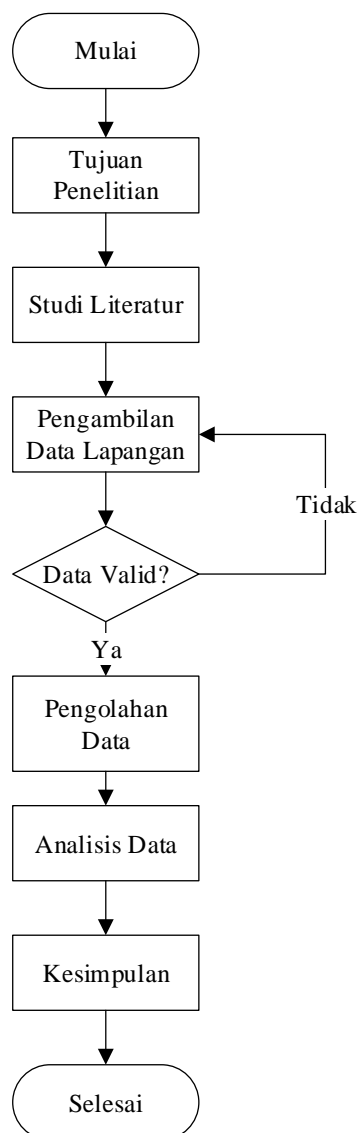


## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Alur Penelitian

Metode penelitian memudahkan proses penelitian dengan menyelesaikan masalah secara sistematis. Ilustrasi pada Gambar 3.1 di bawah ini menggambarkan urutan langkah dalam penelitian mengenai "Penganalisaan Dampak Tekanan Gas SF6 terhadap Kecepatan Terjadinya Busur Listrik pada PMT Bay Penghantar 150 kV Bandung Utara#2 di Gardu Induk Dago Pakar".



Gambar 3. 1 Diagram Alur Penelitian

Proses alur penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut, berdasarkan diagram alir yang ditunjukkan pada gambar 3.1:

1. Tujuan Penelitian

Tahap pertama melibatkan penentuan tujuan penelitian, termasuk untuk memahami nilai arus gangguan hubung singkat dalam kondisi gangguan 3 fasa, 2 fasa, dan 1 fasa ke tanah bervariasi dengan jarak, pengaruh tekanan gas SF<sub>6</sub> terhadap laju busur listrik pada PMT di bay penghantar Bandung Utara 2 di Gardu Induk Dago Pakar. Ini juga mencakup identifikasi faktor-faktor yang memengaruhi tekanan gas SF<sub>6</sub> pada PMT tersebut.

2. Studi Literatur

Dalam tahap ini, dilakukan pencarian dan pengumpulan referensi melalui studi literatur dari berbagai sumber, termasuk *IEEE*, *Google Scholar*, dan *Google Book*. Referensi dari jurnal nasional dan internasional berkaitan dengan Pemutus Tenaga (PMT) menggunakan isolasi gas SF<sub>6</sub> menjadi landasan bacaan yang mendukung penelitian.

3. Pengambilan Data Lapangan

Pada langkah ini, data lapangan diperoleh dengan mengunjungi Gardu Induk Dago Pakar 150 kV di Cimenyan, Kota Bandung. Data yang dikumpulkan meliputi gambaran *single line diagram* gardu induk, spesifikasi PMT 150kV bay penghantar Bandung Utara 2, spesifikasi transformator daya 2, jenis penghantar yang digunakan, dan data pemeliharaan 2 tahunan di bay penghantar tersebut.

4. Verifikasi Data

Pada tahap ini setelah semua data dikumpulkan, data-data tersebut harus dilakukan pengecekan karena data-data tersebut harus valid dengan jurnal-jurnal terkait. Setelah data-data tersebut sudah valid dan sesuai maka data tersebut dapat dilakukan langkah selanjutnya berupa analisis data dan juga pengolahan data, semua hal harus dievaluasi untuk mendapatkan data yang benar dan sesuai jika data belum valid atau sesuai.

5. Pengolahan data

Data yang terkumpul dari observasi lapangan diolah dan dihitung secara manual menggunakan kalkulator ilmiah. Pengolahan data melibatkan

perhitungan impedansi sumber, reaktansi trafo tenaga, reaktansi urutan nol trafo tenaga, serta impedansi urutan positif ( $Z_1$ ), urutan negatif ( $Z_2$ ), dan urutan nol ( $Z_0$ ) pada penyulang. Selain itu, perhitungan arus hubung singkat juga dilakukan untuk mendapatkan nilai arus yang mungkin terjadi pada jalur penghantar. Setelah itu, dilakukan perhitungan laju busur listrik berdasarkan nilai arus hubung singkat yang telah di dapatkan sebelumnya.

#### 6. Analisis Data

Pada tahap ini, analisis data dilakukan untuk membahas hasil perhitungan penelitian. Analisis data terdiri dari tahapan reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan atau verifikasi. Pada tahap ini, solusi untuk pertanyaan penelitian juga dicari.

#### 7. Kesimpulan

Langkah terakhir adalah menyusun kesimpulan. Pada tahap ini, hasil analisis dan pengolahan data dibandingkan dengan referensi jurnal yang digunakan sebagai acuan awal. Selain itu, diberikan saran-saran yang relevan untuk pengembangan penelitian lebih lanjut.

### 3.2 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan di Gardu Induk Dago Pakar 150 Kv UPT Bandung Kecamatan Cimenyan, Kabupaten Bandung, Jawa Barat.



Gambar 3. 2 Gardu Induk Dago Pakar

### 3.3 Metode Pengumpulan Data

Tujuan dari proses pengumpulan data adalah untuk mendapatkan informasi yang dibutuhkan untuk mencapai tujuan penelitian. Dalam rangka mencapai tujuan ini, penulis menjalankan serangkaian tahapan yaitu:

#### 1. Studi Literatur

Tahap pertama dilakukan dengan melakukan penelitian literatur, dimana peneliti mencari dan merujuk pada berbagai sumber literatur yang relevan dengan penelitian yang dilakukan. Sumber-sumber literatur ini mencakup buku, jurnal ilmiah, dan hasil penelitian sebelumnya. Tujuan dari tahap ini adalah membangun pemahaman dan wawasan awal mengenai topik penelitian serta mengumpulkan kerangka teoretis yang diperlukan.

#### 2. Pengamatan Lapangan

Tahap berikutnya melibatkan pengamatan lapangan, di mana data dikumpulkan secara langsung di Gardu Induk Dago Pakar. Melalui pengamatan langsung ini, peneliti mengumpulkan data spesifik mengenai peralatan yang relevan dengan penelitian. Data-data tersebut diperoleh melalui observasi langsung di lokasi, memungkinkan untuk mendapatkan informasi yang akurat dan tepat dari sumber yang sesuai.

### 3.4 Data Penunjang Penelitian

Pengamatan dan observasi dilakukan secara langsung di lapangan untuk mendukung data penelitian. Proses pengumpulan data ini berlangsung di Gardu Induk Dago Pakar 150 kV yang terletak di Kecamatan Cimenyan, Kabupaten Bandung, Jawa Barat.

#### 3.4.1 Data Spesifikasi Pemutus Tenaga (PMT) Bay Penghantar Bandung Utara 2

Tabel 3. 1 Spesifikasi PMT 150 kV Bandung Utara 2

Merk	AREVA
Tipe	GL 313 F3
Tegangan Nominal	170 kV
Frekuensi Nominal	50 Hz
Arus Normal Nominal	3150 A

Nilai arus hubung singkat maksimal	40 kA
Tegangan tahan impuls petir nominal	750 kV
Gas SF6, tekanan nominal (20°C)	0,64 MPa
Gas SF6, alarm nominal (20°C)	0,54 MPa
Gas SF6, tekanan penguncian (20°C)	0,51 MPa
Jumlah waktu nominal yang ditentukan (toleransi $\pm 10\%$ )	
<i>Opening time</i>	29 ms
<i>Break time</i>	50 ms
<i>Closing time</i>	70 ms
<i>Close-open time</i>	$\leq 70$ ms

### 3.4.2 Data Spesifikasi Transformator Daya 2

Tabel 3. 2 Spesifikasi Transformator Daya 2

Merk	UNINDO
Daya	60 MVA
Tegangan	150/20 kV
Impedansi	12,5 %
Tegangan Primer	150 kV
Tegangan Sekunder	20 kV
Ratio Current Transformator	2000/5 A
Arus Nominal Transformator	1732,1 A
Hubungan belitan Transformator	Delta
Ground Resistor	12 Ohm
Daya Hubung Singkat pada Bus 150 kV (MVA hubung singkat)	461,5 MVA

### 3.4.3 Data Penyulang Bandung Utara 2

Tabel 3. 3 Spesifikasi penyulang Bandung Utara 2

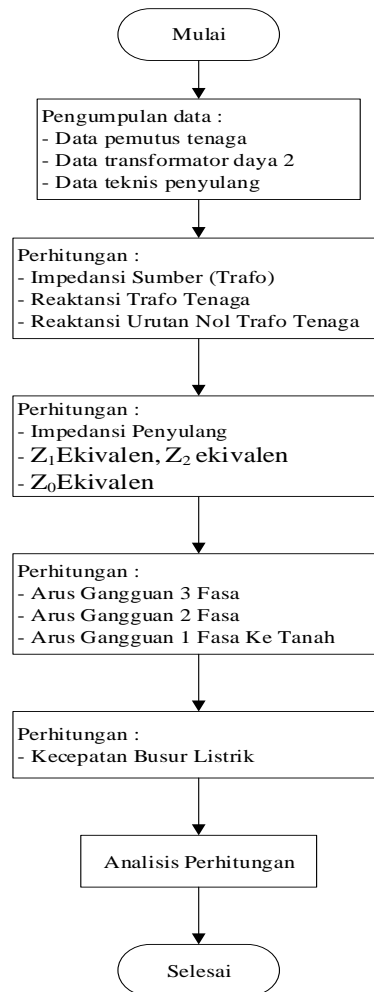
Jenis Penghantar	AAAC
Luas Penampang	240 mm <sup>2</sup>
Panjang	10 km
Tegangan Sistem	20 kV

### 3.5 Perangkat Penunjang Penelitian

Penulis menggunakan komputer dengan sistem operasi *Windows 10* untuk penelitian ini dan dipasang dengan prosesor *Intel(R) Core(TM) i3-4160 CPU @ 3.60GHz* 3.60 GHz, dilengkapi RAM sebesar 8GB, serta sistem operasi 64 bit. Dalam kerangka penelitian ini, dua perangkat lunak yang diaplikasikan oleh penulis adalah *Microsoft Excel* dan *Microsoft Word*. *Microsoft Excel* dimanfaatkan untuk menciptakan visualisasi grafik dari hasil perhitungan kecepatan busur listrik. Di sisi lain, *Microsoft Word* digunakan untuk menyusun laporan penelitian dan menyimpan berbagai dataset yang diperlukan dalam penelitian ini. Di samping dua program tersebut, juga dimanfaatkan *Microsoft Visio* untuk menghasilkan diagram alir penelitian dan aplikasi kalkulator ilmiah untuk membantu dalam perhitungan manual.

### 3.6 Metode Pengolahan Data

Pengolahan data dalam konteks penelitian ini mengadopsi pendekatan deskriptif kuantitatif, dimana data berupa nilai kuantitatif diolah melalui metode matematika dan statistik. Tujuan yang dikehendaki melalui tahap pengolahan data ini adalah memberikan interpretasi yang lebih mendalam terkait berbagai aspek yang terdapat dalam kawasan penelitian, serta menggambarkan hubungan yang ada di antara elemen-elemen yang ada di dalamnya.



Gambar 3. 3 Diagram Alir Pengolahan Data

Pada diagram alur pengolahan data, langkah awal melibatkan pengumpulan data dari observasi lapangan di Gardu Induk Dago Pakar. Data yang dikumpulkan termasuk spesifikasi pemutus tenaga 150 kV bay penghantar Bandung Utara 2, spesifikasi transformator daya 2, dan panjang penyulang. Setelah data-data ini diperoleh, langkah selanjutnya adalah memproses data untuk mendapatkan hasil perhitungan seperti impedansi sumber (trafo), reaktansi trafo tenaga, dan reaktansi urutan nol trafo tenaga. Dari sini, dilakukan perhitungan impedansi penyulang, serta perhitungan nilai  $Z_1$ ekivalen,  $Z_2$ ekivalen, dan  $Z_0$ ekivalen. Tujuan dari perhitungan ini adalah untuk mengetahui nilai arus gangguan tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ke tanah.

Jika proses perhitungan tersebut selesai, maka perhitungan akan dilanjutkan dengan menghitung kecepatan terjadinya busur listrik. Perhitungan ini penting

untuk memahami dampak tekanan gas SF<sub>6</sub> terhadap kecepatan busur listrik yang muncul akibat gangguan hubung singkat.

Langkah berikutnya adalah melibatkan pengolahan data dengan menerapkan beberapa perhitungan berikut:

### 3.6.1 Gangguan Hubung Singkat

Terdapat tiga varian gangguan yang mungkin timbul pada saluran transmisi, yakni gangguan hubung singkat tiga fasa, gangguan hubung singkat dua fasa, dan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah. Untuk menghitung arus gangguan ini, salah satu landasan utama yang digunakan adalah Hukum Ohm (Hasan, 2012).

#### A. Menghitung Impedansi Sumber

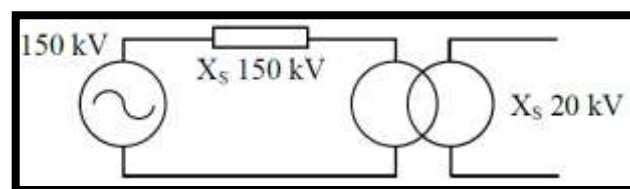
Rumus persamaan 2.3 dapat digunakan untuk menghitung nilai impedansi sumber (trafo).

$$X_s = \frac{kV^2}{MVA_{HS}}$$

Diketahui dari tabel 3.2 tegangan pada sisi primer sebesar 150 kV serta *short circuit level* trafo tenaga sebesar 461,5 MVA.

$$X_s = \frac{150^2}{461,5} = 48,75 \text{ ohm}$$

Nilai impedansi sumber pada tegangan 150 kV adalah 48,75 ohm. Akan tetapi, untuk menghitung impedansi sumber pada tegangan 20 kV, perlu dilakukan transformasi terlebih dahulu untuk mentransfer nilai tersebut ke sisi sekunder.



Gambar 3. 4 Impedansi pada trafo tenaga

Metode perhitungan yang digunakan untuk menentukan nilai impedansi pada 20 kV adalah menggunakan persamaan 2.4.



$$\begin{aligned} \text{Daya sisi 150 kV} &= \text{Daya sisi 20 kV} \\ \frac{kV_1^2}{Z_1} &= \frac{kV_2^2}{Z_2} \end{aligned}$$

Maka,

$$Z_2 = \frac{kV_2^2 Z_1}{kV_1^2} = \frac{20^2 \cdot 48,75}{150^2} = 0,86 \text{ ohm}$$

Nilai impedansi sumber pada tegangan 20 kV setelah konversi adalah 0,86 ohm.

### B. Perhitungan Impedansi Transformator

Untuk mengetahui kapasitas reaktansi suatu trafo tenaga, pertama-tama pelajari nilai reaktansinya. Untuk melakukan ini, gunakan data trafo tenaga berdasarkan tabel 3.2.

Daya : 60 MVA dengan rasio tegangan 150/20 kV.

Reaktansi : 12,5%

Untuk menghitung impedansi dasar pada trafo sisi 20 kV, dapat digunakan persamaan 2.5.

$$X_t(\text{pada } 100\%) = \frac{kV^2}{MVA}$$

Maka,

$$Z_B = \frac{20kV^2}{60MVA}$$

$$Z_B = \frac{20^2}{60} = 6,67 \text{ ohm}$$

- Perhitungan reaktansi trafo tenaga menggunakan persamaan 2.6.

$$X_T = \% \text{ yang diketahui} \times Z_t (\text{pada } 100\%)$$

Maka,

$$X_T = 12,5\% \times Z_B \text{ ohm}$$

$$X_T = 12,5\% \times 6,67$$

$$X_T = 0,834 \text{ ohm}$$

Reaktansi yang muncul ini adalah reaktansi trafo tenaga untuk urutan positif (+) dan urutan negatif (-).

○ Reaktansi Urutan Nol Trafo Tenaga

Untuk reaktansi urutan nol trafo tenaga, dalam situasi ini, sistem pentanahan netral pada trafo memiliki resistansi sekitar 12 ohm. Trafo yang ada di Gardu Induk (G.I) menggunakan belitan delta. Perhitungan reaktansi urutan nol trafo tenaga ini dilakukan berdasarkan persamaan 2.8.

$$X_{t0} = 3 \times X_{t1}$$

Maka,

$$\begin{aligned} X_{t0} &= 3 \times X_{t1} \\ &= 3 \times j 0,834 \end{aligned}$$

$$X_{t0} = j 2,502$$

C. Perhitungan Impedansi Penyulang

Impedansi penyulang dapat diperoleh melalui data teknis yang tersedia pada Gardu Induk. Impedansi urutan positif, negatif, dan nol dapat diambil dari informasi teknis yang terdapat dalam data Gardu Induk. Tabel berisi data teknis untuk setiap penghantar di Gardu Induk ditampilkan di bawah ini.

Tabel 3. 4 Data Teknis penghantar AAAC (SPLN, 1985)

Penampang nominal (mm <sup>2</sup> )	Jari-jari (mm)	Urut	GMR (mm)	Impedansi urutan positif (ohm/km)	Impedansi urutan nol (ohm/km)
16	2,2563	7	1,638	2,0161 + j0,4036	2,1641 + j1,6911
25	2,8203	7	2,0475	1,2903 + j0,3896	1,4384 + j1,6770
35	3,3371	7	2,4227	0,9217 + j0,3790	1,0697 + j1,6665
50	3,9886	7	2,8957	0,6452 + j0,3678	0,7932 + j1,6553
70	4,7193	7	3,4262	0,4608 + j0,3572	0,6088 + j1,6447
95	5,4979	19	4,1674	0,3396 + j0,3449	0,4876 + j1,6324
123	6,1791	19	4,6837	0,2688 + j0,3376	0,4168 + j1,6251

150	6,9084	19	5,2365	$0,2162 + j0,3305$	$0,3631 + j1,6180$
185	7,6722	19	5,8155	$0,1744 + j0,3239$	$0,3224 + j1,6114$
240	8,7386	19	6,6238	$0,1344 + j0,3158$	$0,2824 + j1,6033$

- o Urutan positif dan urutan negatif

Pada situasi studi ini, digunakan kabel AAAC dengan luas penampang 240 mm<sup>2</sup>. Berdasarkan informasi yang diberikan dalam tabel sebelumnya, data ini dapat digunakan untuk menyatakan bahwa:

$$\text{Impedansi urutan positif } (Z_1) = 0,1344 + j 0,3158 \text{ ohm/km}$$

Oleh karena itu, impedansi penyulang bisa di-simulasikan pada kondisi gangguan sebesar 25%, 50%, 75%, dan 100% dari panjang total penyulang. Hal ini bertujuan untuk menilai berapa besar impedansi penyulang pada titik gangguan yang berbeda.

Nilai impedansi penyulang urutan positif dan negatif untuk masing-masing titik gangguan dihitung menggunakan persamaan 2.10.

$$Z_1 = Z_2 = \% \text{ panjang} \times \text{panjang penyulang (km)} \times Z_1/Z_2 \text{ (ohm)}$$

Maka,

$$\begin{aligned} \text{Impedansi urutan positif } (Z_1) &= \text{Impedansi urutan positif } (Z_2) \\ \text{Untuk panjang 25\%} &= 0,25 \times S \times (Z_1) = (Z_1 \text{ 25\%}) \text{ ohm} \\ \text{Untuk panjang 50\%} &= 0,5 \times S \times (Z_1) = (Z_1 \text{ 50\%}) \text{ ohm} \\ \text{Untuk panjang 75\%} &= 0,75 \times S \times (Z_1) = (Z_1 \text{ 75\%}) \text{ ohm} \\ \text{Untuk panjang 100\%} &= 1 \times S \times (Z_1) = (Z_1 \text{ 100\%}) \text{ ohm} \end{aligned}$$

Diketahui panjang penyulang sebesar 10 km. Maka,

$$\begin{aligned} \text{Untuk panjang 25\%} &= 0,25 \times 10 \times (0,1344 + j 0,3158) \\ &= 0,366 + j 0,79 \text{ ohm} \\ \text{Untuk panjang 50\%} &= 0,5 \times 10 \times (0,1344 + j 0,3158) \\ &= 0,67 + j 1,58 \text{ ohm} \\ \text{Untuk panjang 75\%} &= 0,75 \times 10 \times (0,1344 + j 0,3158) \\ &= 1,008 + j 2,37 \text{ ohm} \\ \text{Untuk panjang 100\%} &= 1 \times 10 \times (0,1344 + j 0,3158) \\ &= 1,344 + j 3,158 \text{ ohm} \end{aligned}$$

- Urutan nol

$$\text{Impedansi urutan nol } (Z_0) = 0,2824 + j 1,6033 \text{ ohm/km}$$

Besar impedansi urutan nol dapat dihitung menggunakan persamaan

2.11 dalam proses simulasi.

$$\begin{aligned} \text{Untuk panjang 25\%} &= 0,25 \times 10 \times (0,2824 + j 1,6033) \\ &= 0,706 + j 4 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Untuk panjang 50\%} &= 05 \times 10 \times (0,2824 + j 1,6033) \\ &= 1,412 + j 8,02 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Untuk panjang 75\%} &= 0,75 \times 10 \times (0,2824 + j 1,6033) \\ &= 2,12 + j 12,2 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Untuk panjang 100\%} &= 1 \times 10 \times (0,2824 + j 1,6033) \\ &= 2,824 + j 16,03 \text{ ohm} \end{aligned}$$

#### D. Perhitungan Impedansi Ekuivalen Jaringan

- Urutan positif dan urutan negatif ( $Z_{1eki} = Z_{2eki}$ )

Setelah menghitung impedansi urutan positif dan negatif, langkah berikutnya adalah mencari impedansi urutan positif ekuivalen ( $Z_1 eki$ ) dan impedansi urutan negatif ekuivalen ( $Z_2 eki$ ). Perhitungan  $Z_1 eki$  dan  $Z_2 eki$  dapat langsung dilakukan sesuai dengan lokasi gangguan menggunakan persamaan 2.12.

$$Z_{1eki} = Z_{2eki} = Z_{S1} + Z_{t1} + Z_1 \text{penyulang}$$

Maka,

$$\begin{aligned} Z_{1eki} = Z_{2eki} &= j 0,86 + j 0,834 + Z_1 \text{penyulang} \\ &= j 1,694 + Z_1 \text{penyulang} \end{aligned}$$

Sehingga,

$$\begin{aligned} \text{Untuk panjang 25\%} &= j 1,694 + (0,366 + j 0,79) \text{ ohm} \\ &= (0,366 + j 2,484) \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Untuk panjang 50\%} &= j 1,694 + (0,67 + j 1,58) \text{ ohm} \\ &= (0,67 + j 3,274) \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Untuk panjang 75\%} &= j 1,694 + (1,008 + j 2,37) \text{ ohm} \\ &= (1,008 + j 4,064) \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Untuk panjang 100\%} &= j 1,694 + (1,344 + j 3,158) \text{ ohm} \\ &= (1,344 + j 4,852) \text{ ohm}\end{aligned}$$

o Urutan nol

Setelah menghitung impedansi urutan nol, langkah selanjutnya adalah menghitung impedansi urutan nol ekuivalen ( $Z_{0eki}$ ) dengan menggunakan persamaan 2.13.

$$Z_{0eki} = Z_{0T} + 3R_N + Z_{0total}$$

Maka,

$$3R_N = 3 \times 12 = 36 \text{ Ohm}$$

$$\begin{aligned}\text{Untuk panjang 25\%} &= j 2,502 + 36 + (0,706 + j 4) \text{ ohm} \\ &= 36,706 + j 6,502 \text{ ohm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Untuk panjang 50\%} &= j 2,502 + 36 + (1,412 + j 8,02) \text{ ohm} \\ &= 37,412 + j 10,522 \text{ ohm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Untuk panjang 75\%} &= j 2,502 + 36 + (2,12 + j 12,2) \text{ ohm} \\ &= 38,12 + j 14,702 \text{ ohm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Untuk panjang 100\%} &= j 2,502 + 36 + (2,824 + j 16,03) \text{ ohm} \\ &= 38,824 + j 18,532 \text{ ohm}\end{aligned}$$

#### E. Perhitungan Arus Gangguan 3 Fasa

Dasar perhitungan untuk menentukan besar arus gangguan hubung singkat tiga fasa menggunakan prinsip hukum Ohm, seperti yang dijabarkan dalam persamaan 2.1.

Maka, besar arus gangguan hubung singkat tiga fasa dapat dihitung dengan mengaplikasikan persamaan 2.14.

$$I_{3 \text{ fasa}} = \frac{V_{ph}}{Z_{1eq}}$$

Maka,

$$\begin{aligned}\text{Panjang 25\%} \quad I &= \frac{20.000\sqrt{3}}{Z_1(\text{dari 25\% penyulang})} \\ &= \frac{20.000\sqrt{3}}{(0,366 + j 2,484)} \\ I &= \frac{20.000\sqrt{3}}{\sqrt{0,366^2 + j 2,484^2}} = 13796,69 \text{ A}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Panjang 50\%} \quad I &= \frac{20.000\sqrt{3}}{Z_1(\text{dari 50\% penyulang})} \\
 &= \frac{20.000\sqrt{3}}{(0,67 + j 3,274)} \\
 I &= \frac{20.000\sqrt{3}}{\sqrt{0,67^2 + j 3,274^2}} = 10365,81 \text{ A} \\
 \text{Panjang 75\%} \quad I &= \frac{20.000\sqrt{3}}{Z_1(\text{dari 75\% penyulang})} \\
 &= \frac{20.000\sqrt{3}}{(1,008 + j 4,064)} \\
 I &= \frac{20.000\sqrt{3}}{\sqrt{1,008^2 + j 4,064^2}} = 8273,18 \text{ A} \\
 \text{Panjang 100\%} \quad I &= \frac{20.000\sqrt{3}}{Z_1(\text{dari 75\% penyulang})} \\
 &= \frac{20.000\sqrt{3}}{(1,344 + j 4,852)} \\
 I &= \frac{20.000\sqrt{3}}{\sqrt{1,344^2 + j 4,852^2}} = 6880,44 \text{ A}
 \end{aligned}$$

#### F. Perhitungan Arus Gangguan 2 Fasa

Dasar perhitungan untuk menentukan besarnya arus gangguan hubung singkat dua fasa menggunakan prinsip hukum Ohm, sesuai dengan yang dijelaskan dalam persamaan 2.1.

Oleh karena itu, besarnya arus gangguan hubung singkat dua fasa dapat dihitung menggunakan persamaan 2.16.

$$I_{2 \text{ fasa}} = \frac{V_{ph-ph}}{2 \times Z_{1eq}}$$

Maka,

$$\begin{aligned}
 \text{Panjang 25\%} \quad I &= \frac{20.000}{2 \times Z_1(\text{dari 25\% penyulang})} \\
 &= \frac{20.000}{2 \times (0,366 + j 2,484)} = \frac{20.000}{(0,732 + j 4,968)}
 \end{aligned}$$

$$I = \frac{20.000}{\sqrt{0,732^2 + j 4,968^2}} = 3982,76 A$$

Panjang 50%

$$I = \frac{20.000}{2 \times Z_1(\text{dari } 50\% \text{ penyulang})}$$

$$= \frac{20.000}{2 \times (0,67 + j 3,274)} = \frac{20.000}{(1,34 + j 6,548)}$$

$$I = \frac{20.000}{\sqrt{1,34^2 + j 6,548^2}} = 2992,35 A$$

Panjang 75%

$$I = \frac{20.000}{2 \times Z_1(\text{dari } 75\% \text{ penyulang})}$$

$$= \frac{20.000}{2 \times (1,008 + j 4,064)} = \frac{20.000}{(2,016 + j 8,128)}$$

$$I = \frac{20.000}{\sqrt{2,016^2 + j 8,128^2}} = 2388,26 A$$

Panjang 100%

$$I = \frac{20.000}{2 \times Z_1(\text{dari } 100\% \text{ penyulang})}$$

$$= \frac{20.000}{2 \times (1,344 + j 4,852)} = \frac{20.000}{(2,688 + j 9,704)}$$

$$I = \frac{20.000}{\sqrt{2,688^2 + j 9,704^2}} = 1986,21 A$$

#### G. Perhitungan Arus Gangguan 1 Fasa ke Tanah

Dasar perhitungan untuk menentukan besarnya arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah juga mengikuti prinsip hukum Ohm, sesuai dengan yang dijabarkan dalam persamaan 2.1.

Oleh karena itu, besarnya arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dapat dihitung menggunakan persamaan 2.18.

$$I_{1 \text{ fasa}} = \frac{3 \times V_{ph}}{2 \times Z_{1eq} + Z_{0eq}}$$

Maka,

Panjang 25%

$$I = \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{2 \times Z_1 + Z_0(\text{dari } 25\% \text{ penyulang})}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{2 \times (0,366 + j 2,484) + (36,706 + j 6,502)} \\
&= \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{37,438 + j 11,47} = \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{37,438^2 + j 11,47^2}} \\
I &= 884,70 A \\
\text{Panjang} & \\
50\% & \\
I &= \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{2 \times Z_1 + Z_0(\text{dari } 50\% \text{ penyulang})} \\
&= \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{2 \times (0,67 + j 3,274) + (37,412 + j 10,522)} \\
&= \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{38,752 + j 17,07} = \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{38,752^2 + j 17,07^2}} \\
I &= 818,06 A \\
\text{Panjang} & \\
75\% & \\
I &= \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{2 \times Z_1 + Z_0(\text{dari } 75\% \text{ penyulang})} \\
&= \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{2 \times (1,008 + j 4,064) + (38,12 + j 14,702)} \\
&= \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{40,136 + j 22,83} = \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{40,136^2 + j 22,83^2}} \\
I &= 750,21 A \\
\text{Panjang} & \\
100\% & \\
I &= \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{2 \times Z_1 + Z_0(\text{dari } 100\% \text{ penyulang})} \\
&= \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{2 \times (1,344 + j 4,852) + (38,824 + j 18,532)} \\
&= \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{41,512 + j 28,236} = \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{41,512^2 + j 28,236^2}} \\
I &= 689,99 A
\end{aligned}$$



### 3.6.2 Kecepatan Busur Listrik

Rentang tekanan dari 100 kPa hingga 510 kPa telah dimanfaatkan dalam serangkaian uji coba untuk menganalisis dampak tekanan terhadap pergerakan busur api (F.Y. Chu, S.A. Boggs, C.K. Law+, 1981). Eksperimen ini menunjukkan adanya hubungan terbalik antara kecepatan aksial busur api dan tekanan gas. Pada jarak celah elektroda sebesar 6,6 cm, penurunan kecepatan arus normalisasi sekitar 0,2 cm/s per kPa tekanan. Pada gas SF<sub>6</sub> yang memiliki tekanan 1 atm, kecepatan busur api mencapai 136 cm/s per kA. Berikut adalah tabel yang merinci hasil pengujian kecepatan busur api dengan mempertahankan jarak celah tetap sejalan dengan variasi tekanan.

Tabel 3. 5 Perbandingan kecepatan busur listrik terhadap tekanan

Gas	Jarak Sela (cm)	Tekanan (kPa)	Perhitungan (cm/s.kA)	Pengujian (cm/s.kA)
SF <sub>6</sub>	6,6	100	200	136
SF <sub>6</sub>	6,6	250	126	120
SF <sub>6</sub>	6,6	350	107	100
SF <sub>6</sub>	6,6	450	94	85
SF <sub>6</sub>	6,6	510	88	84

Pada tekanan 510 kPa, kecepatan busur api mencapai 84 cm/s per kA, dan terjadi penurunan sebesar 0,2 cm/s per kA per kPa tekanan, sesuai dengan data yang disajikan dalam tabel di atas.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa:

$$P = P_{PMT} - P_{uji}$$

$$(5,1 \text{ bar}) = 510 \text{ kPa}$$

$$P = -$$

$$(6,1 \text{ bar}) = 610 \text{ kPa}$$

$$P = P_{PMT} - P_{uji}$$

$$= 610 - 510$$

$$P = 100 \text{ kPa}$$

$$(5,4 \text{ bar}) = 540 \text{ kPa}$$

$$P = P_{PMT} - P_{uji}$$

$$= 540 - 510$$

$$(6,4 \text{ bar}) = 640 \text{ kPa}$$

$$P = P_{PMT} - P_{uji}$$

$$= 640 - 510$$

$$P = 30 \text{ kPa} \qquad P = 130 \text{ kPa}$$

Dengan adanya faktor penurunan kecepatan busur api sebesar 0,2 cm/s per kA, kecepatan busur api mengalami penurunan, maka:

$$U = P \times 0,2 \text{ cm/s kA}$$

(5,1 bar)

$$U = -$$

(6,1 bar)

$$\begin{aligned} U &= 100 \text{ kPa} \times 0,2 \text{ cm/s kA} \\ &= 20 \text{ cm/s kA} \end{aligned}$$

(5,4 bar)

$$\begin{aligned} U &= 30 \text{ kPa} \times 0,2 \text{ cm/s kA} \\ &= 6 \text{ cm/s kA} \end{aligned}$$

(6,4 bar)

$$\begin{aligned} U &= 130 \text{ kPa} \times 0,2 \text{ cm/s kA} \\ &= 26 \text{ cm/s kA} \end{aligned}$$

Tingkat penurunan kecepatan busur api pada tekanan 5,1 bar (510 kPa), 5,4 bar (540 kPa), 6,1 bar (610 kPa), dan 6,4 bar (640 kPa) pada PMT adalah sebesar:

$$U_{PMT} = U_{uji} - U$$

(5,1 bar)

$$U = 84 \text{ cm/s kA}$$

(6,1 bar)

$$\begin{aligned} U_{PMT} &= 84 \text{ cm/s kA} - 20 \text{ cm/s kA} \\ &= 64 \text{ cm/s kA} \end{aligned}$$

(5,4 bar)

$$\begin{aligned} U_{PMT} &= 84 \text{ cm/s kA} - 6 \text{ cm/s kA} \\ &= 78 \text{ cm/s kA} \end{aligned}$$

(6,4 bar)

$$\begin{aligned} U_{PMT} &= 84 \text{ cm/s kA} - 26 \text{ cm/s kA} \\ &= 58 \text{ cm/s kA} \end{aligned}$$

Oleh karena itu, berikut adalah kecepatan busur listrik ketika terjadi arus gangguan pada tekanan 5,1 bar, 5,4 bar, 6,1 bar, dan 6,4 bar :

a. Pada arus gangguan 3 fasa dengan jarak 25%

$$U_{arc} = U_{PMT} \times IF$$

(5,1 bar) = 510 kPa

$$\begin{aligned} U_{arc} &= U_{PMT} \times IF \\ &= 84 \text{ cm/s kA} \times 13,79 \text{ kA} \\ &= 1158,36 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

(6,1 bar) = 610 kPa

$$\begin{aligned} U_{arc} &= U_{PMT} \times IF \\ &= 64 \text{ cm/s kA} \times 13,79 \text{ kA} \\ &= 882,56 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

$$(5,4 \text{ bar}) = 540 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} U_{arc} &= U_{PMT} \times IF \\ &= 78 \text{ cm/s kA} \times 13,79 \text{ kA} \\ &= 1075,62 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

$$(6,4 \text{ bar}) = 640 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} U_{arc} &= U_{PMT} \times IF \\ &= 58 \text{ cm/s kA} \times 13,79 \text{ kA} \\ &= 799,82 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

b. Pada arus gangguan 2 fasa dengan jarak 25%

$$U_{arc} = U_{PMT} \times IF$$

$$(5,1 \text{ bar}) = 510 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} U_{arc} &= U_{PMT} \times IF \\ &= 84 \text{ cm/s kA} \times 3,98 \text{ kA} \\ &= 334,32 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

$$(6,1 \text{ bar}) = 610 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} U_{arc} &= U_{PMT} \times IF \\ &= 64 \text{ cm/s kA} \times 3,98 \text{ kA} \\ &= 254,72 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

$$(5,4 \text{ bar}) = 540 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} U_{arc} &= U_{PMT} \times IF \\ &= 78 \text{ cm/s kA} \times 3,98 \text{ kA} \\ &= 310,44 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

$$(6,4 \text{ bar}) = 640 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} U_{arc} &= U_{PMT} \times IF \\ &= 58 \text{ cm/s kA} \times 3,98 \text{ kA} \\ &= 230,84 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

c. Pada arus gangguan 1 fasa ke tanah dengan jarak 25%

$$U_{arc} = U_{PMT} \times IF$$

$$(5,1 \text{ bar}) = 510 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} U_{arc} &= U_{PMT} \times IF \\ &= 84 \text{ cm/s kA} \times 0,88 \text{ kA} \\ &= 73,92 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

$$(6,1 \text{ bar}) = 610 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} U_{arc} &= U_{PMT} \times IF \\ &= 64 \text{ cm/s kA} \times 0,88 \text{ kA} \\ &= 56,32 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

$$(5,4 \text{ bar}) = 540 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} U_{arc} &= U_{PMT} \times IF \\ &= 78 \text{ cm/s kA} \times 0,88 \text{ kA} \\ &= 68,64 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

$$(6,4 \text{ bar}) = 640 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} U_{arc} &= U_{PMT} \times IF \\ &= 58 \text{ cm/s kA} \times 0,88 \text{ kA} \\ &= 51,04 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

### 3.7 Metode Analisis Data

Studi ini menggunakan analisis interaktif, yang terdiri dari empat tahapan utama. Berikut adalah langkah-langkah dalam prosedur analisis data:

1. Pengumpulan Data

Tahap awal melibatkan pengumpulan data melalui beberapa metode, seperti observasi lapangan, wawancara, dan telaah literatur. Data ini akan digunakan untuk menghitung arus gangguan hubung singkat dan kecepatan busur listrik pada PMT bay penghantar Bandung Utara 2 di Gardu Induk 150 kV Dago Pakar.

2. Reduksi Data

Langkah berikutnya adalah mereduksi data, di mana peneliti melakukan seleksi data yang relevan dari berbagai sumber yang telah dikumpulkan. Data yang dipilih meliputi spesifikasi peralatan trafo daya 2, PMT 150 kV, informasi teknis penyulang Bandung Utara 2, serta perbandingan kecepatan busur listrik.

3. Penyajian Data

Data yang telah direduksi kemudian disusun sehingga lebih mudah dipahami pembaca. Tabel dan grafik digunakan untuk menyajikan hasil penelitian dengan jelas dan efektif.

4. Penarikan Kesimpulan

Pada tahap terakhir, peneliti membuat kesimpulan dari data yang dianalisis. Kesimpulan ini bertujuan untuk memberikan jawaban terhadap pertanyaan atau masalah penelitian yang diidentifikasi sebelumnya.