
**ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT PENYULANG UNM DI
GI PANAKKUKANG DENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE ETAP
21.0.1**

Moh. Kayyum¹, Sugeng A. Karim², Al Imran³

Universitas Negeri Makassar^{1,2,3}

muhammadkayyum78@gmail.com¹, al.imran@unm.ac.id², sugeng.a@unm.ac.id³

ABSTRAK

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan model analisis gangguan hubung singkat berbasis data aktual sistem distribusi 20 kV pada Penyulang UNM di Gardu Induk Panakkukang yang mengintegrasikan pendekatan komponen simetris dengan pemodelan detail jaringan menggunakan ETAP 21.0.1. Penelitian ini tidak hanya melakukan validasi kuantitatif antara metode analitis dan simulasi numerik dengan tingkat deviasi <1%, tetapi juga mengevaluasi sensitivitas arus gangguan terhadap variasi lokasi titik gangguan sepanjang penyulang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis besar arus gangguan hubung singkat pada Penyulang UNM di Gardu Induk Panakkukang, meliputi gangguan tiga fasa, dua fasa, serta satu fasa ke tanah dengan menggunakan metode perhitungan manual dan simulasi software ETAP 21.0.1. Data yang digunakan mencakup spesifikasi transformator, impedansi saluran, serta karakteristik penyulang sepanjang 4 km dengan penghantar AAAC 150 mm². Hasil perhitungan menunjukkan bahwa arus gangguan terbesar terjadi pada hubung singkat tiga fasa sebesar 11,770 kA, sedangkan hasil simulasi ETAP menghasilkan nilai 12,064 kA. Untuk gangguan dua fasa diperoleh arus 10,197 kA (manual) dan 10,448 kA (ETAP), sedangkan pada gangguan satu fasa ke tanah nilai arus lebih kecil yaitu sekitar 0,288 kA. Selisih antara hasil perhitungan manual dan simulasi berada di bawah 1%, sehingga metode perhitungan manual terbukti valid sebagai acuan. Analisis juga menunjukkan bahwa semakin jauh titik gangguan dari sumber, arus gangguan semakin kecil akibat bertambahnya impedansi saluran.

Kata Kunci: Hubung Singkat, Penyulang UNM, ETAP 21.0.1, Arus Gangguan, GI Panakkukang.

ABSTRACT

The novelty of this research lies in the development of a short circuit fault analysis model based on actual data of the 20 kV distribution system at the UNM Feeder at the Panakkukang Substation that integrates the symmetrical component approach with detailed network modeling using ETAP 21.0.1. This research not only conducts quantitative validation between analytical methods and numerical simulations with a deviation level of <1%, but also evaluates the sensitivity of the fault current to variations in the location of the fault point along the feeder. This study aims to analyze the magnitude of the short circuit fault current at the UNM Feeder at the Panakkukang Substation, including three-phase, two-phase, and single-phase to

ground faults using manual calculation methods and ETAP 21.0.1 software simulations. The data used include transformer specifications, line impedances, and characteristics of the 4 km long feeder with 150 mm² AAAC conductors. The calculation results show that the largest fault current occurs in a three-phase short circuit at 11.770 kA, while the ETAP simulation results produce a value of 12.064 kA. For two-phase faults, currents obtained are 10.197 kA (manual) and 10.448 kA (ETAP), while for single-phase to ground faults, the current value is smaller, at around 0.288 kA. The difference between the manual calculation and simulation results is below 1%, so the manual calculation method is proven valid as a reference. The analysis also shows that the further the fault point is from the source, the smaller the fault current due to the increase in line impedance.

Keywords: Short circuit, UNM Feeder, ETAP 21.0.1, Fault Current, Panakkukang Substation.

A. PENDAHULUAN

Suatu sistem tenaga listrik sering kali dihadapkan pada permasalahan interferensi yang dapat menyebabkan penyediaan energi listrik menjadi terganggu. Gangguan hubung singkat merupakan salah satu jenis gangguan yang dapat menyebabkan terhambatnya penyaluran energi listrik. Gangguan hubung singkat biasanya disebabkan oleh rusaknya bahan isolasi pada penghantar. Gangguan hubung singkat mekanis dapat menyebabkan kerusakan pada sistem dan peralatan elektronik, serta secara ekonomis dapat menyebabkan kegiatan produksi dan distribusi menjadi berkurang atau terhenti (Gaffar dkk., 2022).

Daya listrik yang disalurkan melalui sistem distribusi tenaga listrik menuju konsumen harus memiliki mutu dan keandalan yang tinggi. Dalam penyaluran energi listrik sering terjadi gangguan-gangguan yang dapat menghambat penyaluran energi listrik ke konsumen. Dari berbagai jenis gangguan yang terjadi faktor internal dan faktor eksternal bisa menyebabkan terjadinya hubung singkat. Faktor internal dari gangguannya ini terjadi akibat peralatan listrik yang rusak. Faktor eksternal terjadi akibat dari cuaca yang buruk seperti gempa bumi, angin puting beliung, petir, runtuhnya pohon yang tumbang, dan lain-lain. Terjadinya hubung singkat ketika penghantar bertegangan akan berhubungan dengan penghantar netral (ground) (Saputra, 2022).

Di Gardu Induk Panakkukang mempunyai tiga buah transformator yang memasok ke beberapa penyulang salah satunya trafo tiga yang terdiri dari 7 penyulang yaitu Penyulang Adyaksa, Penyulang Rappocini, Penyulang Veteran, Penyulang Latanete, Penyulang IKIP, Penyulang UNM, Penyulang Perumnas dan dari beberapa penyulang tersebut salah satu yang

sering terjadi gangguan hubung singkat adalah pada Penyulang UNM. Oleh sebab itu, diperlukan suatu analisis terhadap hubung singkat yang bertujuan untuk mengetahui gangguan hubung singkat 3 fasa, 2 fasa, 2 fasa ke tanah dan 1 fasa ke tanah. Sehingga besarnya arus gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi didalam suatu sistem kelistrikan perlu diketahui sebelum gangguan yang sesungguhnya terjadi.

Rumusan masalah dalam penelitian ini meliputi berapa besar arus gangguan hubung singkat pada jaringan distribusi 20 kV pada penyulang Unm di GI Panakkukang dan bagaimana hasil antara nilai perhitungan analisis gangguan hubung singkat dengan nilai yang ditampilkan dengan simulasi pada ETAP 21.0.1. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui berapa besar arus gangguan tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ke bumi pada jaringan distribusi 20 kV pada Penyulang UNM dan untuk mengetahui nilai perhitungan analisis gangguan hubung singkat dengan nilai yang ditampilkan dalam simulasi pada software ETAP 21.0.1. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan teknis bagi pihak terkait dalam mengevaluasi besarnya arus gangguan hubung singkat pada Penyulang UNM di Gardu Induk Panakkukang serta dapat memberikan referensi dalam penentuan koordinasi dan setting sistem proteksi agar sesuai dengan kondisi arus gangguan yang terjadi di lapangan.

B. TINJAUAN PUSTAKA

Gangguan hubung singkat dapat didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi akibat adanya penurunan kekuatan dasar isolasi antara sesama kawat fasa dengan tanah. Hubung singkat terjadi ketika penghantar yang bertegangan tersambung langsung ke penghantar netral. Gangguan hubung singkat adalah gangguan yang terjadi karena adanya kesalahan antara bagian-bagian yang bertegangan. Gangguan hubung singkat adalah suatu kondisi pada sistem tenaga dimana penghantar yang berarus terhubung dengan penghantar lain atau dengan tanah (Aryanto & Balkis, 2021).

Ada dua jenis arus gangguan hubung singkat, yaitu arus gangguan hubung singkat simetris dan tidak simetris. Gangguan hubung singkat simetris ini hanya terjadi pada sistem 3 fasa. Hubung singkat jenis ini terjadi dimana ketiga konduktor terhubung singkat secara bersamaan (Imran & Nayla, 2024). Hubung singkat tipe simetris hanya untuk hubung singkat 3 fasa dengan atau tanpa ground. Hanya 5% dari total kejadian gangguan hubung singkat merupakan hubung singkat tiga fasa. Sedangkan, Gangguan hubung singkat tidak simetris jenis

ini terjadi pada sistem satu dan tiga fasa. Hubung singkat terjadi antara konduktor bertegangan dengan atau tanpa ground. Hubung singkat tidak simetris ini dibagi menjadi: Line to line fault (dua fasa yang disingkat tanpa tanah), Double line to ground fault (dua fase yang terhubung bersama ke tanah), dan Single line to ground fault (salah satu fase terhubung singkat ke tanah). Secara statistik menunjukkan bahwa sekitar 70-80% gangguan listrik yang ada dalam sistem tenaga adalah gangguan yang tidak simetris (Saifudin, 2021).

C. LANDASAN TEORI

Analisis gangguan hubung singkat adalah analisis yang mempelajari kontribusi arus gangguan hubung singkat yang mungkin mengalir pada setiap cabang di dalam sistem ketika gangguan hubung singkat terjadi di dalam sistem tenaga listrik. Analisis gangguan hubung singkat merupakan suatu hal yang penting untuk menentukan rating arus hubung singkat, seperti interrupting capacity (breaking capacity) dan momentary capacity semua circuit breaker dan momentary capacity busbar yang digunakan pada sistem tenaga atau sistem distribusi untuk melindungi perangkat dan peralatan sistem distribusi dari efek yang ditimbulkan oleh gangguan hubung singkat (Imran dkk., 2021).

Dalam menentukan setting relai proteksi yang digunakan untuk melindungi sistem dari kemungkinan adanya gangguan hubung singkat sehingga dilakukan analisa gangguan hubung singkat. Perhitungan gangguan hubung singkat bertujuan untuk menghitung arus maksimum dan minimum gangguan, dan tegangan pada lokasi yang berbeda dari sistem tenaga untuk jenis gangguan yang berbeda sehingga rancangan pengaman, relai dan pemutus yang tepat bisa dipilih untuk melindungi sistem dari kondisi yang tidak normal dalam waktu yang singkat (Galla dkk., 2020).

a. Menghitung Nilai Impedansi

Pada jaringan distribusi terdapat tiga jenis impedansi yaitu impedansi positif, impedansi negative dan impedansi nol. Untuk mendapatkan impedansi total dari jaringan distribusi maka perlu dihitung ketiga jenis impedansi tersebut pada sumber, trafo dan penyulang. Impedansi sumber sisi primer (Saadat, 1999). Berikut Persamaannya:

$$X_{primer} = \frac{kv^2}{mva_{hs}} \quad (3.1)$$

Keterangan:

X primer: Impedansi Sumber Primer (Ohm)

kV : Tegangan Sumber (kilo Volt)

MVAhs : Data Hubung Singkat (MVA)

Sedangkan impedansi sumber sisi sekunder dihitung dengan mengkonversikan impedansi sisi primer ke sisi sekunder (Grainger, J.J. & Stevenson, 1994). Berikut persamaannya.

$$Xs \text{ primer} = \frac{kV_2^2}{kV_1^2} \times Z \text{ primer.} \quad (3.2)$$

Keterangan:

Z primer : Impedansi Sumber Primer (Ohm)

Zs : Impedansi Sumber Sekunder (Ohm)

kV₁ : Tegangan Sisi Primer Transformator Daya (kilo Volt)

kV₂ : Tegangan Sisi Sekunder Transformator Daya (kilo Volt)

Setelah mendapatkan nilai reaktansi sumber, maka perlu dilakukan perhitungan reaktansi transformtor menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Xt = (Z\%) \times \frac{KV \text{ Sekunder}^2}{MVA \text{ trafo}} \quad (3.3)$$

Keterangan:

Xt : Impedansi urutan positif negatif transformator (Ohm)

(Z%) : Impedansi transformator tenaga

kV sekunder : Tegangan Sisi Sekunder Transformator (kilo Volt)

MVA trafo : Daya Transformator (VA)

$$X_{t0} = 3 \times j \times Xt \quad (3.4)$$

Keterangan:

Xt : Impedansi Urutan positif negatif transformator (Ohm)

X_{t0} : Impedansi urutan nol transformator (Ohm)

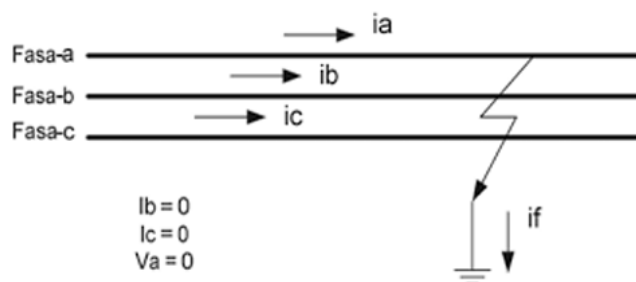
$$Z \text{ Penyulang} = \text{Panjang Penyulang} \times Z_{\text{penghantar}} \quad (3.5)$$

Keterangan:

$Z_{penyulang}$: Impedansi Penyulang (Ohm)

$Z_{penghantar}$: Impedansi Jenis Penghantar (Ohm)

b. Menghitung Arus Hubung Singkat 1 Fasa



Gambar 3.1 Gangguan Satu Fasa ke Tanah

$$I_{1\text{fasa}} = \frac{3 \times V_{L-N}}{Z_{1ek} + Z_{2ek} + Z_{0ek}} \quad (3.6)$$

$I_{1\text{fasa}}$: Arus gangguan 1 fasa ke tanah (A)

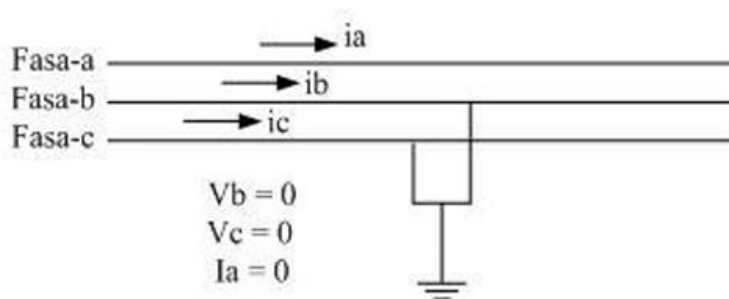
V_{L-N} : Tegangan fasa netral sisi sekunder transformator (kV)

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

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

Z_{0eq} : Impedansi Ekivalen urutan nol (Ω)

c. Menghitung Arus Hubung Singkat 2 Fasa



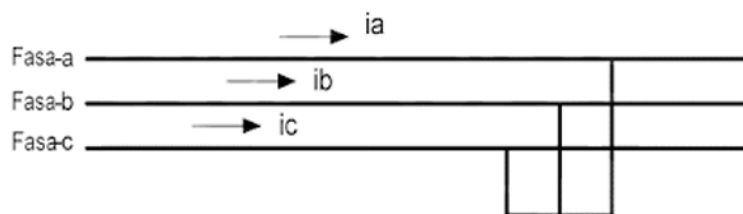
Gambar 3.2 Gangguan Satu Fasa Ke Tanah

$$I_{2fasa} = \frac{V_{L-N}}{Z_{1eq} + Z_{2eq}} \quad (3.7)$$

Keterangan:

- I_{2fasa} : Arus gangguan 2 fasa ketanah (A)
- V_{L-N} : Tegangan fasa netral sisi sekunder transformator (V)
- Z_{1eq} : Impedansi Ekivalen Urutan Positif (Ω)
- Z_{2eq} : Impedansi Ekivalen Urutan negatif (Ω)

d. Menghitung Arus Hubung Singkat 3 Fasa



Gambar 3.1 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

$$I_{3fasa} = \frac{V_{ph}}{Z_{1eq}} \quad (3.8)$$

Keterangan:

- I_{3fasa} : Arus gangguan 3 fasa (A)
- V_{ph} : Tegangan Nominal (Volt)
- Z_{1eq} : Impedansi Ekivalen Urutan Positif (Ω)

D. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif yang bertujuan untuk menganalisis besarnya arus gangguan hubung singkat pada jaringan distribusi 20 kV Penyulang UNM di Gardu Induk Panakkukang. Penelitian dilaksanakan di PLN ULP Mattoangng Kota Makassar selama empat bulan, yaitu dari Maret hingga Mei 2025.

Tahapan analisis dimulai dari perhitungan teknis berdasarkan data sistem kelistrikan yang diperoleh, kemudian divalidasi menggunakan simulasi perangkat lunak ETAP 21.0.1. Jenis gangguan yang dianalisis meliputi gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa

ke tanah. Hasil perhitungan manual dan simulasi dibandingkan untuk mengetahui tingkat kesesuaian serta memberikan gambaran kondisi sistem distribusi dalam menghadapi gangguan hubung singkat.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data pembebanan yang telah diperoleh di bawah, langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan arus gangguan hubung singkat untuk mengetahui jumlah arus hubung singkat yang mengalir pada rangkaian ketika terjadi arus gangguan hubung singkat. Adapun jenis gangguan hubung singkat yang akan dihitung meliputi:

- 1) Hubung singkat tiga fasa
- 2) Hubung singkat dua fasa
- 3) Hubung singkat satu fasa ke bumi

Perhitungan gangguan hubung singkat yang terjadi pada penyulang 20 kV dihitung nilainya berdasarkan dari beberapa titik gangguan yaitu 0%, 25%, 75%, dan 100% dari panjang penyulang.

Berikut adalah rekapitulasi data pada wilayah kerja PT. PLN (Persero) ULP Panakkukang dan Gardu Induk PT. PLN (Persero) ULTG Panakkukang, data ini mencakup data penyulang UNM, data trafo tenaga dan data hubung singkat pada trafo III GI Panakkukang sebagaimana disajikan pada tabe 1, tabel 2 dan tabel 3.

Penyulang UNM merupakan wilayah kerja dari PT PLN (Persero) ULP Panakkukang yang disuplai dari Trafo-III Gardu Induk Panakkukang dengan kapasitas trafo 60 MVA. Data penyulang UNM ditunjukkan pada Tabel 41 berikut:

Tabel 1 Data Penyulang UNM

Penyulang UNM	
Tegangan	20 kV
Jenis Penghantar	AAAC
Arus Maksimal	73,2 A
Ukuran Pemghantar	150 mm ²
Panjang Jaringan	4.00 kms

Impedansi Positif dan Negatif	$0,216 + j 0,330 \Omega/\text{km}$
Impedansi Nol	$0,363 + j 1,618 \Omega/\text{km}$

Pada Gardu Induk Panakkukang terdapat tiga transformator yang aktif digunakan yaitu Trafo-I berkapasitas 60 MVA, Trafo-II berkapasitas 60 MVA, Trafo-III berkapasitas 60 MVA. Penyulang UNM dilayani oleh Trafo-III berkapasitas 60 MVA. Spesifikasi Trafo-III pada Gardu Induk Panakkukang yang melayani penyulang Malewang dapat dilihat pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2 Spesifikasi Trafo Tenaga III GI Panakkukang

Trafo Tenaga	
Tegangan	150/20 kV
Impedansi	12,752%
Tegangan Primer	150 kV
Tegangan Sekunder	20 kV
Rasio CT	2000/5
Arus Nominal Trafo	1732,0 A
Vector Grub	Ynyn0
Ground Resistor	40 Ohm
In NGR	300 A

Berikut data hubung singkat yang ada pada trafo III GI Panakkukang:

Tabel 3 Data Hubung Singkat

Data Hubung Singkat	
Daya Hubung Singkat	3042,8 MVA

a. Impedansi Sumber

Data MVA hubung singkat di bus 150 kV di Gardu Induk Panakkukang adalah MVA. Berdasarkan data hubung singkat tersebut maka impedansi sumber pada sisi 150 kV dapat dihitung menggunakan persamaan (1), maka:

$$\begin{aligned} X_{primer} &= \frac{kV^2}{MVA_{hs}} \\ &= \frac{150^2}{3042,8} \\ &= 7,39 \Omega \end{aligned}$$

Sedangkan impedansi sumber pada sisi sekunder dihitung dengan menggunakan persamaan (2) seperti di bawah ini:

$$\begin{aligned} X_{sekunder} &= \frac{kV_2^2}{kV_1^2} \times X_{primer} \\ &= \frac{20^2}{150^2} \times 7,39 \Omega \\ &= \frac{400}{22500} \times 7,39 \Omega = 0,131 \Omega \end{aligned}$$

b. Menghitung Reaktansi Transformator

Berdasarkan dari data yang diperoleh, nilai impedansi transformator 60 MVA adalah, untuk mendapatkan nilai reaktansi positif, negative dan nol dalam satuan ohm (Ω) maka terlebih dahulu menghitung nilai reaktansi pada kondisi 100%. dimana:

$$\begin{aligned} X \text{ (Pada 100\%)} &= \frac{\text{Tegangan HV Travo}}{\text{Kapasitas Trafo}} \\ &= \frac{20^2}{60} \\ &= j 6,667 \Omega \end{aligned}$$

Maka besarnya nilai reaktansi urutan positif, negative dan nol adalah sebagai berikut:

Reaktansi urutan positif dan negative ($X_{t1} = X_{t2}$) dengan menggunakan persamaan (3) seperti di bawah ini:

$$\begin{aligned} X_{t_1} = X_{t_2} &= 12,753\% \times 6,667 \\ &= 0,850 \Omega \end{aligned}$$

Sehingga nilai ($X_{t1} = X_{t2}$) = 0,850 Ω

Karena transformator daya pada Gardu Induk Panakkukang mempunyai hubungan belitan YNyn0d, maka besarnya nilai X_{t0} dapat dihitung menggunakan persamaan (4) seperti di bawah ini:

$$\begin{aligned} X_{t_0} &= 3 \times j X_t \\ &= 3 \times j 0,850 \\ &= 2,55 \Omega \end{aligned}$$

Sehingga nilai $X_{t_0} = 2,55 \Omega$

c. Menghitung Impedansi Penyulang

Jenis penghantar yang digunakan pada penyulang UNM adalah AAAC 150 mm² dengan panjang jaringan 4.00 km. Berdasarkan karakteristik kawat, nilai impedansi positif dan nolnya adalah:

$$\begin{aligned} Z_1 = Z_2 &= 0,216 + j 0,330 \Omega/\text{km} \\ Z_0 &= 0,363 + j 1,618 \Omega/\text{km} \end{aligned}$$

Karena penyulang dibagi beberapa titik gangguan, maka nilai impedansi penyulang pada jarak 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% Sehingga nilai impedansi total penyulang dengan panjang 4,00 km adalah:

$$\begin{aligned} Z_1 = Z_2 &= L \times Z_{\text{positif}} \\ &= 2 \times (0,216 + j 0,330) \\ &= 0,432 + j 0,66 \Omega \\ Z_0 &= L \times Z_{\text{nol}} \\ &= 2 \times (0,363 + j 1,618) \\ &= 0,726 + j 3,236 \Omega \end{aligned}$$

Impedansi urutan positif dan negatif pada penyulang UNM yang dihitung berdasarkan persentase panjang saluran dari 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% yang kemudian dikalikan dengan panjang penyulang UNM yaitu 4,00 km ditunjukkan pada tabel 4.5 berikut ini:

Tabel 4 Impedansi urutan positif dan negatif pada penyulang

No	Panjang Saluran (%)	Impedansi Penyulang ($Z_1 = Z_2$) (Ω)
1	0	0
2	25	$0,216 + j 0,33$
3	50	$0,432 + j 0,66$
4	75	$0,648 + j 0,99$

5	100	0,864 + j 1,32
---	-----	----------------

Impedansi urutan Nol pada penyulang UNM yang dihitung berdasarkan persentase panjang saluran dari 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% yang kemudian dikalikan dengan panjang penyulang UNM yaitu 4,00 km ditunjukkan pada tabel 5 berikut ini:

Tabel 5 Impedansi urutan positif dan negatif pada penyulang

No	Panjang Saluran (%)	Impedansi Penyulang (Z_0) (Ω)
1	0	0
2	25	0,363 + j 1,618
3	50	0,726 + j 3,236
4	75	1,089 + j 4,854
5	100	1,452 + j 6,472

d. Menghitung Impedansi Ekuivalen Jaringan

Dengan menggunakan persamaan (5) maka nilai impedansi urutan positif dan negatif sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 Z_{1eq} = Z_{2eq} &= Z_{S1} \text{ (Sekunder)} + Z_{Tr} + Z_L \text{ (Penyulang)} \\
 &= 0,131 + j 0,850 + j 0,33 \\
 &= 0,981 + j 0,33 \\
 &= j 1,311
 \end{aligned}$$

Nilai impedansi urutan positif penyulang sama dengan nilai impedansi urutan negatif penyulang maka impedansi ekuivalen urutan positif dan negatif jaringan di setiap gangguan dapat dilihat pada tabel dibawah.

Tabel 6 Impedansi ekuivalen jaringan urutan positif dan negatif pada penyulang

No	Panjang Saluran (%)	Impedansi Penyulang ($Z_1 = Z_2$) (Ω)
1	0	j 0,981
2	25	0,216 + j 1,311
3	50	0,432 + j 1,641
4	75	0,648 + j 1,971

5	100	0,864 + j 2,301
---	-----	-----------------

Pada tabel 6 menunjukkan hasil perhitungan impedansi ekuivalen jaringan urutan positif dan negatif pada penyulang Clarion berdasarkan penjumlahan dari impedansi sekunder, impedansi trafo serta impedansi penyulang yang disesuaikan dengan presentase jarak.

Dengan menggunakan persamaan (5), maka nilai impedansi urutan nol sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Z_{0eq} &= Z_{t0} + 3 RN + Z_0 \text{ (Penyulang)} \\ &= j 2,55 + (3 \times 40) + Z_0 \text{ (Penyulang)} \\ &= j 2,55 + 120 + Z_0 \text{ (Penyulang)} \end{aligned}$$

Maka impedansi ekuivalen urutan nol pada titik gangguan 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100 %:

Tabel 7 Impedansi ekuivalen urutan nol pada penyulang

No	Panjang Saluran (%)	Impedansi Ekuivalen Urutan Nol
1	0	j 2,55 + 120
2	25	120,363 + j 4,168
3	50	120,726 + j 5,786
4	75	121,089 + j 7,404
5	100	121,452 + j 9,022

Pada tabel 7 menunjukkan hasil perhitungan impedansi ekuivalen urutan nol pada penyulang UNM berdasarkan penjumlahan dari impedansi urutan nol, tiga kali nilai ground resistor pada trafo serta impedansi penyulang yang disesuaikan dengan presentase jarak.

e. Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat 3 fasa

Setelah mendapatkan impedansi ekuivalen jaringannya sesuai dengan lokasi gangguan, selanjutnya menghitung arus gangguan hubung singkat. Untuk nilai impedansinya menggunakan impedansi ekuivalen jaringan dan juga tergantung pada jenis gangguan hubung singkatnya yaitu 3 fasa, 2 fasa dan 1 fasa ke tanah.

Dengan menggunakan persamaan (8), maka nilai arus hubung singkat 3 fasa pada titik gangguan 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%:

$$\begin{aligned} I_{3\text{fasa}} &= \frac{V_{ph}}{Z_{1eq}} \\ &= \frac{11547}{1,696910} \\ &= 6,804 \text{ kA} \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas kami mengambil sampel perhitungan di titik 50% dan untuk hasil perhitungan di titik 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%: dengan perhitungan sama dengan diatas kita bisa lihat di tabel dibawah:

Tabel 8 Arus gangguan hubung singkat 3 fasa

No	Panjang Saluran (%)	Arus Hubung Singkat 3 Fasa (kA)
1	0	11,770
2	25	8,690
3	50	6,804
4	75	5,565
5	100	4,697

Pada tabel 4.9 menunjukkan hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 3 fasa pada penyulang UNM berdasarkan pembagian antara tegangan nominal dan impedansi ekuivalen pada penyulang UNM yang disesuaikan dengan persentase panjang salurannya.

f. Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat 2 fasa

Dengan menggunakan persamaan (7), maka nilai arus hubung singkat 2 fasa pada titik gangguan 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%:

$$\begin{aligned} I_{2\text{fasa}} &= \frac{V_{ph-ph}}{Z_{1eq} + Z_{2eq}} \\ &= \frac{20000}{Z_{1eq} + Z_{2eq}} \end{aligned}$$

Karena Nilai $Z_{1eq} = Z_{2eq}$

$$I_{2\text{fasa}} = \frac{20000}{2 \times Z_{1eq}}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Perhitungan} &= \frac{20000}{2 \times Z_{1eq}} \\
 &= \frac{20000}{2 \times (0,432 + j 1,641)} \\
 &= \frac{20000}{0,864 + j 3,282} \\
 &= \frac{20000}{\sqrt{0,864^2 + 3,282^2}} \\
 &= \frac{20000}{\sqrt{0,746496 + 10,771524}} \\
 &= \frac{20000}{\sqrt{11,51802}} \\
 &= \frac{20000}{3,393820} \\
 I_{2fasa} &= 5,893 \text{ kA}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas kami mengambil sampel perhitungan di titik 50% dan untuk hasil perhitungan di titik 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%: dengan perhitungan sama dengan diatas kita bisa lihat di tabel dibawah:

Tabel 9 Arus gangguan hubung singkat 2 fasa

No	Panjang Saluran (%)	Arus Hubung Singkat 2 Fasa (kA)
1	0	10,193
2	25	7,526
3	50	5,893
4	75	4,819
5	100	4,068

Pada tabel 9 menunjukkan hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 2 fasa pada penyulang UNM berdasarkan pembagian antara tegangan fasa netral dan impedansi urutan positif dan negatif pada penyulang UNM yang disesuaikan dengan persentase panjang salurannya.

g. Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat 1 fasa ke tanah

Untuk gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah pada titik 0%, 25%, 50%, 75%, 100% dapat digunakan persamaan (6) seperti di bawah ini:

$$I_{1\text{fasa}} = \frac{3 \times V_{ph}}{Z_{1eq} + Z_{2eq} + Z_0}$$

$$I_{1\text{fasa}} = \frac{3 \times V_{ph}}{2 \times Z_{1eq} + Z_0}$$

$$I_{1\text{fasa}} = \frac{3 \times 20000 \sqrt{3}}{(2 \times 0,432 + 120,726) + (2 \times 1,641 + 5,786)}$$

$$= \frac{34641}{121,59 + 9,068}$$

$$= \frac{34641}{\sqrt{121,59^2 + 9,068^2}}$$

$$= \frac{34641}{\sqrt{14.784,1281 + 82,228624}}$$

$$= \frac{34641}{\sqrt{14.866,356724}}$$

$$= \frac{34641}{121,927670}$$

$$I = 284,111063 \text{ A}$$

$$I_{1\text{fasa}} = 0,284 \text{ kA}$$

Dari perhitungan diatas kami mengambil sampel perhitungan di titik 50% dan untuk hasil perhitungan di titik 0%,25%,50%,75%, dan 100%, dengan perhitungan sama dengan diatas kita bisa lihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 10 Arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

No	Panjang Saluran (%)	Arus Hubung Singkat 1 Fasa (kA)
1	0	0,288
2	25	0,286
3	50	0,284
4	75	0,281
5	100	0,279

Pada tabel 10 menunjukkan hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 1 fasa pada penyulang UNM berdasarkan pembagian antara tiga kali tegangan fasa netral dengan penjumlahan impedansi urutan positif dan negatif dengan impedansi urutan nol pada penyulang UNM yang disesuaikan dengan persentase panjang salurannya.

Setelah mendapatkan nilai arus gangguan hubung singkat 3 fasa, 2 fasa dan 1 fasa ke tanah, maka dapat dilihat perbandingannya sebagai berikut:

Tabel 11 Perbandingan arus gangguan hubung singkat 3 fasa, 2 fasa dan 1 fasa ke tanah

No	Panjang Saluran (%)	Jarak (km)	Arus Hubung Singkat (kA)		
			3 Fasa	2 fasa	1 Fasa ke Tanah
1	0	0	11,770	10,193	0.288
2	25	1	8,690	7,526	0,286
3	50	2	6,804	5,893	0,284
4	75	3	5,565	4,819	0,281
5	100	4	4,697	4,068	0,279

Dari tabel 11 dapat dilihat bahwa besarnya arus gangguan hubung singkat dipengaruhi oleh jarak titik gangguan, semakin jauh jarak titik gangguan maka semakin kecil arus gangguan hubung singkatnya dan sebaliknya. Selain itu dapat dilihat bahwa arus gangguan hubung singkat terbesar adalah arus gangguan hubung singkat tiga fasa, apabila ditinjau dari gangguan antar fasa.

h. Simulasi Arus Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Pada simulasi ini yang akan dilihat besarnya arus gangguan hubung singkat yang terjadi pada penyulang 20 kV, yaitu gangguan hubung singkat 3 fasa, 2 fasa dan 1 fasa ke tanah. Pada simulasi ini akan menunjukkan kondisi normal jaringan dan ketika terjadi ketiga gangguan tersebut diatas. Simulasi ini dibuat dengan software ETAP 21.0.1. Berikut gambar simulasi single line yang dibuat pada software dalam keadaan gangguan:

a) Simulasi Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Dari simulasi yang dilakukan pada penyulang UNM diketahui panjang penyulang sebesar 4,00 km. Pada titik gangguan terletak pada 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang penyulang dari busbar 20 kV, maka dapat dilihat hasil nilai arus gangguan hubung singkat 3 fasa pada tabel berikut:

Tabel 12 Hasil Simulasi arus hubung singkat 3 fasa menggunakan *ETAP 21.0.1*

No	Panjang Saluran (%)	Simulasi Arus Hubung Singkat 3 Fasa (kA)
1	0	12,064
2	25	9,198
3	50	7,416
4	75	6,207
5	100	5,334

b) Simulasi Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa

Dari simulasi yang dilakukan pada penyulang UNM diketahui panjang penyulang sebesar 4,00 km. Pada titik gangguan terletak pada 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang penyulang dari busbar 20 kV, maka dapat dilihat hasil nilai arus gangguan hubung singkat 2 fasa pada tabel berikut:

Tabel 13 Hasil Simulasi arus hubung singkat 2 fasa menggunakan *ETAP 21.0.1*

No	Panjang Saluran (%)	Simulasi Arus Hubung Singkat 2 Fasa (kA)
1	0	10,448
2	25	7,966
3	50	6,422
4	75	5,375
5	100	4,619

c) Simulasi Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah

Dari simulasi yang dilakukan pada penyulang UNM diketahui panjang penyulang sebesar 4,00 km. Pada gambar diatas titik gangguan terletak pada 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang penyulang dari busbar 20 kV, maka dapat dilihat hasil nilai arus gangguan hubung singkat 1 fasa pada tabel berikut:

Tabel 14 Hasil Simulasi arus hubung singkat 1 fasa menggunakan ETAP 21.0.1

No	Panjang Saluran (%)	Simulasi Arus Hubung Singkat 1 Fasa ke tanah (kA)
1	0	0
2	25	0
3	50	0
4	75	0
5	100	0

i. Perbandingan Hasil Perhitungan dan Hasil Simulasi

Setelah melakukan perhitungan arus gangguan hubung singkat dan telah membuat simulasi didapatkan nilai perbandingan berikut.

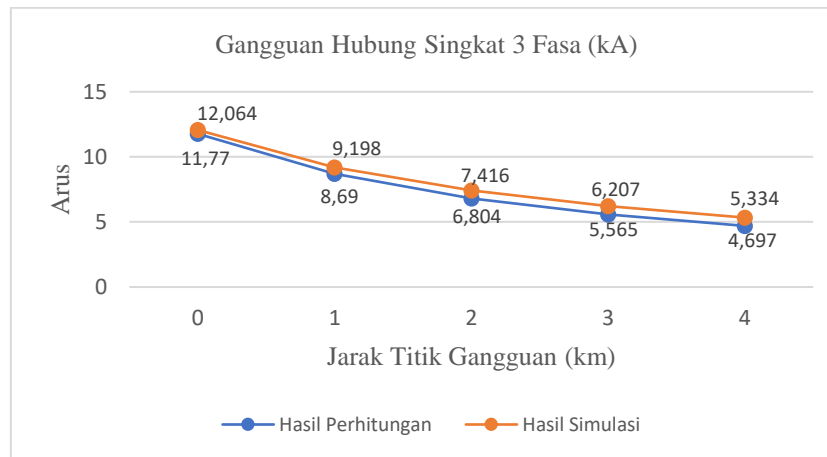
a) Gangguan hubung singkat 3 fasa

Tabel 15 Perbandingan hasil perhitungan dengan hasil simulasi arus gangguan hubung singkat 3 fasa

No	Panjang Saluran (%)	Jarak (km)	Arus Hubung Singkat (kA)	
			Hasil Perhitungan	Hasil Simulasi
1	0	0	11,770	12,064
2	25	1	8,690	9,198
3	50	2	6,804	7,416
4	75	3	5,565	6,207
5	100	4	4,697	5,334

Pada tabel 15 menunjukkan perbandingan hasil perhitungan dengan hasil simulasi arus gangguan hubung singkat 3 fasa dimana dari tabel diatas dapat dilihat bahwa setiap persentase panjang saluran dari hasil perhitungan dengan menggunakan rumus dan simulasi pada software ETAP 21.0.1.

Setelah melakukan perhitungan dan simulasi yang hasilnya dapat dilihat pada tabel diatas, maka dapat dibuat grafik arus gangguan hubung singkat terhadap jaak titik gangguan sebagai berikut:



Gambar 4.1 Grafik Hubung Singkat 3 Fasa Terhadap Jarak Titik Gangguan

Dari grafik diatas, dapat dilihat bahwa pada gangguan hubung singkat 3 fasa besarnya nilai arus gangguan yang terjadi pada penyulang 20 kV dipengaruhi oleh jarak titik gangguan.

b) Gangguan hubung singkat 2 fasa

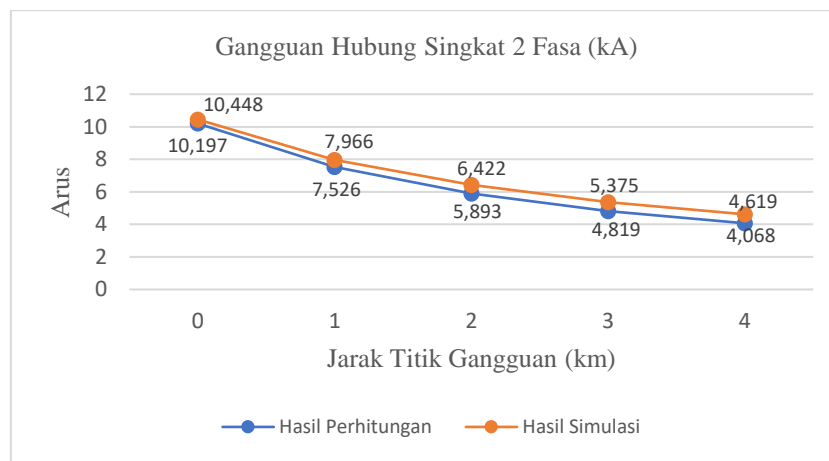
Tabel 16 Perbandingan hasil perhitungan dengan hasil simulasi arus gangguan hubung singkat 2 fasa

No	Panjang Saluran (%)	Jarak (km)	Arus Hubung Singkat (kA)	
			Hasil Perhitungan	Hasil Simulasi
1	0	0	10,197	10,448
2	25	1	7,526	7,966
3	50	2	5,893	6,422
4	75	3	4,819	5,375
5	100	4	4,068	4,619

Pada tabel 16 menunjukkan perbandingan hasil perhitungan dengan hasil simulasi arus gangguan hubung singkat 2 fasa dimana dari tabel diatas dapat dilihat bahwa selisih setiap persentase panjang saluran dari hasil perhitungan dengan

menggunakan rumus dan simulasi pada software ETAP 21.0.1 memiliki nilai yang tidak terlalu jauh bedanya.

Setelah melakukan perhitungan dan simulasi yang hasilnya dapat dilihat pada tabel diatas, maka dapat dibuat grafik arus gangguan hubung singkat terhadap jaak titik gangguan sebagai berikut:



Gambar 4.2 Grafik Hubung Singkat 2 Fasa Terhadap Jarak Titik Gangguan

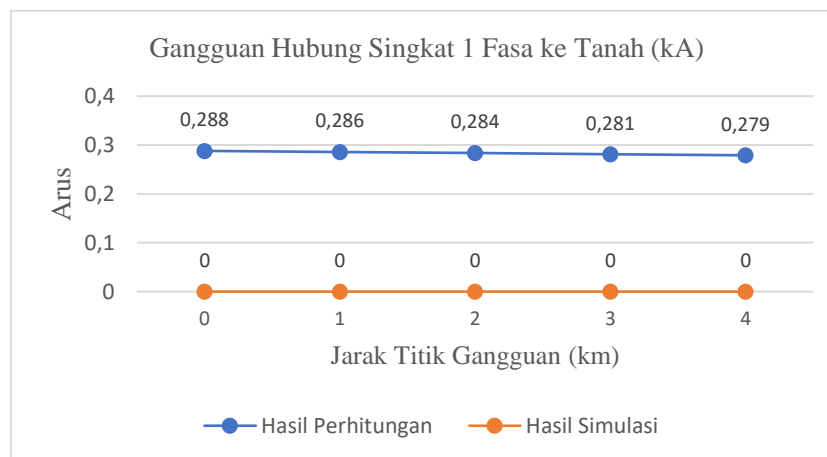
Dari grafik diatas, dapat disimpulkan bahwa pada gangguan hubung singkat 2 fasa besarnya nilai arus gangguan yang terjadi pada penyulang 20 kV dipengaruhi oleh jarak titik gangguan.

c) Gangguan hubung singkat 1 fasa ke Tanah

Tabel 17 Perbandingan hasil perhitungan dengan hasil simulasi arus gangguan hubung singkat 1 fasa

No	Panjang Saluran (%)	Jarak (km)	Arus Hubung Singkat (kA)	
			Hasil Perhitungan	Hasil Simulasi
1	0	0	0,288	0
2	25	1	0,286	0
3	50	2	0,284	0
4	75	3	0,281	0
5	100	4	0,279	0

Pada tabel 17 menunjukkan perbandingan hasil perhitungan dengan hasil simulasi arus gangguan hubung singkat 2 fasa dimana dari tabel diatas dapat dilihat bahwa selisih setiap persentase panjang saluran dari hasil perhitungan dengan menggunakan rumus dan simulasi pada software ETAP 21.0.1 memiliki selisih nilai yang jauh. Setelah melakukan perhitungan dan simulasi yang hasilnya dapat dilihat pada tabel diatas, maka dapat dibuat grafik arus gangguan hubung singkat terhadap jarak titik gangguan sebagai berikut:



Dari grafik diatas, dapat disimpulkan bahwa pada gangguan hubung singkat 1 fasa besarnya nilai arus gangguan yang terjadi pada penyulang 20 kV dipengaruhi oleh jarak titik gangguan.

D. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Gangguan hubung singkat tiga fasa menghasilkan arus terbesar, dengan nilai hasil perhitungan manual sebesar 11,770 kA dan hasil simulasi ETAP sebesar 12,064 kA. Hal ini terjadi karena seluruh fasa terhubung langsung satu sama lain, sehingga arus gangguan menjadi maksimal.
2. Gangguan dua fasa menghasilkan arus sebesar 10,197 kA (manual) dan 10,448 kA (ETAP), sedangkan gangguan satu fasa ke tanah memiliki arus terkecil, yaitu sekitar 0,288 kA. Perbedaan besar arus ini disebabkan oleh jenis gangguan dan nilai impedansi urutan yang terlibat.

3. Selisih antara hasil perhitungan manual dan hasil simulasi ETAP berada di bawah 1%, sehingga metode perhitungan manual terbukti akurat dan dapat dijadikan acuan untuk analisis gangguan hubung singkat pada sistem distribusi 20 kV.
4. Semakin jauh titik gangguan dari sumber, maka arus gangguan semakin kecil akibat meningkatnya nilai impedansi saluran. Hal ini menunjukkan bahwa panjang saluran berpengaruh terhadap besarnya arus hubung singkat yang terjadi.
5. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi untuk menentukan kapasitas dan koordinasi sistem proteksi seperti circuit breaker, recloser, dan relay, sehingga sistem distribusi listrik dapat terlindungi secara optimal dari dampak gangguan hubung singkat.

Saran

1. Perlu dilakukan pemeliharaan rutin dan inspeksi berkala pada jaringan distribusi khususnya di Penyulang UNM untuk meminimalkan risiko terjadinya gangguan hubung singkat akibat faktor eksternal maupun keausan peralatan.
2. Analisis sistem proteksi sebaiknya dilakukan secara menyeluruh dengan mempertimbangkan hasil analisis arus hubung singkat, agar koordinasi antar peralatan proteksi dapat berjalan lebih selektif dan efisien.
3. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji efek gangguan hubung singkat terhadap sistem proteksi secara dinamis, termasuk waktu kerja relay dan pemutus tenaga agar respon proteksi lebih cepat dan akurat.
4. Penggunaan software ETAP dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan simulasi beban dan kondisi transien, sehingga hasil analisis lebih mendekati kondisi nyata sistem tenaga listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- Aryanto, N., & Balkis, M. (2021). Tinjauan Gangguan Jaringan Distribusi 20 Kv. *JTERAF (Jurnal Teknik Elektro Raflesia)*, 1(1).
- Gaffar, A., Agussalim, A., & Arisandi, D. (2022). Analisis Gangguan Hubung Singkat Pada Jaringan Distribusi 20 Kv Di Gardu Induk Panakkukang. *Jurnal Teknologi Elekterika*, 1(2), 156. <https://doi.org/10.31963/elekterika.v1i2.1221>

- Galla, W. F., Sampeallo, A. S., & Daris, J. I. (2020). Analisis Gangguan Hubung Singkat Pada Saluran Udara 20 Kv Di Penyulang Naioni Pt. Pln (Persero) Ulp Kupang Untuk Menentukan Kapasitas Pemutusan Fuse Cut Out Menggunakan Etap 12.6. *Jurnal Media Elektro, IX(2)*, 101–112. <https://doi.org/10.35508/jme.v0i0.3208>
- Grainger, J.J. & Stevenson, W. D. (1994). *Power System Analysis. McGraw-Hill. 6.*
- Imran, A., & Nayla, N. A. (2024). *Aplikasi Sistem Tenaga Listrik ETAP Power Station Untuk Simulasi Gangguan Hubung Singkat. 107.*
- Imran, A., Ruslan, & Syamsurijal. (2021). Analisis Gangguan Hubung Singkat pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik UP3 Makassar Utara dengan Menggunakan Aplikasi Etap 12.6. *Seminar Nasional Hasil Penelitian 2021*, 1369–1377. <https://www.etap.com>
- Saadat, H. (1999). [Hadi_Saadat]_Power_System_Analysis.pdf. In *Power System Analysis* (hal. 257–313).
- Saifudin. (2021). Analisis Perbandingan Perhitungan Short Circuit Pada Gardu Induk 150 / 20 KV (Studi Kasus Pada Gardu Induk Manyar Gresik) Analisis Perbandingan Perhitungan Short Circuit Pada Gardu Induk (Studi Kasus Pada Gardu Induk Manyar Gresik). *Jurnal Teknik Elektro, 10*, 507–515.
- Saputra, M. R. (2022). *Perancangan Sistem Proteksi Petir Eksternal Dan Internal Pembangkit Listrik Tenaga Surya Di Rt 28 Kunangan Jaya 2 Desa Bungku. 63*