

# ANALISIS KINERJA PROTEKSI PETIR PADA SALURAN TRANSMISI TENAGA LISTRIK MENGGUNAKAN PEMROGRAMAN PYTHON

Rofi Hariadi<sup>1)</sup>, Fri Murdiya<sup>2)</sup>

<sup>1) 2)</sup>Program Studi Teknik Elektro S1, Fakultas Teknik Universitas Riau  
Kampus Bina Widya Km. 12,5 Simpang Baru Panam, Pekanbaru 28293  
Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau  
Email: rofi.hariadi@student.unri.ac.id

## ABSTRACT

One of main causes of interruption of electrical power supply is the lightning strike on overhead power transmission lines. The lightning performance of transmission line can be determined by value of shielding failure flashover rate (SFFOR) and back flashover rate (BFOR). The object of this study is to create a computer application to compute lightning performance on the transmission lines using Python programming. Python's package tkinter used for program interface window. Application programming is done by using the concept of Object Oriented Programming (OOP) using Python's keyword class. Validation shows that the application has applied the method correctly with a percentage error 0 % for SFFOR and 0,344 % for BFOR. The application can do analysis on the factors that affecting SFFOR and BFOR such as the effect of thunder day, tower foot resistance, and number of isolator disks. The results obtained in this study is computer application that can perform lightning performance analysis and analysis of factors that can affect it, such as thunder day, tower foot resistance and the number of isolator disks.

Keywords: BFOR, lightning performance, OOP, overhead transmission line, Python, SFFOR, tkinter

## I. PENDAHULUAN

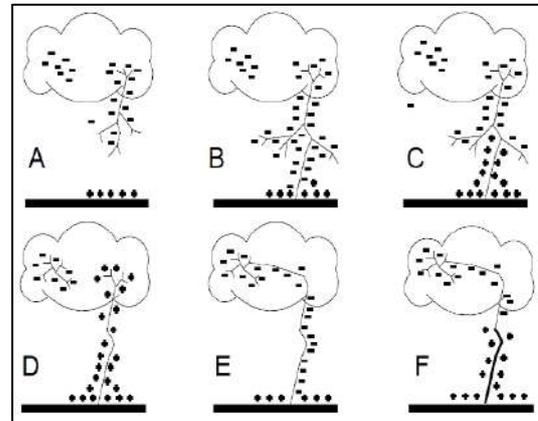
Kinerja dari Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT), Saluran Udara Ekstra Tinggi (SUTET), dapat ditentukan dari jumlah sambaran petir yang menyambar komponen saluran dan menyebabkan lompatan api atau *Flashover* (FO). Menurut (Barros, 2011) jika petir menyambar kawat fasa dan menyebabkan FO pada isolator, maka itu disebut kegagalan perisai atau *Shielding Failure* (SF), dan perlu dihitung *Shielding Failure Flashover Rate* (SFFOR). Jika petir menyambar pada kawat lindung atau menara transmisi, maka akan timbul tegangan lebih yang bisa cukup tinggi untuk menyebabkan loncatan api balik atau *Backflashover* (BFO) pada isolator. Pada kasus BFO diperlukan untuk menghitung *Backflashover Rate* (BFOR).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat aplikasi komputer yang dapat melakukan analisis kinerja proteksi petir menggunakan pemrograman Python.

### Mekanisme Sambaran Petir

Petir diawali dengan sebuah *stepped leader* yang mendekati ke bumi, kemudian terbagi menjadi satu atau beberapa jalur (Gambar 1A). Setelah *stepped* atau *downward leader* mendekati bumi,

sebuah *upward leader* (sambaran balik) dari bumi bertemu dengan *downward leader* (Gambar 1B). Kemudian *upward leader* bergerak ke atas dari bumi menuju awan (Gambar 1C) pada proses ini arus dilepas ke bumi. Dari proses A hingga C pada Gambar 1 disebut mekanisme sambaran pertama (Anderson J. G., 1982). Dan sebuah petir bisa saja terdiri dari banyak sambaran. Sambaran kedua dijelaskan pada Gambar 1D hingga 1F, yang mana prosesnya hampir sama dengan proses sambaran pertama.



Gambar 1 Proses terjadinya petir yang menyambar saluran transmisi

### Jumlah Sambaran ke Tanah

Untuk menentukan kerapatan sambaran ke tanah digunakan Persamaan 1 (Anderson, 1982).

$$N = 0,12 \times Td \quad (1)$$

Dimana Td adalah jumlah hari guruh yang didapatkan dari peta isokeraunik.

### Jumlah Sambaran ke Bangunan

Jumlah sambaran yang mungkin mengenai saluran dihitung menggunakan persamaan berikut (Anderson, 1982).

$$N_L = \frac{0,12 \times Td (b+4 \times h_{g\_avg}^{1,09})}{10} \quad (2)$$

Dimana  $h_{g\_avg}$ , merupakan tinggi rata – rata kawat lindung (Anderson, 1982).

$$h_{avg} = h - \left(\frac{2}{3}\right) \times Sag \quad (3)$$

### Probabilitas Distribusi Arus Puncak Petir

Untuk mengetahui probabilitas arus puncak petir digunakan persamaan berikut (Anderson & Erikson, 1979).

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}} \quad (4)$$

### Penyederhanaan Sub Penghantar

Ekuivalen sub penghantar dapat dihitung dengan persamaan berikut (Anderson, 1982).

$$R_{eq} = \sqrt[N]{r_{11}r_{12}r_{13} \dots r_{1n}} \quad (5)$$

Di mana N adalah jumlah sub penghantar,  $r_{1n}$  jarak antar sub penghantar.

### Kurva Tegangan-Waktu

Tegangan FO pada waktu tertentu adalah sebagai berikut (Anderson, 1982).

$$V_C = \left(0,4w + \frac{0,71w}{t^{0,75}}\right) \times 1000 \quad (6)$$

Dimana t adalah waktu tembus isolator, dan w adalah total panjang isolator.

### Radius Kawat dengan Kehadiran Korona

Radius sampul korona dapat diselesaikan secara iterasi pada persamaan 7 (Abrantes, 2016).

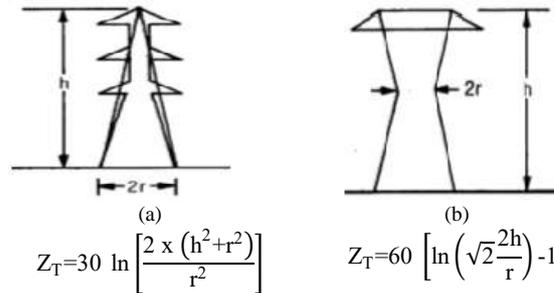
$$R_C^{n+1} = \frac{V_C}{E_o \ln\left(\frac{2h}{R_C^n}\right)} \quad (7)$$

Dimana  $E_o$  yaitu 1500 kV/m, radius efektif kawat akibat terbentuknya sampul korona, yaitu (Anderson, 1982).

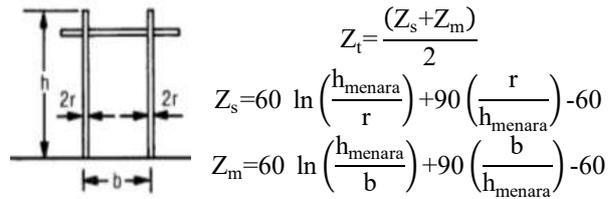
$$R_{C \text{ efektif}} = R_C + R_{eq} \quad (8)$$

### Menara Transmisi

Menara transmisi diklasifikasi ke dalam beberapa bentuk yang sering ditemukan sebagai berikut (Anderson, 1982).



**Gambar 2** Bentuk menara (a) kelas 1, (b) kelas 3.



**Gambar 3** Bentuk menara kelas 2

waktu tempuh  $\tau_T$  dari puncak ke kaki menara ,

$$\tau_T = \frac{h}{300} \mu s \quad (9)$$

### Impedansi Surja Kawat

Impedansi surja satu kawat lindung dan kawat penghantar dalam korona berat adalah sebagai berikut (Anderson, 1982).

$$Z_{s\_nn} = 60 \times \sqrt{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) \cdot \ln\left(\frac{2h}{R_{C \text{ efektif}}}\right)} \quad (10)$$

Impedansi surja 2 kawat lindung dihitung dengan persamaan berikut (Anderson J. G., 1982).

$$Z_s = \frac{Z_{s\_nn} + Z_{s\_mn}}{2} \quad (11)$$

$$Z_{s\_mn} = 60 \ln\left(\frac{a_{mn}}{b_{mn}}\right) \quad (12)$$

Di mana  $a_{mn}$  adalah jarak dari kawat m ke bayangan kawat n,  $b_{mn}$  adalah jarak sebenarnya antara kawat m dan n.

### Menentukan Faktor Kopeling

Faktor kopeling 2 kawat lindung adalah sebagai berikut (Anderson, 1982).

$$K_n = \frac{Z_{n1} + Z_{n2}}{Z_{s\_nn} + Z_{s\_nm}} \quad (13)$$

Sedangkan untuk 1 kawat lindung,

$$K_n = \frac{Z_{n1}}{Z_{s\_nn}} \quad (14)$$

### Menghitung Kegagalan Pelindung

#### 1) Arus Kritis (Arus Minimum FO)

Arus kritis pada isolator dan jarak sambaran minimum dihitung dengan persamaan berikut (Anderson J. G., 1982).

$$I_{min} = \frac{2 \times V_C}{Z_{s\_nn}} \quad (15)$$

$$S = 10 \times I^{0.65} \quad (16)$$

## 2) Kawat Fasa Terekspos

Koordinat kawat lindung dan sudut lindung efektif dihitung menggunakan persamaan berikut (Anderson J. G., 1982).

$$X_G = \sqrt{S^2 - (\beta S - Y_\phi)^2} - \sqrt{S^2 - (\beta S - Y_c)^2} \quad (17)$$

$$\alpha_E = \tan^{-1} \left( \frac{X_G}{Y_\phi - Y_G} \right) \quad (18)$$

Hitung sudut lindung *existing* dengan persamaan berikut,

$$\alpha_s = \tan^{-1} \left( \frac{X_\phi - X_G}{Y_G - Y_\phi} \right) \quad (19)$$

Jika  $\alpha_s < \alpha_E$ , maka nilai SFFOR adalah 0 untuk fasa tersebut. Jika  $\alpha_s > \alpha_E$ , maka hitung area tidak terlindungi.

## 3) Menghitung Area Tidak Terlindungi

Jika  $\beta S > Y_\phi$ , maka:

$$X_s = S[\cos \theta + \sin(\alpha_s - \omega)] \quad (20)$$

Jika,  $\beta S < Y_\phi$ , maka:

$$X_s = S[1 + \sin(\alpha_s - \omega)] \quad (21)$$

Di mana,

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\beta S - Y_\phi}{S} \quad (22)$$

$$\omega = \cos^{-1} \frac{F}{2S} \quad (23)$$

$$\alpha_s = \tan^{-1} \left( \frac{X_\phi - X_G}{Y_G - Y_\phi} \right) \quad (24)$$

Koefisien  $\beta$ , 0,8 untuk Tegangan Ekstra Tinggi, 0,64 untuk Tegangan Ultra Tinggi, dan 1 untuk Tegangan Tinggi dan Tegangan Menengah. F adalah jarak kawat lindung ke fasa n.

## 4) Menghitung Jarak Sambaran Maksimum

Jarak sambaran maksimum dihitung dengan persamaan berikut. (Anderson J. G., 1982).

$$S_{\max} = Y_o \left( \frac{-B_s - \sqrt{B_s^2 + A_s C_s}}{A_s} \right) \quad (25)$$

$$Y_o = \frac{Y_G + Y_\phi}{2} \quad (26)$$

$$m = \left( \frac{X_\phi - X_G}{Y_G - Y_\phi} \right) \quad (27)$$

$$A_s = m^2 - m^2 \beta - \beta^2 \quad (28)$$

$$B_s = \beta(m^2 + 1) \quad (29)$$

$$C_s = (m^2 + 1) \quad (30)$$

## 5) Menghitung Arus Sambaran Maksimum

Arus sambaran maksimum kegagalan perisai, dihitung menggunakan persamaan berikut (Anderson J. G., 1982).

$$I = 0,029 \cdot S^{1.54} \quad (31)$$

## 6) Hitung SFFOR

SFFOR dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Anderson J. G., 1982).

$$N_{SF} = 0,012 \cdot T_d \cdot \frac{X_s}{2} \cdot (P_{\min} - P_{\max}) \quad (32)$$

## Menghitung BFOR

### 1) Tegangan Menara

Dengan arus sambaran sebesar 1 kA. Maka, persamaan tegangan di puncak menara ada 2  $\mu s$  adalah sebagai berikut (Anderson J. G., 1982).

$$(V_T)_2 = \left[ Z_I - \frac{Z_W}{1-\psi} \times \left( 1 - \frac{\tau_T}{1-\psi} \right) \right] \times I \quad (33)$$

Di mana,

$$Z_I = \frac{Z_S \times Z_T}{Z_S + 2Z_T} \quad (34)$$

$$Z_W = \left[ \frac{2Z_S Z_T}{(Z_S + 2Z_T)^2} \right] \times \left[ \frac{Z_T - R}{Z_T + R} \right] \quad (35)$$

$$\psi = \left( \frac{2Z_T - Z_S}{2Z_T + Z_S} \right) \left( \frac{Z_T - R}{Z_T + R} \right) \quad (36)$$

Tegangan resistansi kaki menara pada 2  $\mu s$  yaitu,

$$(V_R)_2 = \left[ \frac{\alpha_R Z_I}{1-\psi} \times \left( 1 - \frac{\psi \tau_T}{1-\psi} \right) \right] \times I \quad (37)$$

$$\alpha_R = \frac{2R}{Z_T + R} \quad (38)$$

Waktu tempuh *span* dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$2\tau_s = \frac{2 \times \text{jarak span (m)}}{300 \times 0,9} \mu s \quad (39)$$

Tegangan pantulan dari menara terdekat pada 2  $\mu s$ , (Anderson, 1982).

$$(V'_T)_2 = \begin{cases} \frac{-4K_s \times (V_T)_2^2}{Z_s} \times \left[ \frac{1-2(V_T)_2}{Z_s} \right] \times (1-\tau_s), & 2\tau_s < 2 \mu s \\ 0, & 2\tau_s > 2 \mu s \end{cases} \quad (40)$$

$$(\bar{V}_T)_2 = (V_T)_2 + (V'_T)_2 \quad (41)$$

Tegangan di lengan menara pada 2  $\mu s$  yaitu,

$$(V_{pn})_2 = (V_R)_2 + \frac{\tau_T - \tau_{pn}}{\tau_T} \times [(V_T)_2 - (V_R)_2] \quad (42)$$

$$\tau_{pn} = \frac{\text{jarak puncak ke lengan menara}}{300} \mu s \quad (43)$$

Tegangan isolator pada 2  $\mu s$  yaitu,

$$(V_{sn})_2 = (V_{pn})_2 - K_n (\bar{V}_T)_2 \quad (44)$$

Tegangan di puncak, resistansi kaki dan lengan menara pada 6  $\mu s$ , dihitung dengan persamaan berikut (Anderson, 1982).

$$(V_T)_6 = (V_R)_6 = (V_{pn})_6 = \left[ \frac{Z_s R}{Z_s + 2R} \right] I \quad (45)$$

Persamaan tegangan pantulan dari menara terdekat pada 6  $\mu s$ , adalah sebagai berikut (Anderson, 1982).

$$(V'_T)_6 = -4 \times K_s \times Z_s \left( \frac{R}{Z_s + 2 \times R} \right)^2 \left[ 1 - \frac{2 \times R}{Z_s + 2 \times R} \right] I \quad (46)$$

Tegangan isolator pada 6  $\mu s$  yaitu,

$$(V_{sn})_6 = [(V_T)_6 + (V'_T)_6] \cdot (1 - K_n) \quad (47)$$

2) Arus Kritis

Arus kritis yang diamati pada 2 μs dan 6 μs dihitung dengan persamaan berikut (Anderson, 1982).

$$(I_{cn})_2 = \frac{(V_c)_2}{(V_{sn})_2} \quad (48)$$

$$(I_{cn})_6 = \frac{(V_c)_6}{(V_{sn})_6} \quad (49)$$

Arus kritikal yang dipengaruhi frekuensi tegangan daya dihitung menggunakan persamaan berikut (Anderson, 1982).

$$I'_{cn} = \left[ \frac{V_c - V_{on} \times \sin(\theta_n - \alpha_n)}{V_c} \right] \times I_{cn} \quad (50)$$

Jika hasil persamaan 51 diplot akan menghasilkan gelombang seperti Gambar 4.

Arus kritis rata-rata saat waktu dominasi dihitung dengan persamaan berikut (Anderson, 1982).

$$I'_{cn} = I_{cn} \left\{ 1 + \frac{V_{on}}{V_{cn}} \left[ \frac{\cos(\theta_2 - \alpha_n) - \cos(\theta_1 - \alpha_n)}{\theta_2 - \theta_1} \right] \right\} \quad (51)$$

3) Menghitung BFOR

Hanya sambaran pada menara yang diperhitungkan, oleh karena itu jumlah sambaran efektif ke saluran dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Anderson, 1982).

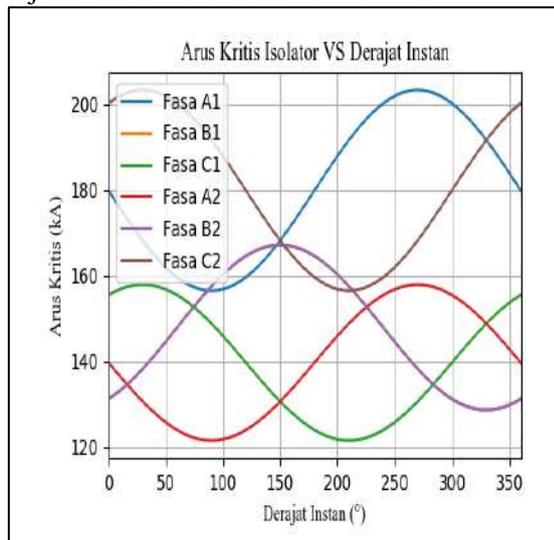
$$N_{L \text{ efektif}} = N_L \times 0,6 \quad (52)$$

Hitung kemungkinan BFO pada masing-masing penghantar.

$$\text{fasa } n = \frac{N_{L \text{ efektif}} \times \text{Persentase dominasi fasa } n}{100} \quad (53)$$

$$FO \text{ Fasa } n = \text{fasa } n \times P_f \quad (54)$$

Sehingga total sambaran yang kemungkinan menyebabkan BFO diketahui dengan menjumlahkan seluruh nilai FO fasa n.



Gambar 4 Arus kritis dan fasa dominasi

II. METODA PENELITIAN

Langkah – langkah yang akan dilakukan yaitu seperti, perancangan antar muka pengguna dan logika yang akan memproses masukan pengguna, validasi dan tes aplikasi. Validasi dilakukan dengan membandingkan keluaran aplikasi dengan teori yang telah dijabarkan pada buku (Anderson, 1982). Data - data yang akan digunakan untuk verifikasi dan tes aplikasi didapatkan dari buku (Anderson, 1982).

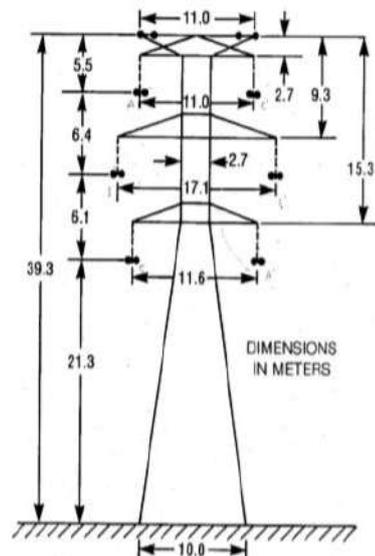
Versi python yang digunakan adalah Python 3.6.8 64 bit, sedangkan virtual environment yang digunakan adalah Pipenv.

Tabel 1 Data konfigurasi kawat lindung dan kawat penghantar

No.	Fungsi	r kawat (m)	Jarak Antar Sub Penghanta r (m)	V <sub>LL</sub> (kV)	α <sub>n</sub> (°)
1	SW	0,0045	-	0	-
2	SW	0,0045	-	0	-
3	A1	0,0148	0,457	345	0
4	B1	0,0148	0,457	345	-120
5	C1	0,0148	0,457	345	120
6	A2	0,0148	0,457	345	0
7	B2	0,0148	0,457	345	-120
8	C2	0,0148	0,457	345	120

Tabel 2 Data lainnya yang dibutuhkan

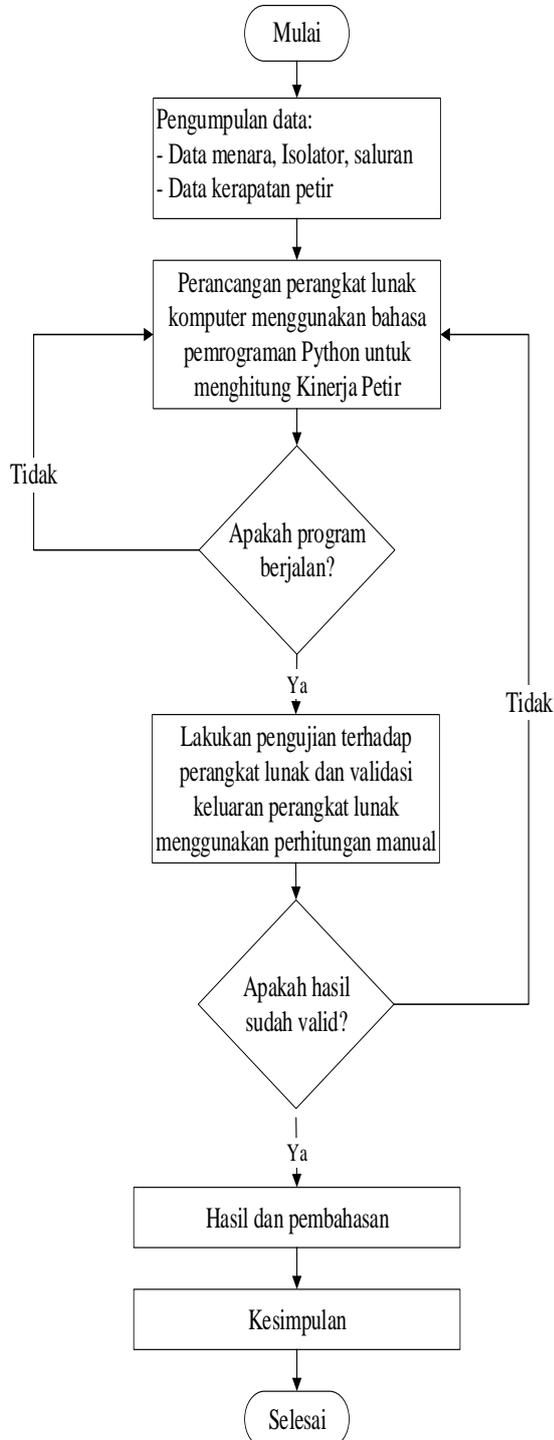
Parameter	Nilai
Panjang isolator (m)	2,63
Span (m)	335
hari guruh (Hari/tahun)	30
Tahanan kaki menara (Ω)	20
Panjang isolator per piringan (m)	0,1753
Td (hari/tahun)	30



Gambar 5 Konfigurasi menara transmisi 345 kV

### Langkah Penelitian

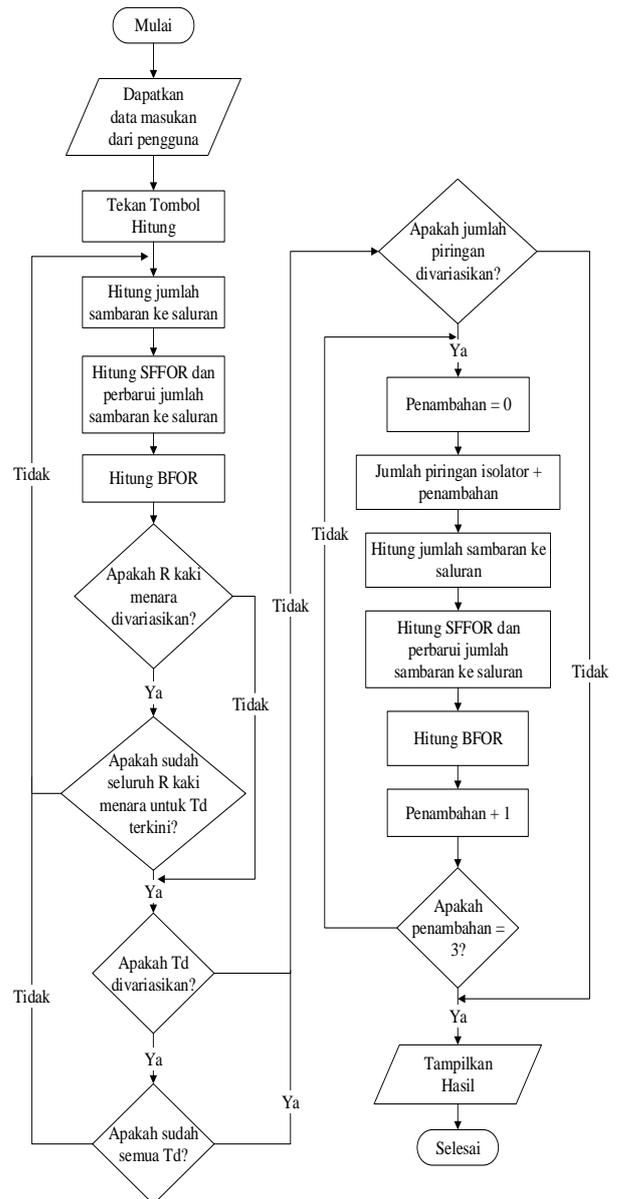
Langkah – langkah penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada gambar diagram alir di bawah ini.



Gambar 6 Diagram alir penelitian

### Langkah Kerja Aplikasi

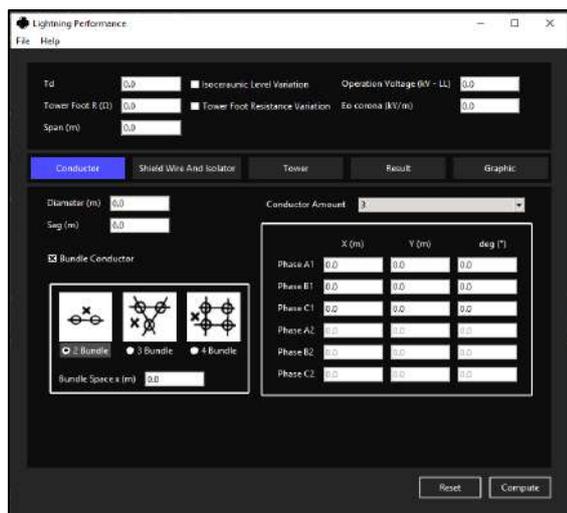
Secara umum langkah – langkah kerja aplikasi yang akan dibuat dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Diagram alir program

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Aplikasi memiliki antar muka seperti yang ditampilkan pada Gambar 8. Antar muka memiliki ukuran bawaan minimal yaitu 730x640 pixel, agar mencegah adanya bagian dari aplikasi yang tidak ditampilkan. Aplikasi memiliki beberapa *Frame* yang saling bertumpuk yaitu *Frame* Penghantar, *Frame* Kawat Lindung dan Isolator, *Frame* Menara, *Frame* Hasil, *Frame* Grafik. *Frame* tersebut dapat diakses dengan menekan tombol di atas *Frame* tersebut pada Gambar 8. Aplikasi juga menyediakan pilihan variasi hari guruh, variasi tahanan kaki menara, dan jumlah piringan isolator. Pilihan tersebut dapat pilih dengan menekan *Checkbutton* pada jendela antar muka aplikasi.



Gambar 8 Antar pengguna aplikasi

### Validasi Aplikasi

Validasi dilakukan dengan membandingkan SFFOR dan BFOR yang dihitung menggunakan aplikasi dengan hasil hitungan manual. Hasil menunjukkan bahwa persentase kesalahan SFFOR dan BFOR yang dihitung menggunakan aplikasi adalah 0 % dan 0,344 %. Dengan itu dapat dikatakan aplikasi telah menerapkan metode analisis SFFOR dan BFOR dengan benar.

### Pengaruh Hari Guruh Terhadap SFFOR dan BFOR

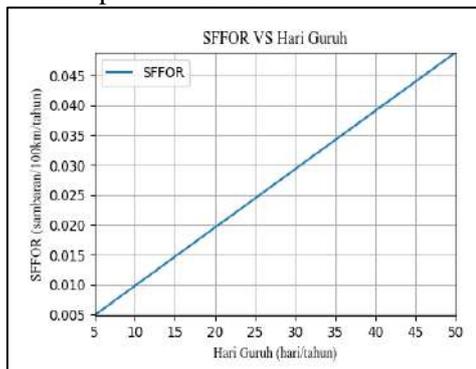
Aplikasi menampilkan keluaran hasil perhitungan dengan variasi hari guruh seperti Lampiran Tabel A. Grafik hasil perhitungan SFFOR dan BFOR dengan hari guruh yang bervariasi dapat dilihat pada Gambar 9 dan 10.

Dari Lampiran Tabel A hari guruh 5 hari/tahun memiliki SFFOR dan BFOR lebih rendah dibandingkan 50 hari/tahun. Hal ini terjadi karena semakin meningkatnya hari guruh, maka kemungkinan sambaran ke saluran semakin meningkat.

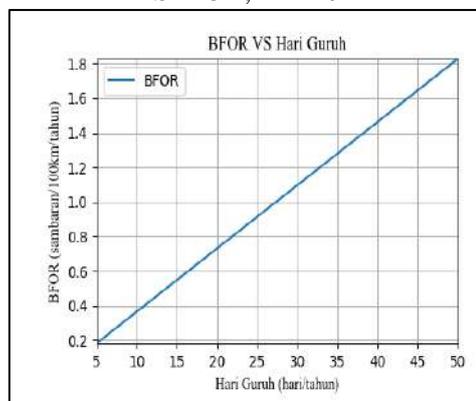
### Pengaruh Tahanan Kaki Menara Terhadap SFFOR dan BFOR

Data yang dilihat pada Lampiran Tabel B dihasilkan oleh perhitungan menggunakan aplikasi. SFFOR pada Lampiran Tabel B tidak mengalami perubahan akibat tahanan kaki menara yang berubah. Bahkan tahanan kaki menara divariasikan hingga 400 Ω, nilai SFFOR masih tetap sama yaitu 0,0293 sambaran/100km/tahun. Sedangkan BFOR pada terus mengalami peningkatan seiring meningkatnya nilai tahanan kaki menara. Grafik

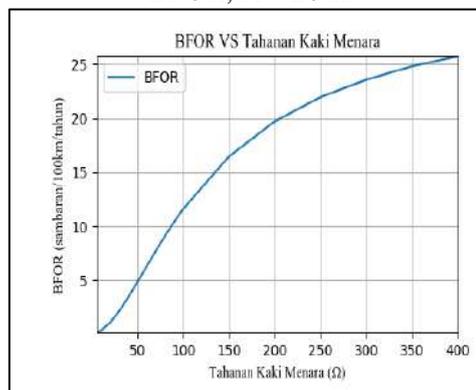
pengaruh tahanan kaki menara terhadap BFOR dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 9 Pengaruh variasi hari guruh terhadap SFFOR, R = 20 Ω



Gambar 10 Pengaruh variasi hari guruh terhadap BFOR, R = 20 Ω

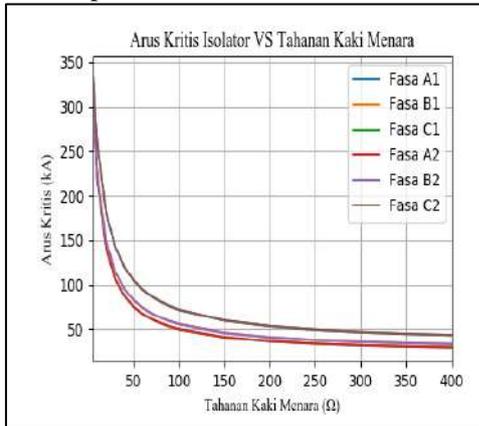


Gambar 11 Pengaruh Tahanan kaki menara terhadap nilai BFOR, Td = 30 hari/tahun

Gambar 12 merupakan grafik pengaruh tahanan kaki menara terhadap arus kritis isolator yang dihasilkan oleh aplikasi. Dari Gambar 12 hanya terlihat 3 kurva, dikarenakan beberapa isolator memiliki arus kritis yang sama, yaitu isolator fasa A1 dengan C2, isolator fasa B1 dengan B2, isolator fasa C1 dengan A2.

Fasa C1 dan A2 memiliki arus kritis isolator lebih rendah dibandingkan fasa lainnya. Pengaruh tahanan kaki menara terhadap arus kritis isolator

dapat dilihat pada Lampiran Tabel C. Untuk menyebabkan FO pada isolator C1 dan A2 dengan R yaitu  $20 \Omega$ , dibutuhkan arus puncak petir sebesar 139,65 kA, sedangkan untuk menyebabkan FO pada isolator dengan R yaitu  $80 \Omega$ , dibutuhkan petir dengan arus puncak 56,36 kA.



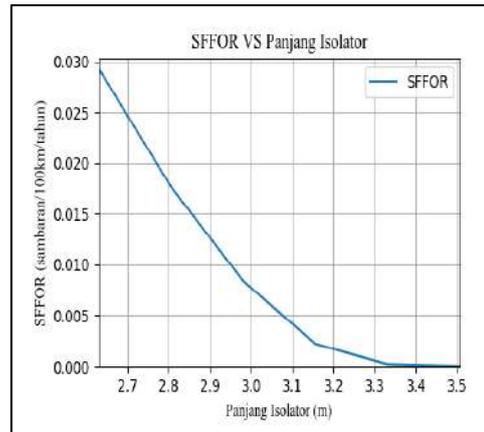
**Gambar 12** Pengaruh tahanan kaki menara terhadap arus kritis isolator,  $T_d = 30$  hari/tahun

Dengan menggunakan Persamaan 4, akan didapatkan peluang arus puncak petir yang dapat melampaui arus kritis isolator yaitu, 0,01958 atau 1,958 % untuk 139,64 kA dan 0,17448 atau 17,448 % untuk 56,36 kA. Artinya, peluang arus puncak petir melampaui arus kritis isolator 56,36 kA lebih besar dari pada isolator dengan arus kritis 139,64 kA. Tentunya isolator dengan arus kritis 56,36 kA akan lebih mudah FO. Karena itu BFOR dengan R sebesar  $80 \Omega$  lebih tinggi.

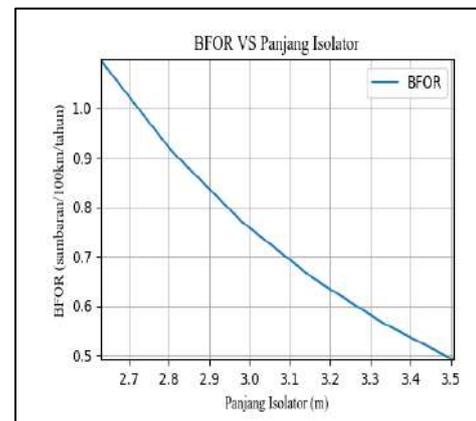
**Pengaruh Jumlah Piringan Isolator Terhadap SFFOR dan BFOR**

Pada Lampiran Tabel D, isolator dengan panjang 2,63 m, arus kritis terendah yaitu 139,65 kA pada isolator fasa C1 dan A2, dibandingkan dengan isolator sepanjang 3,51 m, memiliki arus kritis isolator terendah yaitu 185,62 kA pada fasa C1 dan A2. Artinya semakin panjang isolator, maka semakin tinggi arus kritis isolator sehingga tidak mudah terjadi FO. Hal ini juga berhubungan dengan probabilitas arus puncak petir yang akan melampaui arus kritis isolator. Semakin tinggi arus kritis isolator maka akan semakin kecil peluang arus petir melampaui arus kritis isolator. Hal ini tentunya meningkatkan kinerja proteksi petir pada saluran transmisi. Pengaruh panjang isolator terhadap nilai SFFOR dan BFOR dapat dilihat pada Lampiran Tabel E.

Gambar 13 dan 14 memperlihatkan pengaruh panjang isolator terhadap nilai SFFOR dan BFOR. Parameter  $T_d = 30$  hari/tahun,  $R = 20 \Omega$ .



**Gambar 13** Pengaruh panjang isolator terhadap nilai SFFOR



**Gambar 14** Pengaruh panjang isolator terhadap nilai BFOR

**IV. KESIMPULAN**

Python merupakan sebuah bahasa pemrograman yang mudah dimengerti karena sintaknya yang mendekati bahasa manusia. Analisis SFFOR dan BFOR menggunakan aplikasi telah divalidasi dengan persentase kesalahan untuk SFFOR dan BFOR yaitu 0 % dan 0,344 %.

Dengan Tahanan kaki menara (R) konstan, hari guruh ( $T_d$ ) divariasikan, menyebabkan nilai SFFOR dan BFOR meningkat. Hal tersebut dikarenakan jumlah sambaran ke saluran meningkat. Dengan  $T_d$  konstan dan R divariasikan, tidak berpengaruh terhadap nilai SFFOR, akan tetapi berpengaruh terhadap nilai BFOR. Semakin kecil nilai tahanan kaki menara, dapat meningkatkan kinerja proteksi petir, dikarenakan nilai BFOR semakin kecil. Penambahan jumlah piringan isolator juga dapat meningkatkan kinerja proteksi petir. penambahan jumlah piringan isolator dapat meningkatkan arus kritis isolator sehingga isolator tidak mudah FO dan mengurangi nilai SFFOR dan BFOR.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abrantes, E. S. (2016). Lightning Performance of Transmission Lines. *Instituto Superior Tecnico of The Universidade de Lisbon*.
- Anderson, J. G. (1982). Lightning Performance of Transmission Line. Dalam E. P. Institute, *Transmission Line Reference Book 345 kV and Above/Second Edition* (2nd ed., hal. 545-593). California: Electric Power Research Institute.
- Anderson, R. B., & Erikson, A. J. (1979). *Lightning Parameters for Engineering Application*. Pretoria, South Africa: CSIR.
- Barros, M. T. (2011). Apontamentos da Cadeira de Alta Tensão.

## LAMPIRAN

**Tabel A**

Pengaruh perubahan hari guruh terhadap nilai SFFOR dan BFOR, R = 20  $\Omega$

Hari Guruh (hari/tahun)	Kinerja Proteksi Petir (Sambaran/ 100km/tahun)		
	SFFOR	BFOR	Total
5	0,0049	0,1829	0,1877
10	0,0098	0,3657	0,3755
20	0,0196	0,7314	0,7510
30	0,0293	1,0971	1,1265
40	0,0391	1,4628	1,5019
50	0,0489	1,8285	1,8774

**Tabel C**

Pengaruh tahanan kaki menara terhadap arus kritis isolator, Td = 30 hari/tahun

R ( $\Omega$ )	Arus Kritis Isolator (kA)					
	A1	B1	C1	A2	B2	C2
5	340,88	308,82	321,62	321,62	308,82	340,88
10	258,47	222,52	219,68	219,68	222,52	258,47
20	179,86	147,83	139,65	139,65	147,83	179,86
30	141,89	114,13	105,76	105,76	114,13	141,89
40	119,53	94,94	87,04	87,04	94,94	119,53
50	104,78	82,56	75,16	75,16	82,56	104,78
60	94,33	73,90	66,96	66,96	73,90	94,33
70	86,54	67,50	60,95	60,95	67,50	86,54
80	80,51	62,59	56,36	56,36	62,59	80,51
90	75,69	58,70	52,74	52,74	58,70	75,69
100	71,77	55,53	49,81	49,81	55,53	71,77
150	59,56	45,78	40,85	40,85	45,78	59,56
200	53,20	40,76	36,27	36,27	40,76	53,20
250	49,30	37,69	33,48	33,48	37,69	49,30
300	46,66	35,62	31,61	31,61	35,62	46,66
350	44,76	34,14	30,27	30,27	34,14	44,76
400	43,32	33,02	29,26	29,26	33,02	43,32

**Tabel B**

Pengaruh tahanan kaki menara terhadap SFFOR dan BFOR, Td = 30 hari/tahun

R ( $\Omega$ )	Kinerja Proteksi Petir (Sambaran/100km/tahun)		
	SFFOR	BFOR	Total
5	0,0293	0,1401	0,1694
10	0,0293	0,356	0,3853
20	0,0293	1,0971	1,1265
30	0,0293	2,1744	2,2037
40	0,0293	3,4704	3,4997
50	0,0293	4,8845	4,9139
60	0,0293	6,3331	6,3624
70	0,0293	7,7542	7,7835
80	0,0293	9,1271	9,1564
90	0,0293	10,4252	10,4546
100	0,0293	11,6397	11,669
150	0,0293	16,4818	16,5112
200	0,0293	19,7276	19,757
250	0,0293	21,9684	21,9977
300	0,0293	23,5811	23,6105
350	0,0293	24,8293	24,8587
400	0,0293	25,7611	25,7905

**Tabel D**

Pengaruh panjang isolator terhadap arus kritis isolator, Td = 30 hari/tahun, R = 20  $\Omega$

N	L (m)	Arus Kritis Isolator (kA)					
		A1	B1	C1	A2	B2	C2
15	2,63	179,86	147,83	139,65	139,65	147,83	179,86
16	2,81	191,4	157,67	148,91	148,91	157,67	191,40
17	2,98	202,84	167,48	158,14	158,14	167,48	202,84
18	3,16	214,19	177,25	167,34	167,34	177,25	214,19
19	3,33	225,45	186,99	176,50	176,50	186,99	225,45
20	3,51	236,61	196,68	185,62	185,62	196,68	236,61

**Tabel E**

Pengaruh panjang isolator terhadap nilai SFFOR dan BFOR, Td = 30 hari/tahun, R = 20  $\Omega$

N	L (m)	Kinerja Proteksi Petir (Sambaran/100km/tahun)		
		SFFOR	BFOR	Total
15	2,63	0,0293	1,0971	1,1265
16	2,80	0,0177	0,9143	0,932
17	2,98	0,0084	0,7707	0,7791
18	3,16	0,0022	0,6572	0,6595
19	3,33	0,0002	0,5658	0,566
20	3,51	0	0,4913	0,4913