

OPTIMASI PENEMPATAN ARRESTER TERHADAP TEGANGAN LEBIH TRANSIEN PADA TRANSFORMATOR DAYA DENGAN METODE ALGORITMA GENETIKA

I Nugroho^{*)}, Susatyo Handoko, and Karnoto

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: inoegrohoz@gmail.com

Abstrak

Sambaran petir tidak langsung dapat menginduksi tegangan lebih transien pada sistem tenaga listrik. Untuk melindungi sistem tenaga listrik dari tegangan lebih transien dibutuhkan alat pelindung yaitu arrester. Jarak antara arrester dengan transformator daya yang dilindungi memiliki peranan yang penting dalam hal keefektifan perlindungan transformator daya. Jika arrester ditempatkan terlalu jauh maka tegangan lebih transien pada transformator dapat melebihi kekuatan isolasi (BIL) dari transformator tersebut. Pada penelitian ini dibuat suatu program simulasi untuk menentukan penempatan arrester yang optimal, mengacu pada jarak antara arrester dengan transformator daya. Program ini dibuat dengan software Matlab dan menggunakan metode algoritma genetika. Konfigurasi saluran yang digunakan dalam pengujian adalah konfigurasi saluran kawat-kawat dan konfigurasi saluran kawat-kabel. Hasil pengujian menunjukkan bahwa jarak antara arrester dengan transformator daya pada konfigurasi saluran kawat-kabel lebih jauh daripada konfigurasi saluran kawat-kawat. Pada pengujian tegangan 20 kV jarak maksimum untuk konfigurasi (X1) adalah 1,035 m dan konfigurasi (X2) adalah 9,009 m. Pengujian tegangan 150 kV jarak maksimum untuk konfigurasi (X1) adalah 1,297 m dan konfigurasi (X2) adalah 9,161 m. Sedangkan pada tegangan 500 kV jarak aman konfigurasi (X1) adalah 2,74 m dan konfigurasi (X2) adalah 19,177 m.

Kata Kunci : tegangan lebih transien, arrester, algoritma genetika, dan konfigurasi saluran

Abstract

Indirect lightning strike can induce transient overvoltage to electrical power system. In order to protect the electrical power system and improve its lightning performance, arresters are installed. The distance between arrester and the power transformer to be protected plays important role for the efficient protection of the equipment. If arrester placed too far from power transformer, the overvoltage can exceed BIL of power transformer. In this research, a simulation program will be created. This program is used to simulate optimum placement of arrester. Program will be created using genetic algorithm method with Matlab 7 programming. The test is performed using two types of configuration : conductor-conductor line and conductor-cable line. The simulation shows that the distance between arrester and power transformer in configuration of conductor cable line (X2) is bigger than configuration of conductor-conductor line (X1). In the voltage system 20kV testing show that the maximum distance for configuration (X1) is 1.035m, and configuration (X2) is 9.009m. In the voltage system 150kV testing show that the maximum distance for configuration (X1) is 1.297m, and for configuration (X2) is 9.161m. In the voltage system 500kV testing show that the maximum distance for configuration (X1) is 2.74m, and for configuration (X2) is 19.177m.

Keywords : transient overvoltage, arrester, genetic algorithm, and line configuration

1. Pendahuluan

Di masa sekarang, kebutuhan akan energi listrik semakin meningkat dan tentunya harus diimbangi dengan peningkatan mutu pelayanan yang harus diberikan kepada pelanggan, sehingga kontinuitas pelayanan energi listrik akan tetap terjaga. Sehingga gangguan harus

diminimalisir. Salah satu gangguan dalam sistem tenaga listrik yang berpengaruh terhadap kontinuitas pelayanan adalah gangguan alam yaitu gangguan yang disebabkan oleh sambaran petir. Terdapat dua sambaran petir, yaitu sambaran petir langsung (*direct stroke*) dan sambaran petir tidak langsung / sambaran induksi (*indirect stroke*). Sambaran petir langsung terjadi apabila petir menyambar

langsung konduktor saluran. Sedangkan sambaran petir tidak langsung terjadi apabila petir menyambar obyek di dekat saluran.[1][2][6][7]

Arrester merupakan salah satu peralatan proteksi untuk melindungi transformator daya dari gangguan tegangan lebih transien yang disebabkan oleh sambaran petir. Akan tetapi arrester memiliki zona proteksi yang terbatas. Dimana zona proteksi arrester didefinisikan sebagai jarak maksimum antara arrester dengan transformator daya. Jika arrester ditempatkan terlalu jauh dengan transformator daya, maka tegangan yang tiba pada transformator daya dapat melebihi tegangan yang dapat dipikul oleh transformator daya (BIL transformator daya). Pada penelitian ini akan dibuat program optimasi penempatan arrester terhadap tegangan lebih transien pada transformator daya menggunakan metode algoritma genetika. [3][5][6][16]

Algoritma genetika merupakan salah satu teknik komputasi yang sangat sesuai untuk permasalahan dengan ruan solusi yang sangat besar. Peletak prinsip dasar sekaligus pencipta algoritma genetika adalah John Holland. Algoritma genetika menggunakan analogi secara langsung dari kebiasaan yang alami yaitu seleksi alam. Algoritma ini bekerja dengan sebuah populasi yang terdiri dari individu – individu, yang masing – masing individu mempresentasikan sebuah solusi yang mungkin bagi persoalan yang ada. Dalam kaitan ini, individu dilambangkan dengan sebuah nilai fitness yang akan digunakan untuk mencari solusi terbaik dari persoalan yang ada. Untuk memeriksa hasil optimasi, kita membutuhkan fungsi fitness, yang menandakan gambaran hasil (solusi) yang sudah dikodekan. Selama berjalan, induk harus digunakan untuk reproduksi, pindah silang dan mutasi untuk menciptakan keturunan. Jika algoritma genetika didesain secara baik, populasi akan mengalami konvergensi dan akan didapatkan sebuah solusi yang optimum. [8][9]

Adapun tujuan pembuatan penelitian ini adalah untuk menentukan penempatan arrester yang optimal terhadap tegangan lebih transien pada transformator daya baik pada konfigurasi saluran kawat-kawat dan pada konfigurasi saluran kawat-kabel. Mengetahui pengaruh dari waktu muka arus sambaran balik dan juga pengaruh jarak antara titik sambaran dengan saluran terhadap jarak maksimum penempatan arrester. Supaya pembahasan tidak menyimpang, maka ditentukan pembatasan masalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini tidak diaplikasikan secara langsung tetapi hanya dalam bentuk simulasi.
2. Tegangan yang digunakan untuk menentukan penempatan arrester adalah tegangan 20 kV, tegangan 150 kV, dan tegangan 500 kV.
3. Saluran memakai kawat dengan jenis konduktor tunggal (*single conductor*), dan kabel dengan jenis kabel berinti tunggal (*single core cable*).

4. Jenis sambaran petir yang digunakan adalah sambaran petir tidak langsung (sambaran induksi) dengan mengasumsikan arus maksimum sambaran balik 650 kA, serta variasi *front time* (waktu muka) arus sambaran balik adalah 0,5 μ s, 1 μ s, dan 2 μ s.
5. Mengasumsikan kecepatan arus sambaran balik (v) = 280 m/ μ s, *incidence angle* (θ) = 2 rad, dan konduktivitas tanah (ρ) = 0,001 S/m.
6. Besarnya tegangan puncak induksi petir pada saluran menggunakan rumus yang ada di paper[5].
7. Perhitungan dan simulasi menggunakan software Matlab versi 7.6.0

2. Metode

Metode pembuatan program optimasi ini meliputi dua tahapan yaitu pengumpulan data dan pembuatan program optimasi jarak penempatan arrester dengan transformator daya.

2.1 Pengumpulan Data

Pada tahapan ini dilakukan pengumpulan data yang diperlukan dalam pembuatan program. Data yang diperoleh ditampilkan di tabel-tabel berikut:

Tabel 1 Parameter Tegangan Maksimum Induksi Petir

Parameter Tegangan Induksi Petir	Nilai
Arus maksimum sambaran balik (I)	650 kA
Waktu muka arus sambaran balik (t_f)	0,5 μ s; 1 μ s; dan 2 μ s
Incidence Angle (θ)	2 rad
Kecepatan arus sambaran balik (v)	280 m/ μ s
Konduktivitas tanah (ρ)	0,001 S/m
Jarak antara titik sambaran dengan saluran (R)	50m, 100m, 200 m
	Teg. 20 kV = 8.5 m
	Teg. 150 kV = 30 m
	Teg. 500 kV = 70 m
Tinggi saluran (h)	

Tabel 2 Parameter Impedansi Surja Kawat (Z_{kawat})

Data Peralatan	Tegangan		
	20 kV	150 kV	500 kV
Luas Penampang Konduktor (A)	95 mm ²	281 mm ²	327 mm ²
Jari-Jari Konduktor (r)	5,5 mm	9,4 mm	10,2 mm
Ketinggian di atas tanah (h)	8,5 m	30 m	70 m

Tabel 3 Parameter Impedansi Surja Kabel (Z_{kabel})

Data Peralatan	Tegangan		
	20 kV	150 kV	500 kV
Diameter Konduktor (dr)	20,6 mm	62 mm	62 mm
Diameter Isolasi (dR)	33,2 mm	101 mm	129 mm
Permittivitas (ϵ)	4	4	4

Tabel 4 Data Tegangan Percik Arrester

Data Peralatan	Tegangan		
	20 kV	150 kV	500 kV
Tegangan Percik Arrester	76 kV	460 kV	927 kV

Tabel 5 Data Kekuatan Isolasi (BIL) Transformator Daya

Data Peralatan	Tegangan yang Digunakan		
	20 kV	150 kV	500 kV
BIL Transformator Daya	125 kV	650 kV	1550 kV

2.2 Pembuatan Program Simulasi

Perancangan program simulasi optimasi ini menggunakan program Matlab 2008 dengan metode optimasi algoritma genetika.

Tegangan maksimum induksi yang terjadi pada saat terjadi sambaran [4] dapat dihitung menggunakan Persamaan (1) berikut:

$$V_{max} = 5.08 \times \frac{h^{0.755} I^{0.98} v^{0.4}}{\alpha^{0.89} \sigma^{0.1} R^{0.885} t_f^{0.18}} \quad (1)$$

Untuk menyelesaikan masalah optimasi jarak penempatan arrester ini menggunakan nilai fungsi tujuan (f(x)) pada Persamaan (2) berikut:

$$f(x) = \frac{1}{Y+0,5} \quad (2)$$

Dimana nilai (Y) bergantung pada konfigurasi yang digunakan, yaitu Y1 untuk konfigurasi saluran kawat-kawat, dan Y2 untuk konfigurasi saluran kawat-kabel.

$$Y_1 = ((E_t/1.15) - E_a) \times v_k - (2 \times A_{KK} \times X_1)$$

$$Y_2 = ((E_t/1.15) - E_a) \times v_{kb} - (2 \times A_{KKb} \times X_2)$$

Dimana:

- E_t = BIL transformator daya
- E_a = Tegangan pelepasan arrester
- v_k = Cepat rambat gel. pada kawat
- v_{kb} = Cepat rambat gel. pada kabel
- A_{KK} = Tegangan maksimum induksi petir pada konfigurasi saluran kawat-kawat
- A_{KKb} = Tegangan maksimum induksi petir pada konfigurasi saluran kawat-kabel
- X_1 = Jarak maksimum arrester pada konfigurasi saluran kawat-kawat
- X_2 = Jarak maksimum arrester pada konfigurasi saluran kawat-kabel

3. Hasil dan Analisa

3.1 Tegangan 20 kV

3.1.1 Pengaruh Variasi Jarak Sambaran

Pengujian variasi jarak antara titik sambaran dengan saluran ini menggunakan tiga variasi jarak (R) yang digunakan, yaitu 50 m, 100 m, 200 m. Parameter yang digunakan adalah arus puncak sambaran balik (I) = 650 kA, waktu muka arus sambaran balik (t_f) = 1 μ s, tinggi saluran (h) = 8,5 m, konduktivitas tanah (σ) = 0.001 S/m, incidence angle (α) = 2 radian, kecepatan arus sambaran balik (v) = 280 m/ μ s.

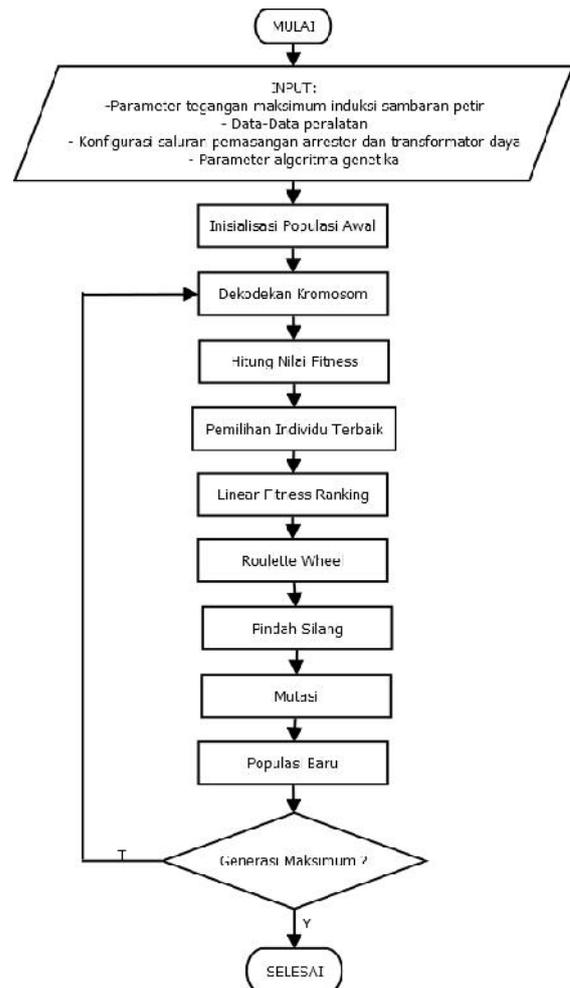
a. Jarak sambaran (R) 50 m

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 9 Hasil Pengujian Dengan Jarak Sambaran 50 m

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	9,4x 10 ⁻⁵	1,035	9,009
2	0,5	0,25	2,227x10 ⁻⁵	1,051	8,736
3	0,75	0,5	3,123x10 ⁻⁵	1,057	8,88
4	0,75	0,5	4,167x10 ⁻⁵	1,041	8,814
5	0,5	0,5	2,269x10 ⁻⁵	1,045	8,719
6	0,5	0,5	1,853x10 ⁻⁵	1,048	8,688

Berdasarkan Tabel 9 terlihat hasil yang berbeda tiap pengujian, hal ini dikarenakan metode AG menerapkan sistem acak pada setiap penelusuran. Hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian pertama dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah 9,4x 10⁻⁵ dengan X1 1,0335 m dan X2 9,0094 m.



Gambar 1 Diagram Alir Pembuatan Program

b. Jarak sambaran (R) 100 m

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 10 Hasil Pengujian Dengan Jarak Sambaran 100 m

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1 (m)	X2 (m)
1	0,5	0,25	$3,677 \times 10^{-5}$	1,938	16,746
2	0,5	0,25	$3,883 \times 10^{-5}$	1,905	16,490
3	0,75	0,5	$8,928 \times 10^{-5}$	1,919	16,459
4	0,75	0,5	$4,98 \times 10^{-5}$	1,921	16,327
5	0,5	0,5	$1,032 \times 10^{-5}$	1,941	16,523
6	0,5	0,5	$1,378 \times 10^{-5}$	1,919	16,907

Berdasarkan Tabel 10 terlihat hasil yang berbeda tiap pengujian, hal ini dikarenakan metode AG menerapkan sistem acak pada setiap penelusuran. Hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian ketiga dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah $8,928 \times 10^{-5}$ dengan X1 1,919 m dan X2 16,4595 m.

c. Jarak sambaran (R) 200 m

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 11 Hasil Pengujian Dengan Jarak Sambaran 200 m

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	$2,877 \times 10^{-5}$	3,561	30,565
2	0,5	0,25	$8,240 \times 10^{-5}$	3,543	30,391
3	0,75	0,5	$1,029 \times 10^{-5}$	3,572	30,372
4	0,75	0,5	$1,135 \times 10^{-5}$	3,558	31,395
5	0,5	0,5	$3,699 \times 10^{-5}$	3,553	30,659
6	0,5	0,5	$1,643 \times 10^{-4}$	3,556	30,950

Berdasarkan Tabel 11 terlihat hasil yang berbeda tiap pengujian, hal ini dikarenakan metode AG menerapkan sistem acak pada setiap penelusuran. Hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian terakhir dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah $1,643 \times 10^{-4}$ dengan X1 3,5561 m dan X2 30,9507 m.

Pengaruh variasi jarak titik sambaran dengan saluran terhadap jarak maksimum arrester dengan transformator daya dapat dilihat pada Tabel .

Tabel 12 Pengaruh Variasi Jarak Sambaran Petir Terhadap Jarak Maksimum Arrester Dengan Transformator Daya Pada Tegangan 20 kV

Jarak Sambaran (R)	Jarak maksimum arrester dan transformator	
	X1(m)	X2(m)
50 m	1,035	9,009
100 m	1,919	16,459
200 m	3,556	30,950

Berdasarkan Tabel 12 diatas dapat dilihat bahwa semakin jauh jarak sambaran dari saluran maka semakin besar pula jarak penempatan arrester yang diijinkan.

3.1.2 Pengaruh Variasi Waktu Muka Sambaran

Pengujian ini menggunakan tiga variasi waktu muka (T_f) yang digunakan, yaitu 0,5 μ s, 1 μ s, 2 μ s. Sedangkan parameter yang lain adalah arus puncak sambaran balik (I) = 650 kA, jarak titik sambaran dengan saluran (R) = 100 m, tinggi saluran (h) = 8,5 m, konduktivitas tanah (ρ) = 0.001 S/m, incidence angle (θ) = 2 radian, kecepatan arus sambaran balik (v) = 280 m/ μ s.

a. Waktu muka 0,5 μ s

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 13 Hasil Pengujian Dengan Waktu Muka 0,5 μ s

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	$2,995 \times 10^{-5}$	1,708	14,296
2	0,5	0,25	$3,671 \times 10^{-5}$	1,714	15,147
3	0,75	0,5	$3,671 \times 10^{-5}$	1,714	15,147
4	0,75	0,5	$1,492 \times 10^{-5}$	1,702	14,086
5	0,5	0,5	$2,204 \times 10^{-5}$	1,698	14,918
6	0,5	0,5	$9,114 \times 10^{-5}$	1,715	14,936

Berdasarkan Tabel 13 terlihat hasil yang berbeda tiap pengujian, hal ini dikarenakan metode AG menerapkan sistem acak pada setiap penelusuran. Hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian terakhir dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah $9,114 \times 10^{-5}$ dengan X1 1,7153 m dan X2 14,9361 m.

b. Waktu muka 1 μ s

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 14 Hasil Pengujian Dengan Waktu Muka 1 μ s

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	$6,167 \times 10^{-5}$	1,911	16,939
2	0,5	0,25	$5,527 \times 10^{-5}$	1,906	16,639
3	0,75	0,5	$6,401 \times 10^{-5}$	1,923	16,675
4	0,75	0,5	$8,735 \times 10^{-5}$	1,922	16,429
5	0,5	0,5	$1,404 \times 10^{-5}$	1,943	16,744
6	0,5	0,5	$4,663 \times 10^{-5}$	1,936	16,662

Berdasarkan Tabel 14 terlihat hasil yang berbeda tiap pengujian, hal ini dikarenakan metode AG menerapkan sistem acak pada setiap penelusuran. Hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian keempat dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah $8,735 \times 10^{-5}$ dengan X1 1,9227 m dan X2 16,4296 m.

c. Waktu muka 2 μs

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 15 Hasil Pengujian Dengan Waktu Muka 2 μs

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	5,542x10 ⁻⁵	2,163	19,171
2	0,5	0,25	4,783x10 ⁻⁵	2,180	19,423
3	0,75	0,5	9,733x10 ⁻⁵	2,166	18,959
4	0,75	0,5	6,612x10 ⁻⁵	2,199	18,614
5	0,5	0,5	4,419x10 ⁻⁵	2,179	18,830
6	0,5	0,5	5,651x10 ⁻⁴	2,183	18,958

Berdasarkan Tabel 15 terlihat hasil yang berbeda tiap pengujian, hal ini dikarenakan metode AG menerapkan sistem acak pada setiap penelusuran. Hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian terakhir dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah 5,651x10⁻⁴ dengan X1 2,1832 m dan X2 18,9582 m.

Pengaruh variasi waktu muka arus sambaran balik terhadap jarak maksimum arrester dengan transformator daya dapat dilihat pada Tabel 16.

Tabel 16 Pengaruh Variasi Waktu Muka Sambaran Petir Terhadap Jarak Maksimum Arrester Dengan Transformator Daya Pada Tegangan 20 kV

Waktu Muka (t _f)	Jarak maksimum arrester dan transformator	
	X1(m)	X2(m)
0,5 μs	1,715	14,936
1 μs	1,922	16,429
2 μs	2,183	18,958

Berdasarkan Tabel 16 diatas dapat dilihat bahwa semakin besar waktu muka sambaran balik maka semakin besar pula jarak penempatan arrester yang diijinkan.

3.2. Tegangan 150 kV

3.2.1 Pengaruh Variasi Jarak Sambaran

Pengujian ini menggunakan tiga variasi jarak antara titik sambaran dengan saluran (R) yang digunakan, yaitu 50 m, 100 m, 200 m. Sedangkan parameter yang lain adalah arus puncak sambaran balik (I) = 650 kA, waktu muka arus sambaran balik (t_f) = 1 μs, tinggi saluran (h) = 30 m, konduktivitas tanah (σ) = 0.001 S/m, incidence angle (α) = 2 radian, kecepatan arus sambaran balik (v) = 280 m/μs.

a. Jarak sambaran (R) 50 m

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 17 Hasil Pengujian Dengan Jarak Sambaran 50 m

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	1,230x10 ⁻⁶	1,313	9,624
2	0,5	0,25	6,472x10 ⁻⁶	1,283	9,261
3	0,75	0,5	3,305x10 ⁻⁶	1,280	9,363
4	0,75	0,5	9,785x10 ⁻⁶	1,305	9,107
5	0,5	0,5	1,431x10 ⁻⁵	1,288	9,181
6	0,5	0,5	5,738x10 ⁻⁵	1,297	9,161

Berdasarkan Tabel 17 terlihat hasil yang berbeda tiap pengujian, hal ini dikarenakan metode AG menerapkan sistem acak pada setiap penelusuran. Hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian terakhir dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah 5,738x10⁻⁵ dengan X1 1,2977 m dan X2 9,1614 m.

b. Jarak sambaran (R) 100 m

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 18 Hasil Pengujian Dengan Jarak Sambaran 100 m

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	1,178x10 ⁵	2,392	17,311
2	0,5	0,25	1,945x10 ⁶	2,412	16,411
3	0,75	0,5	7,132x10 ⁵	2,403	17,068
4	0,75	0,5	4,505x10 ⁶	2,365	16,939
5	0,5	0,5	2,397x10 ⁵	2,382	17,041
6	0,5	0,5	7,137x10 ⁵	2,391	17,131

Berdasarkan Tabel 18 terlihat hasil yang berbeda tiap pengujian, hal ini dikarenakan metode AG menerapkan sistem acak pada setiap penelusuran. Hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian terakhir dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah 7,137x10⁵ dengan X1 2,3913 m dan X2 17,131 m.

c. Jarak sambaran (R) 200 m

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 19 Hasil Pengujian Dengan Jarak Sambaran 200 m

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	2,572x10 ⁵	4,433	31,157
2	0,5	0,25	9,824x10 ⁵	4,426	31,423
3	0,75	0,5	3,567x10 ⁵	4,425	31,183
4	0,75	0,5	7,288x10 ⁵	4,429	31,459
5	0,5	0,5	3,637x10 ⁴	4,426	31,457
6	0,5	0,5	1,643x10 ⁴	3,556	30,950

Berdasarkan Tabel 19 terlihat hasil yang berbeda tiap pengujian, hal ini dikarenakan metode AG menerapkan sistem acak pada setiap penelusuran. Hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian kelima dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah $3,637 \times 10^{-4}$ dengan X1 4,4265 m dan X2 31,4576 m.

Pengaruh variasi jarak titik sambaran dengan saluran terhadap jarak maksimum arrester dengan transformator daya dapat dilihat pada Tabel 20.

Tabel 20 Pengaruh Variasi Jarak Sambaran Petir Terhadap Jarak Maksimum Arrester Dengan Transformator Daya Pada Tegangan 150 kV

Jarak Sambaran (R)	Jarak maksimum arrester dan transformator	
	X1(m)	X2(m)
50 m	1,297	9,161
100 m	2,391	17,131
200 m	4,426	31,457

Berdasarkan Tabel 20 diatas dapat dilihat bahwa semakin jauh jarak sambaran dari saluran maka semakin besar pula jarak penempatan arrester yang diijinkan.

3.2.2 Pengaruh Variasi Waktu Muka Sambaran

Pengujian ini menggunakan tiga variasi waktu muka (T_f) yang digunakan, yaitu 0,5 μ s, 1 μ s, 2 μ s. Sedangkan parameter yang lain adalah arus puncak sambaran balik (I) = 650 kA, jarak titik sambaran dengan saluran (R) = 100 m, tinggi saluran (h) = 8,5 m, konduktivitas tanah (ρ) = 0.001 S/m, *incidence angle* (θ) = 2 radian, kecepatan arus sambaran balik (v) = 280 m/ μ s.

a. Waktu muka 0,5 μ s

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 21 Hasil Pengujian Dengan Waktu Muka 0,5 μ s

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	$8,111 \times 10^{-6}$	2,118	15,330
2	0,5	0,25	$3,421 \times 10^{-6}$	2,131	15,429
3	0,75	0,5	$7,616 \times 10^{-6}$	2,093	15,032
4	0,75	0,5	$8,915 \times 10^{-6}$	2,103	15,269
5	0,5	0,5	$2,324 \times 10^{-5}$	2,115	15,215
6	0,5	0,5	$1,43 \times 10^{-4}$	2,114	15,023

Berdasarkan Tabel 21 terlihat hasil yang berbeda tiap pengujian, hal ini dikarenakan metode AG menerapkan sistem acak pada setiap penelusuran. Hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian terakhir dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah $1,43 \times 10^{-4}$ dengan X1 2,1144 m dan X2 15,0233 m.

b. Waktu muka 1 μ s

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 22 Hasil Pengujian Dengan Waktu Muka 1 μ s

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	$4,371 \times 10^{-6}$	2,427	17,032
2	0,5	0,25	$2,027 \times 10^{-4}$	2,397	17,030
3	0,75	0,5	$1,231 \times 10^{-5}$	2,403	17,285
4	0,75	0,5	$5,025 \times 10^{-6}$	2,373	17,315
5	0,5	0,5	$5,847 \times 10^{-5}$	2,374	17,042
6	0,5	0,5	$1,324 \times 10^{-6}$	2,451	17,225

Berdasarkan Tabel 22 terlihat hasil yang berbeda tiap pengujian, hal ini dikarenakan metode AG menerapkan sistem acak pada setiap penelusuran. Hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian kedua dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah $2,027 \times 10^{-4}$ dengan X1 2,3972 m dan X2 17,0301 m.

c. Waktu muka 2 μ s

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 23 Hasil Pengujian Dengan Waktu Muka 2 μ s

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	$1,492 \times 10^{-5}$	2,725	19,078
2	0,5	0,25	$1,077 \times 10^{-5}$	2,698	19,534
3	0,75	0,5	$1,006 \times 10^{-5}$	2,721	19,34
4	0,75	0,5	$1,952 \times 10^{-5}$	2,727	19,144
5	0,5	0,5	$3,455 \times 10^{-6}$	2,728	19,843
6	0,5	0,5	$7,216 \times 10^{-6}$	2,725	19,672

Berdasarkan Tabel 23 terlihat hasil yang berbeda tiap pengujian, hal ini dikarenakan metode AG menerapkan sistem acak pada setiap penelusuran. Hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian keempat dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah $1,952 \times 10^{-5}$ dengan X1 2,727 m dan X2 19,1474 m. Pengaruh variasi waktu muka arus sambaran balik terhadap jarak maksimum arrester dengan transformator daya dapat dilihat pada Tabel 24 .

Tabel 24 Pengaruh Variasi Waktu Muka Sambaran Petir Terhadap Jarak Maksimum Arrester Dengan Transformator Daya Pada Tegangan 150 kV

Waktu Muka (t_f)	Jarak maksimum arrester dan transformator	
	X1(m)	X2(m)
0,5 μ s	2,114	15,023
1 μ s	2,397	17,030
2 μ s	2,727	19,147

Berdasarkan Tabel 24 diatas dapat dilihat bahwa semakin besar waktu muka sambaran balik maka semakin besar pula jarak penempatan arrester yang diijinkan.

3.3. Tegangan 500 kV

3.3.1 Pengaruh Variasi Jarak Sambaran

Pengujian ini menggunakan tiga variasi jarak antara titik sambaran dengan saluran (R) yang digunakan, yaitu 50 m, 100 m, 200 m. Sedangkan parameter yang lain adalah

arus puncak sambaran balik (I) = 650 kA, waktu muka arus sambaran balik (t_f) = 1 μ s, tinggi saluran (h) = 70 m, konduktivitas tanah (ρ) = 0.001 S/m, *incidence angle* (θ) = 2 radian, kecepatan arus sambaran balik (v) = 280 m/ μ s.

a. Jarak sambaran (R) 50 m

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 25 Hasil Pengujian Dengan Jarak Sambaran 50 m

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	1,272x10 ⁶	2,736	19,3
2	0,5	0,25	6,028x10 ⁷	2,734	19,404
3	0,75	0,5	6,444x10 ⁷	2,721	19,315
4	0,75	0,5	7,15x10 ⁷	2,723	19,312
5	0,5	0,5	2,432x10 ⁶	2,729	19,201
6	0,5	0,5	4,725x10 ⁶	2,740	19,177

Berdasarkan Tabel 25 terlihat hasil yang berbeda tiap pengujian, hal ini dikarenakan metode AG menerapkan sistem acak pada setiap penelusuran. Hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian terakhir dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah 4,725x10⁶ dengan X1 2,740 m dan X2 19,177 m.

b. Jarak sambaran (R) 100 m

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 26 Hasil Pengujian Dengan Jarak Sambaran 100 m

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	1,898x10 ⁶	5,045	34,883
2	0,5	0,25	1,382x10 ⁵	5,051	35,335
3	0,75	0,5	2,455x10 ⁵	5,047	35,230
4	0,75	0,5	9,205x10 ⁶	5,066	35,213
5	0,5	0,5	4,43x10 ⁶	5,038	35,227
6	0,5	0,5	9,993x10 ⁶	5,056	35,062

Berdasarkan Tabel 26 terlihat hasil yang berbeda tiap pengujian, hal ini dikarenakan metode AG menerapkan sistem acak pada setiap penelusuran. Hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian ketiga dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah 2,455x10⁵ dengan X1 5,047 m dan X2 35,230 m.

c. Jarak sambaran (R) 200 m

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 27 Hasil Pengujian Dengan Jarak Sambaran 200 m

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	2,802x10 ⁵	9,325	64,916
2	0,5	0,25	1,124x10 ⁵	9,318	64,181
3	0,75	0,5	2,954x10 ⁵	9,338	65,185
4	0,75	0,5	3,368x10 ⁵	9,328	65,164
5	0,5	0,5	2,248x10 ⁵	9,329	64,856
6	0,5	0,5	3,503x10 ⁶	9,337	64,556

Berdasarkan Tabel 27 terlihat hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian keempat dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah 3,368x10⁵ dengan X1 9,328 m dan X2 65,164 m.

Pengaruh variasi jarak titik sambaran dengan saluran terhadap jarak maksimum arrester dengan transformator daya dapat dilihat pada Tabel 28.

Tabel 28 Pengaruh Variasi Jarak Sambaran Petir Terhadap Jarak Maksimum Arrester Dengan Transformator Daya Pada Tegangan 500 kV

Jarak Sambaran (R)	Jarak maksimum arrester dan transformator	
	X1(m)	X2(m)
50 m	2,740	19,177
100 m	5,047	35,230
200 m	9,328	65,164

Berdasarkan Tabel 28 diatas dapat dilihat bahwa semakin jauh jarak sambaran dari saluran maka semakin besar pula jarak penempatan arrester yang diijinkan.

3.3.2 Pengaruh Variasi Waktu Muka Sambaran

Pengujian ini menggunakan tiga variasi waktu muka (T_f) yang digunakan, yaitu 0,5 μ s, 1 μ s, 2 μ s. Sedangkan parameter yang lain adalah arus puncak sambaran balik (I) = 650 kA, jarak titik sambaran dengan saluran (R) = 100 m, tinggi saluran (h) = 70 m.

a. Waktu muka 0,5 μ s

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 29 Hasil Pengujian Dengan Waktu Muka 0,5 μ s

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	1,006x10 ⁶	4,485	30,821
2	0,5	0,25	3,706x10 ⁷	4,512	31,074
3	0,75	0,5	1,256x10 ⁶	4,471	30,726
4	0,75	0,5	1,607x10 ⁶	4,479	31,319
5	0,5	0,5	1,965x10 ⁶	4,466	31,381
6	0,5	0,5	3,328x10 ⁵	4,466	31,116

Berdasarkan Tabel 29 terlihat hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian terakhir dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah 3,328x10⁵ dengan X1 4,466 m dan X2 31,116 m.

b. Waktu muka 1 μ s

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 30 Hasil Pengujian Dengan Waktu Muka 1 μ s

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	2,185x10 ⁶	5,031	35,282
2	0,5	0,25	1,169x10 ⁶	5,059	35,657
3	0,75	0,5	2,403x10 ⁶	5,044	34,931
4	0,75	0,5	1,79x10 ⁶	5,046	34,869
5	0,5	0,5	8,004x10 ⁷	5,092	35,104
6	0,5	0,5	2,133x10 ⁵	5,048	35,281

Berdasarkan Tabel 30 terlihat hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian terakhir dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah $2,133 \times 10^{-5}$ dengan X1 5,0487 m dan X2 35,2817 m.

c. Waktu muka 2 μs

Pengujian variasi ini dilakukan dengan enam kali pengambilan data, dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 31 Hasil Pengujian Dengan Waktu Muka 2 μs

Peng-ujian	Pindah silang	Mutasi	Fungsi Tujuan	Jarak Maksimum	
				X1(m)	X2(m)
1	0,5	0,25	$3,783 \times 10^5$	5,731	39,933
2	0,5	0,25	$9,173 \times 10^7$	5,686	40,023
3	0,75	0,5	$2,332 \times 10^5$	5,730	39,797
4	0,75	0,5	$4,979 \times 10^6$	5,731	39,659
5	0,5	0,5	$3,664 \times 10^6$	5,707	39,781
6	0,5	0,5	$1,801 \times 10^6$	5,754	40,014

Berdasarkan Tabel 31 terlihat hasil yang berbeda tiap pengujian, hal ini dikarenakan metode AG menerapkan sistem acak pada setiap penelusuran. Hasil terbaik pengujian adalah pada pengujian pertama dengan nilai fungsi tujuan tertinggi adalah $3,783 \times 10^{-5}$ dengan X1 5,7319m dan X2 39,9335 m.

Pengaruh variasi waktu muka arus sambaran balik terhadap jarak maksimum arrester dengan transformator daya dapat dilihat pada Tabel 32 .

Tabel 32 Pengaruh Variasi Waktu Muka Sambaran Petir Terhadap Jarak Maksimum Arrester Dengan Transformator Daya Pada Tegangan 500 kV

Waktu Muka (t)	Jarak maksimum arrester dan transformator	
	X1(m)	X2(m)
0,5 μs	4,466	31,116
1 μs	5,055	35,27
2 μs	5,731	39,933

Berdasarkan Tabel 32 diatas dapat dilihat bahwa semakin besar waktu muka sambaran balik maka semakin besar pula jarak penempatan arrester yang diijinkan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan Konfigurasi saluran kawat-kabel memiliki jarak maksimum arrester dengan transformator daya yang lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi saluran kawat-kawat. Pada tegangan 20 kV jarak aman maksimum untuk konfigurasi (X1) adalah 1,035 m dan konfigurasi (X2) adalah 9,009 m. Tegangan 150 kV jarak aman maksimum untuk konfigurasi (X1) adalah 1,297 m dan konfigurasi (X2) adalah 9,161 m. Tegangan 500 kV jarak aman konfigurasi (X1) adalah 2,74 m dan konfigurasi (X2) adalah 19,177 m. Waktu muka sambaran memiliki pengaruh terhadap optimasi yaitu semakin besar waktu muka arus sambaran balik

maka jarak maksimum arrester dengan transformator daya semakin besar. Jarak titik sambaran petir juga berpengaruh terhadap optimasi penempatan arrester, yaitu semakin besar jarak antara titik sambaran dengan saluran maka jarak maksimum arrester dengan transformator daya semakin besar. Besar tegangan sisa yang tiba pada transformator daya masih berada dibawah nilai BIL sehingga transformator daya masih dalam keadaan aman. Simulasi yang dilakukan ini masih terbatas pada batasan masalah yang disebutkan didepan, pengembangan lebih lanjut bisa dilakukan dengan metode lain, misalnya metode fuzzy, ant colony optimation, bee colony optimation, maupun metode optimasi lain. Selain itu perlu juga dikembangkan untuk kawat jenis konduktor berkas (*bundle conductor*) dan kabel berinti banyak (*multiple core cable*).

Referensi

- [1]. Abdu, Syamsir dan Angga Septian. Analisis Gangguan Petir Akibat Sambaran Langsung Pada Saluran Transmisi Tegangan Ekstra Tinggi 500 kV, *JETri*. 2009; 8(2): 1-20.
- [2]. Affandi, M.Yusron, *Studi Pengaruh Tegangan Lebih Akibat Induksi Petir Pada Saluran Transmisi Tegangan Tinggi Menggunakan Coupling Model*, Surabaya:Jurusan Teknik Elektro-FTI ITS. 2011.
- [3]. C.A Christodoulou, V.Vita, A.Mitropoulou, D.S.Oikonomou, L.Ekonomou. *Interface Construction for The Computation of The Optimum Installation Position of Metal Oxide Surge Arrester in Medium Voltage Substations*, ISBN: 978-960-474-159-5, 2011.
- [4]. Ernesto Perez, Javier Herrera, and Horacio Torres. *Sensitivity Analysis of Induced Voltages on Distribution Lines*, paper IEEE Bologna Power Tech Conference. Italy. 2003
- [5]. Harjanto, Dwi, Yuningtyastuti, Susatyo Handoko . Optimasi Penempatan Arrester Terhadap Tegangan Lebih Transien Pada Transformator Daya Menggunakan PSO (*Particle Swarm Optimization*).*Jurnal Amplifier*. 2012;2(1):11-22
- [6]. Hutahuruk, TS, *Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*. Jakarta. Penerbit Erlangga. 1989.
- [7]. Pratomo, Fariz Dwi. *Studi Tegangan Lebih Impuls Akibat Penggunaan Konfigurasi Mixed Lines (High Voltage Overhead-Cable Lines) 150 kV*. Surabaya:Jurusan Teknik Elektro-FTI ITS; 2011.
- [8]. Sanjoyo. *Aplikasi Algoritma Genetika*. Jogjakarta, 2006
- [9]. Suyanto. *Algoritma Genetika Dalam Matlab*. Yogyakarta:Penerbit Andi. 2005
- [10]. SPLN 7-1978. *Pedoman Pemilihan Tingkat Isolasi Transformator dan Penangkap Petir*. Jakarta. 1978.
- [11]. SPLN 121-1996. *Konstruksi Saluran Udara Tegangan Tinggi 70 kV dan 150 kV Dengan Tiang Beton/Baja*. Jakarta. 1996.
- [12]. SPLN 15-1978. *Pedoman Pemilihan Jenis Dan Ukuran Penghantar Alumunium Bagi Saluran Udara 20 kV, 66 kV, dan 150 kV*. Jakarta. 1978.
- [13]. Tobing, Bonggas L. *Peralatan Tegangan Tinggi*. Penerbit PT Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. 2003.