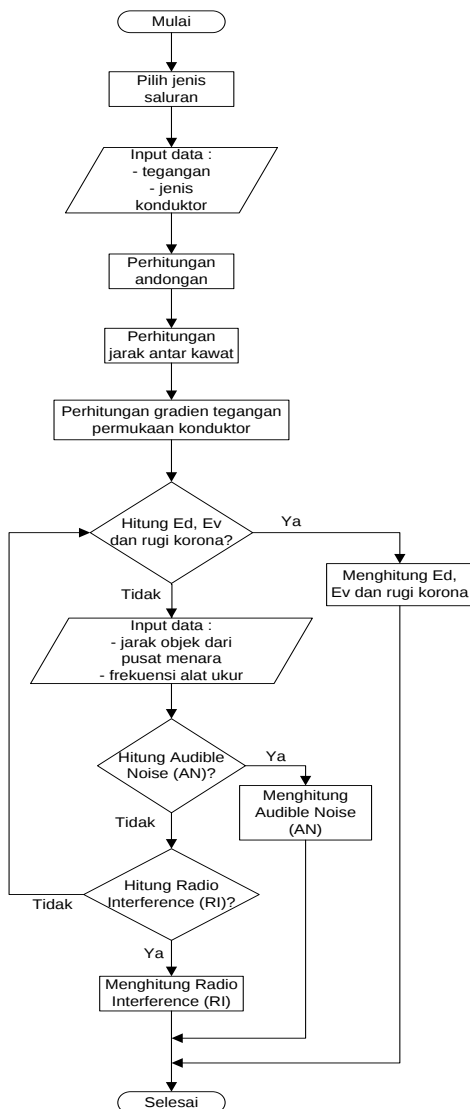
$$RI_{FL50}(i) = -81,98 + 119,56 \log G(i) + 43,57 \log d + 3,97 \log N - 19,05 \log D(i) - 25,07 \log f \quad (20)$$

Keterangan :

- $RI_{FL50}(i)$ = RI konduktor i terhadap antenna (dB $\mu V/m$)
 G = gradien tegangan permukaan konduktor berkas (kV rms/cm)
 D = diameter sub konduktor (cm)
 N = jumlah berkas
 D_i = jarak antara konduktor i dengan antenna (m)
 $D = \sqrt{h^2 + R^2}$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$
 h = ketinggian konduktor i dari tanah (m)
 R = jarak lateral dari antenna ke konduktor i (m)
 f = frekuensi yang digunakan dalam pengukuran (MHz)

3. Perancangan Program

Perancangan program simulasi perhitungan rugi korona, *audible noise* dan *radio interference* di sekitar Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500kV ini menggunakan bahasa pemrograman Matlab 7.9.0. Pembuatan program simulasi ini dimulai dari pembuatan tampilan GUI, penulisan seranai program dan pengujian program. Program yang dibuat dalam penelitian ini terdiri atas empat tahap perhitungan. Tahap pertama adalah proses perhitungan andongan dan jarak antar kawat konduktor pada menara saluran transmisi menurut beberapa formula yang telah dijabarkan pada bab sebelumnya. Tahap kedua, ketiga dan keempat merupakan inti dari program yaitu perhitungan rugi korona, *audible noise* dan *radio interference*. Secara umum berikut prosedur perhitungan pada program simulasi perhitungan rugi korona, AN dan RI :



Gambar 1 Diagram alir program simulasi

4. Analisis Dan Pembahasan

A. Analisis Pengaruh Jarak Antar Kawat

Salah satu faktor yang mempengaruhi nilai rugi korona adalah jarak antar kawat pada saluran transmisi. Semakin besar jarak antar kawat, maka gradien tegangan permukaan konduktor akan semakin kecil, sehingga rugi korona juga semakin kecil. Bila rugi korona semakin kecil, maka nilai *audible noise* dan *radio interference* yang timbul juga akan semakin kecil. Berikut ini akan dibahas pengaruh jarak antar kawat terhadap nilai rugi korona, *audible noise* dan *radio interference*. Proses perhitungan dengan program dilakukan melalui empat tahap proses. Yaitu perhitungan andongan dan jarak antar kawat, perhitungan rugi korona, perhitungan *audible noise* dan perhitungan *radio interference*. Tahap pertama yaitu melakukan perhitungan andongan dan jarak antar kawat, berikut ini data yang diperlukan :

Tabel 2 Data masukan perhitungan andongan dan jarak antar kawat

Parameter	Nilai	Satuan
Jenis konduktor	ACSR Gannet	
Tegangan	500	kV
Diameter konduktor	25,76	mm
Span	450	m
Horizontal tension	2372,3	Kg
Berat konduktor	1,408	Kg/m
Panjang renteng isolator	5,5	m

Dari data di atas maka didapat hasil perhitungan andongan dan jarak antar kawat sebagai berikut :

Tabel 3 Hasil perhitungan andongan dan jarak antar kawat

Parameter	Nilai	Satuan
Andongan	15,0457	m
Mecomb's formula	4,3697	m
VDE	15,4092	m
NESC 1	9,1269	m
NESC 2	4,0375	m
Swedish formula	6,0213	m
French formula	6,9595	m
Midlands electricity	11,4719	m

Selanjutnya dilakukan perhitungan rugi korona, *audible noise* dan *radio interference* dengan jarak antar kawat hasil perhitungan sebelumnya. Untuk menghitung rugi korona, AN dan RI diperlukan data-data sebagai berikut :

Tabel 4 Data masukan perhitungan rugi korona, AN dan RI

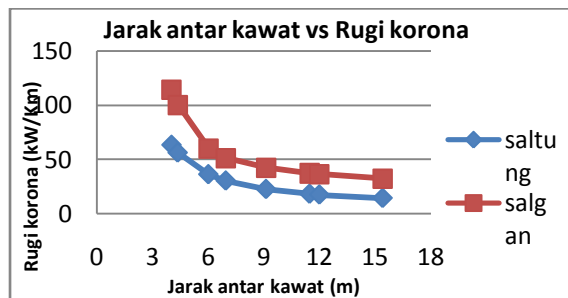
Parameter	Saluran tunggal		Saluran ganda	
	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
Tegangan	500	kV	500	kV
Diameter konduktor	25,76	mm	25,76	mm
Ketinggian konduktor	35,0457	m	35,0457	m
Jarak sub konduktor	450	mm	450	mm

Jarak sirkit atas	-	-	14,6	m
Jarak sirkit tengah	-	-	14,6	m
Jarak sirkit bawah	-	-	14,6	m
Faktor permukaan konduktor	0,82		0,82	
Suhu	26,8	°C	26,8	°C
Tekanan	757,562	mmHg	757,562	mmHg
Curah hujan	0,276	mm/jam	0,276	mm/jam
Jumlah bundled konduktor	4		4	
Jarak lateral (x)	42	m	37,3	m
Ketinggian objek	1,5	m	1,5	m

Dari data-data diatas, didapat hasil perhitungan rugi korona, AN dan RI sebagai berikut :

Tabel 5 Hasil perhitungan rugi korona dengan variasi jarak antar kawat

Metode	Nilai (m)	Rugi Korona (kW/3 fasa km)	
		Saluran Tunggal	Saluran Ganda
NESC 2	4,0375	63,5565	114,4066
Mecomb's	4,3697	56,4254	100,2176
Swedish	6,0213	36,3902	60,2845
French	6,9595	30,5135	51,214
NESC 1	9,1269	22,7143	42,6186
Midlands	11,4719	18,3083	37,5287
Electricity Standar SNI	12	17,6079	36,6838
VDE	15,4092	14,4579	32,6407



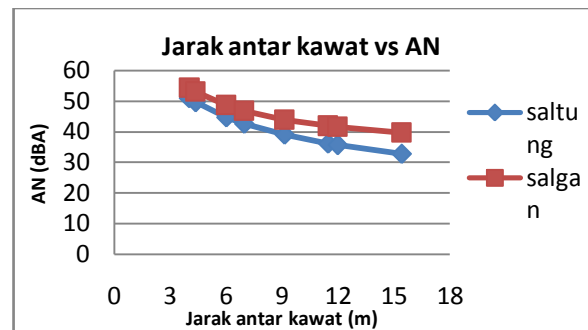
Gambar 2 Grafik perbandingan rugi korona saluran tunggal dengan saluran ganda

Berdasarkan Tabel 5 dan Gambar 2 dapat dilihat bahwa semakin besar jarak antar kawat maka rugi korona yang terjadi pada saluran tunggal maupun saluran ganda semakin kecil.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa jarak antar kawat yang semakin besar dapat mengurangi nilai rugi korona yang terjadi pada saluran. Pada saluran ganda memiliki nilai rugi korona yang jauh lebih besar daripada saluran tunggal. Hal ini dikarenakan pada saluran ganda terdapat dua buah konduktor untuk tiap-tiap fasanya.

Tabel 6 Hasil perhitungan audible noise dengan variasi jarak antar kawat

Metode	Nilai (m)	AN total BPA (dBA)	
		Saluran Tunggal	Saluran Ganda
NESC 2	4,0375	50,8862	54,3380
Mecomb's	4,3697	49,5848	53,0970
Swedish	6,0213	44,6434	48,5591
French	6,9595	42,5726	46,7762
NESC 1	9,1269	38,9398	43,8841
Midlands	11,4719	36,1108	41,8550
Electricity Standar SNI	12	35,5789	41,4927
VDE	15,4092	32,7735	39,6489



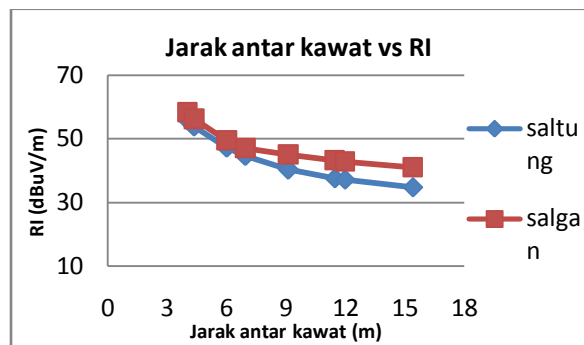
Gambar 3 Grafik perbandingan nilai AN saluran tunggal dengan saluran ganda

Berdasarkan Tabel 6 dan Gambar 3 bahwa semakin besar jarak antar kawat maka *audible noise* yang dihasilkan akan semakin kecil.

Nilai AN pada saluran ganda lebih besar daripada saluran tunggal, hal ini dikarenakan pada saluran ganda nilai AN adalah jumlah dari dua fasa pada masing-masing sirkit. Pada saluran ganda jumlah konduktor tiap fasa ada dua. Namun nilai AN pada semua perhitungan masih terdapat pada level sedang dan teguran sedang sehingga masih dapat ditoleransi.

Tabel 7 Hasil perhitungan radio interference dengan variasi jarak antar kawat

Metode	Nilai (m)	RI total CIGRE (dBμV/m)	
		Saluran Tunggal	Saluran Ganda
NESC 2	4,0375	55,7367	58,1833
Mecomb's	4,3697	53,8536	56,1293
Swedish	6,0213	47,1256	49,4769
French	6,9595	44,4925	47,0095
NESC 1	9,1269	40,2453	45,0187
Midlands	11,4719	37,5622	43,0735
Electricity Standar SNI	12	37,0827	42,7209
VDE	15,4092	34,6939	40,8955



Gambar 4 Grafik perbandingan nilai RI saluran tunggal dengan saluran ganda

Berdasarkan Tabel 7 dan Gambar 4 menunjukkan bahwa semakin besar jarak antar kawat maka *radio interference* yang dihasilkan akan semakin kecil.

Nilai RI pada semua perhitungan dengan rumus CIGRE masih pada batas yang diizinkan yaitu 56-62 dB μ V/m pada cuaca hujan dengan jarak 30 m dari fasa paling luar.

B. Analisis Pengaruh Jarak Antar Sirkuit pada Saluran Ganda

Pada perhitungan rugi korona, *Audible Noise* dan *Radio Interference* dengan variasi jarak antar sirkuit dilakukan dengan cara memperbesar jarak antar sirkuit atas, tengah dan bawah. Pada penelitian ini akan dianalisis pengaruh jarak antar sirkuit tiap fasa terhadap nilai rugi korona, *Audible Noise* dan *Radio Interference*. Konfigurasi saluran yang dipakai adalah bentuk H, dimana jarak antar sirkuit tiap saluran fasa sama. Sehingga jarak antar sirkuit atas, tengah dan bawah adalah sama. Variasi dilakukan dengan memperbesar nilai jarak antar sirkuit.

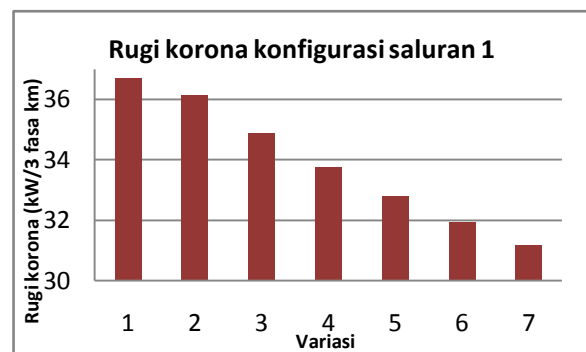
Hasil perhitungan rugi korona, AN dan RI dengan variasi jarak antar sirkuit pada saluran ganda ditunjukkan oleh Tabel berikut ini :

Tabel 8 Perbandingan nilai rugi korona, *audible noise* dan *radio interference* pada tiap konfigurasi saluran

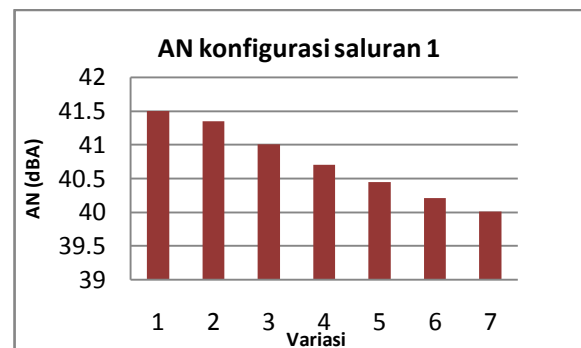
Variasi	Jarak Sirkuit (m)			Rugi korona (kW/3 fasa km)	AN BPA (dBA)	RI CIGRE (dB μ V/m)
	Atas	Tengah	bawah			
1	11,6	14,6	14,6	36,6838	41,4927	42,7209
2	15	15	15	36,1248	41,3424	42,5249
3	16	16	16	34,8591	41,0002	42,0719
4	17	17	17	33,7566	40,7007	41,6666
5	18	18	18	32,7913	40,4383	41,3034

6	19	19	19	31,942	40,2081	40,9773
7	20	20	20	31,1917	40,0057	40,6844

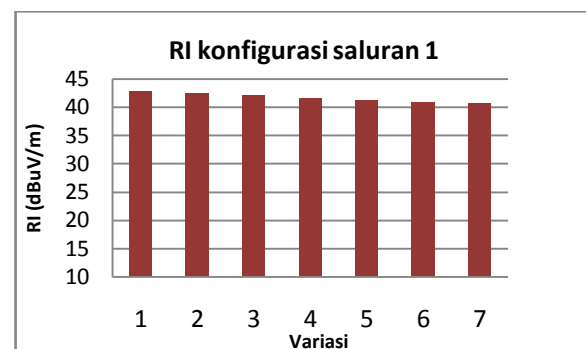
Berdasarkan Tabel 8 di atas, dapat dilihat bahwa penambahan jarak antar sirkuit mengakibatkan nilai rugi korona, AN dan RI menjadi lebih kecil. Nilai rugi korona, *audible noise* dan *radio interference* terkecil terdapat variasi 1 dengan jarak sirkuit atas, tengah dan bawah sebesar 20 m. Berikut ini adalah grafik rugi korona, AN dan RI dengan variasi jarak antar sirkuit.



Gambar 5 Grafik rugi korona dengan variasi jarak antar sirkuit



Gambar 6 Grafik AN dengan variasi jarak antar sirkuit



Gambar 7 Grafik RI dengan variasi jarak antar sirkuit

Dari Gambar 5, 6 dan 7 di atas terlihat bahwa nilai rugi korona, *audible noise* dan *radio interference* terbesar dihasilkan variasi ke-1 yaitu saluran dengan jarak antar sirkit terkecil. Sedangkan untuk nilai rugi korona dan *audible noise* terkecil terdapat pada variasi ke-7 yaitu saluran dengan jarak antar sirkit terbesar.

5. Penutup

A. Kesimpulan

1. Semakin besar jarak antar kawat, maka gradien tegangan permukaan masing-masing konduktor akan semakin kecil sehingga menyebabkan rugi korona, *audible noise* dan *radio interference* yang terjadi akan semakin kecil juga.
2. Pada saluran tunggal nilai rugi korona, *audible noise* dengan rumus BPA dan *radio interference* dengan rumus CIGRE terkecil berturut-turut adalah 14,4579 kW/3 fasa km, 32,7735 dBA dan 34,6939 dB μ V/m.
3. Pada saluran ganda nilai rugi korona, *audible noise* dengan rumus BPA dan *radio interference* dengan rumus CIGRE terbesar berturut-turut adalah 114,4066 kW/3 fasa km, 54,3380 dBA dan 58,1833 dB μ V/m.
4. Perhitungan pada saluran tunggal dengan rumus BPA dan CIGRE dan jarak antar kawat yang sesuai standar SNI 04-6918-2002 yaitu sebesar 12 m menghasilkan nilai *audible noise* sebesar 35,5789 dBA yang dikategorikan tenang dan tanpa teguran menurut SPLN 46-1 tahun 1981 dan Kriteria Perry, sedangkan nilai *radio interference* yang dihasilkan yaitu sebesar 37,0827 dB μ V/m masih sesuai dengan standar IEEE *Radio Noise design Guide*.
5. Perhitungan pada saluran ganda dengan rumus BPA dan CIGRE dan jarak antar sirkit yang sesuai standar SNI 04-6918-2002 yaitu sebesar 14,6 m menghasilkan nilai *audible noise* sebesar 41,4927 dBA yang dikategorikan sedang dan tanpa teguran menurut SPLN 46-1 tahun 1981 dan Kriteria Perry, sedangkan nilai *radio interference* yang dihasilkan yaitu sebesar 42,7209 dB μ V/m masih sesuai dengan standar IEEE *Radio Noise design Guide*.
6. Perhitungan rugi korona, *audible noise* dan *radio interference* dengan variasi jarak antar kawat memberikan perubahan yang lebih signifikan dibanding dengan variasi jarak antar sirkit.

B. Saran

1. Perlu dikembangkan lebih lanjut untuk menghitung pengaruh variasi jarak antar kawat dan konfigurasi jarak antar sirkit terhadap *television interference* (TVI).
2. Dapat dikembangkan lagi perhitungan variasi jarak antar kawat terhadap kuat medan magnet di sekitar saluran transmisi.

Daftar Pustaka

- [1]. Begamudre, R.D., "Extra High Voltage AC Transmission Engineering", New Age Internasional, New Delhi, 2006.
- [2]. CS., Indulkar, "Sensitivity Analysis of Corona and Radio Noise in EHV Transmission Lines", International Journal of Power and Energy Systems, Vol.85, December 2004.
- [3]. Deshpande, M. V., "Electrical Power System Design", McGraw-Hill, New Delhi, 1984.
- [4]. Gary B. J, "Re : Measurement of Electric and Magnetic Fields; Corona Effects; Audible and Radio Noise; Compliance with Health and Safety Standards", <http://www.aptrailinfo.com/downloads/pa/Statement%20No.%209%20-%20Johnson%20Direct%20Testimony.pdf>, 12 Juni, 2012.
- [5]. Gonen, Turan, "Electric Power Transmission System Engineering : Analysis & Design", John Wiley and Sons, inc.Toronto.1988.
- [6]. Hardika, Iwan, "Analisa Pengaruh Jarak Antar Kawat dan Panjang Cross Arm Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi 500 KV Terhadap Kuat Medan Listrik", Penelitian Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro Semarang, 2012.
- [7]. K.H. Yang, et all, "New Environmentally Friendly Design Program, TL-CALC 2001 for High Voltage AC Transmission Lines", IEEE Trans.PE, Vol.124, No.1, 2004.
- [8]. La Forest, J. J., "Transmission Line Reference Book", Electric Power Research Institute, California, 1982.
- [9]. Lucas, J. Rohan, "High Voltage Engineering", Department of Electrical Engineering University of Moratuwa, Srilanka, 2001.
- [10]. Parmar, Jignesh, "What Is Corona Effect", <http://electricalnotes.wordpress.com/2011/03/23/what-is-corona-effect/>, 12 Juni, 2012.
- [11]. Pilatowicz, Andrzej, "Radio Noise Level Due To Electric Power Lines And Its Relation To Line Design Parameters", Institute of Power Engineering, Warszawa, 1980.
- [12]. S.R.Satish and A.R.Santha Kumar, "Design of Steel Structures", http://nptel.iitm.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Design_Steel_Structures_II/7_transmission_towers/2_material_properties.pdf, 12 Juni 2012.
- [13]. Sumarsono, Heru, "Analisis Perhitungan Jarak Antar Kawat Dan Clearance Saluran Transmisi Udara", Penelitian Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro Semarang, 2009.
- [14]. Susilo, Untung, "Analisis Pengaruh Konfigurasi Konduktor Berkas terhadap Efisiensi, Regulasi Tegangan dan Korona pada Saluran Transmisi Udara", Penelitian Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro Semarang, 2009.
- [15]. Wadhwa, C. L., "High Voltage Engineering", New Age International, New Delhi, 2007.
- [16]. ----, "A Comparison of Methods for Calculating Audible noise of High Voltage Transmission Lines", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol.PAS-101, no 10, October 1982.
- [17]. ----, "Electrical Transmission and Distribution Reference Book", Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation, Pennsylvania, 1964.

- [18]. ----, "*Radio Noise Design Guide For High Voltage Transmission Lines*", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol.PAS-90, no 2, March/April 1971.
- [19]. ----, "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.
- [20]. ----, "SPLN 46-1-1981 : Pedoman Pembatasan Tingkat Bising, Bagian I : Tingkat Bising di Lingkungan Kerja".