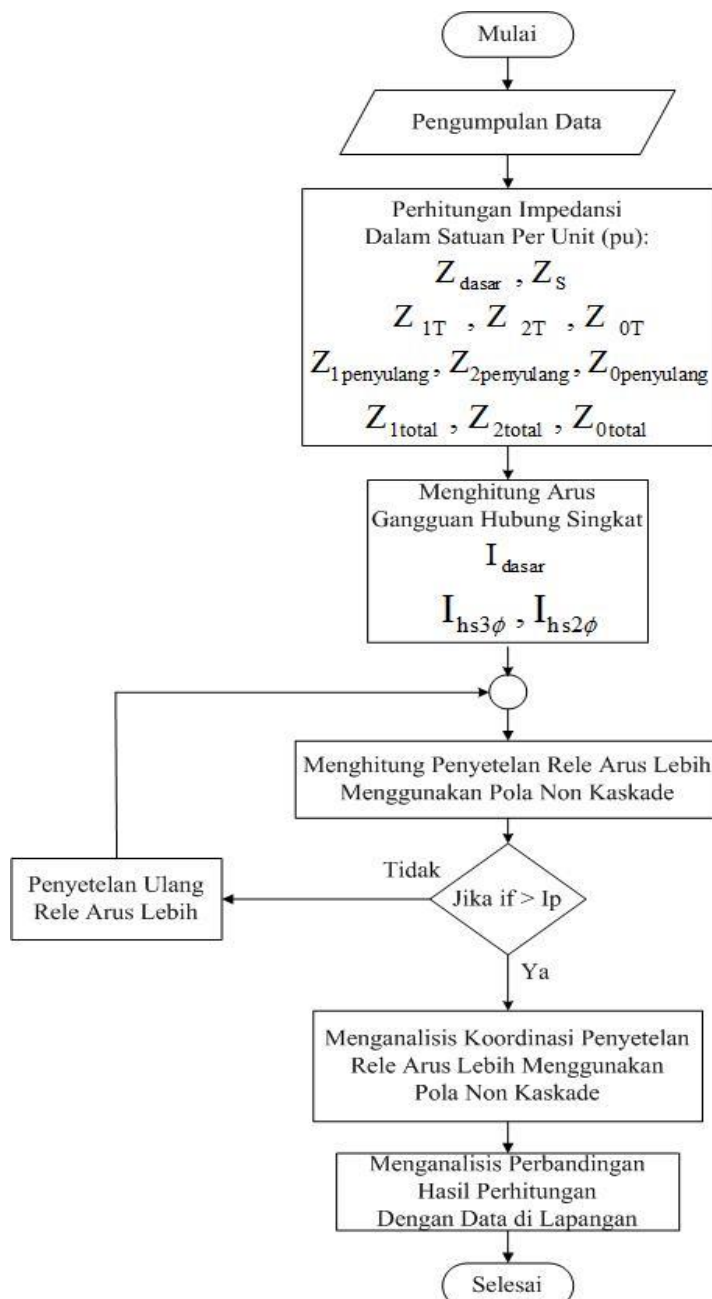


### BAB III METODE PENELITIAN

Untuk menyelesaikan rumusan masalah dan merealisasikan tujuan dari pembahasan dalam penelitian ini, maka diperlukan metode untuk menyelesaikan permasalahannya. Metode penelitian dalam penyusunan penelitian ini adalah metode perhitungan dimana data-data yang didapatkan akan dihitung dan kemudian dianalisis. Adapun langkah-langkah metode penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.1 dibawah ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Metode Penelitian

### 3.1 Pengambilan Data

Dalam penelitian ini dilakukan pengambilan data yang diperoleh dari PT. PLN (Persero) P3B Jawa Bali Area Pelaksana Pemeliharaan Malang dan PT. PLN (Persero) Distribusi Jawa Timur Area Pelayanan dan Jaringan Malang Rayon Malang Kota. Pengambilan data dilakukan untuk memperoleh data-data yang diperlukan dalam menyelesaikan penelitian. Adapun data-data yang diperlukan merupakan data sekunder, yaitu:

- Diagram satu garis Gardu Induk Sengkaling Malang dan penyulang Junrejo.
- Data spesifikasi transformator daya III dengan kapasitas 150/20 kV dengan daya 30 MVA pada Gardu Induk Sengkaling Malang.
- Data spesifikasi rele arus lebih yang digunakan di sisi masukan 20 kV dan penyulang Junrejo.
- Data spesifikasi kawat penghantar penyulang Junrejo.

### 3.2 Prosedur Perhitungan dan Analisis

Langkah-langkah perhitungan dan analisis untuk memperoleh hasil akhir dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghitung arus gangguan hubung singkat yang terjadi pada berbagai titik lokasi gangguan yang diasumsikan di busbar 20 kV Gardu Induk Sengkaling Malang dan 1%, 2%, 3% sampai dengan 100% panjang penyulang. Penentuan titik lokasi gangguan ini dapat membantu dalam menentukan jarak titik lokasi gangguan hubung singkat pada penyulang, sehingga dapat diketahui impedansi urutan penyulang untuk setiap titik gangguan hubung singkat yang akan dihitung. Adapun langkah-langkah perhitungan sebagai berikut:
  - a. Menghitung impedansi dasar dengan menggunakan persamaan (2.14).
  - b. Menghitung impedansi sumber dengan menggunakan persamaan (2.17) dan (2.18).
  - c. Menghitung impedansi masing-masing komponen dalam satuan per unit (pu), yaitu impedansi transformator daya menggunakan persamaan (2.16), (2.19), (2.20), (2.21), dan (2.22) kemudian untuk menghitung impedansi penyulang dengan menggunakan persamaan (2.23) dan (2.24).
  - d. Menghitung impedansi total dengan menggunakan persamaan (2.25) dan (2.26).

- e. Menghitung arus dasar dengan menggunakan persamaan (2.13).
  - f. Menghitung arus gangguan hubung singkat tiga fasa dan antar fasa dengan menggunakan persamaan (2.30) dan (2.31).
2. Penyetelan rele arus lebih menggunakan pola non kaskade yang dianalisis adalah penyetelan arus, penyetelan arus instan dan penyetelan waktu pada sisi masukan dan penyulang 20 kV. Untuk menghitung penyetelan arus pada sisi masukan dan penyulang 20 kV dapat menggunakan persamaan (2.9) dan (2.10). Untuk menghitung arus instan sisi penyulang dengan persamaan (2.3), (2.4), (2.6) dan (2.7), sedangkan untuk arus instan sisi masukan 20 kV menggunakan persamaan (2.3), (2.5), (2.6) dan (2.7). Untuk penyetelan waktunya berdasarkan karakteristik waktu kerja rele arus lebih *standart inverse* didapat dengan menggunakan persamaan (2.11) dan (2.12).
  3. Setelah dilakukan perhitungan arus gangguan hubung singkat dan penyetelan rele arus lebih menggunakan pola non kaskade, maka perlu dilakukan analisis koordinasi waktu kerja rele arus lebih menggunakan pola non kaskade pada sisi masukan dan penyulang 20 kV untuk berbagai titik lokasi arus gangguan hubung singkat.
  4. Menganalisis perbandingan hasil perhitungan dengan data yang diperoleh di lapangan. Analisis ini dilakukan dengan cara membandingkan hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat, penyetelan rele arus lebih, dan tingkat kinerja rele arus lebih saat terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa dan antar fasa dipenyulang.

### **3.3 Penutup**

Pada bagian penutup akan dilakukan pengambilan kesimpulan dan saran. Kesimpulan diambil berdasarkan hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat dan penyetelan rele arus lebih menggunakan pola non kaskade yang dilakukan, sehingga dapat diketahui perbandingan pola pengaman mana yang lebih baik dari segi kecepatan dan selektifitas rele arus lebih untuk pemutusan gangguan arus hubung singkat yang terjadi. Setelah kesimpulan diambil maka saran akan digunakan untuk memperbaiki penelitian dan pengembangan selanjutnya.

**BAB IV**  
**ANALISIS KOORDINASI RELE ARUS LEBIH PADA *INCOMING***  
**DAN PENYULANG 20 KV GARDU INDUK SENKALING**  
**MENGGUNAKAN POLA NON KASKADE**

**4.1 Gardu Induk Sengkaling**

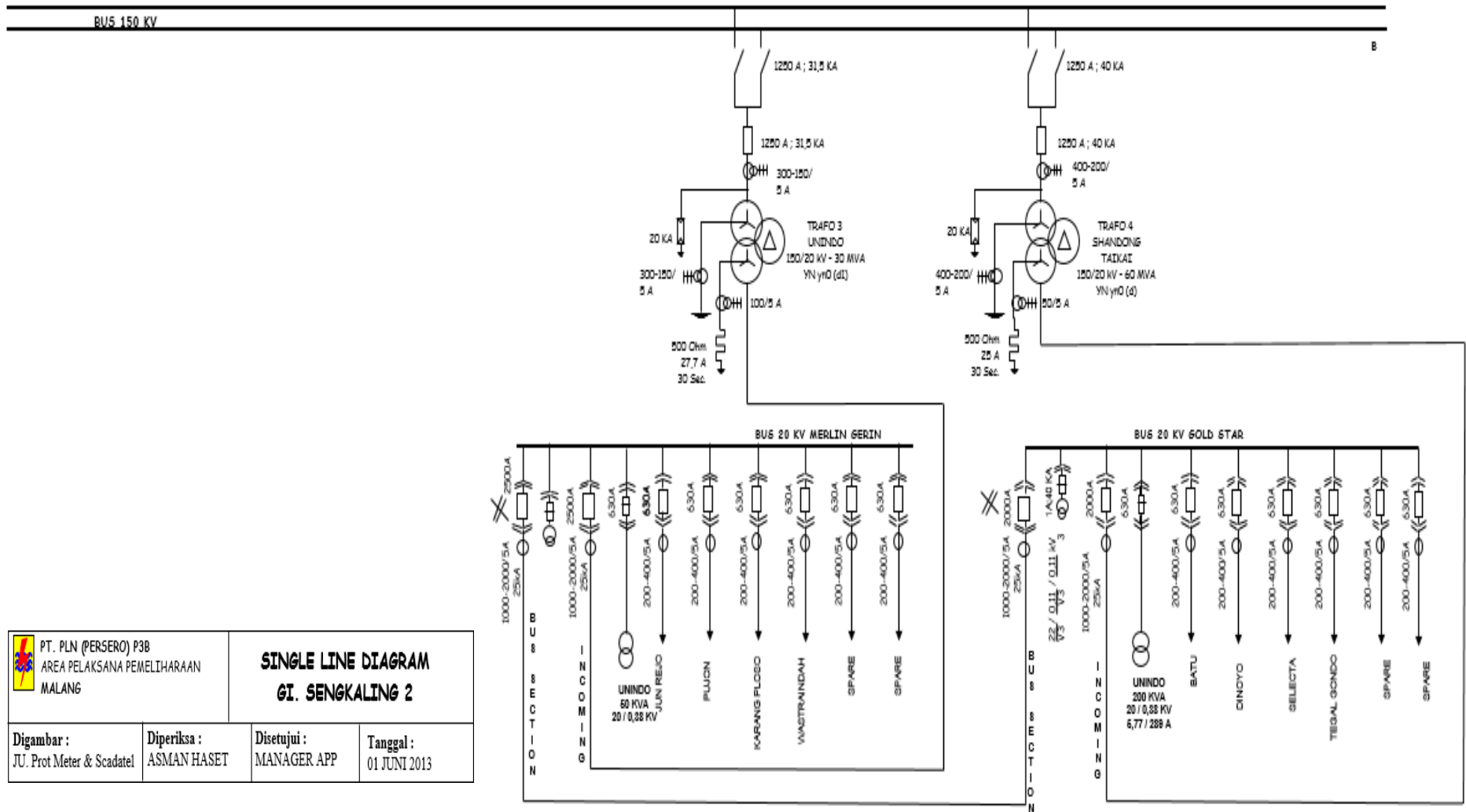
Gardu Induk (GI) Sengkaling adalah salah satu dari 16 GI yang ada di wilayah Unit Pelayanan Transmisi Malang. Gardu Induk Sengkaling memiliki 4 buah transformator yang menerima suplai tegangan 150 kV. Transformator I dan transformator II berfungsi untuk menurunkan tegangan dari 150 kV menjadi 70 kV, dan dua transformator lainnya, yaitu transformator III dan transformator IV berfungsi untuk menurunkan tegangan 150 kV menjadi 20 kV. Dari transformator III dan IV disalurkan ke penyulang-penyulang, kemudian transformator distribusi yang ada di penyulang-penyulang tersebut menurunkan tegangan dari 20 kV menjadi 380/220 V sesuai dengan kebutuhan dari konsumen.

Pengaturan beban dan energi Gardu Induk Sengkaling adalah sebagai berikut :

- a. Transformator III dengan kapasitas 30 MVA menyalurkan energi ke penyulang Junrejo, Pujon, Karang Ploso dan Wastra Indah.
- b. Transformator IV dengan kapasitas 60 MVA menyalurkan energi ke penyulang Batu, Dinoyo, Selecta dan Tegal Gondo.

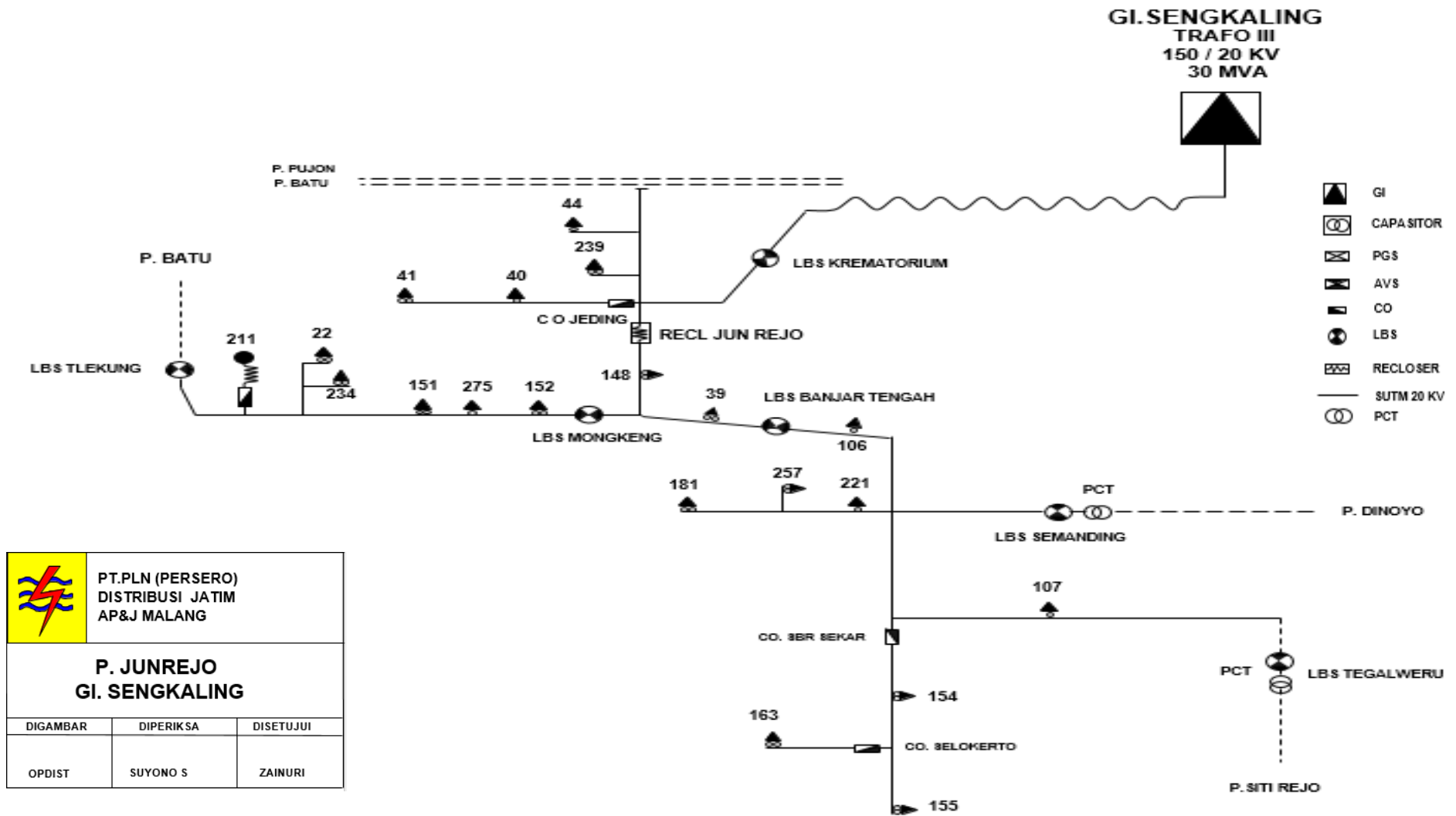
Berdasarkan data Gardu Induk Sengkaling, dapat diketahui bahwa sistem jaringan distribusi yang sering mengalami gangguan pada tahun 2013 adalah penyulang Junrejo, dengan total jumlah gangguan sebanyak 14 kali. Bahkan pernah terjadi gangguan pada penyulang Junrejo yang berdampak pada beroperasinya rele masukan 20 kV akibat kegagalan atau keterlambatan sistem proteksi pada penyulang Junrejo. Beroperasinya rele masukan 20 kV mengakibatkan padamnya penyulang-penyulang lain yang mendapat suplai tegangan dari masukan 20 kV tersebut.

Hal ini berarti penyulang Junrejo merupakan penyulang yang cukup bermasalah dari sisi keandalan dan koordinasi sistem proteksinya. Dengan alasan-alasan yang telah diuraikan diatas maka penulis hendak melakukan analisis koordinasi proteksi pada sisi masukan 20 kV dan penyulang Junrejo dan mencari solusi untuk meningkatkan keandalan sistem proteksinya. Adapun diagram satu garis transformator III di Gardu Induk Sengkaling ditunjukkan pada gambar 4.1 dan diagram satu garis penyulang Junrejo ditunjukkan pada gambar 4.2.



 PT. PLN (PERSERO) P3B AREA PELAKSANA PEMELIHARAAN MALANG	<b>SINGLE LINE DIAGRAM</b> <b>GT. SENGKALING 2</b>		
	Digambar : JU. Prot Meter & Scadatel	Diperiksa : ASMAN HASET	Disetujui : MANAGER APP

Gambar 4.1 Diagram Satu Garis Transformator Daya III Gardu Induk Sengkaling Malang  
 Sumber: PT. PLN (Persero) APP Malang, 2013



 <b>PT. PLN (PERSERO) DISTRIBUSI JATIM AP&amp;J MALANG</b>		
<b>P. JUNREJO GI. SENGKALING</b>		
DIGAMBAR	DIPERIKSA	DISETUJUI
OPDIST	SUYONO S	ZAINURI

Gambar 4.2 Diagram Satu Garis Penyulang Junrejo  
Sumber: PT. PLN (Persero) APJ Malang, 2014

Tabel 4.1 Data Transformator Daya III Gardu Induk Sengkaling Malang

<b>Merk</b>	UNINDO
<b>Tipe</b>	TTUB 150/30000
<b>Daya</b>	30 MVA
<b>Impedansi</b>	12,5%
<b>Tegangan</b>	150/20 kV
<b>Tahanan Pentanahan</b>	500 ohm
<b>Hub. Belitan</b>	YNyn0 (d1)

Sumber: PT. PLN (Persero) APP Malang, 2010

Tabel 4.2 Data Rele Arus Lebih Sisi Masukan 20 kV

<b>Merk</b>	GEC
<b>Tipe</b>	MCGG 82
<b>Nomer Serie</b>	793468 D
<b>Setelan Arus (I&gt;)</b>	1000 A
<b>Time Dial &gt;</b>	0,2 (SI)
<b>Rasio CT</b>	2000/5
<b>Karakteristik</b>	<i>Standart Inverse</i>
<b>Arus Nominal (In)</b>	5 A

Sumber: PT. PLN (Persero) APP Malang, 2010

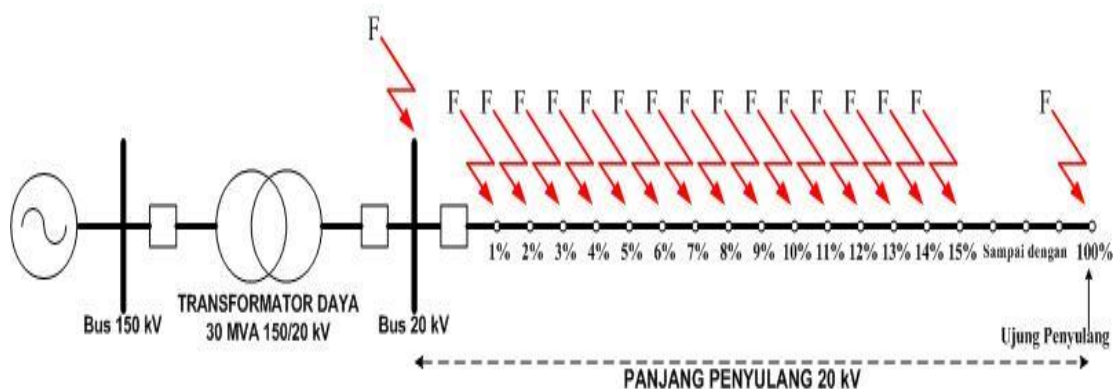
Tabel 4.3 Data Rele Arus Lebih Sisi Penyulang

<b>Merk</b>	MICOM
<b>Tipe</b>	P127
<b>Nomer Serie</b>	36007937
<b>Setelan Arus (I&gt;)</b>	320 A
<b>Time Dial &gt;</b>	0,05 (SI)
<b>Setelan Arus Instan (I&gt;&gt;)</b>	2000 A
<b>Time Dial &gt;&gt;</b>	Instan
<b>Rasio CT</b>	400/5
<b>Karakteristik</b>	<i>Standart Inverse</i>
<b>Arus Nominal (In)</b>	5 A

Sumber: PT. PLN (Persero) APJ Malang, 2014

## 4.2 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat

Untuk perhitungan arus gangguan hubung singkat ini dihitung berdasarkan panjang penyulang, seperti ditunjukkan pada gambar (4.3), yaitu arus gangguan hubung singkat diasumsikan terjadi di busbar 20 kV Gardu Induk Sengkaling Malang dan 1%, 2%, 3%, sampai dengan 100% panjang penyulang.



Gambar 4.3 Diagram Satu Garis Penyulang Junrejo Dengan Berbagai Titik Lokasi Gangguan

### 4.2.1 Menghitung Impedansi Dasar

Perhitungan impedansi dasar mengacu dari transformator daya pada sisi tegangan sekundernya. Impedansi dasar diperoleh dari hasil perbandingan antara tegangan dan daya transformator tersebut. Berdasarkan tabel (4.1), nilai tegangan sekunder yang dijadikan sebagai tegangan dasar adalah 20 kV dan daya transformator yang digunakan sebagai daya dasar adalah 30 MVA. Dengan menggunakan nilai dasar tersebut dan persamaan (2.14) didapat impedansi dasar sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Z_{\text{dasar}} (\Omega) &= \frac{(kV_{L-L})^2}{MVA_{3\phi}} \\ &= \frac{(20)^2}{30} \\ &= 13,33 \Omega \end{aligned}$$

### 4.2.2 Menghitung Impedansi Sumber

Impedansi sumber diperoleh dengan membandingkan antara tegangan dasar dan MVA hubung singkat. Tegangan dasar merupakan tegangan sisi sekunder transformator daya sedangkan MVA hubung singkat diperoleh dari jaringan distribusi yang dipasok dari tegangan tinggi dengan menggunakan transformator daya. Pada tabel (4.1) diketahui



besar tegangan dasar, yaitu 20 kV sedangkan untuk MVA hubung singkat terlebih dahulu harus diketahui nilai arus hubung singkat pada busbar sisi tegangan tinggi yang mewakili semua unit pembangkit beroperasi, menurut data sekunder yang ditunjukkan pada tabel di lampiran II.2, nilai arus hubung singkat pada busbar sisi tegangan tinggi 150 kV yang menjadi suplai Gardu Induk Sengkaling Malang sebesar 9,73581 kA. Dengan menggunakan persamaan (2.18) didapat nilai MVA hubung singkat sebagai berikut:

$$\begin{aligned} MVA_{hs} &= \sqrt{3} \times 150 \text{ kV} \times 9,73581 \text{ kA} \\ &= 2529,44 \text{ MVA} \end{aligned}$$

Dengan memanfaatkan hasil perhitungan MVA hubung singkat diatas, dapat dihitung impedansi sumber dengan menggunakan persamaan (2.17) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Z_s (\Omega) &= \frac{(kV_{L-L})^2}{MVA_{hs}} \\ &= \frac{(20)^2}{2529,44} \\ &= 0,1581 \Omega \end{aligned}$$

Impedansi sumber mempengaruhi nilai impedansi total suatu jaringan yang dilakukan dalam perhitungan arus gangguan hubung singkat. Untuk mempermudah perhitungan arus gangguan hubung singkat, maka impedansi sumber dibuat dalam satuan per unit (pu) dengan menggunakan persamaan (2.15) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Z_s (\text{pu}) &= \frac{Z_s (\Omega)}{Z_{\text{dasar}}} \\ &= \frac{0,1581 \Omega}{13,33 \Omega} \\ &= j 0,0119 \text{ pu} \end{aligned}$$

### 4.2.3 Menghitung Impedansi Transformator Daya

Data sekunder impedansi transformator yang terlihat pada tabel (4.1) diketahui masih dalam bentuk persentase, yaitu sebesar 12,5%. Maka impedansi transformator dengan menggunakan dasar baru dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (2.16) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Z_{1T}(\text{pu}) = Z_{2T}(\text{pu}) &= j 0,125 \left( \frac{20}{20} \right)^2 \times \left( \frac{30}{30} \right) \\ &= j 0,125 \text{ pu} \end{aligned}$$

Karena transformator daya III Gardu Induk Sengkaling Malang yang terpasang mempunyai hubungan belitan YNyn0 (d1), yang mempunyai belitan delta di dalamnya dan ditanahkan maka nilai impedansi urutan nol transformator daya dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (2.21) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Z_{0T}(\text{pu}) &= 3 \times Z_{1T}(\text{pu}) \\ &= 3 \times j 0,125 \text{ pu} \\ &= j 0,375 \text{ pu} \end{aligned}$$

### 4.2.4 Menghitung Impedansi Penyulang

Untuk mengetahui besar impedansi penyulang pada suatu titik gangguan tertentu dapat diasumsikan pada lokasi gangguan di busbar 20 kV Gardu Induk Sengkaling Malang dan 1%, 2%, 3% sampai dengan 100% panjang penyulang, dengan memasukkan data sekunder yang ditunjukkan pada tabel di lampiran II.8, yaitu jenis kawat penghantar yang digunakan pada penyulang Junrejo adalah tipe AAAC dengan luas penampang 150 mm<sup>2</sup> dan panjang penyulang Junrejo 23,085 km dan nilai impedansi dari kawat penghantar AAAC dengan luas 150 mm<sup>2</sup> dapat dilihat pada tabel di lampiran II.3. Sehingga dapat dihitung impedansi penyulang urutan positif dan negatif dengan menggunakan persamaan (2.23) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Z_{1\text{penyulang}} = Z_{2\text{penyulang}} &= (0,2162 + j 0,3305 \Omega/\text{km}) \times 23,085 \text{ km} \\ &= 9,1170 \angle 56,81^\circ \Omega \end{aligned}$$

Untuk mendapatkan satuan per unit (pu) dilakukan perhitungan sesuai dengan persamaan (2.15) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
Z_{1\text{penyulang}} (\text{pu}) &= \frac{Z_{1\text{penyulang}}}{Z_{\text{dasar}}} \\
&= \frac{9,1170 \angle 56,81^\circ \Omega}{13,33 \Omega} \\
&= 0,3743 + j 0,5722 \text{ pu}
\end{aligned}$$

Sedangkan perhitungan impedansi nol, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.24) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
Z_{0\text{penyulang}} &= (0,3631 + j1,6180 \Omega/\text{km}) \times 23,085 \text{ km} \\
&= 38,2805 \angle 77,35^\circ \Omega
\end{aligned}$$

Untuk mendapatkan satuan per unit (pu) dilakukan perhitungan sesuai dengan persamaan (2.15) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
Z_{0\text{penyulang}} (\text{pu}) &= \frac{Z_{0\text{penyulang}}}{Z_{\text{dasar}}} \\
&= \frac{38,2805 \angle 77,35^\circ \Omega}{13,33 \Omega} \\
&= 0,6287 + j 2,8014 \text{ pu}
\end{aligned}$$

Dengan cara yang sama maka untuk perhitungan impedansi penyulang urutan positif, urutan negatif dan urutan nol untuk berbagai titik lokasi terjadinya gangguan dapat dilihat pada tabel di lampiran I.1.

#### 4.2.5 Menghitung Impedansi Total

Dalam perhitungan ini dicari impedansi total urutan positif, urutan negatif dan urutan nol untuk berbagai titik lokasi terjadinya gangguan. Dengan memanfaatkan hasil perhitungan diatas yang terdiri dari impedansi sumber, impedansi transformator daya dan impedansi penyulang. Dapat dihitung impedansi total urutan positif dan negatif menggunakan persamaan (2.25) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
Z_{1\text{total}} = Z_{2\text{total}} &= Z_S + Z_{1T} + Z_{1\text{penyulang}} \\
Z_{1\text{total}} 100\% &= (j 0,0119) + (j 0,125) + (0,3743 + j 0,5722) \\
&= 0,8018 \angle 62,17^\circ \text{ pu}
\end{aligned}$$

Sedangkan untuk perhitungan impedansi total urutan nol, karena transformator daya III Gardu Induk Sengkaling Malang titik netralnya ditanahkan dengan tahanan tinggi sebesar  $500 \Omega$ . Tahanan pentanahan diikut sertakan dalam perhitungan impedansi total urutan nol. Perhitungan impedansi pentanahan dalam satuan per unit (pu) menggunakan persamaan (2.15) yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Z_n(\text{pu}) &= \frac{R_n}{Z_{\text{dasar}}} \\ &= \frac{500 \Omega}{13,33 \Omega} \\ &= 37,5 \text{ pu} \end{aligned}$$

Dengan memanfaatkan hasil perhitungan impedansi pentanahan dalam per unit (pu) diatas, dapat dihitung impedansi total urutan nol dengan menggunakan persamaan (2.26) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Z_{0\text{total}} &= Z_{0T} + 3.Z_N + Z_{0\text{penyulang}} \\ Z_{0\text{total}} 100\% &= (j 0,375) + 3 (37,5) + (0,6287 + j 2,8014) \\ &= 113,1732 \angle 1,61^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama maka untuk perhitungan impedansi total urutan positif, urutan negatif dan urutan nol untuk berbagai titik lokasi terjadinya gangguan dapat dilihat pada tabel di lampiran I.2.

### 4.3 Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa dan Antar Fasa

Setelah mendapatkan nilai dari impedansi total sesuai titik lokasi terjadinya gangguan, selanjutnya perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung. Hanya saja impedansi total yang dimaksud adalah yang tergantung dari jenis arus gangguan hubung singkatnya. Pada perhitungan arus gangguan hubung singkat nilai impedansi gangguan  $Z_f$  dianggap nol dan  $E_a$  adalah tegangan sebesar  $1 \angle 0^\circ$  karena dalam bentuk per unit (pu).

### 4.3.1 Menghitung Arus Dasar

Perhitungan arus dasar diperoleh dari hasil perbandingan antara daya dan tegangan transformator daya sisi sekunder. Berdasarkan tabel (4.1), nilai daya dasar dalam satuan kilovoltampere sebesar 30.000 kVA sedangkan untuk tegangan dasar sebesar 20 kV. Dengan menggunakan persamaan (2.13) didapat nilai arus dasar sebagai berikut:

$$\begin{aligned} I_{\text{dasar}} &= \frac{\text{kVA}_{3\phi}}{\sqrt{3} \times \text{kV}_{\text{L-L}}} \\ &= \frac{30.000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 20 \text{ kV}} \\ &= 866,03 \text{ A} \end{aligned}$$

### 4.3.2 Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Perhitungan arus gangguan hubung singkat tiga fasa dengan menggunakan tabel pada lampiran I.2 kedalam persamaan (2.30) sehingga didapat hasil perhitungan arus hubung singkat tiga fasa sebagai berikut:

Untuk arus gangguan hubung singkat tiga fasa pada titik gangguan di 100% panjang penyulang.

$$\begin{aligned} I_{\text{hs } 3\phi} &= \frac{E_a}{Z_1 + Z_f} \\ &= \frac{1 \angle 0^\circ}{0,8018 \angle 62,17^\circ + 0} \\ &= 1,2472 \angle - 62,17^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

Oleh karena perhitungan diatas masih dalam satuan per unit (pu) maka untuk mendapatkan nilai sebenarnya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.15) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Harga sebenarnya} &= \text{Harga per unit (pu)} \times I_{\text{dasar}} \text{ (A)} \\ I_{\text{hs } 3\phi} \text{ (A)} &= I_{\text{hs } 3\phi} \text{ (pu)} \times I_{\text{dasar}} \text{ (A)} \\ I_{\text{hs } 3\phi} \text{ (A)} &= (1,2472 \angle - 62,17^\circ \text{ pu}) \times 866,03 \text{ A} \\ &= 1080,08 \text{ A} \end{aligned}$$

Sehingga arus gangguan hubung singkat tiga fasa saat terjadi di lokasi 100% panjang penyulang sebesar 1080,08 A.

Dengan cara yang sama maka untuk perhitungan arus gangguan hubung singkat tiga fasa untuk berbagai titik lokasi terjadinya gangguan di penyulang dapat dilihat pada tabel di lampiran I.3.

#### 4.3.3 Arus Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa

Perhitungan arus gangguan hubung singkat antar fasa dengan menggunakan tabel pada lampiran I.2 kedalam persamaan (2.31) sehingga didapat hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat antar fasa sebagai berikut:

Untuk arus gangguan hubung singkat antar fasa pada titik gangguan di 100% panjang penyulang.

$$\begin{aligned} I_{hs\ 2\phi} &= \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \\ &= \frac{1 \angle 0^\circ}{(0,8018 \angle 62,17^\circ) + (0,8018 \angle 62,17^\circ) + 0} \\ &= \frac{1 \angle 0^\circ}{1,6036 \angle 62,17^\circ} \\ &= 0,6236 \angle - 62,17^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

Oleh karena perhitungan diatas masih dalam satuan per unit (pu) maka untuk mendapatkan nilai sebenarnya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.15) sebagai berikut:

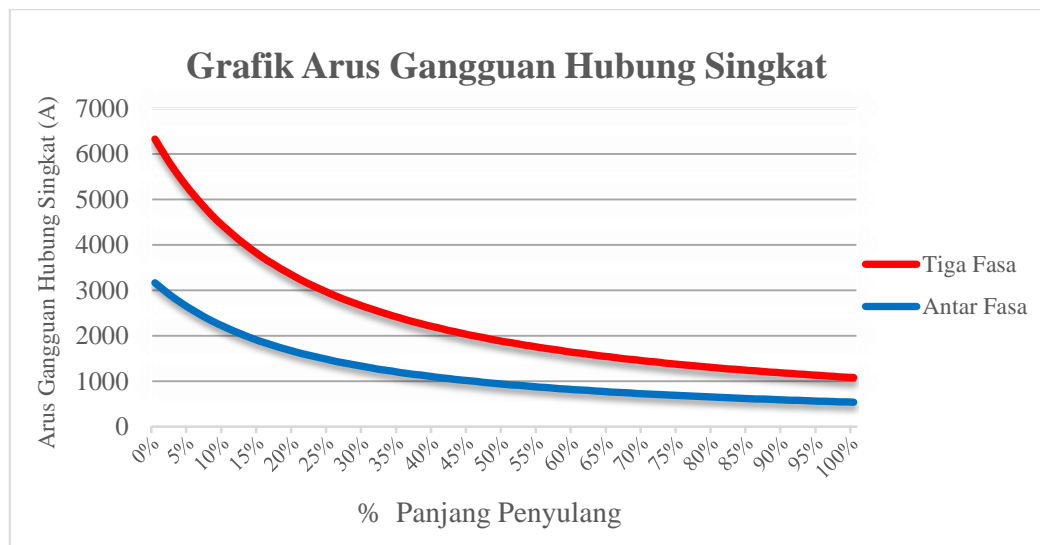
$$\begin{aligned} \text{Harga sebenarnya} &= \text{Harga per unit (pu)} \times I_{\text{dasar}} \text{ (A)} \\ I_{hs\ 2\phi} \text{ (A)} &= I_{hs\ 2\phi} \text{ (pu)} \times I_{\text{dasar}} \text{ (A)} \\ I_{hs\ 2\phi} \text{ (A)} &= (0,6236 \angle - 62,17^\circ \text{ pu}) \times 866,03 \text{ A} \\ &= 540,04 \text{ A} \end{aligned}$$

Sehingga arus gangguan hubung singkat antar fasa saat terjadi di lokasi 100% panjang penyulang sebesar 540,04 A.

Dengan cara yang sama maka untuk perhitungan arus gangguan hubung singkat antar fasa untuk berbagai titik lokasi terjadinya gangguan di penyulang dapat dilihat pada tabel di lampiran I.4.

Dengan hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat tiga fasa dan antar fasa ini dapat digunakan untuk penyetelan rele arus lebih menggunakan pola non kaskade. Maka dapat dibuat suatu perbandingan besarnya arus gangguan hubung singkat terhadap titik lokasi terjadinya gangguan, dapat dilihat pada tabel di lampiran I.5.

Dari tabel pada lampiran I.5 dapat digambarkan grafik perbandingan arus gangguan hubung singkat tiga fasa dan antar fasa untuk berbagai titik lokasi terjadinya gangguan yang ditunjukkan pada gambar 4.4 dibawah ini.



Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa dan Antar Fasa Menurut Titik Lokasi Terjadinya Gangguan

Dari hasil perhitungan yang ditunjukkan pada tabel di lampiran I.5 dapat dianalisis bahwa arus gangguan hubung singkat terbesar pada penyulang Junrejo adalah arus gangguan hubung singkat tiga fasa dan antar fasa yang terjadi di busbar 20 kV Gardu Induk Sengkaling Malang, yaitu sebesar 6327,84 A dan 3163,92 A sedangkan arus gangguan hubung singkat tiga fasa dan antar fasa terkecil terjadi di ujung penyulang, yaitu sebesar 1080,08 A dan 540,04 A. Dapat dilihat bahwa besarnya arus gangguan hubung singkat dipengaruhi oleh jarak titik lokasi gangguan, semakin jauh jarak titik lokasi gangguan maka semakin kecil arus gangguan hubung singkat yang terjadi dan sebaliknya. Arus gangguan hubung singkat yang terjadi di penyulang Junrejo cukup besar, maka diperlukan sistem proteksi yang dapat bekerja dengan waktu cepat. Kemampuan sistem proteksi untuk memisahkan gangguan secepat mungkin akan mengurangi akibat yang ditimbulkan oleh gangguan tersebut, yaitu berupa kerusakan peralatan instalasi. Arus gangguan hubung singkat yang terjadi pada titik lokasi yang diasumsikan mempunyai

selisih nilai yang tidak jauh berbeda. Perubahan arus gangguan yang relatif kecil ini membutuhkan sistem proteksi dengan selektifitas dan sensitifitas yang tinggi.

#### 4.4 Perhitungan Penyetelan Rele Arus Lebih Menggunakan Pola Non Kaskade

Dari hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat, pada tahap selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai penyetelan rele arus lebih menggunakan pola non kaskade. Penyetelan rele arus lebih menggunakan pola non kaskade tergantung pada titik lokasi terjadinya arus gangguan hubung singkat, yaitu saat gangguan di busbar 20 kV diluar daerah instan rele arus lebih sisi masukan 20 kV, maka rele arus lebih sisi masukan 20 kV akan bekerja sesuai dengan setelan invers, akan tetapi jika gangguan yang terjadi didalam daerah instan maka akan bekerja sesuai dengan setelan instan dan pada saat gangguan dipenyulang diluar daerah instan rele arus lebih sisi penyulang, maka rele arus lebih sisi penyulang akan bekerja sesuai dengan setelan invers dan jika gangguan yang terjadi didalam daerah instan maka akan bekerja sesuai dengan setelan instan.

##### 4.4.1 Penyetelan Sisi Penyulang

Untuk penyetelan rele arus lebih yang terpasang di sisi penyulang, menurut data sekunder pada tabel (4.3) diketahui mempunyai karakteristik *standart inverse*. Maka untuk penyetelan arus dan waktu rele arus lebih sisi penyulang dapat dihitung sebagai berikut:

###### 4.4.1.1 Penyetelan Arus

Untuk menentukan nilai penyetelan arus rele arus lebih yang terpasang pada sisi penyulang, dihitung berdasarkan arus beban maksimum yang mengalir dipenyulang Junrejo. Menurut data sekunder yang ditunjukkan pada tabel di lampiran II.5, arus beban maksimum yang mengalir dipenyulang Junrejo sebesar 101 A, sehingga dapat dihitung penyetelan arus pada bagian primer dan sekunder menggunakan persamaan (2.9) dan (2.10) sebagai berikut:

- Penyetelan Arus Pada Bagian Primer

$$\begin{aligned} I_{\text{set primer}} &= 1,05 \times 101 \text{ A} \\ &= 106,05 \text{ A} \end{aligned}$$

Penyetelan arus pada bagian primer menunjukkan bahwa, jika terdapat arus gangguan hubung singkat dengan nilai sama dengan atau lebih besar dari 106,05 A, maka rele arus lebih sisi penyulang akan mendeteksinya dan kemudian memerintahkan PMT



untuk bekerja. Akan tetapi jika terdapat arus gangguan hubung singkat kurang dari 106,05 A, maka rele arus lebih sisi penyulang tidak dapat mendeteksi gangguan tersebut.

- Penyetelan Arus Pada Bagian Sekunder

$$\begin{aligned} I_{\text{set sekunder}} &= 106,05 \times \frac{5}{400} \\ &= 1,33 \text{ A} \end{aligned}$$

#### 4.4.1.2 Penyetelan Arus Instan

Penyetelan arus instan sisi penyulang tergantung dari kapasitas dan arus nominal transformator daya yang terpasang, dapat dilihat pada tabel (4.1) bahwa kapasitas transformator daya sebesar 30 MVA dan untuk mengetahui arus nominal transformator daya yang terpasang, dengan menggunakan persamaan (2.6) sehingga dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} I_{\text{n trafo}} &= \frac{\text{kVA}}{\sqrt{3} \times \text{kV}_{\text{L-L}}} \\ &= \frac{30000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 20} \\ &= 866,03 \text{ A} \end{aligned}$$

Dengan memanfaatkan hasil perhitungan arus nominal transformator daya diatas, dapat dihitung arus instan pada sisi penyulang dengan menggunakan persamaan (2.4) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} I_{\text{instan}} &= 2,4 \times I_{\text{n trafo}} \\ &= 2,4 \times 866,03 \text{ A} \\ &= 2078,472 \text{ A} \end{aligned}$$

Dengan memanfaatkan hasil perhitungan arus instan pada sisi penyulang, sehingga dapat dihitung penyetelan arus instan pada bagian sekunder dan primer dengan menggunakan persamaan (2.3) dan (2.7) sebagai berikut:

- Penyetelan Arus Instan Pada Bagian Sekunder

$$\begin{aligned} I_{\text{instan sekunder}} &= \frac{I_{\text{instan}}}{I_{\text{set primer}}} \\ &= \frac{2078,472 \text{ A}}{106,05 \text{ A}} \\ &= 19,65 \text{ A} \end{aligned}$$

- Penyetelan Arus Instan Pada Bagian Primer

$$\begin{aligned} I_{\text{instan primer}} &= I_{\text{instan sekunder}} \times I_{\text{set primer}} \\ &= 19,65 \text{ A} \times 106,05 \text{ A} \\ &= 2084 \text{ A} \end{aligned}$$

Penyetelan waktu: 40 milidetik.

#### 4.4.1.3 Penyetelan Waktu

Arus gangguan hubung singkat yang dipilih untuk menentukan besarnya penyetelan TMS rele arus lebih sisi penyulang, yaitu arus gangguan hubung singkat tiga fasa yang terjadi di busbar 20 kV Gardu Induk Sengkaling Malang. Arus gangguan hubung singkat ini diambil sebagai titik koordinasi antara rele arus lebih sisi penyulang dengan rele arus lebih sisi masukan 20 kV. Waktu kerja paling hilir yang ditetapkan  $t: 0,3$  detik. Keputusan ini diambil agar rele tidak sampai beroperasi lagi akibat adanya arus naik (*inrush current*) dari trafo-trafo distribusi yang sudah tersambung di jaringan distribusi, pada saat PMT penyulang tersebut dimasukkan, dengan memanfaatkan persamaan (2.12), didapat perhitungan sebagai berikut:

$$\text{TMS} = \frac{\left[ \left( \frac{6327,84}{106,05} \right)^{0,02} \right] - 1}{0,14} \times 0,3$$

$$\text{TMS} = 0,1826$$

Sedangkan arus gangguan hubung singkat yang dipilih untuk menentukan waktu kerja saat terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa dipenyulang, yaitu dimulai dari lokasi gangguan di 44% panjang penyulang. Karena lokasi gangguan tersebut diluar daerah instan rele arus lebih sisi penyulang, sehingga bekerja sesuai dengan setelan invers. Dengan menggunakan persamaan (2.11) dapat dihitung sebagai berikut:

$$t = \frac{0,14}{\left[ \left( \frac{2051,73}{106,05} \right)^{0,02} \right]^{-1}} \times 0,1826$$

$$= 0,4188 \text{ detik}$$

Untuk menentukan waktu kerja saat terjadi arus gangguan hubung singkat antar fasa dipenyulang, yaitu dimulai dari lokasi gangguan di 12% panjang penyulang. Karena lokasi gangguan tersebut berada diluar daerah instan rele arus lebih sisi penyulang. Dengan menggunakan persamaan (2.11) dapat dihitung sebagai berikut:

$$t = \frac{0,14}{\left[ \left( \frac{2058,27}{106,05} \right)^{0,02} \right]^{-1}} \times 0,1826$$

$$= 0,4183 \text{ detik}$$

Dengan cara yang sama maka untuk penyetelan waktu kerja rele arus lebih pada lokasi gangguan diluar daerah instan rele arus lebih sisi penyulang saat terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa dan antar fasa dipenyulang, dapat dilihat pada tabel di lampiran I.6.

#### 4.4.2 Penyetelan Sisi Masukan 20 kV

Untuk penyetelan rele arus lebih yang terpasang di sisi masukan 20 kV, menurut data sekunder pada tabel (4.2) diketahui mempunyai karakteristik *standart inverse*. Maka untuk penyetelan arus dan waktu rele arus lebih sisi masukan 20 kV dapat dihitung sebagai berikut:

##### 4.4.2.1 Penyetelan Arus

Untuk menentukan nilai penyetelan arus rele arus lebih yang terpasang pada sisi masukan 20 kV harus terlebih dahulu dihitung nilai arus nominal transformator daya yang terpasang, dengan menggunakan data pada tabel (4.1) kedalam persamaan (2.6) didapat sebagai berikut:

$$I_{n \text{ trafo}} = \frac{\text{kVA}}{\sqrt{3} \times \text{kV}_{L-L}}$$

$$= \frac{30000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 20}$$

$$= 866,03 \text{ A}$$

Dengan memanfaatkan hasil perhitungan arus nominal transformator daya diatas, sehingga dapat dihitung penyetelan arus pada bagian primer dan sekunder sisi masukan 20 kV dengan menggunakan persamaan (2.9) dan (2.10) sebagai berikut:

- Penyetelan Arus Pada Bagian Primer

$$\begin{aligned} I_{\text{set primer}} &= 1,05 \times 866,03 \text{ A} \\ &= 909,3315 \text{ A} \end{aligned}$$

Penyetelan arus pada bagian primer menunjukkan bahwa, jika terdapat arus gangguan hubung singkat dengan nilai sama dengan atau lebih besar dari 909,3315 A, maka rele arus lebih sisi masukan 20 kV akan mendeteksinya dan kemudian memerintahkan PMT untuk bekerja. Akan tetapi jika terdapat arus gangguan hubung singkat kurang dari 909,3315 A, maka rele arus lebih sisi masukan 20 kV tidak dapat mendeteksi gangguan tersebut.

- Penyetelan Arus Pada Bagian Sekunder

$$\begin{aligned} I_{\text{set sekunder}} &= 909,3315 \times \frac{5}{2000} \\ &= 2,27 \text{ A} \end{aligned}$$

#### 4.4.2.2 Penyetelan Arus Instan

Penyetelan arus instan pada sisi masukan 20 kV dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.5) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} I_{\text{instan}} &= 4 \times I_{\text{n trafo}} \\ &= 4 \times 866,03 \text{ A} \\ &= 3464,12 \text{ A} \end{aligned}$$

Dengan memanfaatkan hasil perhitungan arus instan pada sisi masukan 20 kV, sehingga dapat dihitung penyetelan arus instan pada bagian sekunder dan primer dengan menggunakan persamaan (2.3) dan (2.7) sebagai berikut:

- Penyetelan Arus Instan Pada Bagian Sekunder

$$\begin{aligned} I_{\text{instan sekunder}} &= \frac{I_{\text{instan}}}{I_{\text{set primer}}} \\ &= \frac{3464,12 \text{ A}}{909,3315 \text{ A}} \\ &= 3,85 \text{ A} \end{aligned}$$

- Penyetelan Arus Instan Pada Bagian Primer

$$\begin{aligned} I_{\text{instan primer}} &= I_{\text{instan sekunder}} \times I_{\text{set primer}} \\ &= 3,85 \text{ A} \times 909,3315 \text{ A} \\ &= 3500,93 \text{ A} \end{aligned}$$

Penyetelan waktu: 80 milidetik.

#### 4.4.2.3 Penyetelan Waktu

Arus gangguan hubung singkat yang dipilih untuk menentukan besarnya penyetelan TMS rele arus lebih sisi masukan 20 kV, yaitu arus gangguan hubung singkat tiga fasa yang terjadi di busbar 20 kV Gardu Induk Sengkaling Malang. Waktu kerja sisi masukan 20 kV didapat dengan waktu kerja rele di sisi hilir +0,4 detik. Dengan menggunakan persamaan (2.12) dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{TMS} = \frac{\left[ \left( \frac{6327,84}{909,3315} \right)^{0,02} \right]^{-1}}{0,14} \times 0,7$$

$$\text{TMS} = 0,1978$$

Sedangkan arus gangguan hubung singkat yang dipilih untuk menentukan waktu kerja saat terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa dipenyulang, yaitu dimulai dari lokasi gangguan di 18% panjang penyulang. Karena lokasi gangguan tersebut diluar daerah instan rele arus lebih sisi masukan 20 kV, sehingga bekerja sesuai dengan setelan invers. Dengan menggunakan persamaan (2.11) sebagai berikut:

$$t = \frac{0,14}{\left[ \left( \frac{3476,03}{909,3315} \right)^{0,02} \right] - 1} \times 0,1978$$

$$= 1,0188 \text{ detik}$$

Untuk menentukan waktu kerja saat terjadi arus gangguan hubung singkat antar fasa dipenyulang, yaitu dimulai dari lokasi gangguan di 0% panjang penyulang. Karena besar arus gangguan hubung singkat antar fasa yang terjadi dipenyulang tidak terdapat arus yang melebihi arus instan sisi masukan 20 kV, sehingga bisa dikatakan pada arus gangguan hubung singkat antar fasa yang terjadi dipenyulang tidak terdapat daerah instan untuk penyetelan rele arus lebih sisi masukan 20 kV. Dengan menggunakan persamaan (2.11) dapat dihitung sebagai berikut:

$$t = \frac{0,14}{\left[ \left( \frac{3163,92}{909,3315} \right)^{0,02} \right] - 1} \times 0,1978$$

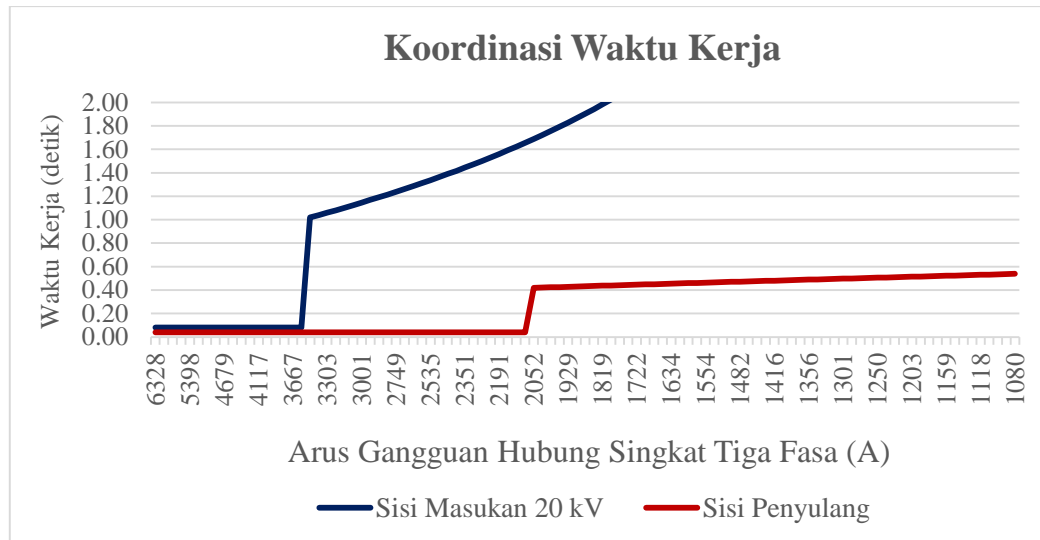
$$= 1,0968 \text{ detik}$$

Dengan cara yang sama maka untuk penyetelan waktu kerja rele arus lebih pada lokasi gangguan diluar daerah instan rele arus lebih sisi masukan 20 kV saat terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa dan antar fasa dipenyulang, dapat dilihat pada tabel di lampiran I.7.

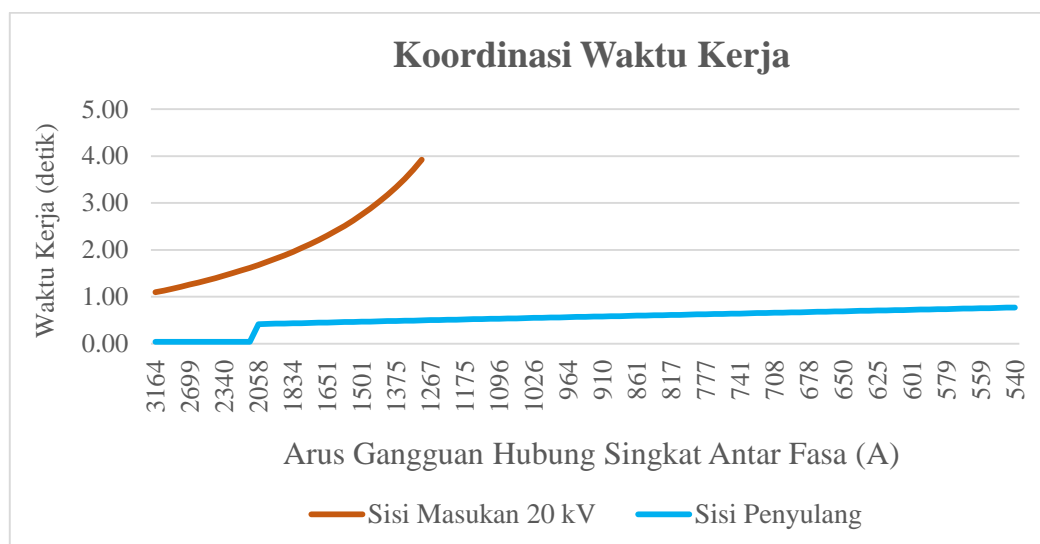
#### 4.5 Koordinasi Rele Arus Lebih Menggunakan Pola Non Kaskade

Berdasarkan penyetelan waktu rele arus lebih yang telah didapat, maka dapat diketahui koordinasi rele arus lebih menggunakan pola non kaskade, yaitu semakin jauh dari sumber tenaga maka penyetelan waktunya semakin lama. Selisih waktu kerja rele arus lebih sisi masukan dan penyulang 20 kV untuk pemutusan arus gangguan hubung singkat tiga fasa dan antar fasa dapat dilihat pada tabel di lampiran I.8.

Dari tabel pada lampiran I.8 dapat digambarkan grafik koordinasi waktu kerja rele arus lebih menggunakan pola non kaskade pada sisi masukan dan penyulang 20 kV saat terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa dan antar fasa yang ditunjukkan pada gambar 4.5 dan 4.6 dibawah ini.



Gambar 4.5 Grafik Koodinasi Waktu Kerja Rele Arus Lebih Menggunakan Pola Non Kaskade Pada Sisi Masukan dan Penyulang 20 kV Saat Terjadi Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa



Gambar 4.6 Grafik Koodinasi Waktu Kerja Rele Arus Lebih Menggunakan Pola Non Kaskade Pada Sisi Masukan dan Penyulang 20 kV Saat Terjadi Arus Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa

Dari gambar (4.5) dan (4.6) di atas dapat dilihat bahwa terdapat selang waktu antara rele arus lebih sisi masukan dan penyulang 20 kV, ini menunjukkan bahwa sudah memenuhi kriteria koordinasi, maksudnya dengan adanya selang waktu tersebut maka rele arus lebih sisi masukan dan penyulang 20 kV tidak akan bekerja secara bersamaan. Rele arus lebih pada sisi penyulang mempunyai waktu kerja yang lebih cepat dari rele arus lebih sisi masukan 20 kV. Penyetelan ini dimaksudkan agar rele arus lebih sisi masukan 20 kV (hulu) sebagai pengaman cadangan memberi kesempatan rele arus lebih

sisi penyulang (hilir) sebagai pengaman utama bekerja terlebih dahulu pada saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa dan antar fasa dipenyulang.

Dari tabel pada lampiran I.8 dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Rele Arus Lebih Sisi Penyulang.

- Pada Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa.

Saat terjadi arus gangguan antara 1080,08-2051,73 A, maka rele arus lebih sisi penyulang akan bekerja sesuai dengan setelan invers ( $I>$ ) sedangkan saat terjadi arus gangguan sebesar 2051,73 A lebih, maka rele arus lebih sisi penyulang akan bekerja sesuai dengan setelan instan ( $I>>$ ).

- Pada Arus Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa.

Saat terjadi arus gangguan antara 540,04-2058,27 A, maka rele arus lebih sisi penyulang akan bekerja sesuai dengan setelan invers ( $I>$ ) sedangkan saat terjadi arus gangguan sebesar 2058,27 A lebih, maka rele arus lebih sisi penyulang akan bekerja sesuai dengan setelan instan ( $I>>$ ).

2. Rele Arus Lebih Sisi Masukan 20 kV.

- Pada Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa.

Saat terjadi arus gangguan antara 1080,08-3476,03 A, maka rele arus lebih sisi masukan 20 kV akan bekerja sesuai dengan setelan invers ( $I>$ ) sedangkan saat terjadi arus gangguan sebesar 3476,03 A lebih, maka rele arus lebih sisi masukan 20 kV akan bekerja sesuai dengan setelan instan ( $I>>$ ).

- Pada Arus Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa.

Karena arus gangguan hubung singkat antar fasa yang terjadi dipenyulang tidak terdapat arus yang melebihi arus instan sebesar 3500,93 A, maka rele arus lebih sisi masukan 20 kV akan bekerja sesuai dengan setelan invers ( $I>$ ).



Apabila terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa pada busbar 20 kV yang termasuk dalam daerah instan, maka rele arus lebih sisi masukan 20 kV akan memberi perintah PMT untuk memutuskan gangguan sesuai dengan setelan instan dengan waktu kerja 80 milidetik dan saat terjadi arus gangguan hubung singkat antar fasa pada busbar 20 kV, tidak terjadi arus gangguan hubung singkat yang melebihi arus instan, sehingga rele arus lebih sisi masukan 20 kV akan bekerja sesuai setelan invers.

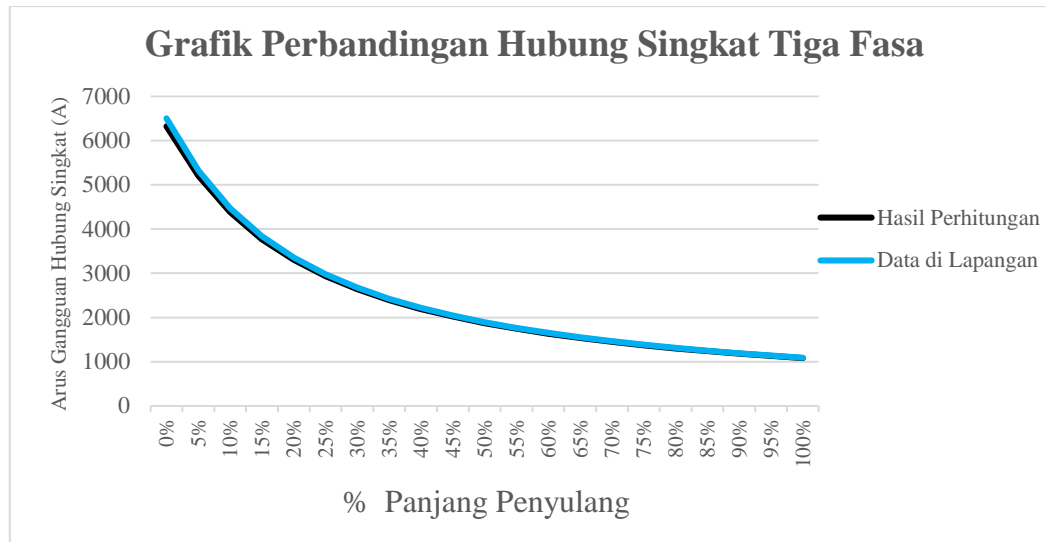
Apabila terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa maupun antar fasa dipenyulang yang termasuk dalam daerah instan, maka rele arus lebih sisi penyulang akan memberi perintah PMT untuk memutuskan gangguan sesuai dengan setelan instan dengan waktu kerja 40 milidetik, namun jika PMT penyulang gagal bekerja maka tCBF akan mengirim sinyal pemutusan ke rele arus lebih sisi masukan 20 kV untuk segera bekerja dengan waktu tunda 0,1 detik.

#### **4.6 Perbandingan Hasil Perhitungan Dengan Data di Lapangan**

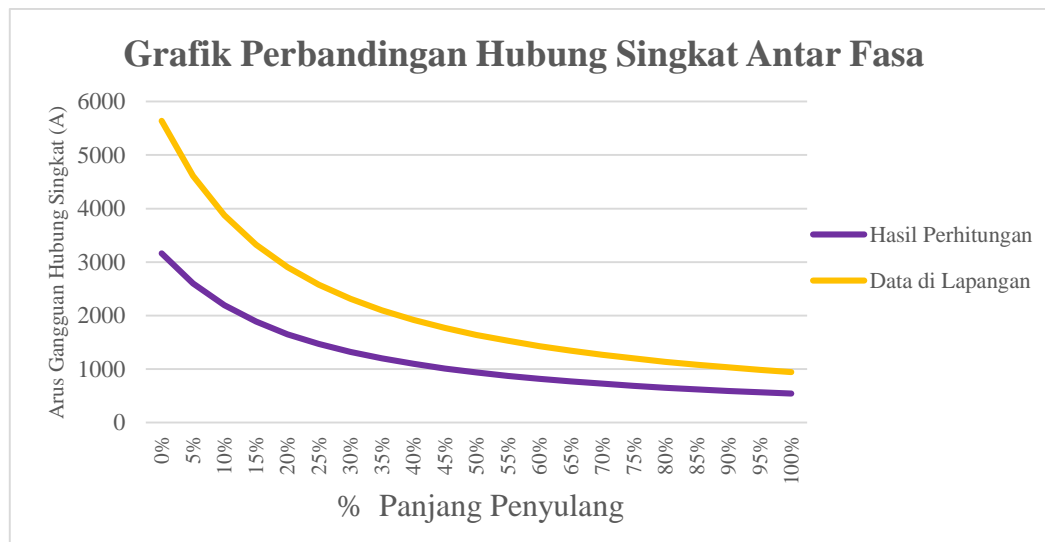
##### **4.6.1 Perbandingan Hasil Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Dengan Data di Lapangan**

Dari hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat yang ditunjukkan pada tabel di lampiran I.5 dan data arus gangguan hubung singkat di lapangan yang ditunjukkan pada tabel di lampiran II.1 terlihat adanya perbedaan, hal ini dikarenakan adanya sistem perhitungan yang berbeda sehingga arus gangguan hubung singkat data di lapangan lebih besar jika dibandingkan dengan arus gangguan hubung singkat hasil perhitungan. Adapun perbedaan ini disebabkan karena sistem perhitungan arus gangguan hubung singkat data di lapangan tidak memperhatikan perubahan nilai arus hubung singkat pada busbar sisi tegangan tinggi 150 kV yang menjadi suplai Gardu Induk Sengkaling Malang, impedansi transformator daya yang digunakan dalam perhitungan tidak sesuai dengan papan nama yang terdapat di transformator daya III Gardu Induk Sengkaling Malang dan juga tidak memperhatikan penambahan panjang penyulang yang mengakibatkan perubahan arus dan impedansi sistem.

Dari tabel pada lampiran I.5 dan tabel pada lampiran II.1 dapat digambarkan grafik perbandingan arus gangguan hubung singkat tiga fasa dan antar fasa hasil perhitungan dengan data di lapangan yang ditunjukkan pada gambar 4.7 dan 4.8 dibawah ini.



Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa Hasil Perhitungan Dengan Data di Lapangan



Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Arus Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa Hasil Perhitungan Dengan Data di Lapangan

#### 4.6.2 Perbandingan Penyetelan Rele Arus Lebih Menggunakan Pola Non Kaskade Dengan Penyetelan yang Diterapkan di Lapangan

Tabel 4.4 Perbandingan Penyetelan Rele Arus Lebih Menggunakan Pola Non Kaskade Dengan Penyetelan yang Diterapkan di Lapangan

Lokasi Rele Arus Lebih	Penyetelan yang Diterapkan di Lapangan	Penyetelan Rele Arus Lebih Pola Non Kaskade
Rele Arus Lebih Sisi Masukan 20 kV CT: 2000/5	I >: 1000 A TMS: 0,2 (SI)	I >: 909,3315 A TMS: 0,1978 (SI)
	I >>: tidak diterapkan	I >>: 3500,93 A t: 80 milidetik
Rele Arus Lebih Sisi Penyulang CT: 400/5	I >: 320 A TMS: 0,05 (SI)	I >: 106,05 A TMS: 0,1826 (SI)
	I >>: 2000 A t: instan	I >>: 2084 A t: 40 milidetik

Berdasarkan dari tabel (4.4) diatas tampak perbedaan cara penyetelan. Untuk penyetelan rele arus lebih yang diterapkan di Gardu Induk Sengkaling saat ini, penyetelan arus instan sisi masukan 20 kV tidak diterapkan, namun untuk pola non kaskade penyetelan arus instan sisi masukan 20 kV diterapkan sehingga dapat mencapai selektifitas sistem proteksi yang baik.

Adapula perbedaan penyetelan arus antara yang diterapkan di lapangan dengan hasil perhitungan. Pada sisi masukan 20 kV, penyetelan arus yang diterapkan di lapangan lebih besar dari hasil perhitungan, hal tersebut karena penyetelan arus yang diterapkan di lapangan telah dibulatkan sesuai dengan range setelan arus jenis rele arus lebih yang digunakan, begitupun sebaliknya penyetelan arus hasil perhitungan pada sisi penyulang lebih kecil dari yang diterapkan di lapangan, hal ini dikarenakan penyetelan arus yang diterapkan di lapangan menggunakan arus nominal transformator arus atau kemampuan hantar arus (KHA) kawat penghantar yang digunakan sedangkan untuk penyetelan arus hasil perhitungan menggunakan arus beban maksimum yang mengalir pada penyulang sehingga tampak dari segi penyetelan arus jauh berbeda.

Perbedaan perhitungan arus gangguan hubung singkat dan penyetelan arus antara hasil perhitungan dengan data di lapangan mengakibatkan penyetelan TMS yang disetkan

ke rele arus lebih sebagai konstanta pun berbeda. Selain itu adapun perbedaan penyetelan TMS yang diterapkan di lapangan dan hasil perhitungan, yaitu dari penentuan lokasi terjadinya gangguan sebagai titik koordinasi antara rele arus lebih sisi masukan dan penyulang 20 kV dan dari awal penentuan waktu kerja rele arus lebih sisi masukan dan penyulang 20 kV yang diinginkan untuk beroperasi. Untuk arus gangguan hubung singkat yang dipilih sebagai titik koordinasi rele arus lebih sisi masukan dan penyulang 20 kV yang diterapkan di lapangan, yaitu arus gangguan hubung singkat antar fasa yang terjadi di busbar 20 kV sedangkan hasil perhitungan menggunakan arus gangguan hubung singkat tiga fasa yang terjadi di busbar 20 kV. Untuk awal penentuan waktu kerja rele arus lebih yang diinginkan untuk beroperasi, pada penyetelan sisi penyulang, hasil perhitungan ditetapkan 0,3 detik, keputusan ini diambil agar rele tidak sampai beroperasi lagi akibat adanya arus naik (*inrush current*) dari trafo-trafo distribusi yang sudah tersambung di jaringan distribusi, pada saat PMT penyulang tersebut dimasukkan sedangkan yang diterapkan di lapangan 0,15 detik. Pada penyetelan sisi masukan 20 kV, hasil perhitungan sebesar 0,7 detik dan yang diterapkan di lapangan sebesar 0,8 detik.

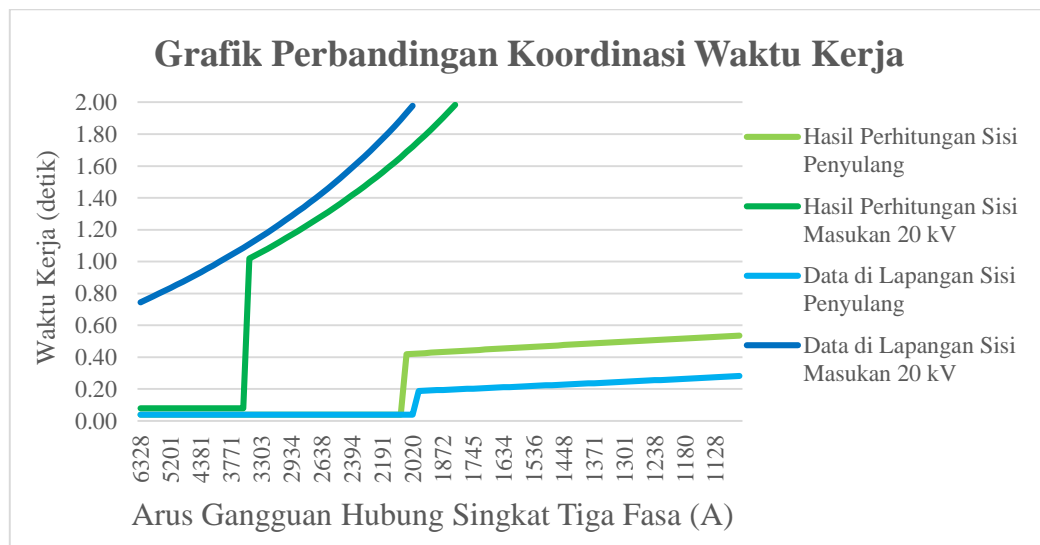
Dari tabel (4.4) dapat diketahui perbandingan koordinasi waktu kerja rele arus lebih sisi masukan dan penyulang 20 kV hasil perhitungan dengan yang diterapkan di lapangan saat terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa dan antar fasa, yang ditunjukkan pada tabel di lampiran I.9.

Berdasarkan tabel pada lampiran I.9 terlihat adanya perbedaan, hal ini dikarenakan adanya perbedaan-perbedaan perhitungan yang telah dijelaskan diatas. Untuk koordinasi waktu kerja rele arus lebih sisi masukan dan penyulang 20 kV yang diterapkan di lapangan tidak sesuai dengan ketentuan PLN sedangkan hasil perhitungan telah memenuhi ketentuan PLN, yaitu selisih waktu kerja antara rele arus lebih sisi penyulang sebagai pengaman utama dan rele arus lebih sisi masukan 20 kV sebagai pengaman cadangan adalah 0,4-0,5 detik.

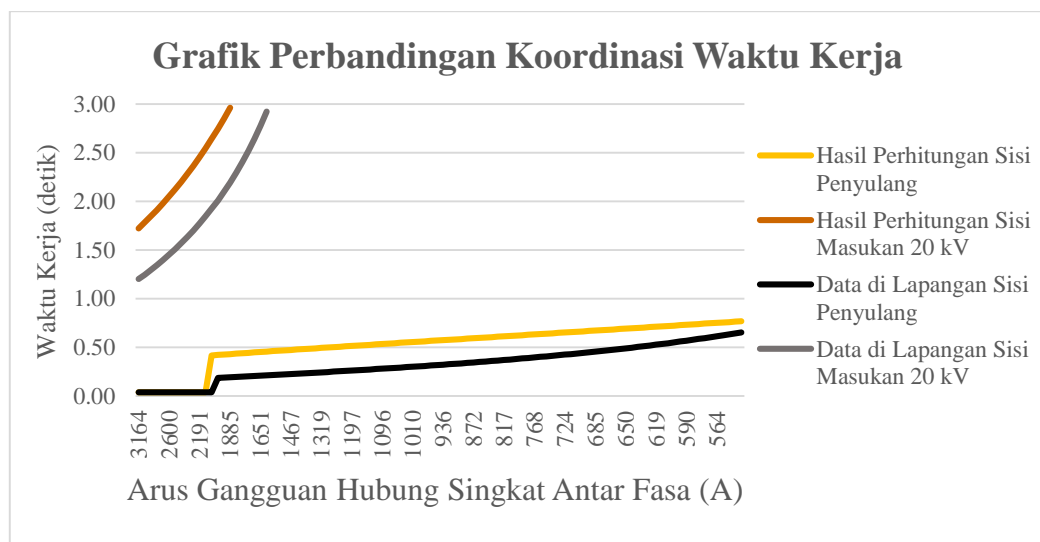
Untuk mengetahui perbandingan koordinasi waktu kerja rele arus lebih sisi masukan dan penyulang 20 kV yang diterapkan di lapangan, diasumsikan apabila terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa dipenyulang sebesar 3569,33 A maka rele arus lebih sisi penyulang akan bekerja sesuai dengan setelan instan, namun jika rele arus lebih sisi penyulang gagal bekerja maka pemutusan gangguan akan dilakukan oleh rele arus lebih sisi masukan 20 kV dengan waktu 1,0864 detik. Sedangkan koordinasi rele arus lebih menggunakan pola non kaskade, jika terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa dipenyulang sebesar 3569,33 A maka rele arus lebih sisi penyulang akan bekerja sesuai

dengan setelan instan, namun jika rele arus lebih sisi penyulang gagal bekerja maka tCBF akan mengirim sinyal pemutusan ke rele arus lebih sisi masukan 20 kV untuk segera bekerja dengan waktu tunda 0,1 detik.

Dari tabel pada lampiran I.9 dapat digambarkan grafik perbandingan koordinasi waktu kerja waktu kerja rele arus lebih sisi masukan dan penyulang 20 kV hasil perhitungan dengan yang diterapkan di lapangan saat terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa dan antar fasa yang ditunjukkan pada gambar 4.9 dan 4.10 dibawah ini.



Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Koordinasi Waktu Kerja Rele Arus Lebih Sisi Masukan dan Penyulang 20 kV Hasil Perhitungan Dengan yang Diterapkan di Lapangan Saat Terjadi Arus Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa



Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Koordinasi Waktu Kerja Rele Arus Lebih Sisi Masukan dan Penyulang 20 kV Hasil Perhitungan Dengan yang Diterapkan di Lapangan Saat Terjadi Arus Gangguan Hubung Singkat Antar Fasa

#### 4.6.3 Perbandingan Tingkat Kinerja Rele Arus Lebih Menggunakan Pola Non Kaskade Dengan yang Diterapkan di Lapangan

Untuk mengetahui tingkat kinerja rele dihitung dengan jumlah rele yang bekerja di daerahnya terhadap jumlah gangguan yang terjadi. Tingkat kinerja rele dikatakan cukup baik bila mempunyai harga sekitar 90-99%. Diasumsikan banyaknya gangguan yang terjadi pada penyulang sebanyak titik lokasi gangguan dan setiap titik lokasi gangguan terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa dan antar fasa, jadi jumlah gangguan yang terjadi di sepanjang penyulang sebanyak 202 kali.

Berdasarkan tabel di lampiran I.10 waktu kerja rele arus lebih yang diterapkan di lapangan saat terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa maupun antar fasa dapat dianalisis bahwa, pada saat terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa dipenyulang yang merupakan gangguan di luar daerah instan maka rele arus lebih sisi penyulang bekerja sesuai dengan setelan invers, dengan waktu kerja untuk pemutusan gangguan dibawah setelan minimumnya, yaitu kurang dari 0,3 detik, bila terjadi gangguan dengan waktu pemutusan  $< 0,3$  detik kemungkinan rele arus lebih tidak beroperasi. Jadi dapat disimpulkan bahwa ketika terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa di luar daerah instan di sepanjang panyulang terdapat kemungkinan rele arus lebih sisi penyulang tidak beroperasi. Untuk waktu kerja rele arus lebih sisi penyulang saat terjadi arus gangguan hubung singkat antar fasa terdapat pula waktu kerja rele arus lebih dibawah setelan minimum, yaitu jika terjadi arus gangguan hubung singkat antar fasa sebesar 1025,87-1997,48 A.

Terdapat pula faktor yang dapat mengakibatkan tidak beroperasinya rele arus lebih sisi penyulang untuk memutuskan arus gangguan hubung singkat yang terjadi dipenyulang, yaitu karena *accuracy limit* CT sebesar 4000 A, jadi jika terjadi arus gangguan hubung singkat dipenyulang yang melewati *accuracy limit* CT ( $< 4000$  A) maka rele arus lebih sisi penyulang tidak beroperasi karena CT tidak dapat mengukur besaran arus yang mengalir secara akurat sedangkan rele arus lebih sisi masukan 20 kV akan bekerja karena batas *accuracy limit* CT 10 kA s/d 20 kA dan akan memberi perintah PMT masukan 20 kV untuk beroperasi. Dari penjelasan diatas dapat diketahui rele arus lebih sisi penyulang (sebagai pengaman utama) yang dapat bekerja dengan sempurna saat terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa maupun antar fasa di sepanjang penyulang sebanyak 102 kali, sehingga dapat diketahui nilai tingkat kinerja rele arus lebih sisi penyulang yang diterapkan di lapangan saat ini sebesar:

$$\begin{aligned} \text{Tingkat kinerja rele arus lebih yang diterapkan di lapangan} &= \frac{102}{202} \times 100\% \\ &= 50,5\% \end{aligned}$$

Sedangkan untuk tingkat kinerja rele arus lebih menggunakan pola non kaskade jika diterapkan di Gardu Induk Sengkaling Malang dapat dilihat pada lampiran I.11. Ketika terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa maupun antar fasa dipenyulang yang merupakan gangguan di luar daerah instan maka rele arus lebih sisi penyulang akan bekerja sesuai dengan setelan invers, dengan waktu kerja untuk pemutusan gangguan melebihi setelan minimumnya, jadi ketika terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa maupun antar fasa di sepanjang penyulang, maka rele arus lebih sisi penyulang akan dapat memutuskan gangguan. Kejadian yang dapat mengakibatkan tidak beroperasinya rele arus lebih sisi penyulang yang diterapkan di lapangan, yaitu jika terjadi arus gangguan hubung singkat dipenyulang yang melewati *accuracy limit* CT (< 4000 A), dapat juga dirasakan oleh rele arus lebih menggunakan pola non kaskade. Jadi dapat diketahui rele arus lebih menggunakan pola non kaskade pada sisi penyulang yang dapat bekerja dengan sempurna saat terjadi arus gangguan hubung singkat tiga fasa maupun antar fasa di sepanjang penyulang sebanyak 189 kali, sehingga dapat diketahui nilai tingkat kinerja rele arus lebih menggunakan pola non kaskade pada sisi penyulang sebesar:

$$\begin{aligned} \text{Tingkat kinerja rele arus lebih menggunakan pola non kaskade} &= \frac{189}{202} \times 100\% \\ &= 93,6\% \end{aligned}$$