

**STUDI KINERJA RELAI ARUS LEBIH PADA TRANSFORMATOR DAYA
30 MVA GARDU INDUK SEDUDUK PUTIH PALEMBANG****Reksi Anjasmara*, Abdul Azis**, Perawati*, Irine Kartika Pebrianti*****Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Palembang, Jl. Jend. A. Yani Lrg. Gotong Royong 9/10 Ulu, Kota Palembang, Provinsi Sumatera Selatan, Indonesia****Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Palembang, Jl. Jend. A. Yani Lrg. Gotong Royong 9/10 Ulu, Kota Palembang, Provinsi Sumatera Selatan, Indonesia***Email: reksianjas2@gmail.com****Email: azis@univpgri-palembang.ac.id (Penulis Korespondensi)***ABSTRAK**

Relai Arus Lebih merupakan peralatan yang mensinyalir adanya arus lebih, baik yang disebabkan oleh adanya gangguan hubung singkat yang dapat merusak peralatan sistem tenaga listrik yang berada dalam wilayah proteksinya. Relai Arus Lebih digunakan hampir pada seluruh pola pengamanan sistem tenaga listrik, dan dapat juga digunakan sebagai pengaman utama ataupun pengaman cadangan. Penelitian dilaksanakan pada Penyulang Beo Transformator-1 30 MVA 70/20 kV Gardu Induk Seduduk Putih Palembang. Hasil penelitian adalah saat gangguan hubung singkat 3 fasa, waktu kerja relai *outgoing* lebih cepat dibandingkan dengan waktu kerja relai *incoming*, dengan selisih waktu 0,7568. Kemudian saat gangguan hubung singkat 2 fasa, waktu kerja relai *outgoing* lebih cepat dibandingkan dengan waktu kerja relai *incoming*, dengan selisih waktu 0,9223. Besar kecilnya selisih waktu kerja tersebut dipengaruhi jauh dekatnya lokasi gangguan. Dimana semakin jauh lokasi gangguan, maka akan semakin besar selisih waktu kerja relai *outgoing* dengan waktu kerja relai *incoming*, dan apabila semakin dekat lokasi gangguan maka semakin kecil selisih waktu kerja relai *outgoing* dengan waktu kerja relai *incoming*. Hal ini bertujuan memberi kesempatan pada relai *outgoing* untuk bekerja terlebih dahulu sebagai pengaman utama (*main protection*) apabila terjadi gangguan hubung singkat di penyulang, dan relai *incoming* akan bekerja sebagai pengaman cadangan (*back-up protection*) apabila relai *outgoing* tidak bekerja. Hasil perhitungan dengan data yang ada dilapangan masih dalam kondisi yang sesuai dengan perbedaannya tidak terlalu jauh, sehingga dapat disimpulkan bahwa secara keseluruhan kinerja Relai Arus Lebih yang ada dilapangan masih dalam kondisi baik.

Kata kunci : Kinerja, Relai Arus Lebih, Transformator, Penyulang

1. PENDAHULUAN

Transformator daya merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya/tenaga dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya (Dendi, Azis, & Perawati, 2022). Transformator memiliki sebuah inti dari besi berlapis pada kumparan primer dan kumparan sekunder. Gandengan magnet menghasilkan induksi-elektromagnet dapat menghasilkan tegangan bolak balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain yang diperlukan transformator (Azis, Nurdiana, & Nisa, 2018). Dalam proses penyaluran tenaga listrik terkadang terjadi kendala yang diakibatkan oleh adanya gangguan. Gangguan merupakan terjadinya suatu kerusakan dalam penyaluran tenaga listrik yang menyebabkan aliran arus listrik lebih besar dari aliran arus yang seharusnya. Secara umum, gangguan pada transformator dibagi menjadi dua jenis yaitu gangguan internal dan gangguan eksternal (Harsono, Berahim, & Hani, 2014).

Gangguan internal adalah gangguan yang berasal dari dalam transformator. Gangguan yang termasuk dalam gangguan internal adalah: terjadinya busur api (*arc*) yang kecil dan pemanasan lokal, gangguan pada sistem pendingin, arus sirkulasi pada transformator yang bekerja paralel. Sedangkan gangguan eksternal adalah gangguan yang berasal dari luar transformator dan dapat terjadi kapan saja dengan waktu yang tidak dapat ditentukan. Gangguan yang termasuk

dalam gangguan eksternal adalah: hubung singkat (*short circuit*), beban lebih (*overload*), gelombang surja (Panjaitan, Mujahidin, & Pramana, 2013).

Gangguan hubung singkat terjadi di luar transformator daya, misalnya gangguan hubung singkat di bus, gangguan hubung singkat di penyulang (*feeder*), dan gangguan hubung singkat di sistem yang merupakan sumber (*source*) bagi transformator daya tersebut. Gangguan hubung singkat adalah gangguan yang terjadi karena adanya kesalahan antara bagian-bagian yang bertegangan, isolasi yang tembus atau rusak karena tidak tahan terhadap tegangan lebih baik yang berasal dari dalam maupun yang berasal dari luar. Berdasarkan kesimetrisan gangguan hubung singkat diklasifikasikan menjadi dua kelompok, yaitu (Azis, & Febrianti, 2019):

1. Gangguan asimetris, merupakan gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang. Gangguan ini terdiri dari:
 - Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, yakni gangguan yang disebabkan karena salah satu fasa terhubung singkat ke tanah atau ground.
 - Gangguan hubung singkat dua fasa, yakni gangguan yang disebabkan karena fasa dan fasa antar kedua fasa terhubung singkat dan tidak terhubung ke tanah.
 - Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah, yakni gangguan yang terjadi ketika kedua fasa terhubung singkat ke tanah.
2. Gangguan simetris, merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Gangguan ini terdiri dari:
 - Gangguan hubung singkat tiga fasa, yakni gangguan yang terjadi ketika ketiga fasa saling terhubung singkat.
 - Gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah, yakni gangguan yang terjadi ketika ketiga fasa terhubung singkat ke tanah.

Pada gangguan hubung singkat, besar arus mencapai beberapa kali arus nominal dan harus diputuskan secepat mungkin. Gangguan hubung singkat apabila tidak segera diatasi, dapat mengakibatkan kerusakan pada transformator daya. Transformator daya merupakan unsur utama dari penyaluran tenaga listrik, maka diperlukan sistem proteksi sebagai pengaman dari gangguan (Ariningrum, Hani, & Pambudi, 2018). Sistem proteksi merupakan pengaman listrik pada sistem tenaga listrik yang terpasang pada sistem distribusi tenaga listrik, transformator tenaga, transmisi tenaga listrik dan generator listrik yang dipergunakan untuk mengamankan sistem tenaga listrik dari gangguan listrik atau beban lebih, dengan cara memisahkan bagian sistem tenaga listrik yang terganggu. Sehingga sistem kelistrikan yang tidak terganggu dapat terus bekerja mengalirkan arus ke beban atau konsumen (Azis, & Febrianti, 2019).

Sistem proteksi merupakan suatu cara untuk mencegah atau membatasi kerusakan peralatan terhadap gangguan, sehingga kelangsungan penyaluran tenaga listrik dapat dipertahankan. Salah satu peralatan yang berfungsi untuk memproteksi peralatan listrik terhadap arus lebih adalah Relai Arus Lebih atau *Over Current Relay* (OCR). Relai Arus Lebih merupakan peralatan yang mensinyalir adanya arus lebih, baik yang disebabkan oleh adanya gangguan hubung singkat atau *overload* yang dapat merusak peralatan sistem tenaga yang berada dalam wilayah proteksinya. Relai Arus Lebih ini digunakan hampir pada seluruh pola pengamanan sistem tenaga listrik, dan relai ini dapat digunakan sebagai pengaman utama ataupun pengaman cadangan (Rizal, & Azis, 2022).

Relai Arus Lebih bekerja berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengaman yang telah ditentukan dan dalam jangka waktu yang telah ditetapkan. Relai Arus Lebih akan *pick up* jika besar arus melebihi nilai *setting*. Pada proteksi transformator daya, Relai Arus Lebih digunakan sebagai tambahan bagi Relai Differensial untuk memberikan tanggapan terhadap gangguan luar. Relai ini digunakan untuk mengamankan peralatan terhadap gangguan hubung singkat antar fasa, hubung singkat satu fasa ke tanah dan beberapa hal dapat digunakan sebagai pengaman beban lebih (PT PLN P3B Jawa Bali, 2005).

Pada transformator daya, Relai Arus Lebih hanya berfungsi sebagai pengaman cadangan (*back up protection*) untuk gangguan eksternal atau sebagai *back up* bagi *outgoing feeder*. Relai

Arus Lebih dapat dipasang pada sisi tegangan tinggi saja atau pada sisi tegangan menengah saja atau bisa juga pada sisi tegangan tinggi dan tegangan menengah sekaligus. Selanjutnya Relai Arus Lebih dapat menjatuhkan PMT pada sisi dimana relai terpasang atau dapat menjatuhkan PMT di kedua sisi transformator tenaga. Relai Arus Lebih jenis *definite time* ataupun *inverse time* dapat dipakai untuk proteksi transformator terhadap arus lebih (Harsono, Berahim, & Hani, 2014). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kinerja Relai Arus Lebih pada Transformator-1 30 MVA Gardu Induk Seduduk Putih Palembang Penyulang Beo pada saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi Penelitian

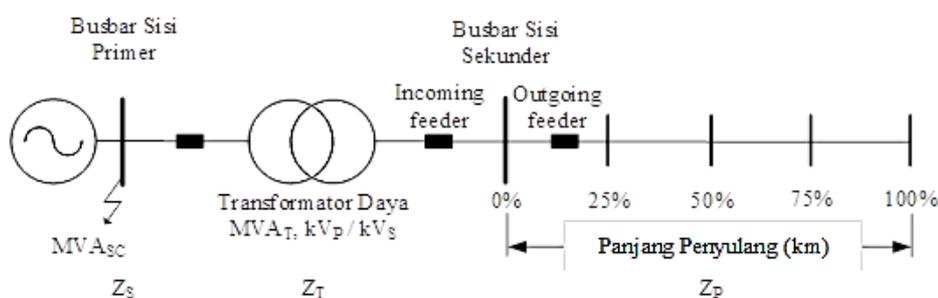
Lokasi penelitian adalah PT PLN (Persero) Gardu Induk Seduduk Putih Palembang, yang beralamat di Jalan Seduduk Putih, Kelurahan 8 Ilir, Kecamatan Ilir Timur III, Palembang 30114. Objek penelitian adalah Relai Arus Lebih pada Penyulang Beo Transformator-1 30 MVA 70/20 kV Gardu Induk Seduduk Putih Palembang. Pelaksanaan penelitian dimulai dari tanggal 1 Juli 2020 sampai dengan tanggal 30 Juli 2020.



Gambar 1. Lokasi penelitian

2.2. Metode yang Digunakan

Untuk menganalisis kinerja Relai Arus Lebih pada Transformator-1 30 MVA Gardu Induk Seduduk Putih Palembang pada saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa, diasumsikan lokasi gangguan hubung singkat terjadi pada jarak 0%, 25%, 50%, 75%, 100% dari panjang penyulang (Kadarisman, & Sarimun, 2012).



Gambar 2. Representasi Penyulang

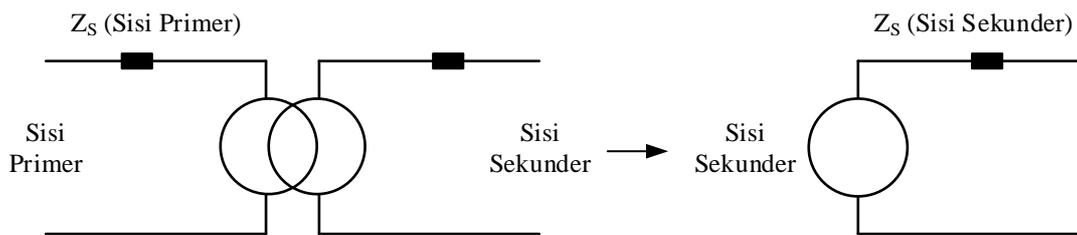
Data yang digunakan dalam penelitian adalah data primer dan dan sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi pada objek penelitian, yang terdiri dari: data Transformator-1 30 MVA 70/20 kV, Penyulang Beo dan Relai Arus Lebih. Sedangkan data sekunder yang akan digunakan adalah *Single Line Diagram* Gardu Induk Seduduk Putih dan Penyulang Beo. Selanjutnya data yang sudah didapatkan kemudian dianalisa dan selanjutnya diproses agar dapat dipergunakan dalam tahapan penelitian. Tahapan dalam penelitian adalah:

2.2.1. Impedansi Sumber

Untuk menghitung impedansi sumber pada busbar sisi sekunder, maka harus dihitung terlebih dahulu impedansi sumber pada busbar sisi primer. Karena resistansi pada sumber diabaikan, maka impedansi sumber urutan positif dan urutan negatif pada sisi primer adalah (Kersting, 2012):

$$\begin{aligned}
 Z_{1S}(\text{sisi primer}) &= Z_{2S}(\text{sisi primer}) = jX_{1S}(\text{sisi primer}) \\
 &= jX_{2S}(\text{sisi primer}) = j \frac{kV_{L-L}^2(\text{sisi primer})}{MVA_{SC}} \quad \dots\dots\dots \text{pers. 1}
 \end{aligned}$$

Arus gangguan hubung singkat pada busbar sisi sekunder diperoleh dengan cara mengkonversikan terlebih dahulu impedansi sumber pada busbar sisi primer ke sisi sekunder (Kadarisman, & Sarimun, 2012).



Gambar 3. Konversi Impedansi Sumber Primer ke Sekunder (Kadarisman, & Sarimun, 2012)

Kemudian mengkonversikan impedansi yang terletak pada busbar sisi primer ke sisi sekunder, untuk mendapatkan impedansi sumber urutan positif dan urutan negatif pada sisi sekunder dengan cara sebagai berikut (Kersting, 2012):

$$\begin{aligned}
 Z_{1S}(\text{sisi sekunder}) &= Z_{2S}(\text{sisi sekunder}) \\
 &= jX_{1S}(\text{sisi sekunder}) = jX_{2S}(\text{sisi sekunder}) \\
 &= \frac{kV_{L-L}^2(\text{sisi sekunder})}{kV_{L-L}^2(\text{sisi primer})} \times jX_{1S}(\text{sisi primer}) \quad \dots\dots\dots \text{pers. 2}
 \end{aligned}$$

Keterangan:

- $Z_{1S}(\text{sisi primer})$ = Impedansi sumber urutan positif sisi primer (Ω)
- $jX_{1S}(\text{sisi primer})$ = Reaktansi sumber urutan positif sisi primer (Ω)
- $Z_{2S}(\text{sisi primer})$ = Impedansi sumber urutan negatif sisi primer (Ω)
- $jX_{2S}(\text{sisi primer})$ = Reaktansi sumber urutan negatif sisi primer (Ω)
- $Z_{1S}(\text{sisi sekunder})$ = Impedansi sumber urutan positif sisi sekunder (Ω)
- $jX_{1S}(\text{sisi sekunder})$ = Reaktansi sumber urutan positif sisi sekunder (Ω)
- $Z_{2S}(\text{sisi sekunder})$ = Impedansi sumber urutan negatif sisi sekunder (Ω)
- $jX_{2S}(\text{sisi sekunder})$ = Reaktansi sumber urutan negatif sisi sekunder (Ω)
- $kV_{L-L}(\text{sisi primer})$ = Tegangan fasa ke fasa sisi primer (kV)
- $kV_{L-L}(\text{sisi sekunder})$ = Tegangan fasa ke fasa sisi sekunder (kV)

MVA_{SC} = Daya hubung singkat busbar sisi primer (MVA)

2.2.2. Impedansi Transformator

Untuk menghitung impedansi transformator urutan positif, urutan negatif dan urutan nol harus dihitung terlebih dahulu impedansi transformator pada kondisi 100%. Perhitungan impedansi transformator yang diambil hanya reaktansi, sedangkan resistansi diabaikan karena sangat kecil. Maka impedansi transformator pada kondisi 100% sisi sekunder adalah (Kadarisman, & Sarimun, 2012):

$$Z_T(100\%) = jX_T(100\%) = j \frac{kV_{L-L}^2(\text{sisi sekunder})}{MVA_T} \dots\dots\dots \text{pers. 3}$$

Setelah diperoleh impedansi transformator pada kondisi 100%, maka impedansi transformator urutan positif dan urutan negatif dapat dihitung dengan cara sebagai berikut (Kadarisman, & Sarimun, 2012):

$$Z_{1T} = Z_{2T} = jX_{1T} = jX_{2T} = Z_T(\%) \times jX_T(100\%) \dots\dots\dots \text{pers. 4}$$

Pada transformator dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta (Δ) didalamnya, maka untuk menghitung besarnya impedansi transformator urutan nol berkisar antara 9 s/d $14 \times jX_{1T}$, dan diambil nilai (Kadarisman, & Sarimun, 2012):

$$Z_{0T} = jX_{0T} = 10 \times jX_{1T} \dots\dots\dots \text{pers. 5}$$

Keterangan:

- $Z_T(100\%)$ = Impedansi transformator pada kondisi 100% (Ω)
- $jX_T(100\%)$ = Reaktansi transformator pada kondisi 100% (Ω)
- $Z_T(\%)$ = Impedansi transformator (%)
- MVA_T = Kapasitas daya transformator (MVA)
- Z_{1T} = Impedansi transformator urutan positif (Ω)
- jX_{1T} = Reaktansi transformator urutan positif (Ω)
- Z_{2T} = Impedansi transformator urutan negatif (Ω)
- jX_{2T} = Reaktansi transformator urutan negatif (Ω)
- Z_{0T} = Impedansi transformator urutan nol (Ω)
- jX_{0T} = Reaktansi transformator urutan nol (Ω)

2.2.3. Impedansi Penyulang

Impedansi penyulang merupakan impedansi pada penghantar suatu penyulang yang besar impedansinya dipengaruhi oleh jenis, panjang, dan luas penampang. Impedansi penyulang urutan positif dan urutan negatif dihitung dengan cara sebagai berikut (Azis, & Febrianti, 2019):

$$Z_{1P} = Z_{2P} = Z_{1P} \times l_P = (R_{1P} + jX_{1P}) \times l_P \dots\dots\dots \text{pers. 6}$$

Selanjutnya impedansi penyulang urutan nol dihitung dengan cara sebagai berikut (Azis, & Febrianti, 2019):

$$Z_{0P} = Z_{0P} \times l_P = (R_{0P} + jX_{0P}) \times l_P \dots\dots\dots \text{pers. 7}$$

Keterangan:

- Z_{1P} = Impedansi penyulang urutan positif (Ω)
- R_{1P} = Resistansi penyulang urutan positif (Ω)
- jX_{1P} = Reaktansi penyulang urutan positif (Ω)
- Z_{2P} = Impedansi penyulang urutan negatif (Ω)
- Z_{0P} = Impedansi penyulang urutan nol (Ω)
- R_{0P} = Resistansi penyulang urutan nol (Ω)

jX_{0P} = Reaktansi penyulang urutan nol (Ω)
 l_p = Panjang penyulang (Ω)

Dari gambar 2, apabila diasumsikan lokasi gangguan hubung singkat terjadi pada 0%, 25%, 50%, 75%, 100% dari panjang penyulang, maka impedansi penyulang dihitung sebagaimana terlihat pada Tabel 1 (Kadarisman, & Sarimun, 2012).

Tabel 1
Impedansi Penyulang Berdasarkan Lokasi Gangguan

Lokasi Gangguan (%)	$Z_{1P} = Z_{2P}$ (Ω)	Z_{0P} (Ω)
0%	$Z_{1P}(0\%) = 0\% \times Z_{1P}$	$Z_{0P}(0\%) = 0\% \times Z_{0P}$
25%	$Z_{1P}(25\%) = 25\% \times Z_{1P}$	$Z_{0P}(25\%) = 25\% \times Z_{0P}$
50%	$Z_{1P}(50\%) = 50\% \times Z_{1P}$	$Z_{0P}(50\%) = 50\% \times Z_{0P}$
75%	$Z_{1P}(75\%) = 75\% \times Z_{1P}$	$Z_{0P}(75\%) = 75\% \times Z_{0P}$
100%	$Z_{1P}(100\%) = 100\% \times Z_{1P}$	$Z_{0P}(100\%) = 100\% \times Z_{0P}$

2.2.4. Impedansi Ekuivalen Jaringan

Impedansi ekuivalen jaringan merupakan impedansi yang terbentuk dari sumber sampai ke lokasi gangguan yang tersambung seri. Impedansi ekuivalen jaringan urutan positif dan urutan negatif, terbentuk dari impedansi sumber, impedansi transformator, dan impedansi penyulang. Impedansi ekuivalen jaringan urutan positif dan urutan negatif dihitung dengan cara sebagai berikut (Rizal, & Azis, 2022):

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = Z_{1S}(\text{sisi sekunder}) + Z_{1T} + Z_{1P} = jX_{1S}(\text{sisi sekunder}) + jX_{1T} + (R_{1P} + jX_{1P}) \dots\dots\dots \text{pers. 8}$$

Sedangkan impedansi ekuivalen jaringan urutan nol terbentuk dari impedansi transformator yang netralnya ditanahkan, dan impedansi penyulang. Impedansi ekuivalen jaringan urutan nol dihitung dengan cara sebagai berikut (Rizal, & Azis, 2022):

$$Z_{0eq} = Z_{0T} + 3R_n + Z_{0P} = jX_{0T} + 3R_n + (R_{0P} + jX_{0P}) \dots\dots\dots \text{pers. 9}$$

Keterangan:

- Z_{1eq} = Impedansi ekuivalen jaringan urutan positif (Ω)
- Z_{2eq} = Impedansi ekuivalen jaringan urutan negatif (Ω)
- Z_{0eq} = Impedansi ekuivalen jaringan urutan nol (Ω)
- R_n = Tahanan NGR (*Netral Grounding Resistor*) (Ω)

Dari gambar 2, apabila diasumsikan lokasi gangguan hubung singkat terjadi pada 0%, 25%, 50%, 75%, 100% dari panjang penyulang, maka impedansi ekuivalen jaringan dihitung sebagaimana terlihat pada Tabel 2 (Kadarisman, & Sarimun, 2012):

Tabel 2
Impedansi Ekuivalen Jaringan Berdasarkan Lokasi Gangguan

Lokasi Gangguan (%)	$Z_{1eq} = Z_{2eq}$ (Ω)	Z_{0P} (Ω)
0%	$Z_{1eq}(0\%) = jX_{1S} + jX_{1T} + Z_{1P}(0\%)$	$Z_{0eq}(0\%) = jX_{0T} + 3R_n + Z_{0P}(0\%)$
25%	$Z_{1eq}(25\%) = jX_{1S} + jX_{1T} + Z_{1P}(25\%)$	$Z_{0eq}(25\%) = jX_{0T} + 3R_n + Z_{0P}(25\%)$
50%	$Z_{1eq}(50\%) = jX_{1S} + jX_{1T} + Z_{1P}(50\%)$	$Z_{0eq}(50\%) = jX_{0T} + 3R_n + Z_{0P}(50\%)$
75%	$Z_{1eq}(75\%) = jX_{1S} + jX_{1T} + Z_{1P}(75\%)$	$Z_{0eq}(75\%) = jX_{0T} + 3R_n + Z_{0P}(75\%)$
100%	$Z_{1eq}(100\%) = jX_{1S} + jX_{1T} + Z_{1P}(100\%)$	$Z_{0eq}(100\%) = jX_{0T} + 3R_n + Z_{0P}(100\%)$

2.2.5. Arus Gangguan Hubung Singkat

Perhitungan arus gangguan hubung singkat merupakan analisa suatu sistem tenaga listrik untuk memperoleh nilai besaran-besaran listrik yang diakibatkan gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa, atau satu fasa ke tanah. Pada penelitian ini hanya menganalisis kinerja Relai Arus Lebih pada saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa.

1. Arus gangguan hubung singkat 3 fasa

Gangguan hubung singkat 3 fasa adalah kondisi dimana ke-3 fasa terhubung singkat, namun arus dan tegangan pada antar fasa masih seimbang. Hal ini dikarenakan gangguan 3 fasa merupakan gangguan simetris, sehingga dapat dianalisis menggunakan urutan positif saja. Arus gangguan hubung singkat 3 fasa dihitung dengan cara sebagai berikut (Kadarisman, & Sarimun, 2012):

$$I_{hs\ 3\ fasa} = \frac{V_{L-N}}{Z_{1\ eq}} = \frac{V_{L-L}/\sqrt{3}}{Z_{1\ eq}} \quad \dots\dots\dots \text{pers. 10}$$

2. Arus gangguan hubung singkat 2 fasa

Sedangkan gangguan hubung singkat 2 fasa atau yang biasa disebut hubung singkat fasa ke fasa adalah kondisi dimana antara fasa ke fasa saling terhubung singkat. Pada gangguan hubung singkat 2 fasa, arus saluran tidak mengandung komponen urutan nol dikarenakan tidak ada gangguan yang terhubung ke tanah. Arus gangguan hubung singkat 2 fasa dihitung dengan cara sebagai berikut (Kadarisman, & Sarimun, 2012):

$$I_{hs\ 2\ fasa} = \frac{V_{L-L}}{Z_{1\ eq} + Z_{2\ eq}} = \frac{V_{L-L}}{2 \times Z_{1\ eq}} \quad \dots\dots\dots \text{pers. 11}$$

Keterangan:

$I_{hs\ 3\ fasa}$ = Arus gangguan hubung singkat 3 fasa (A)

$I_{hs\ 2\ fasa}$ = Arus gangguan hubung singkat 2 fasa (A)

Dari gambar 2, apabila diasumsikan lokasi gangguan hubung singkat terjadi pada 0%, 25%, 50%, 75%, 100% dari panjang penyulang, maka arus gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa dihitung pada Tabel 3 (Kadarisman, & Sarimun, 2012):

Tabel 3
Arus Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa dan 2 Fasa Berdasarkan Lokasi Gangguan

Lokasi Gangguan (%)	$I_{hs\ 3\ fasa}$ (A)	$I_{hs\ 2\ fasa}$ (A)
0%	$I_{hs\ 3\ fasa}(0\%) = \frac{V_{L-N}}{Z_{1\ eq}(0\%)}$	$I_{hs\ 2\ fasa}(0\%) = \frac{V_{L-L}}{2 \times Z_{1\ eq}(0\%)}$
25%	$I_{hs\ 3\ fasa}(25\%) = \frac{V_{L-N}}{Z_{1\ eq}(25\%)}$	$I_{hs\ 2\ fasa}(25\%) = \frac{V_{L-L}}{2 \times Z_{1\ eq}(25\%)}$
50%	$I_{hs\ 3\ fasa}(50\%) = \frac{V_{L-N}}{Z_{1\ eq}(50\%)}$	$I_{hs\ 2\ fasa}(50\%) = \frac{V_{L-L}}{2 \times Z_{1\ eq}(50\%)}$
75%	$I_{hs\ 3\ fasa}(75\%) = \frac{V_{L-N}}{Z_{1\ eq}(75\%)}$	$I_{hs\ 2\ fasa}(75\%) = \frac{V_{L-L}}{2 \times Z_{1\ eq}(75\%)}$
100%	$I_{hs\ 3\ fasa}(100\%) = \frac{V_{L-N}}{Z_{1\ eq}(100\%)}$	$I_{hs\ 2\ fasa}(100\%) = \frac{V_{L-L}}{2 \times Z_{1\ eq}(100\%)}$

2.2.6. Setelan Relai Arus Lebih pada Sisi *Outgoing* Penyulang

1. Setelan Arus

Setelan Relai Arus Lebih pada sisi *outgoing* penyulang dihitung berdasarkan arus beban maksimum. Untuk relai *inverse* diset 1,05 sampai dengan $1,1 \times I_{maks}$. Persyaratan lain yang harus dipenuhi, yaitu untuk penyetelan waktu minimum dari Relai Arus Lebih terutama di penyulang tidak lebih kecil dari 0,3 detik. Keputusan ini diambil agar relai tidak sampai trip lagi akibat adanya arus *inrush* dari transformator distribusi yang sudah tersambung di

jaringan distribusi, pada saat PMT penyulang tersebut dimasukan. Setelan arus pada sisi primer adalah (Azis, & Febrianti, 2019):

$$I_{set} (primer) = 1,05 \times I_{beban} \quad \dots\dots\dots \text{pers. 12}$$

Nilai arus tersebut merupakan nilai setelan pada sisi primer, sedangkan nilai yang akan di setel pada Relai Arus Lebih adalah nilai sekundernya. Setelan arus pada sisi sekunder adalah (Azis, & Febrianti, 2019):

$$I_{set} (sekunder) = I_{set} (primer) \times \frac{1}{Ratio CT} \quad \dots\dots\dots \text{pers. 13}$$

2. Setelan Waktu Kerja atau *Time Multiplier Setting* (TMS)

Arus gangguan yang dipilih untuk menentukan besarnya setelan waktu kerja (TMS) Relai Arus Lebih yang terpasang pada sisi *outgoing* penyulang adalah arus gangguan hubung singkat tiga fasa di 0% panjang penyulang. Waktu kerja paling hilir yang ditetapkan $t = 0,3$ detik. Keputusan ini diambil agar relai tidak sampai trip lagi akibat adanya arus *inrush* dari transformator-transformator distribusi yang sudah tersambung di jaringan distribusi, pada saat PMT penyulang tersebut dimasukan, maka setelan waktu kerja (TMS) adalah (Azis, & Febrianti, 2019):

$$TMS = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{3 \text{ fase}(0\%)}}{I_{set} (primer)} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} \quad \dots\dots\dots \text{pers. 14}$$

Keterangan:

- $I_{set} (primer)$ = Nilai setelan arus primer relai (A)
- $I_{set} (sekunder)$ = Nilai setelan arus sekunder relai (A)
- $Ratio CT$ = Perbandingan transformator arus yang terpasang (A)
- t = Waktu kerja
- TMS = Setelan waktu kerja
- I_{fault} = Arus gangguan hubung singkat
- I_{set} = Setelan arus (A)

2.2.7. Setelan Relai Arus Lebih pada Sisi *Incoming* Penyulang

1. Setelan Arus

Untuk menentukan setelan Relai Arus Lebih pada sisi *incoming* penyulang diperlukan nilai arus nominal transformator. Arus nominal transformator pada sisi sekunder dihitung dengan cara sebagai berikut (Azis, & Febrianti, 2019):

$$I_{nominal} (sekunder) = \frac{kVA_T}{\sqrt{3} V_{L-L}} \quad \dots\dots\dots \text{pers. 15}$$

Setelan arus pada sisi primer adalah:

$$I_{set} (primer) = 1,05 \times I_{nominal} (sekunder) \quad \dots\dots\dots \text{pers. 16}$$

Maka setelan arus pada sisi sekunder adalah:

$$I_{set} (sekunder) = I_{set} (primer) \times \frac{1}{Ratio CT} \quad \dots\dots\dots \text{pers. 17}$$

2. Setelan Waktu Kerja atau *Time Multiplier Setting* (TMS)

Arus gangguan yang dipilih untuk menentukan besarnya setelan waktu kerja (TMS) Relai Arus Lebih pada sisi *incoming* penyulang adalah arus gangguan hubung singkat 3 fasa di 0% panjang penyulang. Waktu kerja *incoming* didapat dengan waktu kerja relai disisi hilir + 0,4 detik, maka $t_{incoming} = (0,3 + 0,4) = 0,7$ detik. Setelah diketahui nilai ketetapan $t = 0,7$ detik, maka nilai setelan waktu kerja (TMS) adalah (Azis, & Febrianti, 2019):

$$TMS = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_3 f_{ase}(0\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} \quad \dots\dots\dots \text{pers. 18}$$

Dari gambar 2, apabila diasumsikan lokasi gangguan hubung singkat terjadi pada 0%, 25%, 50%, 75%, 100% dari panjang penyulang, maka waktu kerja Relai Arus Lebih pada saat gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa dihitung sebagaimana terlihat pada Tabel 4 dan Tabel 5 (Kadarisman, & Sarimun, 2012).

Tabel 4

Waktu Kerja Relai Arus Lebih Untuk Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Berdasarkan Lokasi Gangguan

Lokasi Gangguan (%)	Relai <i>Incoming</i>	Relai <i>Outgoing</i>
0%	$t(0\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_3 f_{asa}(0\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$	$t(0\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_3 f_{asa}(0\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$
25%	$t(25\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_3 f_{asa}(25\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$	$t(25\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_3 f_{asa}(25\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$
50%	$t(50\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_3 f_{asa}(50\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$	$t(50\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_3 f_{asa}(50\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$
75%	$t(75\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_3 f_{asa}(75\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$	$t(75\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_3 f_{asa}(75\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$
100%	$t(100\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_3 f_{asa}(100\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$	$t(100\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_3 f_{asa}(100\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$

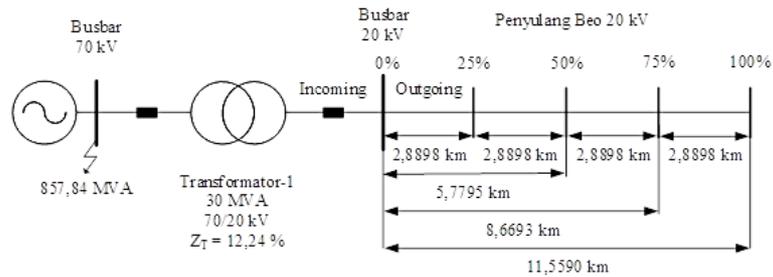
Tabel 5

Waktu Kerja Relai Arus Lebih Untuk Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa Berdasarkan Lokasi Gangguan

Lokasi Gangguan (%)	Relai <i>Incoming</i>	Relai <i>Outgoing</i>
0%	$t(0\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_2 f_{asa}(0\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$	$t(0\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_2 f_{asa}(0\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$
25%	$t(25\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_2 f_{asa}(25\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$	$t(25\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_2 f_{asa}(25\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$
50%	$t(50\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_2 f_{asa}(50\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$	$t(50\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_2 f_{asa}(50\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$
75%	$t(75\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_2 f_{asa}(75\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$	$t(75\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_2 f_{asa}(75\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$
100%	$t(100\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_2 f_{asa}(100\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$	$t(100\%) = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_2 f_{asa}(100\%)}{I_{set}(primer)} \right)^{0,02} - 1}$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada PT PLN (Persero) Gardu Induk Seduduk Putih Palembang terdapat Transformator-1 dengan daya sebesar 30 MVA, tegangan 70 kV/20 kV dengan impedansi = 12,24%. Transformator-1 mengisi tegangan ke busbar 20 kV dan terdapat Penyulang Beo 20 kV dengan panjang 11,5590 km.



Gambar 4. Representasi Penyulang Beo

3.1. Data Penelitian

3.1.1. Data Transformator-1

– Merk	: Pauwels
– Serial Number	: 3011130050
– Tahun	: 2014
– Standar	: IEC 60076
– Rated Power (MVA_T)	: 30 MVA
– Cooling	: ONAN/ONAF
– Fasa-Frekuensi	: 3-50 Hz
– Tegangan Primer (kV_{L-L} 70kV)	: 70 kV
– Tegangan Sekunder (kV_{L-L} 20kV)	: 20 kV
– Arus Primer ($I_{nominal}$ 70 kV)	: 247,44 A
– Arus Sekunder ($I_{nominal}$ 20 kV)	: 866,03 A
– Impedansi (Z_T)	: 12,24%
– Vektor Grup	: YNyn0
– NGR (R_n)	: 40 Ω

3.1.2. Data Penyulang Beo

– Jenis Penghantar	: AAAC
– Luas Penampang	: 240 mm ²
– Panjang Penyulang Beo (l_p)	: 11,5590 km
– Impedansi Urutan Positif (Z_{1P})	: 0,1344 + j 0,3158 Ω /km
– Impedansi Urutan Negatif (Z_{2P})	: 0,1344 + j 0,3158 Ω /km
– Impedansi Urutan Nol (Z_{0P})	: 0,2824 + j 1,6034 Ω /km

3.1.3. Data Relai Arus Lebih

1. Sisi *Outgoing* Penyulang Beo

– Merk	: Schneider
– Type	: Micom P123
– Karakteristik	: Standar Inverse
– $I_{setting}$: 300 A
– Ratio CT	: 300/5 A
– TMS	: 0,125
– t	: 0,3
2. Sisi *Incoming* Penyulang Beo

– Merk	: Schneider
– Type	: Micom P122
– Karakteristik	: Standar Inverse
– $I_{setting}$: 600 A
– Ratio CT	: 600/5 A
– TMS	: 0,15
– t	: 0,7

3.2. Hasil

3.2.1. Impedansi Sumber

Daya hubung singkat pada busbar 70 kV Gardu Induk Seduduk Putih Palembang adalah 857,84 MVA, maka impedansi sumber urutan positif dan urutan negatif pada sisi 70 kV adalah:

$$Z_{1S}(70\text{ kV}) = Z_{2S}(70\text{ kV}) = jX_{1S}(70\text{ kV}) = j \frac{kV_{L-L}^2(70\text{ kV})}{MVA_{SC}} = j \frac{70^2}{857,84} = j 5,7120 \Omega$$

Maka impedansi sumber urutan positif dan urutan negatif pada sisi 20 kV dapat dihitung, yaitu:

$$\begin{aligned} Z_{1S}(20\text{ kV}) = Z_{2S}(20\text{ kV}) = jX_{1S}(20\text{ kV}) &= \frac{kV_{L-L}^2(20\text{ kV})}{kV_{L-L}^2(70\text{ kV})} \times j X_{1S}(70\text{ kV}) \\ &= \frac{20^2}{70^2} \times j 5,7120 = j 0,4663 \Omega \end{aligned}$$

3.2.2. Impedansi Transformator-1

Agar dapat menghitung impedansi Transformator-1 urutan positif, negatif dan urutan nol, maka harus dihitung terlebih dahulu impedansi dasar transformator pada 100%, yaitu:

$$Z_T(100\%) = jX_T(100\%) = j \frac{kV_{L-L}^2(20\text{ kV})}{MVA_T} = j \frac{20^2}{30} = j 13,3333 \Omega$$

Impedansi Transformator-1 adalah 12,24 %. Maka nilai impedansi transformator urutan positif dan urutan negatif dapat dihitung, yaitu:

$$Z_{1T} = Z_{2T} = jX_{1T} = jX_{2T} = Z_T(\%) \times jX_T(100\%) = 0,1224 \times j 13,3333 = j 1,6320 \Omega$$

3.2.3. Impedansi Penyulang Beo

Penyulang Beo menggunakan jenis penghantar AAAC 240 mm² dengan panjang penyulang 11,559 km. Impedansi Penyulang Beo urutan positif dan urutan negatif untuk lokasi gangguan 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang Penyulang Beo, sebagaimana terlihat pada Tabel 6.

Tabel 6

Hasil Perhitungan Impedansi Penyulang Beo Berdasarkan Lokasi Gangguan

Lokasi		$Z_{1P} = Z_{2P} (\Omega)$
Gangguan (%)	(km)	
0%	0,0000	$0,0000 \times (1,5535 + j 3,6503) = 0,0000 + j 0,0000 = 0,0000 \angle 0,0000^\circ$
25%	2,8898	$2,8898 \times (1,5535 + j 3,6503) = 0,3884 + j 0,9126 = 0,9918 \angle 66,9461^\circ$
50%	5,7795	$5,7795 \times (1,5535 + j 3,6503) = 0,7768 + j 1,8252 = 1,9836 \angle 66,9461^\circ$
75%	8,6693	$8,6693 \times (1,5535 + j 3,6503) = 1,1651 + j 2,7377 = 2,9754 \angle 66,9461^\circ$
100%	11,5590	$11,5590 \times (1,5535 + j 3,6503) = 1,5535 + j 3,6503 = 3,9672 \angle 66,9461^\circ$

Sumber: Hasil Perhitungan

3.2.4. Impedansi Ekuivalen Penyulang Beo

Impedansi ekuivalen Penyulang Beo terbentuk dari sumber sampai ke lokasi gangguan yang tersambung seri. Impedansi ekuivalen Penyulang Beo urutan positif dan urutan negatif adalah:

$$\begin{aligned} Z_{1eq} = Z_{2eq} &= jX_{1S}(20\text{ kV}) + jX_{1T} + Z_{1P} \\ &= j 0,4663 + j 1,6320 + Z_{1P} = j 2,0983 + Z_{1P} \end{aligned}$$

Maka impedansi ekuivalen Penyulang Beo urutan positif dan urutan negatif untuk lokasi gangguan 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang Penyulang Beo, sebagaimana terlihat pada Tabel 7.

Tabel 7

Hasil Perhitungan Impedansi Ekuivalen Penyulang Beo Berdasarkan Lokasi Gangguan

Lokasi Gangguan		$Z_{1eq} = Z_{2eq} (\Omega)$
(%)	(km)	
0%	0,0000	$j 2,0983 + 0,0000 + j 0,0000 = 0,0000 + j 2,0983 = 2,0983 \angle 0,0000^\circ$
25%	2,8898	$j 2,0983 + 0,3884 + j 0,9126 = 0,3884 + j 3,0109 = 3,0358 \angle 82,6498^\circ$
50%	5,7795	$j 2,0983 + 0,7768 + j 1,8252 = 0,7768 + j 3,9235 = 3,9996 \angle 78,8014^\circ$
75%	8,6693	$j 2,0983 + 1,1651 + j 2,7377 = 1,1651 + j 4,8360 = 4,9744 \angle 76,4539^\circ$
100%	11,5590	$j 2,0983 + 1,5535 + j 3,6503 = 1,5535 + j 5,7486 = 5,9548 \angle 74,8774^\circ$

Sumber: Hasil Perhitungan

3.2.5. Arus Gangguan Hubung Singkat Penyulang Beo

Arus gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa, untuk lokasi gangguan 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang Penyulang Beo, sebagaimana terlihat pada Tabel 8.

Tabel 8

Hasil Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa dan 2 Fasa pada Penyulang Beo Berdasarkan Lokasi Gangguan

Lokasi Gangguan		$I_{hs\ 3\ fasa} (A)$	$I_{hs\ 2\ fasa} (A)$
(%)	(km)		
0%	0,0000	5.503,0663 \angle 0,0000°	4.765,7952 \angle 0,0000°
25%	2,8898	3.803,5935 \angle - 82,6498°	3.294,0086 \angle - 82,6498°
50%	5,7795	2.887,0367 \angle - 78,8014°	2.500,2471 \angle - 78,8014°
75%	8,6693	2.321,2792 \angle - 76,4539°	2.010,2868 \angle - 76,4539°
100%	11,5590	1.939,0974 \angle - 74,8774°	1.679,3076 \angle - 74,8774°

Sumber: Hasil Perhitungan

3.2.6. Setelan Relai Arus Lebih pada Sisi *Outgoing* Penyulang Beo

1. Setelan Arus

$$I_{beban} = 286,40 A$$

$$Rasio\ CT = 300/5 A$$

Setelan arus pada sisi primer adalah:

$$I_{set}\ (primer) = 1,05 \times I_{beban} = 1,05 \times 286,40 = 300,72 A$$

Maka setelan arus pada sisi sekunder adalah:

$$I_{set}\ (sekunder) = I_{set}\ (primer) \times \frac{1}{Ratio\ CT} = 300,72 \times \frac{1}{300/5} = 5,0120 A$$

2. Setelan Waktu

Setelan waktu (TMS) adalah:

$$TMS = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{3\ fasa}(0\%)}{I_{set}\ (primer)} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = \frac{0,3 \times \left(\left(\frac{5.503,0663}{300,72} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = 0,1283$$

3.2.7. Setelan Relai Arus Lebih pada Sisi *Incoming* Penyulang Beo

1. Setelan Arus

$$Rasio\ CT = 600/5 A$$

Arus nominal transformator pada sisi 20 kV adalah:

$$I_{nominal}\ (20\ kV) = \frac{kVA_T}{\sqrt{3} V_{L-L}} = \frac{30.000}{\sqrt{3} \times 20} = 866,0254 A$$

Setelan arus pada sisi primer adalah:

$$I_{set}\ (primer) = 1,05 \times I_{nominal}\ (20\ kV) = 1,05 \times 866,0254 = 909,3267 A$$

Maka setelan arus pada sisi sekunder adalah:

$$I_{set} (sekunder) = I_{set} (primer) \times \frac{1}{Ratio CT} = 909,3267 \times \frac{1}{600/5} = 7,5777 A$$

2. Setelan Waktu

Setelan waktu (*TMS*) adalah:

$$TMS = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_3 fase(0\%)}{I_{set} (primer)} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = \frac{0,3 \times \left(\left(\frac{5.503,0663}{909,3267} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = 0,1833 A$$

Maka waktu kerja Relai Arus Lebih saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa untuk lokasi gangguan 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang Penyulang Beo, adalah:

Tabel 9

Hasil Perhitungan Waktu Kerja Relai Arus Lebih pada Penyulang Beo saat terjadi Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Berdasarkan Lokasi Gangguan

Lokasi Gangguan		Relai <i>Outgoing</i>	Relai <i>Incoming</i>
(%)	(km)		
0%	0,0000	0,7000	0,3000
25%	2,8898	0,8840	0,3450
50%	5,7795	1,0980	0,3881
75%	8,6693	1,3565	0,4304
100%	11,5590	1,6817	0,4728

Sumber: Hasil Perhitungan

dan waktu kerja Relai Arus Lebih pada gangguan hubung singkat 2 fasa untuk lokasi gangguan 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang penyulang, sebagaimana terlihat pada Tabel 10.

Tabel 10

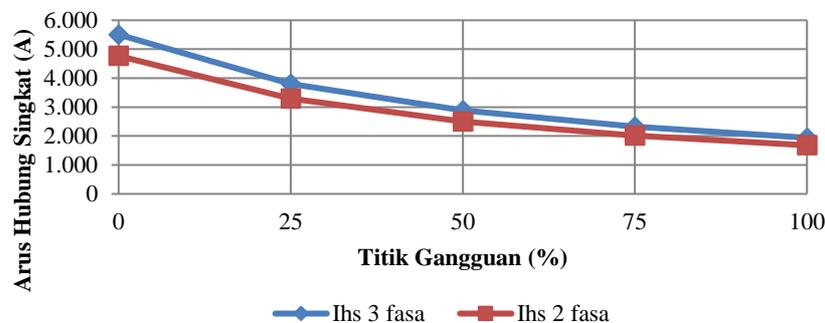
Hasil Perhitungan Waktu Kerja Relai Arus Lebih pada Penyulang Beo saat Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa Berdasarkan Lokasi Gangguan

Lokasi Gangguan		Relai <i>Outgoing</i>	Relai <i>Incoming</i>
(%)	(km)		
0%	0,0000	0,7619	0,3161
25%	2,8898	0,9842	0,3662
50%	5,7795	1,2559	0,4150
75%	8,6693	1,6047	0,4637
100%	11,5590	2,0791	0,5131

Sumber: Hasil Perhitungan

3.3. Pembahasan

3.3.1. Arus Gangguan Hubung Singkat pada Penyulang Beo



Gambar 5. Kurva Arus Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa dan 2 Fasa

Tabel 8 memperlihatkan hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa disepanjang Penyulang Beo, dimana diasumsikan lokasi gangguan hubung singkat terjadi pada lokasi 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% di Penyulang Beo. Gambar 5 memperlihatkan kurva arus gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa pada Penyulang Beo Gardu Induk Seduduk Putih. Dapat dilihat bahwa arus gangguan hubung singkat 3 fasa lebih besar daripada arus gangguan hubung singkat 2 fasa lebih, apabila ditinjau dari gangguan terhadap fasa. Selain itu besar arus gangguan hubung singkat dipengaruhi lokasi gangguan, semakin jauh lokasi gangguan maka arus gangguan hubung singkat akan semakin kecil, dan apabila semakin dekat lokasi gangguan maka arus gangguan hubung singkat akan semakin besar.

3.3.2. Setelan Relai Arus Lebih pada Penyulang Beo

Tabel 11

Perbandingan Data Lapangan dengan Hasil Perhitungan Setelan Relai Arus Lebih pada Penyulang Beo

Relai Arus Lebih	Data Lapangan			Hasil Perhitungan	
Sisi <i>Outgoing</i>	TMS	0,125		TMS	0,1283
	Rasio CT	300/5		Rasio CT	300/5
	t	0,3		t	0,3
Sisi <i>Incoming</i>	TMS	0,15		TMS	0,1833
	Rasio CT	600/5 A		Rasio CT	600/5 A
	t	0,7		t	0,7

Berdasarkan Tabel 11 dapat dianalisa bahwa setelan Relai Arus Lebih pada Penyulang Beo berdasarkan data lapangan dan hasil perhitungan masih dalam kondisi yang sesuai dengan perbedaan yang tidak terlalu signifikan. Dimana berdasarkan data lapangan, TMS Relai Arus Lebih pada sisi *outgoing* adalah 0,125 dan sisi *incoming* adalah 0,15. Sedangkan dari hasil perhitungan, TMS Relai Arus Lebih pada sisi *outgoing* adalah 0,1283 dan sisi *incoming* adalah 0,1833. Kemudian waktu kerja relai pada sisi *outgoing* Penyulang Beo lebih cepat dibandingkan dengan waktu kerja relai pada sisi *incoming* Penyulang Beo. Berarti secara keseluruhan setelan Relai Arus Lebih pada Penyulang Beo sudah baik.

3.3.3. Kinerja Relai Arus Lebih pada Penyulang Beo

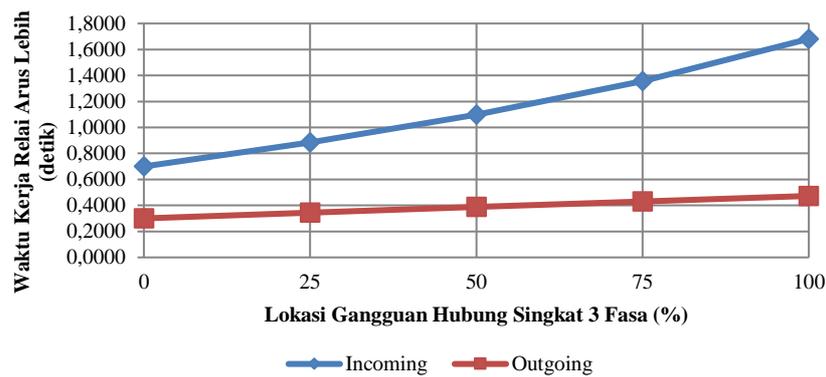
Tabel 12 menunjukkan hasil perhitungan pemeriksaan waktu kerja relai pada gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa pada Penyulang Beo, baik sisi *incoming* maupun sisi *outgoing* pada lokasi gangguan 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% dari panjang Penyulang Beo.

Tabel 12

Waktu Kerja Relai Arus Lebih pada Penyulang Beo saat Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa dan 2 Fasa Berdasarkan Lokasi Gangguan

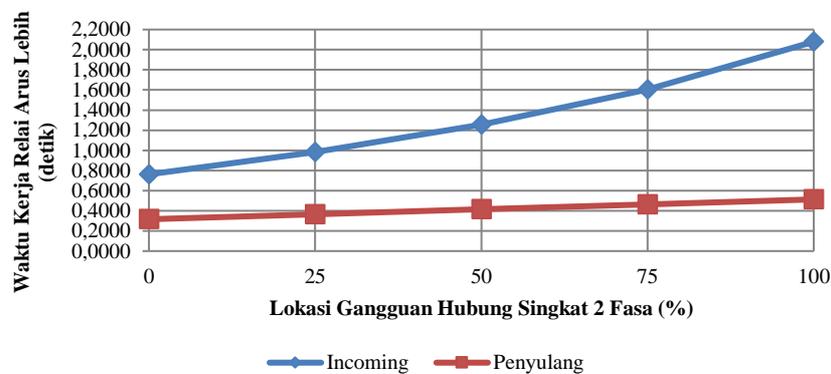
Lokasi Gangguan		Waktu Kerja Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa (detik)			Waktu Kerja Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa (detik)		
(%)	(km)	Relai <i>Incoming</i>	Sisi <i>Outgoing</i>	Selisih Waktu	Relai <i>Incoming</i>	Sisi <i>Outgoing</i>	Selisih Waktu
0%	0,0000	0,7000	0,3000	0,4000	0,7619	0,3161	0,4458
25%	2,8898	0,8840	0,3450	0,5390	0,9842	0,3662	0,6179
50%	5,7795	1,0980	0,3881	0,7099	1,2559	0,4150	0,8409
75%	8,6693	1,3565	0,4304	0,9260	1,6047	0,4637	1,1410
100%	11,5590	1,6817	0,4728	1,2089	2,0791	0,5131	1,5659

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 6. Kurva Waktu Kerja Relai Arus Lebih saat Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Tabel 12 menunjukkan bahwa saat gangguan hubung singkat 3 fasa, waktu kerja Relai Arus Lebih pada sisi *outgoing* Penyulang Beo lebih cepat dibandingkan dengan waktu kerja relai pada sisi *incoming* Penyulang Beo, dengan selisih waktu (*grading time*) 0,7568. Selain itu, Gambar 6 menunjukkan bahwa lokasi gangguan juga mempengaruhi besar kecilnya selisih waktu kerja relai *outgoing* dengan relai *incoming*. Dimana semakin jauh lokasi gangguan, maka akan semakin besar selisih waktu kerja relai *outgoing* dengan waktu kerja relai *incoming*, dan apabila semakin dekat lokasi gangguan maka semakin kecil selisih waktu kerja relai *outgoing* dengan waktu kerja relai *incoming*. Hal ini bertujuan memberi kesempatan pada relai *outgoing* untuk bekerja terlebih dahulu sebagai pengaman utama (*main protection*) apabila terjadi gangguan hubung singkat di penyulang, dan relai *incoming* akan bekerja sebagai pengaman cadangan (*back-up protection*) apabila relai *outgoing* tidak bekerja. Berarti secara keseluruhan kinerja Relai Arus Lebih pada Penyulang Beo saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa sudah baik.



Gambar 7. Kurva Waktu Kerja Relai Arus Lebih saat Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa

Tabel 12 menunjukkan bahwa saat gangguan hubung singkat 2 fasa, waktu kerja Relai Arus Lebih pada sisi *outgoing* Penyulang Beo lebih cepat dibandingkan dengan waktu kerja relai pada sisi *incoming* Penyulang Beo, dengan selisih waktu (*grading time*) 0,9223. Selain itu, Gambar 7 menunjukkan bahwa lokasi gangguan juga mempengaruhi besar kecilnya selisih waktu kerja relai *outgoing* dengan relai *incoming*. Dimana semakin jauh lokasi gangguan, maka akan semakin besar selisih waktu kerja relai *outgoing* dengan waktu kerja relai *incoming*, dan apabila semakin dekat lokasi gangguan maka semakin kecil selisih waktu kerja relai *outgoing* dengan waktu kerja relai *incoming*. Hal ini bertujuan memberi kesempatan pada relai *outgoing* untuk bekerja terlebih dahulu sebagai pengaman utama (*main protection*) apabila terjadi gangguan hubung singkat di penyulang, dan relai *incoming* akan bekerja sebagai pengaman cadangan (*back-up protection*)

apabila relai *outgoing* tidak bekerja. Berarti secara keseluruhan kinerja Relai Arus Lebih pada Penyulang Beo saat terjadi gangguan hubung singkat 2 fasa sudah baik.

Pada Tabel 12 dapat dilihat bahwa waktu kerja Relai Arus Lebih untuk gangguan hubung singkat 3 fasa lebih cepat dibandingkan waktu kerja Relai Arus Lebih untuk gangguan hubung singkat 2 fasa untuk seluruh lokasi gangguan. Sehingga dapat dikatakan besar kecilnya arus gangguan hubung singkat akan mempengaruhi cepat lambatnya waktu kerja relai, apabila ditinjau berdasarkan fasa. Semakin besar arus gangguan hubung singkat maka semakin cepat waktu kerja relai, dan apabila semakin kecil arus gangguan hubung singkat maka semakin lambat waktu kerja relai. Berarti secara keseluruhan kinerja Relai Arus Lebih pada Penyulang Beo saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa sudah baik.

4. KESIMPULAN

- Arus gangguan hubung singkat 3 fasa lebih besar daripada arus gangguan hubung singkat 2 fasa lebih, apabila ditinjau dari gangguan terhadap fasa. Selain itu besar arus gangguan hubung singkat dipengaruhi lokasi gangguan, semakin jauh lokasi gangguan maka arus gangguan hubung singkat akan semakin kecil, dan apabila semakin dekat lokasi gangguan maka arus gangguan hubung singkat akan semakin besar.
- Saat gangguan hubung singkat 3 fasa, waktu kerja relai *outgoing* lebih cepat dibandingkan dengan waktu kerja relai *incoming*, dengan selisih waktu 0,7568. Kemudian saat gangguan hubung singkat 2 fasa, waktu kerja relai *outgoing* lebih cepat dibandingkan dengan waktu kerja relai *incoming*, dengan selisih waktu 0,9223. Besar kecilnya selisih waktu kerja tersebut dipengaruhi jauh dekatnya lokasi gangguan. Dimana semakin jauh lokasi gangguan, maka akan semakin besar selisih waktu kerja relai *outgoing* dengan waktu kerja relai *incoming*, dan apabila semakin dekat lokasi gangguan maka semakin kecil selisih waktu kerja relai *outgoing* dengan waktu kerja relai *incoming*.
- Waktu kerja relai saat gangguan hubung singkat 3 fasa lebih cepat dibandingkan waktu kerja relai saat gangguan hubung singkat 2 fasa. Besar kecilnya selisih waktu kerja tersebut dipengaruhi besar kecilnya arus gangguan hubung singkat. Dimana semakin besar arus gangguan hubung singkat maka semakin cepat waktu kerja relai, dan apabila semakin kecil arus gangguan hubung singkat maka semakin lambat waktu kerja relai.
- Hasil perhitungan dengan data yang ada dilapangan masih dalam kondisi yang sesuai dengan perbedaannya tidak terlalu jauh, sehingga dapat disimpulkan bahwa secara keseluruhan kinerja Relai Arus Lebih yang ada dilapangan masih dalam kondisi baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariningrum, N. S., Hani, S., & Pambudi, P. E. (2018). ANALISIS KINERJA RELAI ARUS LEBIH TERHADAP ARUS GANGGUAN PADA TRANSFORMATOR 60 MVA DI GARDU INDUK 150 KV KENTUNGAN. *Jurnal Elektrikal*, 5(2), 17-25, [h https://ejournal.akprind.ac.id/index.php/elektrikal/article/view/2607](https://ejournal.akprind.ac.id/index.php/elektrikal/article/view/2607)
- Azis, A., & Febrianti, I. K. (2019). ANALISIS SISTEM PROTEKSI ARUS LEBIH PADA PENYULANG CENDANA GARDU INDUK BUNGERAN PALEMBANG. *Jurnal Ampere*, 4(2), 332-344, DOI: <http://dx.doi.org/10.31851/ampere.v4i2.3468>
- Azis, A., Nurdiana, N., & Nisa, U. L. (2018). RUGI-RUGI DAYA PADA TRANSFORMATOR U. 019 PT. PLN 9PERSERO) WS@ JB RAYON AMPERA AKIBAT KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN. *Jurnal Ampere*, 3(1), 177-184, DOI: <http://dx.doi.org/10.31851/ampere.v3i1.3475>

- Dendi, D., Azis, A., & Perawati (2022). ANALISA PENGARUH PEMBEBANAN TERHADAP SUSUT UMUR TRANSFORMATOR DAYA 150 KV DI PLTGU KERAMASAN PALEMBANG. *TEKNIKA: Jurnal Teknik*, 9(1), 28-41, DOI: <http://dx.doi.org/10.35449/teknika.v9i1.198>
- Harsono, H. D., Berahim, H., & Hani, S. (2014). STUDI PENGARUH BEBAN LEBIH TERHADAP KINERJA RELAY ARUS LEBIH PADA TRANSFORMATOR DAYA DI GARDU INDUK PEDAN MENGGUNAKAN ETAP. *Jurnal Elektrikal*, 1(2), 44-59, <https://ejournal.akprind.ac.id/index.php/elektrikal/article/view/2590>
- Hutauruk, T. S. (1983). JARINGAN TEGANGAN MENENGAH. Badan Pelaksana Prokerma PLN-ITB, Bandung.
- Kadarisman, P., & Sarimun, W. (2012). KOORDINASI OCR DAN GFR PADA JARINGAN DISTRIBUSI. PT PLN (Persero) Jasa Pendidikan dan Pelatihan, Jakarta.
- Kersting, W., H. (2012). DISTRIBUTION SYSTEM MODELLING AND ANALYSIS. CRC Press, Third Edition, New Mexico.
- Panjaitan, S. I., Mujahidin, M., & Pramana, R. (2013). STUDI PENGARUH BEBAN LEBIH TERHADAP KINERJA RELAI ARUS LEBIH PADA TRANSFORMATOR DAYA (studi kasus transformator daya 1 150/20 kV (30 MVA) di Gardu Induk Batu Besar PT. PLN Batam). *Jurnal Tugas Akhir*, 1-13, <https://jurnal.umrah.ac.id/wp-content/uploads/2013/08/Susi-Irmalawati-Panjaitan-090120201005.pdf>
- PT PLN (Persero) P3B Jawa Bali. (2005). MODUL PELATIHAN RELAI OCR. Badan Penerbit PLN, Jakarta.
- Rizal, C., & Azis, A. (2022). ANALISA SETTING RELAI ARUS LEBIH (OCR) DAN RELAI GANGGUAN TANAH (GFR) PADA PENYULANG GURAMI GARDU INDUK SUNGAI KEDUKAN PALEMBANG. *Jurnal Ampere*, 7(2), 49-62, DOI: <http://dx.doi.org/10.31851/ampere.v7i1.7706>