

Koordinasi Proteksi Arus Lebih Penyulang Tembuku terhadap Indeks Keandalan Sistem Distribusi 20 KV PT. PLN (Persero) ULP Bangli

I Wayan Sukadana¹, Risma Fauziyah Ramadhani²

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Pendidikan Nasional Denpasar, Jl. Bedugul No.39, Sidakarya, Kec. Denpasar Sel
Kota Denpasar, Bali 80224
email: sukadana@undiknas.ac.id¹, risma.framadhani@yahoo.com²

Received: June 2020; Accepted: August 2020; Published: November 2020
DOI: <http://dx.doi.org/10.30649/j-eltrik.v2i2.104>

Abstrak

Penyulang Tembuku dilengkapi peralatan proteksi over current relay (OCR) pada *Recloser* Tembuku dan rele PMT *Outgoing* Penyulang Tembuku di GI Gianyar. Berdasarkan data yang tercatat pada monitoring PLN UP3 Bali Timur, tiga dari empat kali gangguan yang terjadi pada Penyulang Tembuku disebabkan oleh kesalahan koordinasi pengaman sehingga terjadi pemadaman meluas. Hipotesa awal penyebab dari kesalahan koordinasi merupakan akibat dari rekonfigurasi jaringan Penyulang Tembuku. Dampak dari kesalahan koordinasi mempengaruhi salah satu kinerja indeks keandalan PLN ULP Bangli, yaitu pencapaian nilai SAIFI. Perhitungan arus hubung singkat menunjukkan nilai arus hubung singkat semakin besar setelah rekonfigurasi jaringan dikarenakan jarak penyulang yang semakin pendek. Hasil analisa dari setting eksisting menunjukkan bahwa waktu kerja antara PMT dan *Recloser* terlalu rapat, sehingga direkomendasikan untuk penyetelan ulang. Hasil perhitungan sebagai dasar rekomendasi diperoleh TMS PMT 0,19 s dan TMS *Recloser* 0,05 s dengan karakteristik Standard Inverse. Analisa terhadap SAIFI menunjukkan jika kinerja proteksi sesuai dengan harapan, maka kontribusi pemadaman karena gangguan pada Penyulang Tembuku dapat ditekan sebesar 31% pada Triwulan I 2019.

Kata kunci: arus hubung singkat, rele arus lebih, kordinasi proteksi, SAIFI

Abstract

Feeder Tembuku is supported by Over Current Relay (OCR) at Recloser Tembuku and Outgoing Circuit Breaker of Feeder Tembuku in GI Gianyar. Based on the data recorded by PLN UP3 Bali Timur, three of four faults happened at Feeder Tembuku was caused by protection miscoordination resulting widespread blackout. Initial hypothesis as the cause of miscoordination is the result of Feeder Tembuku's network reconfiguration. The impact of miscoordination affecting one of reliability index of PLN ULP Bangli, which is the achievement of SAIFI value. The short circuit current calculations show the value of short circuit current is greater after the network reconfiguration due to shorter feeder distance. The analysis of the existing settings shows that the working time between CB and Recloser is too tight, so it is recommended for resetting. Calculation results as a basis for recommendations obtained TMS 0,19s for CB and TMS 0,05s for Recloser both with Standard Inverse

characteristics. Analysis of SAIFI shows that if protection performance is in line with expectations, the contribution of blackouts due to fault at Feeder Tembuku can be reduced by 31% in the first quarter of 2019.

Keywords: *short circuit current, over current relay, protection coordination, SAIFI*

I. PENDAHULUAN

Seiring dengan kewajiban PLN untuk menyalurkan energi listrik yang berkualitas kepada pelanggan, maka diperlukan pemenuhan standar pelayanan yang baik sesuai kriteria tingkat mutu pelayanan, dimana salah satu poin utamanya adalah tingkat pemadaman rendah. Pemadaman listrik akibat gangguan yang terjadi pada jaringan tegangan menengah merupakan kontributor terbesar terhadap SAIFI sebagai salah satu indikator penilaian indeks keandalan.

Data gangguan yang tercatat di PLN UP3 Bali Timur ULP Bangli selama triwulan pertama tahun 2019 menunjukkan bahwa gangguan pada jaringan SUTM yang menyebabkan trip pada sisi PMT *Outgoing* Penyulang pada Gardu Induk menjadi penyebab tingginya tingkat pemadaman.

Berdasarkan data trip penyulang di ULP Bangli, penyulang Tembuku adalah yang paling sering trip diantara lainnya. Hingga akhir bulan Maret 2019, pemadaman tidak terencana (gangguan) berkontribusi sebesar 54% dari nilai realisasi total SAIDI 66,61 menit/pelanggan sedangkan 83% dari total realisasi SAIFI 1,12 kali/pelanggan. Selama triwulan I, diperkirakan trip Penyulang Tembuku cukup berperan dalam meningkatnya nilai SAIFI yang dicapai ULP Bangli hingga akhir triwulan I tahun 2019.

Salah satu permasalahan yang terjadi pada Penyulang Tembuku adalah koordinasi proteksi pada jaringan tegangan menengah yang kurang baik sehingga menyebabkan pemadaman meluas. Hal yang terjadi setelah dilakukan rekonfigurasi jaringan adalah lolosnya proteksi *Recloser* sehingga menghantam proteksi

penyulang di sisi *outgoing* Gardu Induk.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penulis tertarik untuk menganalisa koordinasi proteksi arus lebih Penyulang Tembuku terhadap indeks keandalan sistem distribusi 20 kV PT PLN (Persero) ULP Bangli dengan mengevaluasi kembali arus hubung singkat penyulang agar dapat mengetahui selektivitas kerja antara PMT dengan *Recloser*. *Recloser* menjadi salah satu opsi peralatan yang digunakan karena memiliki keunggulan bahwa *recloser* dapat diatur untuk melokalisasi gangguan temporer. Hasil analisa akan digunakan sebagai dasar penyetelan ulang relay proteksi guna meningkatkan keandalan (*reliability*).

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan indeks keandalan sistem dengan pola operasi yang baik dengan cara mengoptimalkan aset peralatan proteksi dengan memberikan rekomendasi setting koordinasi proteksi yang sesuai. Hal tersebut dapat dipenuhi dengan mengetahui nilai arus hubung singkat pada saluran utama Penyulang Tembuku. Penelitian ini sangat berbeda dengan penelitian-penelitian dilakukan sebelumnya yang hanya membahas tentang koordinasi antar pengaman baik OCR maupun GFR dan tidak sampai pada perhitungan indeks keandalan sistem yaitu SAIFI.

Sistem Tenaga Listrik

Pembangkitan, penghantar (saluran transmisi/distribusi) dan beban merupakan tiga komponen utama penyaluran energi listrik. Energi listrik ditransfer dari unit-unit pembangkit melalui saluran transmisi ke berbagai lokasi kemudian disebarkan melalui sistem distribusi hingga akhirnya menyuplai beban atau konsumen [1].

Sistem Proteksi

Secara umum pengertian sistem proteksi ialah cara untuk mencegah atau membatasi kerusakan peralatan terhadap gangguan, sehingga kelangsungan penyediaan tenaga listrik dapat dipertahankan.

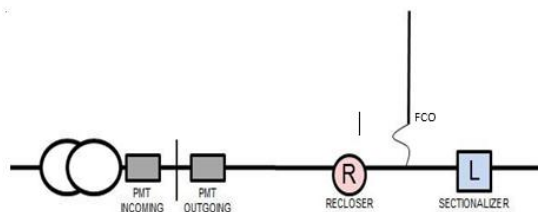
Proteksi sistem distribusi merupakan perlindungan yang bertujuan untuk mencegah atau membatasi kerusakan pada jaringan dan peralatan sistem distribusi, serta untuk keselamatan umum [2].

Tujuan dari sistem proteksi tersebut antara lain adalah untuk menghindari atau memperkecil kerusakan akibat gangguan yang terjadi, melokalisasi daerah gangguan, memberikan keandalan pelayanan pada pelayanan, serta memperkecil bahaya bagi manusia.

Persyaratan sistem proteksi guna memenuhi tujuan di atas, antara lain: kepekaan, keandalan, selektifitas, kecepatan, sederhana, dan ekonomis.

Peralatan Proteksi Penyulang 20kV

Berikut gambaran umum terkait komponen peralatan proteksi utama pada penyulang:



Gambar 1. Sketsa Peralatan Proteksi Penyulang 20kV

- Pemutus Tenaga (PMT)

Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan *switching* mekanis yang mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam kondisi normal maupun abnormal (gangguan) seperti kondisi hubung singkat.

- Pemutus Balik Otomatis (*Recloser*)

Recloser adalah peralatan yang terdiri dari pemutus tenaga yang dilengkapi peralatan elektronik sebagai kelengkapan *Recloser*, dimana peralatan ini tidak

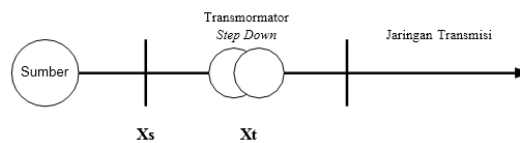
berhubungan dengan tegangan menengah dan pada dengan ini *Recloser* dapat dikendalikan cara pelepasannya.

Recloser berfungsi memisahkan daerah yang sistemnya terganggu secara cepat sehingga dapat melokalisasi gangguan secara sesaat. *Recloser* akan masuk kembali sesuai settingannya jika yang terjadi adalah gangguan temporer, sehingga daerah yang sebelumnya diamankan akan aktif kembali secara otomatis.

- Koordinasi PMT *Outgoing - Recloser*

Koordinasi proteksi OCR pada PMT *outgoing* dengan *Recloser* salah satunya adalah perbedaan waktu kerja ketika terjadi gangguan hubung singkat pada jaringan distribusi. *Recloser* sebagai pengaman utama pada jaringan memiliki waktu kerja yang lebih cepat daripada PMT *outgoing*.

Distribusi Tegangan Menengah



Gambar 2. Sketsa jaringan distribusi tegangan menengah

Besarnya nilai impedansi ekivalen positif, negatif dan nol dari titik gangguan sampai ke sumber. Impedansi yang terbentuk dari sumber ke titik gangguan tersambung seri, maka perhitungan Z_{1eq} dan Z_{2eq} dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut, sedangkan untuk perhitungan Z_{0eq} dimulai dari titik gangguan sampai ke trafo tenaga yang netralnya ditanahkan. Namun hubungan belitan trafo harus diketahui untuk menghitung impedansi Z_{0eq} , sehingga impedansi ekivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

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

$$Z_{1eq}=Z_{2eq}=Z_{s1}+Z_{t1}+Z_{l\text{penyulang}} \dots\dots(1)$$

Dimana:

Z_{1eq} : Impedansi ekivalen jaringan urutan positif (Ω)

Z_{2eq} : Impedansi ekivalen jaringan urutan negatif (Ω)

Z_{s1} : Impedansi sumber sisi 20 kV (Ω)

Z_{t1} : Impedansi trafo tenaga urutan positif dan negatif (Ω)

Z_1 : Impedansi urutan positif/ negatif (Ω)

- Urutan nol

$$Z_{0eq} = Z_{t0} + 3R_N + Z_0 \text{ penyulang} \dots (2)$$

Dimana:

Z_{0eq} : Impedansi ekivalen jaringan nol (Ω)

Z_{t0} : Impedansi trafo tenaga urutan nol (Ω)

R_N : Tahanan tanah trafo tenaga (Ω)

Z_0 : Impedansi urutan nol (Ω)

Arus Gangguan Hubung Singkat

Arus hubung singkat adalah arus lebih yang diakibatkan oleh gangguan impedansi yang sangat kecil mendekati nol antara dua penghantar yang aktif, yang dalam kondisi normal berbeda potensial [2].

Arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dasar sebagai berikut:

$$I = \frac{V}{Z} \dots (3)$$

Dimana

I : Arus yang mengalir pada hambatan Z (A)

V : Tegangan sumber (V)

Z : Impedansi jaringan, nilai ekivalen impedansi dalam jaringan dari sumber tegangan sampai titik gangguan (Ω)

a. Hubung singkat tiga fasa



Gambar 3. Gangguan hubung singkat 3 fasa

Arus gangguan hubung singkat tiga fasa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$I_{sc3} = \frac{V_{ph}}{Z_{1eq}} \dots (4)$$

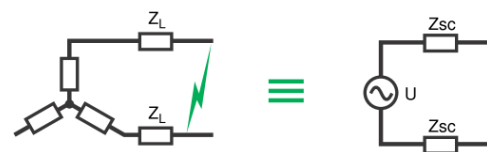
Dimana:

I_{sc3} : Arus gangguan hubung singkat tiga fasa (A)

V_{ph} : Tegangan fasa - netral sistem (V)

Z_{1eq} : Impedansi ekivalen urutan positif (Ω)

b. Hubung singkat dua fasa



Gambar 4. Gangguan hubung singkat 2 fasa

Arus gangguan hubung singkat dua fasa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$I_{sc2} = \frac{V_{ph-ph}}{Z_{1eq} + Z_{2eq}} \dots (5)$$

karena $Z_{1eq} = Z_{2eq}$, maka:

$$I_{sc2} = \frac{V_{ph-ph}}{2 \times Z_{2eq}} \dots (6)$$

dimana:

I_{sc2} : Arus gangguan hubung singkat dua fasa (A)

V_{ph-ph} : Tegangan fasa-fasa sistem (V)

Z_{1eq} : Impedansi urutan positif (Ω)

Z_{2eq} : Impedansi urutan negatif (Ω)

Rele Arus Lebih

Rele arus lebih atau *Over Current Relay* (OCR) adalah suatu rele yang bekerjanya berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengaman tertentu dalam jangka waktu tertentu. Karakteristik waktu pemutusannya dapat diatur, baik itu karakteristik *instaneous* (seketika), *definite* (tertentu), maupun *inverse* (terbalik).

Tabel 1. Standar TMS berdasarkan karakteristik rele OCR

Karakteristik Rele	Standar IEC 60255
Standard Inverse (SI)	$T = TMS \times \frac{0.14}{I_r^{0.02} - 1}$
Very Inverse (VI)	$T = TMS \times \frac{13.5}{I_r - 1}$
Extremely Inverse (EI)	$T = TMS \times \frac{80}{I_r^2 - 1}$
Long time standart earth fault	$T = TMS \times \frac{120}{I_r - 1}$

Sumber: IEC 60255 Electrical Relays

Menghitung setelan waktu kerja rele arus lebih dengan karakteristik *inverse* dapat menggunakan persamaan pada Tabel 1.

Keandalan Sistem Distribusi

Keandalan sistem distribusi ialah ukuran tingkat pelayanan penyediaan tenaga listrik dari sistem ke konsumen [3].

Keandalan sistem distribusi listrik diukur dengan indeks keandalan yang dinyatakan dalam suatu besaran probabilitas rata-rata. Indeks keandalan diantaranya SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*), yaitu indikator frekuensi rata-rata konsumen merasakan interupsi penyaluran tenaga listrik dalam suatu periode tertentu.

$$SAIFI = \frac{\sum_n^i (\lambda_i \times N_i)}{N_t} \dots \dots \dots (7)$$

Sedangkan SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) merupakan indikator durasi rata-rata konsumen merasakan interupsi penyaluran tenaga listrik dalam suatu periode tertentu.

$$SAIDI = \frac{\sum_n^i (\delta_i \times N_i)}{N_t} \dots \dots \dots (8)$$

dimana:

i : Padam ke- i

n : Jumlah padam

λ_i : Kali (frekuensi) padam ke- i

δ_i : Lama (durasi) padam ke- i

N_i : Jumlah pelanggan padam ke- i

N_t : Total pelanggan pada satu unit layanan

II. METODE PENELITIAN

Pengambilan Data

Metode pengambilan data dilakukan dengan observasi secara langsung di PT PLN (Persero) ULP Bangli. Pengolahan data dilakukan dengan cara perhitungan untuk mendapatkan nilai impedansi saluran dan arus hubung singkat antar fasa untuk keperluan koordinasi rele proteksi. Hasil perhitungan akan dijadikan rekomendasi untuk penyetelan proteksi arus lebih pada Penyulang Tembuku. Disamping itu hasil perhitungan dijadikan referensi untuk menganalisa penyebab permasalahan proteksi yang tidak koordinatif. Data-data yang didapat berdasarkan peralatan yang berada pada wilayah kerja Gardu Induk Gianyar untuk penyaluran energi listrik melalui Penyulang Tembuku.

Tabel 2. Data Transformator II pada Gardu Induk Gianyar

Kapasitas Daya	60 MVA
Tegangan Kerja	150/20 kV
Impedansi	12,512 %
$I_{hs3?}$	11.124A

Sumber: PT PLN (Persero) UP2D Bali

Analisa Data

Teknis analisis data adalah dengan menggunakan data pada saluran Penyulang Tembuku, dengan materi kajian perhitungan koordinasi rele proteksi (rele arus lebih).

Tabel 3. Data Aset Penyulang Tembuku

Panjang STUM Main Line	61,92 km
Jumlah Keypoint	11 titik
Jumlah Gardu Distribusi	54 unit
Jumlah Pelanggan	7664 pelanggan

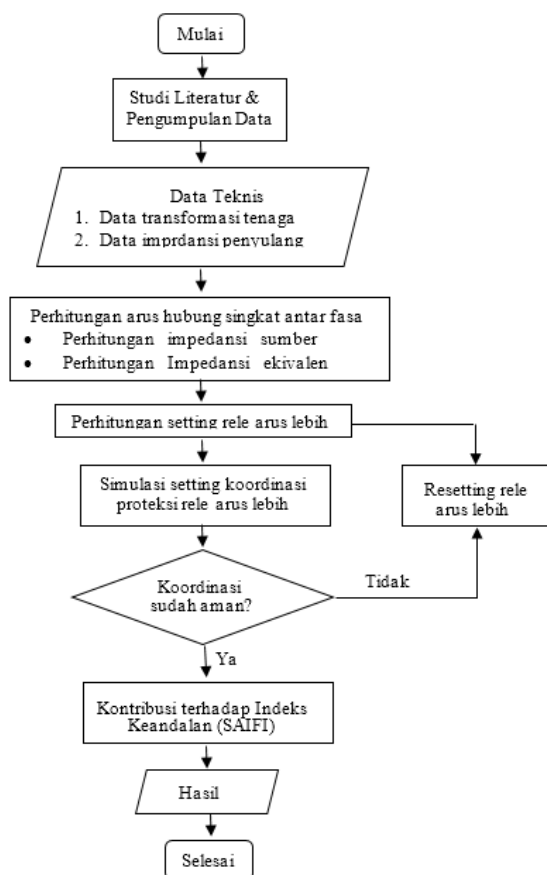
Sumber: PT PLN (Persero) ULP Bangli

Tabel 4 menampilkan setting proteksi eksisting pada Penyulang Tembuku. Data-data didapat dari PLN UP2D Bali.

Tabel 4. Data Setting Proteksi Penyulang Tembuku

Setting	PMT Outgoing	Recloser
$I_{low\ set}$	304	120
$t_{low\ set}$	0,20	0,18
TMS	0,11 (Standard Inverse)	0,05 (Standard Inverse)
$I_{high\ set\ 1}$	3440	830
$t_{high\ set\ 1}$	0,3 (Definite)	0 (Instantaneous)
$I_{high\ set\ 1}$	6000	
$t_{high\ set\ 1}$	0 (Instantaneous)	

Sumber: PT PLN (Persero) UP2D Bali

**Gambar 5.** Diagram Alir Penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Impedansi Sumber

Berdasarkan data pada Tabel 2, diketahui arus hubung singkat pada Transformator II GI Gianyar di sisi 150kV sebesar 11.124 A. Maka impedansi hubung

singkat di sisi sumber adalah:

$$\begin{aligned}
 MVA_{sc} &= 150 \times I_{hs3\phi} \times \sqrt{3} \\
 &= 150 \times 11.124 \times \sqrt{3} \\
 &= 2890,1 \text{ MVA}
 \end{aligned}$$

Maka nilai impedansi sumber sisi primer primer diketahui melalui persamaan:

$$X_{sc} = \frac{kV}{MVA_{sc}} = \frac{20^2}{2890,1} = 0,14 \Omega$$

Impedansi Sumber

Berdasarkan data pada Tabel 2, diketahui persentase impedansi transformator yang terdapat pada *nameplate* Transformator II GI Gianyar adalah 12.512%. Maka impedansi transformator adalah:

$$\begin{aligned}
 X_{T1} &= \text{Impedansi (\%)} \times \frac{kV^2}{MVA} \\
 &= 12.512 \times \frac{20^2}{60} \\
 &= 0,83 \Omega
 \end{aligned}$$

Impedansi Saluran Distribusi

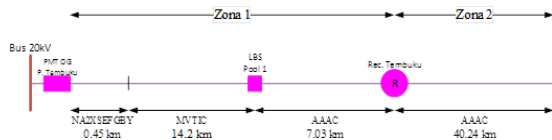
Kombinasi penghantar Penyulang Tembuku antara lain kabel tanah (NA2XSEFGBY) sebagai output dari kubikel PMT *Outgoing* Penyulang Tembuku hingga ke tiang pertama saluran udara, kemudian disambungkan dengan kabel udara pilin berisolasi (MVTIC) hingga LBS Pool 1. Selanjutnya dari LBS Pool 1 hingga ujung jaringan didominasi oleh penghantar AAAC 150 mm². Data impedansi penghantar pada Penyulang Tembuku dirangkum dalam Tabel 5.

Tabel 5. Data Penghantar Penyulang Tembuku

Peng-hantar	Luas Penampang	Impedansi urutan positif $R_L + jX_L$ (ohm/km)
NA2XSEFGBY	240 mm ²	0,1610 + j 0,0980
MVTIC	150 mm ²	0,2375 + j 0,3002
AAAC	150 mm ²	0,2162 + j 0,3305

Sumber: PT PLN (Persero) UP3 Bali Timur

Total panjang Penyulang Tembuku diketahui sepanjang 61,92 km. Dalam memudahkan perhitungan, maka saluran dibagi menjadi Zona 1 (GI Gianyar – *Recloser* Tembuku) dan Zona 2 (*Recloser* Tembuku – ujung jaringan).



Gambar 5. Konfigurasi Penyulang Tembuku

Data yang dibutuhkan untuk analisa gangguan hubung singkat antar fasa adalah impedansi urutan positif (Z_1) dan impedansi urutan negatif (Z_2), dimana nilai $Z_1 = Z_2$. Data perhitungan impedansi saluran pada Zona 1 tersaji pada Tabel 6.

Tabel 6. Impedansi Saluran Zona 1 Penyulang Tembuku

Peng-hantar	Luas Penampang	Panjang (km)	Impedansi urutan positif $R_L + jX_L$ (ohm/km)
NA2X SEFGB Y	240 mm ²	0,45	0,0725 + j 0,0441
MVTIC	150 mm ²	14,20	3,3725 + j 4,2628
AAAC	150 mm ²	7,03	1,5199 + j 2,3234
Total Zona1 Zona2		21,68	4,9648 + j 6,6304

Data perhitungan impedansi saluran pada Zona 2 tersaji pada Tabel 7.

Tabel 7. Impedansi Saluran Zona 1 Penyulang Tembuku

Peng-hantar	Luas Penampang	Panjang (km)	Impedansi urutan positif $R_L + jX_L$ (ohm/km)
NA2XS EFGBY	240 mm ²	0,45	0,0725 + j 0,0441

Peng-hantar	Luas Penampang	Panjang (km)	Impedansi urutan positif $R_L + jX_L$ (ohm/km)
MVTIC	150 mm ²	14,2	3,3725 + j 4,2628
AAAC	150 mm ²	47,27	10,2193 + j 15,6221
Total Z1 Zona 2		61,92	13,6643 + j 19,9290

Impedansi Ekivalen

Impedansi ekivalen yang akan digunakan dalam analisis ini adalah impedansi ekivalen urutan positif (Z_{1eq}). Impedansi ekivalen dihitung pada masing-masing zona proteksi untuk mendapatkan referensi setting pengaman masing-masing zona seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

Tabel 8. Impedansi Ekivalen Zona 1 Penyulang Tembuku

Impedansi	Impedansi ekivalen ($Z_{1eq} = Z_{2eq}$) $R_L + jX_L$ (ohm/km)
X_{SC}	j 0,14
X_{T1}	j 0,84
Z_1	4,9648 + j 6,6304
Total Z_{1eq} Zona 2	4,9648 + j 7,6044

$$\begin{aligned}
 \text{Zona 1 } Z_{1eq} &= Z_{2eq} \\
 &= \sqrt{4,9648^2 + 7,6044^2} \\
 &= 9,08 \, \Omega/\text{km}
 \end{aligned}$$

Data perhitungan impedansi ekivalen pada Zona 2 tersaji pada Tabel 9.

Tabel 9. Impedansi Ekivalen Zona 2 Penyulang Tembuku

Impedansi	Impedansi ekivalen ($Z_{1eq} = Z_{2eq}$) $R_L + jX_L$ (ohm/km)
X_{SC}	j 0,14
X_{T1}	j 0,84
Z_1	13,6643 + j 19,9290
Total Z_{1eq} Zona 2	13,6643 + j 20,9030

$$\begin{aligned}
 \text{Zona 1 } Z_{1eq} &= Z_{2eq} \\
 &= \sqrt{13,6643^2 + 20,9030^2} \\
 &= 24,97 \, \Omega/\text{km}
 \end{aligned}$$

Perhitungan Arus Hubung Singkat

Arus gangguan yang akan dihitung dalam penelitian ini adalah arus hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa. Nilai arus hubung singkat yang dihitung dalam penelitian ini ada pada setiap keypoint. Disamping sebagai referensi setting pengamanan pada saluran distribusi Penyulang Tembuku, perhitungan arus hubung singkat pada tiap *keypoint* bertujuan untuk mengevaluasi histori gangguan yang pernah terjadi pada Penyulang Tembuku, khususnya pada gangguan yang berdampak pemadaman meluas akibat perlatan proteksi yang tidak koordinatif. Berikut sample perhitungan untuk arus gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa pada ujung jaringan Zona 1 dan Zona 2.

Tabel 10. Perhitungan Arus Hubung Singkat antar Fasa

Arus Hubung Singkat	Zona 1	Zona 2
3 fasa (I_{sc3})	$I_{sc3} = \frac{V_{ph}}{Z_{1eq}}$ $= \frac{20000}{\sqrt{3} \times 9,08}$ $= 1271 \text{ A}$	$I_{sc3} = \frac{V_{ph}}{Z_{1eq}}$ $= \frac{20000}{\sqrt{3} \times 24,97}$ $= 1101 \text{ A}$
3 fasa (I_{sc2})	$I_{sc2} = \frac{V_{ph-ph}}{Z_{1eq} + Z_{2eq}}$ $= \frac{V_{ph-ph}}{2 \times Z_{1eq}}$ $= \frac{20000}{2 \times 9,08}$ $= 462 \text{ A}$	$I_{sc2} = \frac{V_{ph-ph}}{Z_{1eq} + Z_{2eq}}$ $= \frac{V_{ph-ph}}{2 \times Z_{1eq}}$ $= \frac{20000}{2 \times 24,97}$ $= 400 \text{ A}$

Sesuai cara perhitungan pada Tabel 10, dengan menyesuaikan impedansi saluran antar keypoint seperti pada Gambar 5, maka diperoleh nilai arus hubung singkat pada Tabel 11.

Tabel 11. Arus Hubung Singkat Tiap Keypoint Penyulang Tembuku

Keypoint	Jarak (km)	Lokasi Gangguan	Arus Gangguan (A)	
			3 Fasa	2 Fasa
PMT Outgoing P. Tem-buku	0.00	0% Panjang Saluran	11855	10267
Trifurcating (Pole 1)	0.45	0.7% Panjang Saluran	11313	9797
LBS Pool 1	14.65	23.7% Panjang Saluran	1831	1586
LBS Umbalan	17.77	28.7% Panjang Saluran	1532	1327
Recloser Tembuku	21.68	35.0% Panjang Saluran	1271	1101
LBS Undisan	26.38	42.6% Panjang Saluran	1056	914
LBS Bangbang	27.60	44.6% Panjang Saluran	1011	876
LBS Pulasari	31.26	50.5% Panjang Saluran	898	777
CO Bypass Kubusuih	41.07	66.3% Panjang Saluran	690	597
LBS Meto-Penaga	47.54	76.8% Panjang Saluran	599	518
LBS Suter	55.33	89.4% Panjang Saluran	516	447
GH Kintamani	61.92	100% Panjang Saluran	462	400

Perhitungan Setting OCR

Pada perhitungan setting relay OCR dan *Recloser* menggunakan karakteristik *standard inverse*, perhitungan setting peralatan proteksi dimulai dari *Recloser* Tembuku, kemudian rele *outgoing* Penyulang. Berdasarkan standar IEEE Std 242-1986, batas waktu kerja antara dua buah rele: 0,2s – 0,4s. Berikut dijabarkan perhitungan setting relay OCR, dan *recloser* pada Penyulang Tembuku.

Recloser Tembuku

Kurva : Standard Inverse

$I_{hs} 3\phi$: 1250 A

IFLA : 100 A

$$\begin{aligned}
 t_{set} &: 0,15s \\
 I_{set} &: 1,2 \times IFLA \\
 &: 1,2 \times 100 \text{ A} \\
 &: 120 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$TMS = \frac{\left(\frac{I_{hs3\phi}}{I_{set}}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times t_{set}$$

$$TMS = \frac{\left(\frac{1250}{120}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times 0,15$$

$$TMS = 0,05s$$

PMT Outgoing Penyulang Tembuku

Kurva : Standard Inverse

$I_{hs 3\phi}$: 11595 A

IFLA : 300 A

t_{set} : $0,15s + 0,2s = 0,35s$

I_{set} : $1,01 \times IFLA$

: $1,01 \times 300 \text{ A}$

: 304 A

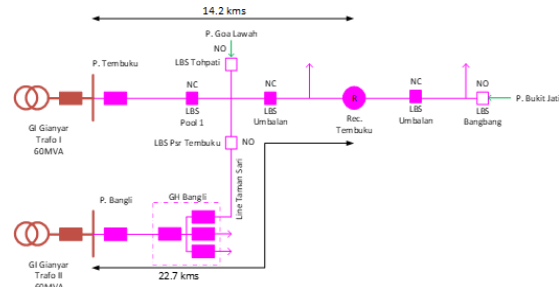
$$TMS = \frac{\left(\frac{I_{hs3\phi}}{I_{set}}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times t_{set}$$

$$TMS = \frac{\left(\frac{11595}{304}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \times 0,35$$

$$TMS = 0,19s$$

Histori Rekonfigurasi Jaringan

Permasalahan selektifitas kerja antara PMT *outgoing* pada GI Gianyar dengan *Recloser* Tembuku diduga karena jarak zona proteksi yang semakin pendek setelah penyulang baru dioperasikan. Ilustrasi ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Konfigurasi Jaringan Penyulang Bangli dengan Penyulang Tembuku

Dari ilustrasi sederhana pada Gambar 6, dapat disimpulkan bahwa panjang section utama, yaitu antara PMT *Outgoing* pada GI Gianyar sampai dengan *Recloser* Tembuku berkurang sepanjang 8.5 kms. Semakin pendek jaringan, maka arus hubung singkat akan semakin besar karena impedansi saluran yang semakin kecil, sehingga jika dibandingkan besar arus gangguan arus lebih antar fasa sebelum dan sesudah rekonfigurasi jaringan ditunjukkan pada Tabel 12 (terlampir).

Berdasarkan Tabel 12, terlihat bahwa rekonfigurasi jaringan menyebabkan arus hubung singkat antar fasa pada antar keypoint semakin besar. Diduga terjadinya miskordinasi antara PMT *Outgoing* Penyulang dan *Recloser* Tembuku karena arus hubung singkat yang semakin besar mengalir pada saluran distribusi, sehingga setting eksisting sudah tidak selektif terhadap sumber gangguan pada zona proteksi *recloser*.

Tabel 12. Perbandingan Arus Hubung Singkat

Keypoint	Jarak		Lokasi Gangguan		3 Fasa		2 Fasa	
	Baru	Lama	Baru	Lama	Baru	Lama	Baru	Lama
PMT Outgoing	0.00	0.00	0.0%	0.0%	11855		10267	
Pool 1	14.65	24.25	23.79%	39.2%	1831		1586	
Umbalan	17.77	27.37	28.79%	38.3%	1532		1327	
Rec Tembuku	21.68	31.28	35.0%	43.7%	1271	883	1101	765
Undisan	26.38	35.98	42.6%	50.3%	1056	773	914	670
Bangbang	27.60	37.20	44.6%	52.0%	1011	749	876	649
	29.43	39.03	47.5%	54.6%	951	716	824	620
Pulasari	31.26	40.86	50.5%	57.1%	898	685	777	593

Keypoint	Jarak		Lokasi Gangguan		3 Fasa		2 Fasa	
	Baru	Lama	Baru	Lama		Baru	Lama	Baru
CO Kubusuih	41.07	50.67	66.3%	70.8%	690	557	597	482
Meto-Penaga	47.54	57.14	76.8%	79.9%	599	496	518	429
LBS Suter	55.33	64.93	89.4%	90.8%	516	438	447	379
GH Kintamani	61.92	71.52	100%	100%	462	399	400	345

Analisa Kurva Koordinasi OCR Eksisting

Dalam hal mengevaluasi hasil perhitungan dengan setting eksisting digunakan data histori gangguan sebagai referensi. Sample gangguan mengambil histori data gangguan tanggal 5 Maret 2019, dimana *Recloser* Tembuku tidak bekerja sesuai zona proteksinya. Sample yang diambil mempertimbangkan adanya data arus gangguan yang terrekam oleh Unit Pelaksana Pengatur Distribusi (UP2D) Bali.

Tabel 13. Histori Gangguan Penyulang Tembuku

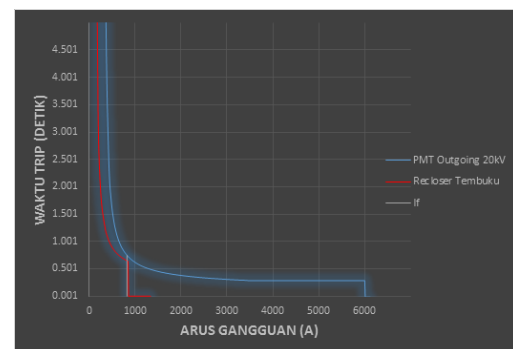
Tgl / Jam / Th	Penerbitan	Kategori	Lama Penerbitan	Status Konten	Identifikasi Gangguan	Arus Gangguan (A)					Seksi Gangguan	Kelas Gangguan	Dampak Gangguan	Keterangan
						a	b	c	d	e				
4 Jan 2019	Tembuku	SUTM	0:40	Outgoing	-	-	-	-	-	-	II	41 A	PD	FUSIONER PELAYAN Lotos, Jaringan kara bambu tumbang di utara LIS Perisai
16 Jan 2019	Tembuku	SUTM	0:14	Outgoing	-	-	-	-	-	-	II	49	L	Proteksi Rectos Lotos, Trip padat memasuki CO sekakubasa
12 Feb 2019	Tembuku	SUTM	0:12	Outgoing	OC	1267	1424	1348	1	I	41C	HP		Petr di LIS Meroasi main line
5 Mar 2019	Tembuku	SUTM	1:06	Outgoing	OC	855	799	27	51	II	41C	HP		Proteksi Rectos Lotos, Petr di perbatasan Pulesari

Sumber: Form Monitoring Kerja Relay (FMKR)
PT PLN (Persero) UP3 Bali Timur
Januari-Maret 2019

Berdasarkan data yang diperoleh dari PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Pengatur Distribusi (UP2D) Bali, data setting kondisi eksisting OCR penyulang dan *Recloser* Tembuku ditunjukkan pada Tabel 4 digambarkan dengan kurva proteksi pada Gambar 7.

Kurva proteksi terbentuk sesuai dengan arus setting (Iset) dan TMS eksisting dengan karakteristik *Standard Inverse*. Dalam hal menganalisa selektifitas kerja pengaman, maka dilakukan pengecekan waktu kerja antara PMT *outgoing* dengan *Recloser*. Simulasi arus gangguan yang di-

ambil sesuai dengan pendekatan arus gangguan sebesar 824 A yang terjadi di antara keypoint LBS Bangbbang dan LBS Pulasari. Contoh perhitungan waktu kerja sebagaimana terlihat pada Tabel 14:



Gambar 7. Kurva Setting OCR Eksisting

Tabel 14. Perhitungan Waktu Kerja PMT dan Recloser

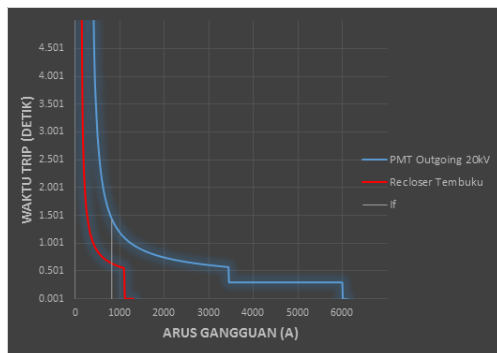
Waktu Kerja (t_{PMT Outgoing})	Waktu Kerja Recloser (t_{Recloser})
$t = \frac{0,14}{(\frac{I_{hs}}{I_{set}})^{0,02} - 1} \times TMS$	$t = \frac{0,14}{(\frac{I_{hs}}{I_{set}})^{0,02} - 1} \times TMS$
$t = \frac{0,14}{(\frac{824}{304})^{0,02} - 1} \times 0,11$	$t = \frac{0,14}{(\frac{824}{120})^{0,02} - 1} \times 0,05$
t = 0,75 s	t = 0,64 s

Berdasarkan cara perhitungan pada Tabel 14, maka selisih waktu kerja antara PMT *Outgoing* Penyulang dengan *Recloser* Tembuku terangkum pada Tabel 15.

Tabel 15. Waktu Kerja Eksisting PMT dan Recloser Tembuku

X Iset	Ifault	$t_{PMT\ outgoing}$	$t_{Recloser}$	Δt
3.5	420	2.33	0.99	1.34
4.0	480	1.65	0.90	0.75
4.5	540	1.31	0.83	0.48
5.0	600	1.10	0.77	0.33
5.5	660	0.97	0.73	0.24
6.0	720	0.87	0.69	0.18
6.4	768	0.81	0.67	0.14
6.9	824	0.75	0.64	0.11
7.0	840	0.74	0.00	0.74
7.5	900	0.69	0.00	0.69
7.8	936	0.66	0.00	0.66
8.5	1020	0.62	0.00	0.62
9.4	1128	0.57	0.00	0.57
9.8	1176	0.55	0.00	0.55
10.0	1200	0.54	0.00	0.54
10.6	1272	0.52	0.00	0.52

Berdasarkan kurva koordinasi OCR setting eksisting pada Gambar 7 dan pemeriksaan waktu kerja pada Tabel 15, terlihat bahwa selektifitas sistem pengamanan hubungan singkat pada penyulang Tembuku masih kurang baik. Waktu kerja proteksi pada beberapa nilai arus hubungan singkat yang masih berada dibawah 0,2 detik menunjukkan tingkat selektifitas sistem yang terlalu rapat.

**Gambar 8.** Selisih Waktu Kerja PMT Outgoing dengan Recloser Tembuku pada Arus Gangguan 824 A

Kurva Proteksi Hasil Perhitungan

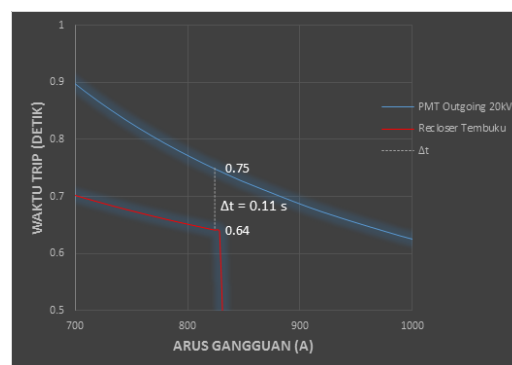
Berdasarkan hasil perhitungan setting rele OCR PMT *Outgoing* dengan *Recloser* Tembuku, didapat nilai-nilai sebagai

rekomendasi setting proteksi pada Tabel 16. Setting I high set 1 pada *Recloser* disesuaikan dengan arus hubung singkat pada zona pangkal *Recloser* Tembuku. Sedangkan seting I low set, I high set 1, dan I high set 2 pada PMT *Outgoing* Penyulang Tembuku tetap sesuai nilai setting eksisting. Hal ini dimaksudkan agar mencegah arus gangguan yang besar mengalir pada penghantar saluran distribusi, dimana arus gangguan yang besar berpotensi merusak penghantar.

Tabel 16. Rekomendasi Setting Proteksi berdasarkan Perhitungan

Setting	PMT <i>Outgoing</i>	<i>Recloser</i>
I low set	304	120
t low set	0,35	0,15
TMS	0,19 (<i>Standard Inverse</i>)	0,05 (<i>Standard Inverse</i>)
I high set 1	3440	1250
t high set 1	0,3 (<i>Definite</i>)	0 (<i>Instantenous</i>)
I high set 2	6000	
t high set 2	0 (<i>Instantenous</i>)	

Berdasarkan setting rekomendasi, kurva setting proteksi digambarkan sebagai berikut:

**Gambar 9.** Kurva Setting OCR Rekomendasi Hasil Perhitungan

Dalam hal menganalisa selektifitas kerja pengamanan, dilakukan pengecekan waktu kerja antara PMT *outgoing* dengan *recloser* seperti sebelumnya. Contoh perhi-

tungan waktu kerja sebagaimana terlihat pada Tabel 17.

Tabel 17. Perhitungan Waktu Kerja PMT dan Recloser

Waktu Kerja ($t_{PMT\ Outgoing}$)	Waktu Kerja Recloser ($t_{Recloser}$)
$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{hs}}{I_{set}}\right)^{0,02}-1} \times TMS$	$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{hs}}{I_{set}}\right)^{0,02}-1} \times TMS$
$t = \frac{0,14}{\left(\frac{824}{304}\right)^{0,02}-1} \times 0,19$	$t = \frac{0,14}{\left(\frac{824}{120}\right)^{0,02}-1} \times 0,05$
$t = 1,43\ s$	$t = 0,64\ s$

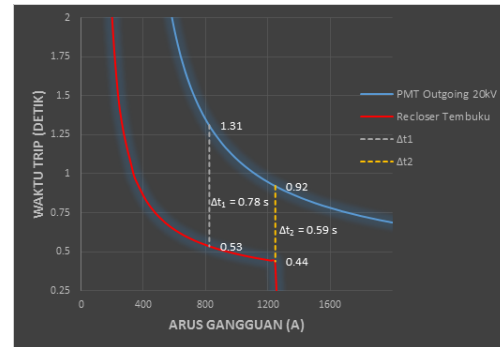
Berdasarkan cara perhitungan di atas, maka selisih waktu kerja antara PMT *Outgoing* Penyulang dengan Recloser Tembuku dirangkum sebagai berikut:

Tabel 18. Waktu Kerja PMT dan Recloser Tembuku sesuai Rekomendasi

X Iset	Ifault	$t_{PMT\ outgoing}$	$t_{Recloser}$	Δt
3.5	420	4.43	0.99	3.43
4.0	480	3.13	0.90	2.23
4.5	540	2.48	0.83	1.66
5.0	600	2.10	0.77	1.33
5.5	660	1.84	0.73	1.11
6.0	720	1.65	0.69	0.96
6.4	768	1.53	0.67	0.87
6.9	824	1.43	0.64	0.78
7.0	840	1.40	0.63	0.76
7.5	900	1.31	0.61	0.70
7.8	936	1.26	0.60	0.66
8.5	1032	1.16	0.57	0.59
9.4	1128	1.08	0.00	1.08
10.0	1200	1.03	0.00	1.03
10.6	1272	0.99	0.00	0.99

Berdasarkan kurva koordinasi OCR setting rekomendasi pada Gambar 9 dan pemeriksaan waktu kerja pada Tabel 18, terlihat bahwa selektifitas sistem pengamanan hubung singkat pada penyulang Tembuku menjadi lebih baik. Selisih waktu

kerja pada nilai I high set 1 *Recloser* Tembuku sebesar 1250 A sebagai titik yang paling dekat dengan kurva PMT *Outgoing* menunjukkan tingkat selektifitas sistem yang cukup dengan selisih waktu 0,59 detik.



Gambar 10. Selisih Waktu Kerja PMT Outgoing dengan Recloser Tembuku pada Arus Gangguan 824 A dan 1250 A

Analisa Kinerja Proteksi Penyulang Tembuku terhadap SAIFI

Berdasarkan data kinerja PT PLN (Persero) UP3 Bali Timur, nilai SAIFI ULP Bangli hingga Maret 2019 adalah 1,12 kali/pelanggan. Dalam perhitungan kinerja unit, indeks keandalan dibagi menjadi dua kategori, yaitu pemadaman terencana (pemadaman karena kegiatan pemeliharaan) dan tidak terencana (pemadaman karena gangguan). Berdasarkan data yang diperoleh, detail SAIFI yang dicapai oleh PLN ULP Bangli diuraikan pada Tabel 19.

Tabel 19. Data Pencapaian SAIFI PLN ULP Bangli

Kategori	SAIFI	
	Kali/Pelanggan Presentase	
Terencana	0,19	17%
Tidak Terencana	0,93	83%
Total	1,12	100%

Sumber: Data Kinerja PT PLN (Persero) UP3 Bali Timur

Tabel 19 menunjukkan bahwa kontribusi pemadaman tidak terencana atau pemadaman yang disebabkan oleh gang-

guan berkontribusi sebesar 83% dari total nilai SAIFI yang dicapai oleh ULP Bangli. Data gangguan yang tercatat di UP3 Bali Timur ULP Bangli selama triwulan pertama di tahun 2019 menunjukkan bahwa gangguan pada jaringan SUTM yang menyebabkan trip PMT *outgoing* di Gardu Induk menjadi penyebab utama tingginya tingkat pemadaman.

Berdasarkan data trip penyulang di atas, Penyulang Tembuku adalah yang paling banyak mengalami trip selama Triwulan I 2019. Jika dianalisa dari histori gangguan penyebab trip Penyulang Tembuku pada Tabel 13, kontribusi paling besar disebabkan oleh kegagalan koordinasi antara Recloser dan PMT *outgoing* Penyulang Tembuku

Tabel 20. Data Histori Gangguan Penyulang PLN ULP Bangli

Penyulang	Kali Trip			Trip Komulatif	%
	Januari	Februari	Maret		
Sulahan	-	-	-	-	-
Bangli	1	1	-	2	33%
Tembuku	2	1	1	4	66%
Kintamani	-	-	-	-	-
Buahan	-	-	-	-	-

Sumber: Rekapitulasi Gangguan Jaringan PLN ULP Bangli Januari-Maret 2019

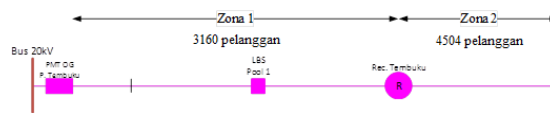
Berdasarkan uraian sebelumnya, maka dianalisa kontribusi pemadaman yang terjadi di wilayah pelayanan Penyulang Tembuku terhadap nilai SAIFI kategori tidak terencana pada ULP Bangli. Berikut data pelanggan yang dilayani oleh Penyulang Tembuku dari total 59044 pelanggan yang dilayani pada wilayah kerja ULP Bangli.

Dari total pelanggan yang dilayani dari Penyulang Tembuku, nilai SAIFI yang dihasilkan akibat pemadaman karena gangguan pada penyulang tersebut sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{SAIFI} &= \frac{\text{kali padam} \times \text{jumlah pelanggan padam}}{\text{jumlah pelanggan total}} \\
 &= \frac{4 \times 7664}{59044} \\
 &= 0,52 \text{ kali/pelanggan}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas, disimpulkan bahwa trip PMT *Outgoing* Penyulang Tembuku berkontribusi sebesar 67,5% dari total SAIFI kategori tidak terencana sebesar 0,93 kali/pelanggan pada nilai pencapaian SAIFI selama triwulan I

2019. Analisa lebih lanjut menguraikan kembali sebaran pelanggan pada zona layanan Penyulang Tembuku dengan ilustrasi pada gambar berikut:



Gambar 11. Ilustrasi Jumlah Pelanggan yang dilayani Penyulang Tembuku

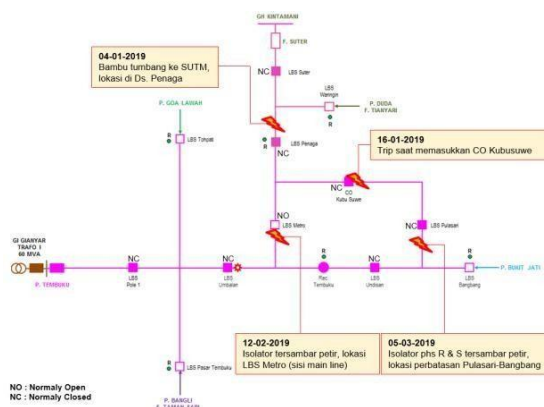
Berdasarkan ilustrasi pada Gambar 11, terlihat bahwa 41,2% pelanggan berada pada zona proteksi pertama, sedangkan 58,8% pelanggan berada pada zona proteksi kedua. Hal ini menunjukkan sebaran pelanggan pada Penyulang Tembuku cukup berimbang, ditambah dengan adanya pelanggan premium pada zona pertama menjadi alasan mengapa keandalan sistem proteksi sangat penting.

Berdasarkan histori gangguan, tiga dari empat kali trip Penyulang Tembuku disebabkan oleh proteksi *Recloser* yang tidak bekerja terhadap gangguan yang ada pada zona proteksinya. Dalam kondisi normal, jika *Recloser* bekerja sesuai de-

ngan skenario proteksi yang diharapkan, maka kontribusinya terhadap pencapaian SAIFI sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{SAIFI} &= \frac{(1 \times 7664) + (3 \times 4504)}{599044} \\ &= (0,13) + (3 \times 0,07) \\ &= 0,36 \text{ kali/pelanggan} \end{aligned}$$

Dari analisa di atas, sebesar 31% dari kontribusi pencapaian SAIFI Pe-nyulang Tembuku pada Triwulan I 2019 dapat ditekan lebih kecil jika skenario proteksi bekerja dengan baik.



Gambar 11. Histori Lokasi ditemukan Penyebab Gangguan Penyulang Tembuku

IV. SIMPULAN

1. Arus hubung singkat pada titik akhir zona 1 adalah 1271 A untuk gangguan hubung singkat 3 fasa dan 1101 A untuk gangguan hubung singkat 2 fasa. Arus hubung singkat pada titik akhir zona 2 adalah 462 A untuk gangguan hubung singkat 3 fasa dan 400 A untuk gangguan hubung singkat 2 fasa.
2. Waktu kerja setting eksisting antara PMT *Outgoing* Penyulang dengan *Recloser* Tembuku terlalu sempit. Selisih waktu kerja atau grading time antara kedua peralatan proteksi masih di bawah 0,2 s pada beberapa nilai arus gangguan sehingga menyebabkan kemungkinan kedua peralatan proteksi trip bersamaan

karena faktor sensitivitas peralatan.

3. Perhitungan menghasilkan rekomendasi setting ulang dengan TMS *Recloser* Tembuku sebesar 0,05 s dan TMS PMT *Outgoing* Penyulang sebesar 0,19 s. Pemeriksaan waktu kerja rele sesuai rekomendasi menunjukkan grading time yang cukup baik pada nilai arus gangguan khususnya di daerah transisi zona 1 dan 2 sebesar 0,59 s.
4. Kesalahan koordinasi pengaman arus lebih pada Penyulang Tembuku berkontribusi sebesar 67,5% dari total SAIFI kategori tidak terencana sebesar 0,93 kali/pelanggan selama triwulan I 2019.
5. Nilai SAIFI yang diperoleh akibat pemadaman pada Penyulang Tembuku adalah sebesar 0,36 kali/pelanggan jika *recloser* bekerja dengan baik, berbeda halnya jika *recloser* tidak bekerja dengan baik maka SAIFI yang diperoleh sebesar 0,52 kali/pelanggan, sehingga dapat ditekan sebesar 31% pada Triwulan I 2019 dengan pola koordinasi proteksi dan operasi yang baik.

V. RUJUKAN

- [1] M. Djiteng. "*Operasi Sistem Tenaga Listrik*". Yogyakarta: Graha Ilmu. 2006.
- [2] S. Wahyudi. "*Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik*". Depok: Gara-mond. 2012.
- [3] H.R Sari. "*Penentuan Angka Keluar Peralatan Untuk Evaluasi Keadalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik*". Bali: Universitas Udayana. 2017.
- [4] B. Indra. "*Studi Koordinasi Peralatan Proteksi OCR dan GFR pada Penyulang Tibubeneng*". Bali: Universitas Udayana. 2015.

- [5] IEEE Std 242. "*IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*". New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2001.
- [6] I.W Sukadana, and I.N Suartika. "*Optimalisasi LBS Motorized Key Point Pada Jaringan Distribusi 20 KV untuk Meningkatkan Keandalan Sistem.*" *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)* 5.1.1 (2019): 141-149.
- [7] M. Nobalt, Benoit. "*Calculation of Short Circuit Currents*". France: Schneider Electric. 2015.
- [8] SNI 04-0225. "*Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000)*". Jakarta: Badan Standarisasi Nasional. 2000.
- [9] Suhadi. 2008. "*Teknik Distribusi Tenaga Listrik*". Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional.
- [10] S.DWilliam "*Analisis Sistem Tenaga Listrik*". Jakarta: Er-langga. 1993.
- [11] S. Daman. "*Sistem Distribusi Tenaga Listrik*". Padang: Universitas Negeri Padang. 2009.
- [12] S. Ramadoni. "*Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik*". Yogyakarta: LP3M UMY Yogyakarta. 2016.
- [13] M. Syamsudin, "*Kinerja Distribusi*". Jakarta: PT PLN (Persero) Pusat Pendidikan dan Pelatihan. 2010.

