

**ANALISIS ARUS HUBUNG SINGKAT PADA SISTEM PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) INSTITUT TEKNOLOGI
SUMATERA (ITERA) DENGAN MENGGUNAKAN
APLIKASI ETAP**

(Skripsi)

Oleh

**SULISTIAWATI
NPM 2117041091**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

ANALISIS ARUS HUBUNG SINGKAT PADA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) INSTITUT TEKNOLOGI SUMATERA (ITERA) DENGAN MENGGUNAKAN APLIKASI ETAP

Oleh

SULISTIAWATI

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Institut Teknologi Sumatera (Itera) berkapasitas 1 MWp merupakan sistem terhubung ke jaringan (*grid-connected*) yang berfungsi mendukung kebutuhan listrik di lingkungan kampus sekaligus menunjang kegiatan penelitian di bidang energi terbarukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya arus hubung singkat yang terjadi pada sistem kelistrikan PLTS Itera, mengevaluasi pengaruh impedansi terhadap arus pada titik-titik kritis, serta menilai kinerja *circuit breaker* (CB) dalam merespons gangguan menggunakan *software* ETAP versi 19.0.1. Simulasi dilakukan pada tiga titik utama, yaitu Bus1 (20 kV), Bus2 (0.4 kV), dan Bus3 (0.4 kV), dengan berbagai skenario gangguan: satu fasa, dua fasa, dua fasa ke tanah, dan tiga fasa. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai impedansi yang rendah (0,011 ohm) pada Bus2 menyebabkan arus hubung singkat tertinggi sebesar 25,742 kA. Sesuai dengan teori hukum Ohm dan teori impedansi, yang menyatakan bahwa arus meningkat saat impedansi rendah. Dikonfirmasi juga bahwa sebagian besar CB efektif, tetapi arus puncaknya (31,014 kA) hampir mencapai kapasitas maksimum (65 kA) di Bus3 sehingga CB11 berisiko. Insiden nyata yang terjadi pada 7 Agustus 2024 berupa gangguan dua fasa akibat kerusakan isolasi turut menguatkan hasil simulasi ini. Sebagaimana telah dijelaskan dalam teori sistem proteksi, penelitian ini menunjukkan bahwa perangkat lunak ETAP sangat baik untuk menemukan titik rawan dan merancang pengaturan proteksi yang andal untuk sistem PLTS

Kata kunci: Arus hubung singkat, *Circuit breaker*, ETAP, Impedansi.

ABSTRACT

ANALYSIS OF SHORT CIRCUIT CURRENTS IN THE SOLAR POWER GENERATION SYSTEM (PLTS) OF THE SUMATERA INSTITUTE OF TECHNOLOGY (ITERA) USING THE ETAP APPLICATION

By

SULISTIAWATI

The photovoltaic power system at Sumatera Institute of Technology (Itera) has a capacity of 1 MWp. This system is connected to the electrical grid, thereby providing electricity to the campus and facilitating research in the field of renewable energy. The objective of this study is to ascertain the magnitude of the short-circuit current that occurs within the PLTS Itera electrical system. The study will also encompass the evaluation of the impact of impedance on current flow at specific points, in addition to the assessment of the performance of the circuit breaker (CB) in response to these conditions. The software utilized for this analysis is ETAP version 19.0.1. The simulation was conducted at three primary locations: Bus1 (20 kV), Bus2 (0,4 kV), and Bus3 (0,4 kV). The simulation encompassed a range of scenarios, including one-phase, two-phase, two-phase to ground, and three-phase configurations. The results of the simulation indicate that a low impedance of 0,011 ohms at Bus2 leads to a maximum short-circuit current of 25,742 kA. In accordance with the established principles of Ohm's law and the theory of impedance, it is evident that an increase in current flow is concomitant with a decrease in impedance. It is imperative to ascertain the efficacy of CBs, as a substantial proportion of CBs are found to be effective. However, the primary concern lies in the maximum capacity of CBs, which is estimated at 65 kA. This observation, coupled with the findings that the CB11 is susceptible to risk, underscores the necessity for further investigation into the operational limitations of CBs. The incident that transpired on August 7, 2024, involved the implementation of two-phase isolation, thereby reinforcing the outcomes of the simulation. As previously outlined in the theory of system protection, the present study demonstrates that the ETAP software is highly effective in identifying vulnerable areas and designing reliable protection systems for photovoltaic (PV) power stations.

Keywords: Circuit current, ETAP, Impedance, Short circuit breaker.

**ANALISIS ARUS HUBUNG SINGKAT PADA SISTEM PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) INSTITUT TEKNOLOGI
SUMATERA (ITERA) DENGAN MENGGUNAKAN
APLIKASI ETAP**

Oleh

SULISTIAWATI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

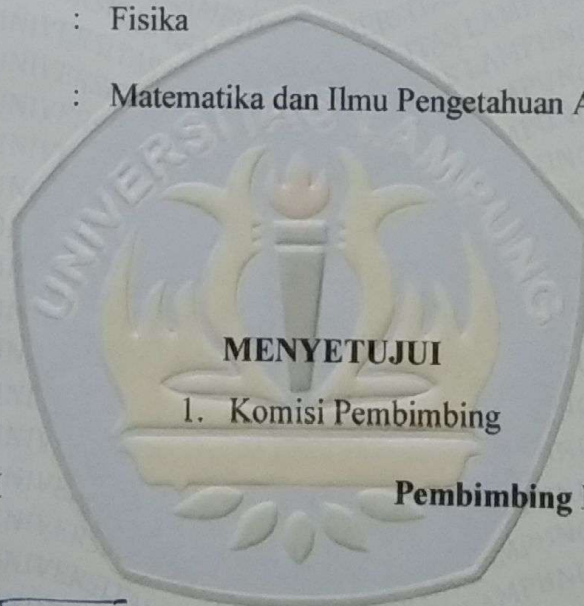
Judul : ANALISIS ARUS HUBUNG SINGKAT PADA
SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA
(PLTS) INSTITUT TEKNOLOGI SUMATERA
(ITERA) DENGAN MENGGUNAKAN APLIKASI
ETAP

Nama : **Sufistiawati**

NPM : 2117041091

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T
NIP. 198010102005011002

Gde KM Atmajaya, S.T., M.T.
NIP. 199403302020121009

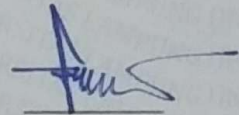
2. Ketua Jurusan Fisika

Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng
NIP. 197109092000121001

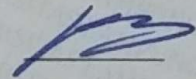
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.

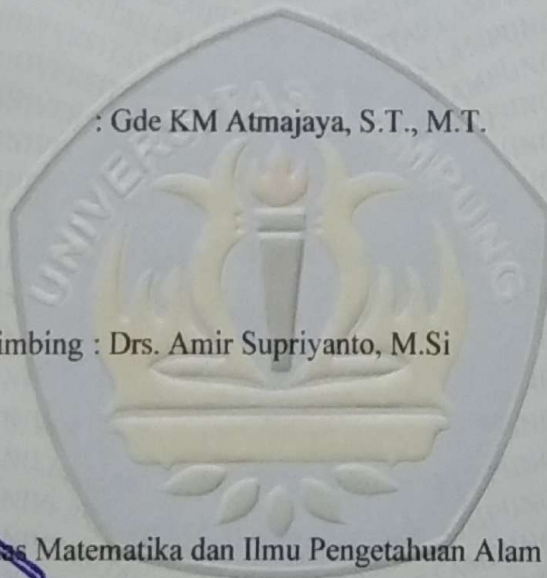
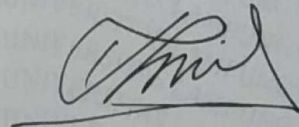


Sekretaris : Gde KM Atmajaya, S.T., M.T.



Penguji

Bukan Pembimbing : Drs. Amir Supriyanto, M.Si



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Drs. Heri Satria, S.Si., M.Si
NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 14 Juli 2025

PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini,

Nama : Sulistiawati

NPM : 2117011075

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Perguruan Tinggi: Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul “**Analisis Arus Hubung Singkat pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Institut Teknologi Sumatera (Itera) dengan Menggunakan Aplikasi ETAP**” adalah benar karya saya sendiri, baik gagasan, hasil, dan analisisnya. Selanjutnya saya juga tidak keberatan jika sebagian atau seluruhnya data dalam skripsi tersebut digunakan oleh dosen atau program studi untuk kepentingan publikasi, sepanjang nama saya disebutkan dan terdapat kesepakatan sebelum dilakukan publikasi.

Bandar Lampung, 14 Juli 2025

Yang menyatakan,



Sulistiawati

NPM. 2117041091

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Sulistiawati, lahir di Negeri Sakti pada 19 Maret 2003. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara yang merupakan anak dari pasangan Bapak Subandri dan Ibu Harida. Penulis menyelesaikan pendidikan di SDN 2 Negeri Sakti yang sekarang berubah nama menjadi SDN 55 Gedong tataan pada tahun 2015, MTs Diniyyah Putri Lampung pada tahun 2018, dan MAS Diniyyah Putri Lampung pada tahun 2021.

Penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung melalui tes SBMPTN pada tahun 2021. Selama menempuh pendidikan di Universitas Lampung, penulis aktif bergabung pada Organisasi Kemahasiswaan (Ormawa). Tahun 2021 penulis menjadi anggota magang bidang Komunikasi dan Informasi (Kominfo) pada Organisasi Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI). Tahun 2022 penulis terdaftar sebagai pengurus aktif organisasi HIMAFI menjadi anggota pada bidang Kominfo dan pengurus pada Unit Kegiatan Mahasiswa Fakultas (UKMF) NATURAL menjadi anggota di bidang Media Dalam Jaringan (Daring). Tahun 2023 penulis aktif menjadi Redaktur Media Dalam Jaringan pada UKMF NATURAL dan aktif menjadi anggota bidang Kominfo pada Organisasi HIMAFI. Tahun 2024 penulis menjadi Pemimpin Umum dalam UKMF NATURAL selama satu periode dan juga telah mengikuti Latihan Kepemimpinan Manajemen Mahasiswa Tingkat Menengah Seluruh Indonesia (LKMM TM-SI) di Universitas Andalas (Unand), Padang, Sumatera Barat.

Penulis dikenal aktif dan bertanggung jawab dalam setiap kegiatan organisasi dan kepanitiaan yang diikuti, serta tetap menunjukkan komitmen tinggi dalam bidang akademik dengan melaksanakan Praktek Kerja Lapangan (PKL) di PT. Bukit Asam Tbk Unit Pelabuhan Tarahan pada awal tahun 2024. Penulis juga mengikuti program pengabdian masyarakat Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Jabung, Kecamatan Jabung, Kabupaten Lampung Timur pada pertengahan 2024. Penulis menyelesaikan penelitian di Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Institut Teknologi Sumatera (Itera) dengan judul **“Analisis Arus Hubung Singkat pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Institut Teknologi Sumatera (Itera) dengan Menggunakan Aplikasi ETAP”**.

MOTO

“Kami akan memperlihatkan kepada mereka tanda-tanda (kebesaran) kami di segenap penjuru dan pada diri mereka sendiri sehingga jelaslah bagi mereka bahwa (Al-Qur’an) itu adalah benar. Tidak cukuplah (bagi kamu) bahwa sesungguhnya Rab-mu menjadi saksi atas segala sesuatu?”

-QS. Al-fushilat (41): 53

“Progres 1% di setiap harinya adalah lebih baik daripada tidak sama sekali”

-James Clear

“IQ saja tidak cukup, kita butuh Analytical Intelligence, Critical Intelligence, and Practical Intelligence”

-Triarchic Theory of Intelligence (Sternberg)

“Fokuslah pada proses, nikmati, amati, perbaiki, dan konsisten. Hasil adalah bonus”

-Sulistiwati

“Konsisten dan disiplin”

-Sulistiwati



PERSEMBAHAN

Alhamdulillah rabbil a'lam, dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT dan rasa cinta dan kasih sayang, penulis mempersembahkan skripsi ini kepada

Kedua Orang Tua

Ayahanda Subandri dan Ibunda Harida yang telah menjadi alasan bagi penulis untuk terus berusaha menjadi lebih baik dan menjadi kebanggaan bagi keduanya, yang selalu mencintai, menyayangi dan memberikan tanpa lelah dan batasan, dan tiada henti mendoakan untuk kebaikan penulis.

Adik Tersayang

Septiana Sari dan Kiki Ahmad Zaki, telah menjadi adik yang selalu memberikan rasa cinta dan kasih sayangnya.

Diri Sendiri

Selalu percaya bahwa semua ada waktunya, selalu menjaga kepercayaan kedua orangtuanya, membuat dirinya bahagia, mampu mempertanggungjawabkan atas pilihannya, berani untuk berubah menjadi diri saat ini, berani untuk keluar dari zona nyaman, dan yang pasti percaya kepada diri sendiri bahwa Ia mampu dan bisa.

Almamater Tercinta

UNIVERSITAS LAMPUNG

KATA PENGANTAR

Segala puja dan puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan nikmat iman, sehat, serta taufik dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul **“Analisis Arus Hubung Singkat pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Institut Teknologi Sumatera (Itera) dengan Menggunakan Aplikasi ETAP”**. Shalawat serta salam penulis haturkan kepada Nabi Muhammad SAW, keluarga, dan sahabatnya yang menjadi suri tauladan umatnya hingga akhir zaman. Semoga kita semua mendapatkan syafaat serta pertolongan Beliau di hari akhir kelak. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) pada Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

Penulis menyadari masih terdapat kekurangan dalam penulisan maupun penyajian skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak kepada penulis dalam perbaikan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat menambah referensi dan rujukan terhadap pengembangan riset mengenai arus hubung singkat dan kemampuan *circuit breaker* dalam sistem kelistrikan di masa depan.

Bandar Lampung, 14 Juli 2025

Penulis,



Sulistiawati

NPM. 2117041091

SANWACANA

Segala puji atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan juga nikmatnya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul **“Analisis Arus Hubung Singkat pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Institut Teknologi Sumatera (Itera) dengan Menggunakan Aplikasi ETAP”**. Serta ucapan terima kasih kepada kedua orang tua yang telah mendoakan dan selalu memberi dukungan baik berupa materi maupun moral. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Universitas Lampung.

Dalam penyusunan skripsi ini, tentunya terdapat hambatan dan juga tantangan yang penulis hadapi, namun atas izin Allah SWT, berkat usaha, doa, semangat, bantuan, bimbingan serta dukungan yang penulis erima dari berbagai pihak, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Atas selesainya skripsi ini, penyusun mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T, selaku dosen Pembimbing Akademik dan Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan serta arahan selama proses penulisan skripsi ini.
2. Bapak Gde KM Atmajaya, S.T., M.T, selaku dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan serta arahan selama penelitian dan juga penulisan skripsi ini.
3. Bapak Drs. Amir Supriyanto, M.Si, selaku Penguji yang telah memberikan banyak masukan dan saran kepada penulis.
4. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
5. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

6. Seluruh Dosen dan staf Jurusan Fisika FMIPA Unila yang telah memberikan ilmu pengetahuannya sehingga penulis bisa berada di tahap ini.
7. Kak Hasbi yang telah memberikan ide dan juga pengetahuan mengenai skripsi ini.
8. Kedua orang tua dan juga seluruh keluarga yang selalu memberikan semangat untuk bisa menyelesaikan skripsi ini.
9. Mitahari, Lala, dan Vin selaku sahabat penulis yang terus memberikan semangat dan motivasi-motivasi dalam hidup serta teman revisi untuk menyelesaikan skripsi ini yang juga menjadi tempat cerita penulis, menjadi tempat menceritakan kebahagiaan ataupun kesedihan penulis.
10. Dekaa, dan Depp selaku sahabat penulis juga yang terus memberikan dukungan, selalu ada ketika dibutuhkan, selalu bisa diandalkan, dan teman yang selalu menjadi tempat berkeluh kesah, sehingga penulis selalu merasa terhibur ketika bersama mereka.
11. Naimah selaku sahabat penulis yang selalu ada ketika dibutuhkan dan tempat bercerita hal-hal random.
12. Teman seperjuangan skripsi penulis, Nurma Novita dan Dameria Simamora yang terus memberikan semangat kepada penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.
13. Seluruh keluarga besar UKMF NATURAL yang menjadi tempat berkembang penulis untuk mengasah dan melatih *soft skill* maupun *hard skill* dan juga tempat bernaung penulis.
14. Kak Sinur yang terus mengingatkan penulis akan perjalanan hidup yang panjang dan terus memberi semangat untuk terus berjuang.
15. Rizki dan Dini selaku teman sejak Sekolah Dasar yang siap kemanapun dan siaga bersama penulis.
16. Asisten PLTS Itera yang telah membantu dan berkontribusi terhadap penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.
17. Teman-teman Fisika angkatan 2021, keluarga besar HIMAFI yang telah bersama-sama menjalani masa perkuliahan dan berbagai pengalaman dalam berbagai *event* maupun pembelajaran kehidupan kepada penulis.

18. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, namun selalu bisa membantu dan berkontribusi yang tak ternilai kepada penulis.

Semoga Allah SWT membalas atas segala kebaikan yang telah diberikan dengan yang lebih baik karena telah membantu dan mempermudah segala urusan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Bandar Lampung, 14 Juli 2025



Sulistiawati

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
LEMBAR PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTO	ix
PERSEMBAHAN.....	x
KATA PENGANTAR.....	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xix
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Terdahulu	6
2.2 Energi Surya dan Fotovoltaik	8
2.3 Arus Hubung Singkat	10
2.4 Peran Aplikasi ETAP	11
2.5 Impedansi	12
2.6 Gangguan Hubung Singkat	14
2.6.1 Gangguan Satu Fasa.....	15
2.6.2 Gangguan Dua fasa	16

2.6.3 Gangguan Tiga Fasa	18
2.7 Spesifikasi Kabel.....	19
2.8 Inverter	22
2.9 Sistem Proteksi dalam Sistem Kelistrikan PLTS	22
III. METODE PENELITIAN	25
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	25
3.2 Alat dan Bahan.....	25
3.3 Metode Penelitian.....	26
3.3.1 Studi Literatur	26
3.3.2 Studi Bimbingan	26
3.3.3 Perancangan Single Line Diagram	26
3.3.4 Analisis Hasil Simulasi ETAP	27
3.4 Prosedur Penelitian.....	27
3.5 Pengambilan Data	28
3.5.1 Data Transformator.....	28
3.5.2 Data Spesifikasi Breaker.....	29
3.5.3 Data MVA _{sc} PLN.....	30
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Gambaran Umum Sistem PLTS Itera	31
4.1.1 Komponen Sistem PLTS Itera	32
4.1.2 <i>Single Line Diagram</i>	36
4.2 Hasil Simulasi ETAP	38
4.2.1 Input Data Simulasi ETAP	38
4.2.2 Hasil Simulasi Arus Hubung Singkat	44
4.3 Analisis Hasil Simulasi ETAP	49
4.3.1 Analisis Arus Hubung Singkat Bus1	49
4.3.2 Analisis Arus Hubung Singkat Bus2	49
4.3.3 Analisis Arus Hubung Singkat Bus3	50
4.3.4 Analisis Peran <i>Circuit Breaker</i>	54
4.4 Analisis Kejadian di Lapangan	56
V. SIMPULAN.....	59
5.1 Simpulan	59
5.2 Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA.....	63
LAMPIRAN.....	66

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Pemanfaatan Energi Matahari Melalui Sel Surya	8
2.2 Software ETAP	11
2.3 Hubung Singkat Satu Fasa	15
2.4 Hubung Singkat Dua Fasa.....	17
2.5 Hubung Singkat Tiga Fasa	18
2.6 Kabel NYA.....	20
2.7 Kabel NYM.....	21
2.8 Kabel NYY.....	21
2.9 Kabel NYAF	22
2.10 Blok Diagram PLTS.....	24
3.1 Diagram Alir	27
4.1 Letak PLTS Itera	29
4.2 Inverter Terpasang	32
4.3 Tipe Modul Panel Surya	33
4.5 Transformator Terpasang	34
4.4 Circuit Breaker Terpasang	35
4.5 Kabel Terpasang.....	35
4.6 Single Line Diagram	36
4.7 Data MVAsc Sumber PLN	37
4.8 Data Trafo Terpasang.....	39
4.9 Data Kabel.....	40
4.10 Masukan Breaker High Voltage.....	41
4.11 Masukan Breaker Low Voltage	42
4.12 Simulasi Arus Hubung Singkat.....	44
4.13 Data Kondisi Kelistrikan Bus3.....	47

4.14	Grafik Perbandingan Arus Hubung Singkat	51
4.15	Perbandingan Nilai Isc dan Impedansi.....	53

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
3.1 Alat dan Bahan Penelitian.....	25
3.2 Data Transformator	28
3.3 Data Spesifikasi Breaker	29
3.4 Data MVA _{sc} PLN	30
4.1 Spesifikasi Inverter Terpasang PLTS Itera	33
4.2 Tipe Modul Terpasang PLTS Itera	34
4.3 Curcuit Breaker Terpasang PLTS Itera.....	36
4.4 Data Sumber Masukan PLN	39
4.5 Data Masukan Trafo.....	40
4.6 Data Kabel.....	41
4.7 Data Masukan Breaker	43
4.8 Short Circuit Summary Report.....	45
4.9 Sequence Impedance Summary Report	46
4.10 Keterangan dari Bus3.....	47

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi menjadi salah satu peranan penting dalam kehidupan manusia. Energi merupakan suatu kemampuan untuk melakukan kerja, sehingga ketersediaan energi menjadi hal sangat penting untuk mencapai tujuan ekonomi, sosial, dan lingkungan. Peningkatan populasi dunia yang meningkat dari hari ke hari, membuat kebutuhan energi terus meningkat, yang menyebabkan pasokan bahan bakar fosil menurun (Siagian *et al.*, 2023). Salah satu sumber energi terbarukan yang dapat menggantikan bahan bakar fosil adalah energi cahaya matahari. Karena letak geografis yang tropis, Indonesia memiliki potensi energi matahari yang sangat besar. Sumber energi matahari dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik nasional dengan intensitas rata-rata 6–8 jam per hari. Untuk mengurangi ketergantungan kita pada bahan bakar fosil yang semakin menipis sekaligus mendukung pengurangan emisi karbon, salah satu langkah strategis adalah dengan mengembangkan energi baru terbarukan yang memanfaatkan energi surya melalui sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Panggayuh dan Kurniawan, 2020).

Sel surya merupakan suatu elemen yang dapat mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui teknologi fotovoltaik. Sel surya pada dasarnya memiliki ketebalan minimum 0,3 mm yang terbuat dari irisan bahan semikonduktor dengan kutub positif dan negatif. Prinsip kerja sel surya dengan memanfaatkan efek fotovoltaik, yang dapat mengubah langsung cahaya matahari menjadi energi listrik, teori ini dikemukakan oleh seorang ahli fisika dari bangsa Perancis, yaitu Becquerel pada tahun 1893. Foton yang mengenai logam fotovoltaik akan menembakkan atom-atom bebas yang mengalirkan arus listrik (Subandi dan Hani, 2015).

Teknologi yang digunakan untuk mengkonversi energi cahaya matahari menjadi listrik disebut fotovoltaik, yang dikemas dalam suatu unit yang terdiri dari banyak sel surya dan disusun secara seri maupun paralel (Samsurizal *et al.*, 2021). Sistem Pembangkit Tenaga Surya (PLTS) menjadi salah satu solusi dalam memenuhi tantangan dalam peningkatan kebutuhan energi, salah satunya adalah kebutuhan energi listrik. PLTS Itera hadir untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di berbagai sektor terutama pada lingkungan kampus, dan dapat menjadi sarana penelitian dan pendidikan. Tidak hanya itu, PLTS Itera dapat menjadi wadah dalam meningkatkan pemahaman mahasiswa mengenai teknologi energi terbarukan. (Yulisman, 2018). Kapasitas yang dimiliki PLTS Itera yakni sebesar 1 MWp, menjadikan salah satu pembangkit tenaga listrik yang signifikan di Indonesia. Namun, sama dengan sistem kelistrikan lainnya, PLTS Itera juga menghadapi risiko gangguan, salah satunya adalah arus hubung singkat.

Arus hubung singkat merupakan arus lebih yang didapatkan karena mengabaikan nilai impedansi antara titik-titik potensial yang sinkron pada sistem tenaga listrik (Tukiman *et al.*, 2017). Arus hubung singkat terjadi ketika dua titik dengan perbedaan potensial yang signifikan dalam sistem listrik bersentuhan langsung, pada umumnya dapat disebabkan oleh kegagalan isolasi, kerusakan mekanis, atau kesalahan dalam desain sistem. Pada sistem fotovoltaik, gangguan arus hubung singkat, dapat disebabkan oleh kerusakan pada komponen modul PV, beban berlebih, kegagalan proteksi dan komponen elektronik, serta pengaruh lingkungan eksternal (Purwo dan H. Sitompul, 2023). Panel surya juga dapat memperbesar arus hubung singkat, terutama jika terjadi masalah pada inverter atau impedansi kabel (Alcala-Gonzalez *et al.*, 2021).

Meskipun telah ada beberapa penelitian terkait arus hubung singkat pada sistem pembangkit listrik, analisis spesifik terhadap sistem PLTS dalam konteks kampus dengan kapasitas 1 MWp seperti di Itera belum diteliti secara menyeluruh. Beberapa penelitian sebelumnya di Indonesia menunjukkan peristiwa hubung singkat sering terjadi, seperti yang ditemukan pada penelitian Marwan *et al.*, (2016) mengungkapkan bahwa arus yang tidak seimbang dapat menyebabkan peningkatan

tegangan pada fase yang tidak terpengaruh dan memiliki konsekuensi dari gangguan hubung singkat termasuk kerusakan peralatan, penurunan stabilitas sistem, dan pemadaman listrik. Penelitian Zain dan Afwan (2020) mengukur arus hubung singkat pada 553,8 A (satu fase ke tanah) dan 1029,41 A (tiga fase), dengan simulasi yang mengkonfirmasi keefektifan sistem perlindungan.

Berbeda dengan Rufato & Oliviera (2005) yang menunjukkan bahwa kesalahan impedansi tinggi dapat menyebabkan arus hubung singkat yang jauh lebih rendah, mempersulit deteksi dan upaya mitigasi. Penelitian ini menekankan pentingnya strategi perlindungan yang disesuaikan dengan karakteristik sistem yang spesifik, khususnya untuk PLTS Itera.

Untuk menganalisis gangguan arus hubung singkat, diperlukan perangkat lunak yang tepat. ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) adalah perangkat lunak yang digunakan untuk simulasi sistem kelistrikan secara keseluruhan serta berfungsi untuk memodelkan, mensimulasikan, memantau, dan mengoptimalkan sistem tenaga listrik, dan untuk memastikan stabilitas dan keandalan sistem secara keseluruhan (Mahdi & Ramadhan, 2019). ETAP dipilih dalam penelitian ini karena kemampuannya yang unggul dalam menganalisis berbagai jenis gangguan, seperti gangguan satu fasa, dua fasa, atau tiga fasa. Analisis ini sangat penting untuk menentukan perlindungan yang sesuai untuk memastikan keandalan sistem kelistrikan (Abdulrazak, 2018). Keunggulan ETAP dibandingkan perangkat lunak lainnya adalah kemampuannya untuk mengintegrasikan komponen PLTS secara spesifik dan melakukan analisis proteksi yang komprehensif dalam satu platform.

Penelitian ini menggunakan ETAP versi 19.0.1 untuk menganalisis sistem kelistrikan PLTS Itera dengan fokus pada identifikasi besaran arus hubung singkat dan evaluasi efektivitas *circuit breaker* dalam sistem proteksi. Melalui simulasi menggunakan ETAP, dan penelitian ini bertujuan untuk menentukan setting proteksi yang optimal untuk mengamankan sistem kelistrikan berdasarkan hasil analisis arus hubung singkat.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana kondisi besaran arus hubung singkat pada kelistrikan gedung Laboratorium Teknik 3 Itera ketika terjadi gangguan hubung singkat?
2. Bagaimana pengaruh nilai impedansi terhadap besarnya arus hubung singkat pada titik kritis sistem kelistrikan PLTS Itera?
3. Bagaimana efektivitas *setting* proteksi yang terpasang, khususnya *circuit breaker* dalam menangani arus hubung singkat.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Mengidentifikasi potensi besaran arus hubung singkat dalam sistem kelistrikan di PLTS Itera
2. Menganalisis pengaruh nilai impedansi terhadap besarnya arus hubung singkat pada titik kritis dalam sistem kelistrikan PLTS Itera
3. Mengevaluasi efektivitas sistem proteksi yang terpasang khususnya *circuit breaker* dalam menangani gangguan arus hubung singkat.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Menjadikan aplikasi ETAP sebagai acuan dalam memilih komponen proteksi yang baik untuk sistem PLTS Itera
2. Mampu menganalisa besarnya arus yang mengalir pada sistem PLTS Itera
3. Meningkatkan keamanan dan kualitas layanan listrik PLTS Itera
4. Meningkatkan keterampilan analisis mahasiswa dalam mencegah masalah terkait arus hubung singkat
5. Mengurangi resiko kerusakan lingkungan dengan merancang sistem kelistrikan yang lebih aman dan efisien.

1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut.

1. Membatasi pada analisis arus hubung singkat untuk memprediksi gangguan pada sistem PLTS Itera menggunakan software ETAP
2. Membatasi pada analisis *circuit breaker* dan besarnya nilai arus hubung singkat pada sistem kelistrikan PLTS Itera
3. Analisis difokuskan pada titik-titik kritis sistem kelistrikan dalam simulasi ETAP
4. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Itera dalam kurun waktu 1 bulan
5. Tipe ETAP yang digunakan adalah 19.0.1 dengan kapasitas PLTS 1 MWp
6. Membatasi pada analisis jaringan listrik yang terkoneksi dengan PLTS Itera sampai ke Trafo PLN.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Analisis arus hubung singkat dalam studi kelistrikan sangat penting, terutama untuk memastikan keamanan dan keandalan sistem tenaga listrik. Banyak penelitian telah dilakukan untuk memahami karakteristik arus hubung singkat, bagaimana hal itu berdampak pada sistem, dan teknik analisis yang dapat digunakan untuk memprediksi dan mengelola risiko yang terkait. Berikut ini adalah ringkasan dari beberapa penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan masalah ini.

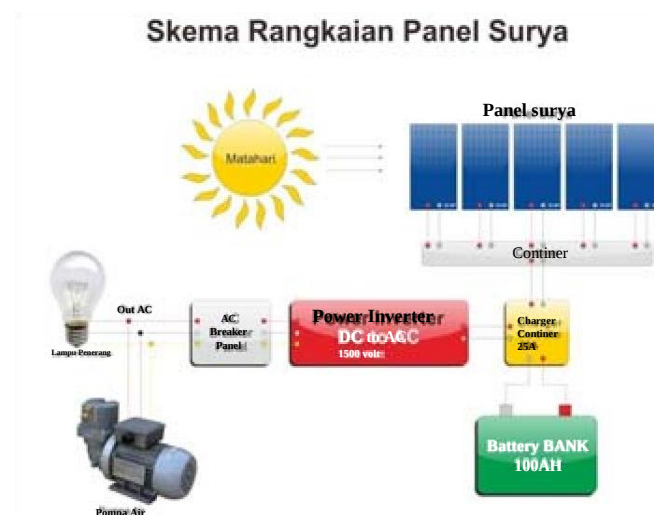
Menurut Yulisman (2018) yang diterbitkan di Jurnal UMSB, memeriksa secara menyeluruh dampak arus gangguan hubung singkat pada setiap cabang sistem tenaga listrik. Untuk mengevaluasi efek dari berbagai jenis gangguan—gangguan satu fasa ke tanah, gangguan dua fasa, dan gangguan tiga fasa—penelitian ini menggunakan pendekatan komprehensif dengan menggunakan metode perhitungan manual dan simulasi berbasis MATLAB. Hasil analisis menunjukkan bahwa gangguan hubung singkat dapat menghentikan pasokan listrik kepada konsumen, yang dapat menyebabkan gangguan layanan dan kerugian ekonomi. Penelitian ini menekankan betapa pentingnya sistem perlindungan yang baik untuk mendeteksi dan menangani gangguan dengan cepat. Dibandingkan dengan jenis gangguan lainnya, nilai arus gangguan hubung singkat tiga fasa memiliki nilai tertinggi, yang merupakan temuan penting dari penelitian ini. Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem harus dirancang untuk menangani potensi arus tinggi yang terjadi selama gangguan tiga fasa, yang dapat merusak infrastruktur dan peralatan kelistrikan. Selain itu, penelitian ini mengusulkan penggunaan perangkat lunak simulasi dalam desain sistem proteksi.

Penelitian tambahan yang dilakukan oleh Sampeallo *et al* (2015) yang menggunakan ETAP 12.6 berkonsentrasi pada analisis arus gangguan hubung singkat dalam jaringan kelistrikan kontemporer. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan nilai arus gangguan hubung singkat terbesar dalam berbagai skenario operasional, serta bagaimana hal ini berdampak pada peralatan listrik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa jenis gangguan dua fasa ke tanah memiliki nilai tertinggi, 10,615 kA, dan jenis gangguan satu fasa ke tanah memiliki nilai terkecil, 3,967 kA. Hasil ini memberikan wawasan penting tentang bagaimana berbagai jenis gangguan dapat mempengaruhi berbagai sistem kelistrikan. Selain itu, penelitian ini menemukan bahwa nilai arus gangguan yang terjadi dapat dipengaruhi oleh perubahan jumlah beban beroperasi peningkatan beban memiliki kecenderungan untuk meningkatkan arus gangguan.

Menurut Nurdiana (2016), arus gangguan hubung singkat penyulang Nakula di Gardu Induk Talang Kelapa dianalisis. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana arus hubung singkat mempengaruhi kinerja sistem distribusi listrik dan juga untuk menemukan komponen yang mempengaruhi nilai arus gangguan. Penelitian ini melibatkan perhitungan manual dan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa impedansi total sistem dan panjang saluran berkorelasi, dengan impedansi total lebih besar seiring dengan panjang saluran, yang berarti nilai arus gangguan lebih kecil. Penemuan ini sangat penting untuk desain jaringan distribusi karena panjang saluran dan jenis kabel dapat mempengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan. Selain itu, penelitian ini menemukan bahwa variabel lingkungan seperti suhu dan kelembaban dapat mempengaruhi resistansi kabel dan, pada gilirannya, mempengaruhi nilai arus gangguan. Dalam desain sistem, insinyur dapat meningkatkan keandalan jaringan distribusi listrik dan mengurangi risiko kegagalan akibat arus hubung singkat.

2.2. Energi Surya dan Fotovoltaik

Energi memiliki peran penting dalam kehidupan manusia, salah satunya adalah energi terbarukan yakni berupa energi matahari atau energi surya. Seperangkat modul yang berguna untuk mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik disebut dengan sel surya (Aulia, 2024). Fotovoltaik merupakan teknologi yang berfungsi untuk mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik secara instan atau langsung. Sedangkan yang dimaksud dengan surya adalah sebuah elemen semikonduktor yang dapat mengkonversi energi surya menjadi energi listrik atas dasar efek fotovoltaik (Safitri *et al.*, 2020). Teknologi sel fotovoltaik yang banyak dikembangkan berjenis teknologi kristal yang dibuat dengan bahan baku berbasis silikon yang menyerupai lembaran kaca dengan ketebalan 6 – 8 milimeter. Fotovoltaik yang digunakan pada umumnya dipasarkan dengan kapasitas 50 Watt-peak (Wp). Efek fotovoltaik pertama kali diakui oleh fisikawan Alexandre Edmond Becquerel di Prancis pada tahun 1839 (Lubna *et al.*, 2021). Proses pemanfaatan energi matahari menjadi energi listrik melalui sel surya dilihat pada **Gambar 2.1**



Gambar 2.1 Pemanfaatan Energi Matahari Melalui Sel Surya
(Subandi & Hani, 2015)

Mekanisme pengubahan foton menjadi energi listrik secara langsung, bekerja berdasarkan efek fotovoltaik. Efek fotovoltaik didefinisikan sebagai suatu fenomena munculnya voltase listrik akibat kontak dua elektroda yang dihubungkan

dengan sistem padatan dibawah energi cahaya. Sel fotovoltaik pada panel surya berdasarkan prinsipnya yaitu apabila dioda semikonduktor bekerja pada proses tak seimbang dan berdasarkan efek fotovoltaik akan menghasilkan tegangan 0,5 – 1 Volt, tergantung pada intensitas cahaya matahari dan jenis zat semikonduktor yang dipakai (Samsurizal *et al.*, 2021).

Teknologi fotovoltaik memiliki beberapa keunggulan, seperti sumber energi yang terbarukan, ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca, dan aplikasi yang fleksibel baik untuk skala kecil maupun besar. Namun, terdapat tantangan dalam penerapannya, seperti efisiensi konversi energi yang masih terbatas, biaya awal pemasangan yang tinggi, dan ketergantungan pada kondisi cuaca. Meski demikian, kemajuan teknologi terus meningkatkan efisiensi dan menurunkan biaya implementasi sistem ini (Hasjanah, 2022).

Energi surya memang memiliki banyak kelebihan, tetapi juga menghadapi beberapa kendala. Salah satunya adalah sifatnya yang intermiten, karena produksi energi sangat bergantung pada kondisi cuaca dan waktu, sehingga tidak bisa digunakan secara optimal pada malam hari atau saat cuaca mendung. Selain itu, kepadatan energinya yang rendah membuat produksi energi per satuan luas lebih kecil dibandingkan energi fosil, sehingga membutuhkan area yang lebih luas untuk menghasilkan energi dalam jumlah yang sama. Tantangan lainnya adalah tingginya biaya awal, meskipun biaya operasionalnya relatif rendah, investasi awal untuk memasang sistem tenaga surya tetap cukup besar (Aulia, 2024).

Diharapkan adopsi energi ini secara luas akan meningkat karena kemajuan teknologi dan penurunan biaya instalasi. Indonesia dapat mengurangi ketergantungannya pada sumber energi fosil dan membantu mengurangi emisi karbon dengan memanfaatkan potensi radiasi matahari yang besar.

2.3. Arus Hubung Singkat

Arus hubung singkat merupakan arus yang timbul akibat adanya gangguan impedansi pada suatu sistem. Arus hubung singkat dapat terjadi karena adanya gangguan yang menimbulkan terhubungnya antar fasa yang berbeda maupun antar fasa pada suatu sistem tenaga listrik. Arus hubung singkat yang memiliki nilai besar akan merusak sistem. Analisis arus hubung singkat dapat digunakan untuk menentukan rating dari alat proteksi listrik yang hendak digunakan pada sistem (Purwo *et al*, 2023).

Arus hubung singkat memiliki pengaruh yang signifikan bila tidak ditangani dengan baik. Arus hubung singkat dapat terjadi karena beberapa hal seperti kegagalan insulasi yang digunakan untuk melindungi kabel listrik atau komponennya, kesalahan koneksi akibat pemasangan komponen yang tidak tepat, dan juga karena faktor eksternal seperti cuaca yang ekstrim atau terdapat benda-benda yang jatuh mengenai modul fotovoltaik. Arus hubung singkat yang besar dapat merusak peralatan, sehingga untuk menggunakannya, hubungan kelistrikan yang terganggu perlu diputuskan dengan *circuit breaker (CB)*. Perhitungan arus hubung singkat sangat penting untuk menentukan kemampuan pemutusnya dan untuk koordinasi pemasangan relai proteksi (Nurdiana, 2016).

Perlindungan terhadap arus hubung singkat sangat penting dalam desain dan pengoperasian sistem PLTS karena arus hubung singkat dapat menyebabkan suhu yang berlebihan pada modul surya, kabel, inverter, dan perangkat lainnya dalam sistem PLTS. Ini dapat menyebabkan kerusakan permanen pada komponen, penurunan efisiensi, atau bahkan gangguan pada operasi sistem secara keseluruhan (Schmidt *et al.*, 2018). Untuk memastikan bahwa sistem PLTS dirancang untuk aman terhadap kondisi arus berlebih, analisis arus hubung singkat diperlukan. Perangkat lunak seperti ETAP sering digunakan untuk mensimulasikan skenario arus hubung singkat, menghitung arus maksimum, dan menentukan kebutuhan proteksi. Selain itu, analisis ini membantu dalam memilih perangkat pelindung yang tepat untuk mencegah kerusakan tambahan (Chowdhury & Aziz, 2021).

2.4. Peran Aplikasi ETAP

ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) merupakan perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Aplikasi ini mampu bekerja dalam keadaan offline untuk simulasi tenaga listrik, online untuk pengelolaan data *real-time* yang digunakan untuk mengendalikan sistem secara *real time*. ETAP dapat melakukan beberapa analisis, seperti analisis aliran daya, analisa hubung singkat, *Arc Flash Analysis*, analisa kestabilan transien dan lain sebagainya. ETAP memungkinkan simulasi arus hubung singkat yang lebih rinci, yang dapat membantu dalam menentukan parameter proteksi yang sesuai untuk komponen dalam sistem PLTS. *Software* ETAP dapat dilihat dalam **Gambar 2.2**



Gambar 2.2 *Software* ETAP

ETAP dapat digunakan untuk membuat proyek sistem listrik dalam bentuk diagram tunggal (*single line diagram*) dan melakukan berbagai bentuk analisis seperti analisis aliran daya, analisis arus hubung singkat, starting motor dan lain-lain. Data yang dimasukkan sesuai dengan *name plate* peralatan yang dibutuhkan (Alfaridzi *et al.*, 2020). ETAP dapat berfungsi secara *offline* untuk simulasi daya listrik dan *online* untuk manajemen data secara *real-time*. Perangkat lunak ini dikembangkan berdasarkan tiga konsep utama: fungsionalitas realitas virtual, integrasi data penuh, dan entri data (Hayusman *et al.*, 2017).

Di dalam aplikasi ETAP terdapat berbagai fitur, termasuk yang digunakan untuk menganalisis pembangkitan (Hayusman *et al.*, 2017). Fitur ETAP memungkinkan kita untuk melakukan berbagai analisis pada grafik garis tunggal, termasuk menganalisis aliran daya, memeriksa hubung singkat, dan melaksanakan koordinasi relai arus lebih. (Rasya *et al.*, 2023). Saat mempelajari analisis aliran arus dalam sistem energi listrik multi-generator, ETAP digunakan untuk mengevaluasi distribusi daya, aliran dan koefisien daya dalam sistem pada tegangan nominal 35kV dan *output* total 500 MW. Hasil simulasi memberikan wawasan tentang respons sistem terhadap perubahan tekanan dan efisiensi penggunaan daya. Studi lain menganalisis kegagalan *short circuit* di pembangkit listrik tenaga uap dan juga menunjukkan penggunaan ETAP untuk penyesuaian relay pada pembangkit listrik tenaga uap. Hasilnya telah digunakan sebagai rekomendasi untuk meningkatkan keandalan sistem PT PLN Oleh karena itu, ETAP adalah salah satu perangkat lunak penting di bidang kelistrikan, baik untuk tujuan akademik dan industri, karena dapat memberikan analisis yang akurat dan komprehensif dari berbagai aspek sistem pengiriman daya. (Kiswantono, 2024).

2.5. Impedansi

Impedansi dalam bidang kelistrikan merupakan ukuran hambatan listrik pada arus yakni suatu kondisi ketika sebuah rangkaian yang dilewati oleh arus menghasilkan hambatan (resistansi) listrik. Impedansi merupakan jumlah dari resistansi dan reaktansi dari sebuah arus yang berlawanan. Resistansi adalah perlawanan dari arus yang menyebabkan panas, sedangkan reaktansi adalah ukuran arus yang berlawanan (Ramadhan, 2024). Impedansi menjadi konsep penting dalam rangkaian listrik yang mewakili keseluruhan komponen sinyal arus. Semakin tinggi impedansi, semakin kecil arus yang mengalir. Impedansi secara matematis dilambangkan dengan Z , satuannya adalah ohm (Ω). Impedansi adalah besaran kompleks yang menggambarkan hambatan total terhadap aliran arus listrik dalam suatu rangkaian listrik, termasuk resistansi dan reaktansi (baik induktif maupun kapasitif) (Galih, 2024). Secara umum dapat dilihat seperti pada persamaan (2.1)

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2.1)$$

Keterangan:

Z = adalah impedansi (Ω);

R = adalah resistansi (Ω);

X_L = adalah reaktansi induktif (Ω);

X_C = adalah reaktansi kapasitif (Ω);

Impedansi berperan penting dalam analisis rangkaian listrik, terutama dalam sistem arus bolak balik (AC). Hambatan total tidak cukup hanya digambarkan dari suatu resistansi, tetapi juga adanya komponen reaktansi, seperti impedansi yang cenderung tinggi pada frekuensi tinggi dalam induktor dan impedansi menurun dengan meningkatnya frekuensi dalam kapasitor. Impedansi dapat diaplikasikan pada beberapa hal seperti dalam bioelektronik digunakan sebagai analisis jaringan biologis, dalam desain antena untuk optimasi input impedansi, dan dalam spektrum impedansi, memungkinkan identifikasi sifat-sifat material seperti kapasitor atau elemen induktif pada frekuensi berbeda (Kanoun *et al.*, 2022).

Pengukuran impedansi dapat dilakukan dengan beberapa metode, salah satunya adalah metode injeksi arus, yang memungkinkan peneliti untuk memperoleh informasi mengenai resistansi, kapasitansi dan induktansi dari bahan yang diuji. Beberapa jenis rangkaian yang umum digunakan dalam pengukuran impedansi yaitu, rangkaian sumber arus tipe floating dan rangkaian *howland* (Maulandari, 2018). Pengukuran impedansi juga dipengaruhi oleh bentuk dan struktur elektroda. Desain elektroda yang tepat dapat mengurangi kesalahan dalam pengukuran dan meningkatkan akurasi data yang diperoleh. Koneksi antara sumber arus dan elektroda juga menjadi faktor penting dalam menentukan nilai impedansi (Sari, 2016).

Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), impedansi menjadi hal yang sangat penting untuk memastikan efisiensi maksimum dan stabilitas operasi. Beberapa hal yang terkait, sebagai berikut.

- a. Pencocokan Impedansi: Pencocokan impedansi digunakan untuk memaksimalkan transfer daya dari modul fotovoltaik ke *converter* daya, seperti pada sistem DC-DC *boost converter*, dan dapat mengurangi kerugian daya selama transmisi.
- b. Pemodelan dan Analisis: pendekatan impedansi berguna untuk analisis stabilitas dan harmonik inverter yang terhubung ke jaringan. Spektroskopi impedansi dapat digunakan untuk mengkarakterisasi bahan atau komponen dan meningkatkan kinerja sistem
- c. Impedansi Sumber Z: Sistem inverter berbasis sumber Z menawarkan efisiensi tinggi dengan konversi satu tahap, yang ideal untuk sistem yang terhubung ke jaringan. Ini juga memungkinkan modul fotovoltaik untuk menggunakan voltase input variable (Jamal *et al.* 2022).

Impedansi memiliki peran penting dalam menganalisis dan mengelola arus hubung singkat untuk menjaga sistem PLTS agar tetap aman. Besar arus gangguan distribusi arus dalam jaringan, dan durasi transien dipengaruhi oleh nilai impedansi. Dalam situasi ini, strategi kontrol yang digunakan oleh inverter fotovoltaik membatasi arus hubung singkat, yang biasanya menghasilkan arus gangguan yang lebih kecil dibandingkan dengan sistem konvensional (Liu *et al.*, 2024). Untuk desain proteksi seperti relay, *circuit breaker*, dan fuse, analisis waktu nyata mempertimbangkan perubahan beban listrik dan fluktuasi energi matahari. Perangkat lunak seperti ETAP digunakan untuk mensimulasikan skenario gangguan dan memberikan petunjuk untuk menemukan lokasi dan spesifikasi alat proteksi. Informasi ini relevan untuk meningkatkan keandalan PLTS dengan pendekatan berbasis analisis impedansi (Lavanya *et al.*, 2024).

2.6. Gangguan Hubung Singkat

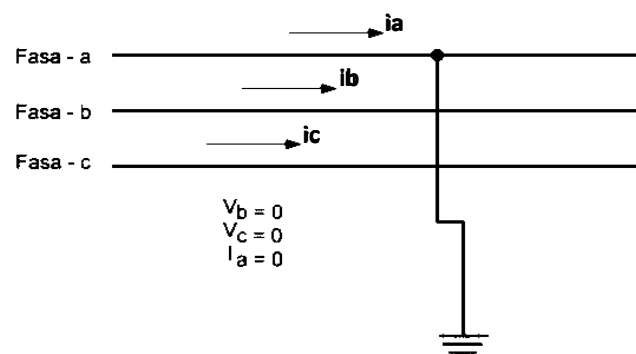
Hubung singkat adalah masalah pada sistem listrik yang terjadi saat pelindung antar kabel atau antara kabel dan tanah rusak, sehingga arus listrik mengalir sangat besar secara tiba-tiba (Hendriyadi, 2017). Gangguan Hubung singkat pada sistem tenaga listrik dapat terjadi antar fasa atau fasa ke tanah. Gangguan dapat bersifat sementara

atau jangka panjang. Jika terjadi gangguan sementara, gangguan akan hilang dengan sendirinya atau bagian yang terganggu dari sumber tegangan. Kemudian, peralatan hubung akan ditutup, dan sistem tenaga listrik akan bekerja kembali seperti biasa. Contoh gangguan sementara adalah *flashover* yang terjadi antara penghantar dan tiang akibat kegagalan isolator, sambaran petir, atau faktor lainnya (Darmana *et al.*, 2015).

Gangguan Hubung singkat pada sistem tenaga listrik dapat terjadi antar fasa atau fasa ke tanah. Istilah “fasa” mengacu pada antara gelombang tegangan dan arus dalam sistem listrik bolak-balik (*Alternating Current, AC*), yaitu arus atau tegangan yang terjadi antara kabel yang ada dengan kabel netral (Hughes, 2005). Dalam memahami cara kerja dan karakteristik sistem listrik, penting untuk memahami sistem listrik fasa, terdapat tiga macam gangguan fasa, yaitu gangguan fasa tunggal atau satu fasa, gangguan dua fasa, dan gangguan tiga fasa (Sampeallo *et al.*, 2015).

2.6.1 Gangguan Satu Fasa

Gangguan satu fasa ke tanah (*single line-to-ground fault*) merupakan jenis gangguan yang paling umum dijumpai pada sistem distribusi listrik. Gangguan ini terjadi saat salah satu konduktor fasa bersentuhan langsung dengan tanah, umumnya disebabkan oleh flashover pada isolator atau kontak langsung dengan benda yang terhubung ke tanah (Samin, 2019). Bentuk dari gangguan hubung singkat satu fasa, dapat dilihat pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.3 Hubung Singkat Satu Fasa (Anshar and Budiman, 2022)

Gangguan satu fasa yang ditunjukkan pada **Gambar 2.2** adalah gangguan hubung singkat yang disebabkan oleh flashover antara penghantar fasa dan tanah. Tidak ada kerusakan yang permanen di lokasi gangguan, dan gangguan ini bersifat sementara. Gangguan satu fasa menyebabkan kenaikan arus pada fasa terganggu dan tegangan menjadi nol, sedangkan pada fasa lain arus menjadi nol dan tegangan naik. (Anshar & Budiman, 2022). Besar gangguan arus pada hubung singkat satu fasa dapat dilihat pada persamaan (2.2)

$$I_A = \frac{E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (2.2)$$

Keterangan.

I_A = Besar gangguan arus (A);

E_a = Tegangan di titik gangguan sesaat terjadinya gangguan (V);

Z_0 = Impedansi urutan nol dilihat dari titik (ohm);

Z_1 = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan (ohm);

Z_2 = Impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan (ohm);

V_b = Tegangan pada fasa b (V);

V_c = Tegangan pada fasa c (V);

i_a = Arus yang mengalir pada fasa a (A);

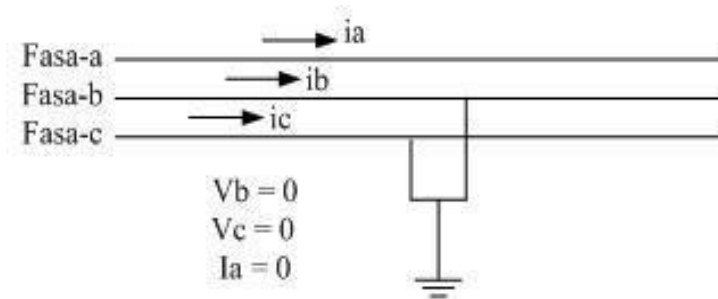
i_b = Arus yang mengalir pada fasa b (A);

i_c = Arus yang mengalir pada fasa c (A);

2.6.2 Gangguan Dua Fasa

Gangguan dua fasa (line-to-line fault) terjadi ketika dua konduktor fasa saling bersentuhan tanpa adanya hubungan langsung dengan tanah. Situasi ini umumnya disebabkan oleh terputusnya salah satu kawat fasa, khususnya fasa tengah, atau kerusakan isolasi yang terjadi secara bersamaan pada dua fasa. Meskipun arus gangguan yang muncul dari kondisi ini tidak sebesar pada gangguan tiga fasa atau gangguan dua fasa ke tanah, dampaknya tetap perlu diwaspadai karena dapat menimbulkan kerusakan serta kualitas tegangan sistem (Hendriyadi, 2017).

Sementara itu, gangguan dua fasa ke tanah (double line-to-ground fault) merupakan kondisi ketika dua konduktor fasa sekaligus terhubung ke tanah. Jenis gangguan ini biasanya menghasilkan arus gangguan yang sangat besar—bahkan dalam beberapa kasus bisa melampaui arus pada gangguan tiga fasa. Gangguan ini sering kali dipicu oleh kerusakan isolasi atau gangguan fisik pada jaringan transmisi maupun distribusi. Dalam analisis sistem tenaga, perhitungan arus gangguan dua fasa ke tanah melibatkan impedansi urutan positif, negatif, dan nol, serta memperhitungkan impedansi hubungan ke tanah (Sampeallo *et al.*, 2015). Bentuk dari gangguan hubung singkat dua fasa, dapat dilihat pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.4 Hubung Singkat Dua Fasa (Anshar and Budiman, 2022)

Gangguan hubung singkat pada **Gambar 2.3** dimana penghantar fasa yang satu bersentuh dengan penghantar fasa yang lainnya menyebabkan arus lebih, juga dikenal sebagai hubung singkat dua fasa. *Flashover* dari pohon yang tertiuup angin dapat menyebabkan gangguan ini. Arus hubung singkat dua fasa biasanya lebih kecil daripada arus hubung singkat tiga fasa ketika terjadi gangguan hubung singkat dua fasa (Anshar & Budiman, 2022). Besar gangguan arus pada hubung singkat dua fasa dapat dilihat pada persamaan (2.3).

$$I_A = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} \quad (2.3)$$

Keterangan.

I_A = Besar gangguan arus (A);

E_a = Tegangan di titik gangguan sesaat terjadinya gangguan (V);

Z_1 = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan (ohm);

Z_2 = Impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan (ohm);

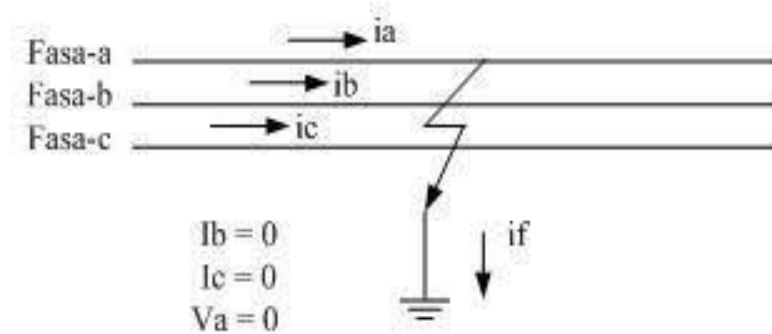
V_b = Tegangan pada fasa b (V);

V_c = Tegangan pada fasa c (V);

I_a = Gangguan arus pada fasa a (A);

2.6.3 Gangguan Tiga Fasa

Gangguan tiga fasa merupakan kondisi ketika ketiga konduktor fasa dalam sistem kelistrikan saling terhubung secara langsung, baik tanpa maupun dengan keterlibatan tanah. Meski kejadian ini jarang ditemui, gangguan tiga fasa tergolong paling berat karena menghasilkan arus gangguan yang sangat besar dan merata di setiap fasa. Besarnya arus tersebut sangat dipengaruhi oleh impedansi urutan positif dari sistem. Karena potensi arus yang timbul sangat tinggi, jenis gangguan ini sering dijadikan acuan utama dalam menentukan kapasitas pemutus arus (*circuit breaker*), agar sistem proteksi dapat bekerja secara andal saat terjadi gangguan maksimum.(Hendriyadi, 2017). Bentuk gangguan tiga fasa dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.5 Hubung Singkat Tiga Fasa (Anshar and Budiman, 2022)

Jenis gangguan ini termasuk dalam kelas gangguan yang simetris, di mana gangguan terjadi ketika tegangan dan arus setiap fasanya tetap seimbang, yang memungkinkan analisisnya dengan menggunakan komponen urutan yang positif saja. Ini adalah jenis gangguan yang terparah dibandingkan dengan gangguan arus hubung singkat lainnya, tetapi sangat jarang terjadi (Syah *et al.*, 2021). Besar gangguan arus pada hubung singkat tiga fasa dapat dilihat pada persamaan (2.4).

$$I_A = \frac{E_a}{Z_1} \quad (2.4)$$

Keterangan.

I_A = Besar gangguan arus (A);

E_a = Tegangan di titik gangguan sesaat terjadinya gangguan (V);

Z_1 = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan (ohm);

V_a = Tegangan pada fasa a;

I_b = Gangguan arus pada fasa b (A);

I_c = Gangguan arus pada fasa c (A);

I_f = Arus yang mengalir menuju ground (A);

2.7. Spesifikasi Kabel

Kabel listrik digunakan untuk mengirimkan energi dari satu tempat ke tempat lain (Budiyanto, 2018). Kabel terdiri dari konduktor, biasanya terbuat dari tembaga atau aluminium, yang dilapisi dengan bahan isolator untuk mencegah arus bocor dan melindungi pengguna dari sengatan listrik. Isolator biasanya terbuat dari bahan thermosetting atau termoplastik, yang tidak menghantarkan listrik (Puji & Oetomo, 2021). Salah satu peralatan penting dalam instalasi adalah kabel, yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik ke peralatan yang menggunakan listrik. Kabel adalah peralatan yang paling rentan terhadap keamanan instalasi. Seperti yang kita lihat di televisi atau media lainnya, kebakaran rumah cukup sering terjadi karena hubungan pendek arus listrik. Hal ini dapat terjadi karena sambungan kabel yang buruk atau kualitas isolasi yang buruk. Karena itu, harus hati-hati saat memilih kabel. Isolator adalah alat listrik yang digunakan untuk memisahkan dua penghantar atau lebih secara elektrik sehingga tidak ada kebocoran arus atau gradien tinggi seperti lompatan api. Namun, untuk mengantisipasi kerusakan isolasi kabel, harus tahu apa yang menyebabkan kerusakan isolasi dan seberapa besar faktor-faktor tersebut berdampak pada kerusakan isolasi. (Hutauruk *et al.*, 2024).

Beberapa hal yang menunjukkan spesifikasi suatu kabel sebagai berikut.

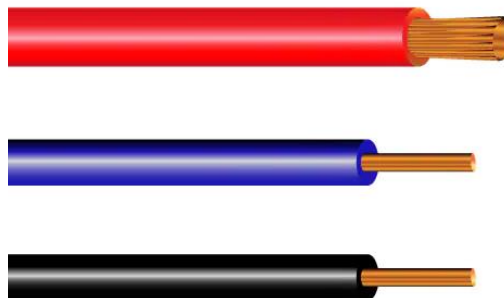
- a. Ukuran (Diameter) Kabel: Diameter konduktor atau inti kabel, yang diukur dalam milimeter persegi (mm²). Diameter ini berdampak terhadap kapasitas

penghantaran arus kabel: semakin besar diameter kabel, semakin banyak arus yang dapat dihantarkannya.

- b. Jumlah Inti Kabel: Jumlah inti kabel menunjukkan jumlah konduktor yang ada dalam kabel. Kabel dapat memiliki satu inti atau banyak inti, tergantung pada fungsinya. Kabel *multicore* sering digunakan dalam sistem kontrol dan instrumentasi yang membutuhkan pengaturan yang kompleks.
- c. Tegangan maksimum yang dapat ditangani tanpa menyebabkan kegagalan disebut tegangan kabel. Kabel dengan tegangan rendah mencakup tegangan di bawah 1.000 Volt; tegangan menengah mencakup tegangan dari 1.000 hingga 35.000 Volt; dan tegangan tinggi mencakup tegangan di atas 35.000 Volt, yang biasanya digunakan untuk transmisi.(Pramudyastuti, 2024).

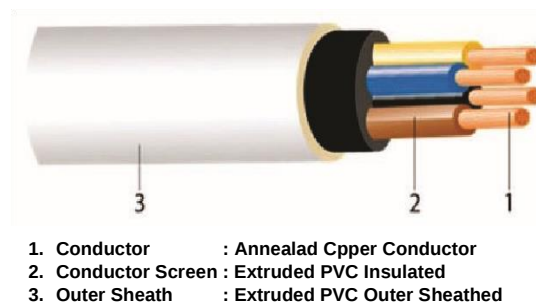
Setiap kabel listrik memiliki kode yang menunjukkan jenis kabelnya. Kode ini menunjukkan berbagai hal, seperti jenis bahan konduktor, jumlah inti, bahan isolasi, apakah digunakan dalam ruangan atau luar ruangan, dan tingkat fleksibilitas. Beberapa kode kabel umum adalah NYA, NYAF, NGA, NYM, NYMHY, NYY, dan NYYHY. Jenis kabel NYM dan NYY biasanya digunakan untuk sistem distribusi listrik di gedung bertingkat (Puji & Oetomo, 2021).

1. Kabel NYA: Digunakan untuk instalasi rumah tangga dengan kebutuhan daya kecil, biasanya memiliki satu inti konduktor dan dilapisi isolasi PVC untuk aplikasi dalam ruangan (Anggraini, 2022). Bentuk kabel NYA dapat dilihat pada **Gambar 2.5**



Gambar 2.6 Kabel NYA (Anggraini, 2022).

2. Kabel NYM: Digunakan untuk instalasi rumah tangga dan gedung dengan kebutuhan daya menengah, terdiri dari beberapa inti konduktor yang dilindungi oleh isolasi PVC (Anggraini, 2022). Kabel NYM merupakan kabel yang memiliki konduktor tembaga lebih dari satu dengan isolator terselubung dengan berbahan PVC (300 – 500 V) (Puji & Oetomo, 2021). Bentuk kabel NYM dapat dilihat pada **Gambar 2.6**



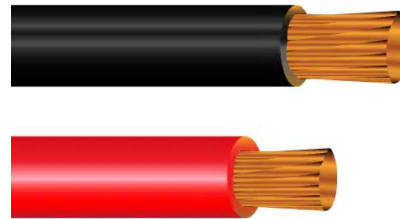
Gambar 2.7 Kabel NYM (Puji & Oetomo, 2021)

3. Kabel NYY: Dirancang untuk digunakan di luar dan di bawah tanah, memiliki pelindung tambahan untuk melindungi dari kelembaban (Anggraini, 2022). Kabel NYY merupakan kabel yang memiliki inti tembaga dengan isolasi PVC dan selubung luar berbahan PVC. Kabel NYY bisa dibilang penyempurnaan dari kabel NYA dan NYM. Kabel ini cocok digunakan untuk instalasi listrik tetap seperti di bawah tanah ataupun tempat *outdoor* lain namun tetap harus diberikan perlindungan khusus seperti pipa (Puji & Oetomo, 2021). Bentuk kabel NYY dapat dilihat pada **Gambar 2.7**



Gambar 2.8 Kabel NYY (Puji & Oetomo, 2021)

4. Kabel NYAF: Digunakan di lingkungan yang lembab atau air, memiliki inti konduktor yang fleksibel dan isolasi yang tahan air (Anggraini, 2022). Bentuk kabel NYA dapat dilihat pada **Gambar 2.8**



Gambar 2.9 Kabel NYAF (Anggraini, 2022).

2.8. Inverter

Inverter adalah rangkaian yang digunakan untuk mengubah sumber arus DC tetap menjadi sumber arus AC dengan frekuensi tertentu. Inverter dapat menghasilkan arus AC dalam bentuk gelombang sinus, gelombang kotak, atau gelombang sinus yang dimodifikasi (Pamungkas *et al.*, 2019). Fungsi utama inverter adalah mengubah tegangan input DC menjadi AC yang dapat digunakan di berbagai aplikasi. Terdapat beberapa jenis inverter, yaitu

- a. Inverter Gelombang Sinus Murni: Menghasilkan gelombang sinusoidal yang bersih dan stabil, yang ideal untuk peralatan sensitif seperti komputer dan alat medis.
- b. Inverter Gelombang Sinus Modifikasi: Menghasilkan gelombang sinusoidal yang tidak sepenuhnya bersih, yang cocok untuk peralatan sederhana seperti lampu dan kipas angin.
- c. Inverter Gelombang Kotak: Menghasilkan gelombang kotak, yang biasanya digunakan dalam aplikasi industri.(Abidin, 2014).

2.9. Sistem Proteksi dalam Sistem Kelistrikan PLTS

Proteksi dalam sistem kelistrikan adalah serangkaian perangkat dan mekanisme yang dimaksudkan untuk mendeteksi, mencegah, dan meminimalkan dampak pada

gangguan sistem listrik. Tujuan sistem proteksi adalah untuk melindungi peralatan, mencegah kerusakan lebih lanjut, dan memastikan bahwa sistem beroperasi dengan aman dan konsisten (Rakhman, 2020). Sistem proteksi sistem tenaga listrik adalah sistem yang melindungi peralatan listrik sistem, seperti generator, transformator, jaringan, dan lain-lain, dari situasi yang tidak biasa selama operasi sistem. (Miftahul, 2021). Sistem proteksi juga memiliki tujuan utama untuk meminimalkan dampak gangguan dalam sistem listrik agar sistem dapat terus beroperasi tanpa terganggu.

Tujuan utama sistem proteksi meliputi:

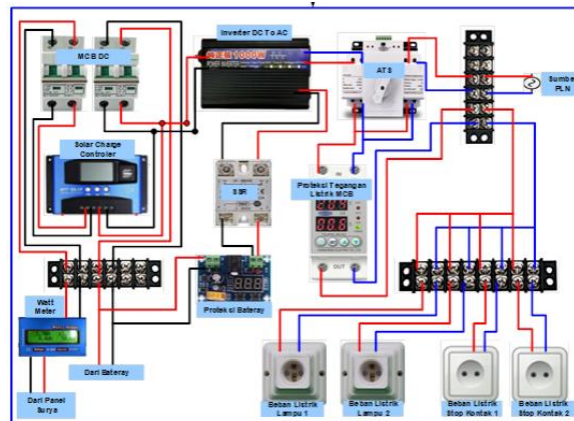
1. Identifikasi Gangguan: Mengidentifikasi secara cepat adanya masalah dalam sistem.
2. Perlindungan Manusia: Mengamankan operator dan pengguna dari risiko bahaya listrik.
3. Perlindungan Peralatan: Melindungi komponen sistem dari kerusakan akibat gangguan dengan mengkoordinasikan perangkat seperti pemutus arus (*circuit breaker*). Hal ini juga mencakup pembatasan gangguan agar tidak menyebar, serta proses isolasi dan pemulihan setelah masalah terselesaikan.
4. Menjamin Keandalan Sistem: Menjaga agar pasokan daya tetap stabil dan berkelanjutan meskipun terjadi gangguan (Anugerah Putra *et al.*, 2021).

Dengan fungsi tersebut, sistem proteksi memainkan peran penting dalam menjaga kelangsungan operasional sistem kelistrikan dan mencegah risiko yang lebih besar.

Suatu sistem PLTS akan memiliki risiko jika tidak memiliki sistem proteksi yang baik. Risiko yang akan dihadapi oleh sistem PLTS adalah sambaran petir dan arus yang berlebih. Sambaran petir dapat menyebabkan kerusakan serius pada komponen utamanya seperti inverter dan panel surya serta berpotensi untuk menimbulkan kebakaran. Arus yang berlebih juga dapat menyebabkan sistem kerusakan pada komponen yang penting untuk menjaga kestabilan sistem

Dalam menghasilkan suatu sistem PLTS, tahap awal yang dilakukan adalah merancang proses sistem PLTS yang akan dihasilkan dengan sistem proteksi baterai

yang dilengkapi dengan proteksi beban (*over voltage and lower voltage*) dan juga sistem ATS (*Automatic Transfer Switch*) (Ramschie *et al.*, 2023). Blok diagram dari sistem PLTS dapat dilihat pada **Gambar 2.8**.



Gambar 2.10 Blok Diagram PLTS (Ramschie *et al.*, 2023)

Berdasarkan **Gambar 2.8**, dijelaskan prinsip kerja sistem PLTS dengan penambahan sistem proteksi dan ATS. Untuk menghasilkan energi listrik dari sistem, *output* dari panel diinputkan ke SCC (*Solar Charge Controller*) melalui MCB DC. SCC berfungsi sebagai pengontrol pengisian daya listrik ke baterai. Untuk mengkonversi tegangan DC dari baterai ke tegangan AC untuk kebutuhan beban listrik, digunakan perangkat inverter. Jika sistem pengukuran PLTS baterai rusak, ATS akan mengalihkan pengukuran PLTS baterai ke sistem pengukuran PLTS baterai. Untuk mencegah pengosongan baterai dari sistem PLTS, digunakan MCB digital. Prinsip MCB digital berfungsi untuk mentransfer tegangan ke baterai ketika tegangan lebih tinggi (240 Volt) atau lebih rendah (190 Volt). Selain itu, MCB juga dapat digunakan untuk mencegah kelebihan beban pada baterai, meningkatkan sistem PLTS (Ramschie *et al.*, 2023).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama satu bulan, yaitu dari Januari 2025 sampai dengan Februari 2025. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Institut Teknologi Sumatera (Itera) untuk pengukuran arus hubung singkat dan simulasi menggunakan *software* ETAP.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada **Tabel 3.1**

Tabel 3.1 Alat dan Bahan Penelitian

No	Nama	Fungsi
1.	Panel Surya	Untuk mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik
2.	<i>Software</i> ETAP	Untuk menganalisis, mensimulasikan, dan memodelkan sistem tenaga listrik
3.	Laptop	Untuk menjalankan <i>software</i> ETAP

3.3 Metode Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah kombinasi pendekatan kuantitatif dengan metode simulasi dan analisis data lapangan. Tahapan utama meliputi studi literatur, pengumpulan data teknis sistem PLTS Itera, pemodelan sistem pada ETAP, simulasi arus hubung singkat, dan analisis hasil untuk menentukan setting proteksi optimal.

3.3.1 Studi Literatur

Pada tahap ini, melakukan pengumpulan berbagai sumber yang akan digunakan sebagai acuan dalam melakukan perancangan sistem. Berdasarkan sumber-sumber yang telah dikumpulkan, akan dipelajari mengenai komponen, rangkaian, dan metode yang akan dilakukan.

3.3.2 Studi Bimbingan

Pada tahap ini, penulis melakukan diskusi dengan dosen pembimbing dan asisten laboratorium dalam menyelesaikan permasalahan yang didapat selama melakukan penelitian secara berkala. Diskusi difokuskan pada validasi pemodelan sistem, interpretasi hasil simulasi, dan rekomendasi setting proteksi yang sesuai dengan standar keamanan dan keandalan sistem PLTS.

3.3.3 Perancangan Single Line Diagram

Pada tahap ini, penulis akan membuat *single line diagram* sebagai rancangan awal dari sistem aliran kelistrikan yang dirancang menggunakan aplikasi ETAP versi 19.0.1.

3.3.4 Analisis Hasil Simulasi ETAP

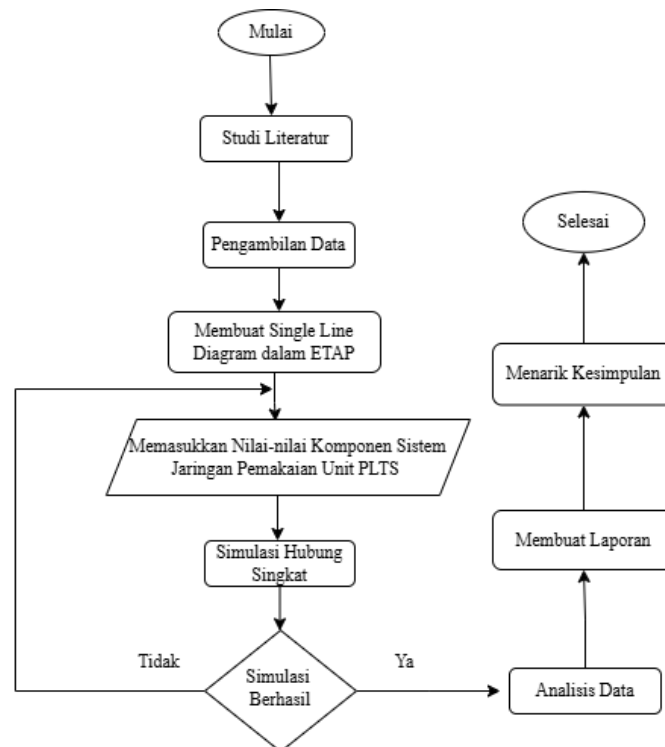
Pada tahap ini, penulis akan melakukan analisis data yang diperoleh dari simulasi aplikasi ETAP menggunakan fitur *Short Circuit Analysis* dengan skenario gangguan berdasarkan sistem aliran kelistrikan yang telah dirancang.

- a. Gangguan hubung singkat 3 fasa
- b. Gangguan hubung singkat 2 fasa
- c. Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah
- d. Gangguan hubung singkat 2 fasa ke tanah

Simulasi dilakukan di berbagai titik potensial terjadinya gangguan di sistem dengan mempertimbangkan kontribusi arus dari sumber PLTS dan jaringan PLN.

3.4 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian dari tugas akhir ini divisualisasikan dalam diagram alir seperti yang tertera pada **Gambar 3.1**



Gambar 3.1 Diagram Alir

Proses dimulai dengan studi literatur sebagai landasan teori yang akan digunakan terhadap penelitian ini, kemudian, data lapangan dikumpulkan untuk merancang *single line diagram* pada aplikasi ETAP dengan mengisi data komponen yang diperlukan. *Single line diagram* kemudian diuji untuk mengetahui simulasi dari arus hubung singkatnya, jika simulasi berhasil, hasilnya akan dianalisis untuk mengevaluasi kemampuan *circuit breaker* dalam mengatasi arus hubung singkat dan merumuskan rekomendasi setting proteksi optimal. Hasil analisis kemudian disusun untuk mendapatkan kesimpulan terkait penelitian ini.

3.5 Pengambilan Data

Untuk memenuhi tujuan penelitian, berikut data-data yang akan diambil selama penelitian untuk memudahkan pengisian parameter dalam perancangan *single line diagram* pada aplikasi ETAP.

3.5.1 Data Transformator

Data trafo digunakan sebagai parameter sistem untuk menghitung besarnya arus hubung singkat, dan impedansi trafo berperan penting dalam menentukan besar arus gangguan yang mengalir ke titik gangguan, serta mempengaruhi setelan proteksi pada sistem tenaga listrik. Data pengamatan akan disajikan dalam **Tabel 3.2**

Tabel 3.2 Data Transformator

No	Nama	Keterangan
1.	<i>Phase</i>	3
2.	<i>Frequency</i>	50 Hz
3	<i>Rated Capacity</i>	1250 kVA
4	<i>Rated Voltage (HV)</i>	20.000 V
5	<i>Rated Voltage (LV)</i>	400 V
6	<i>Short Circuit Impedance</i>	5,5 %

3.5.2 Data Spesifikasi *Breaker*

Circuit breaker adalah perangkat proteksi utama dalam sistem kelistrikan untuk menangani arus gangguan. Sehingga, pengambilan data ini bertujuan untuk memastikan *breaker* dapat melindungi sistem dari arus hubung singkat tanpa kerusakan dan menentukan apakah ada kebutuhan untuk mengganti atau meningkatkan kapasitas breaker. Data pengamatan ini akan disajikan pada **Tabel 3.3**

Tabel 3.3 Data Spesifikasi Breaker

No	Nama	Jenis Breaker	Merk Breaker	Tipe Breaker	Kapasitas Arus Hubung Singkat (A)	Rating Arus (A)
1.	CB12	MCCB	Schneider Electric	CVS250F	36000	200
2.	CB14	MCCB	Schneider Electric	CVS250F	36000	200
3	CB15	MCCB	Schneider Electric	CVS250F	36000	200
4	CB16	MCCB	Schneider Electric	CVS250F	36000	200
5	CB17	MCCB	Schneider Electric	CVS250F	36000	200
6	CB18	MCCB	Schneider Electric	CVS250F	36000	200
7	CB19	MCCB	Schneider Electric	CVS250F	36000	200
8	CB20	MCCB	Schneider Electric	CVS250F	36000	200
9	CB21	ACB	Schneider Electric	NS1600N	50000	1600
10	CB6	MCCB	Schneider Electric	NW20H1	65000	1600
11	CB7	MCCB	Schneider Electric	NW10H1	65000	1600
12	CB22	ACB	Schneider Electric	NS1600N	50000	1600
13	CB11	MCCB	Schneider Electric	NW10H1	65000	1600

3.5.3 Data MVAsc PLN

Sebagai dasar dalam evaluasi interkoneksi sistem PLTS dengan jaringan PLN, nilai Short-Circuit MVA (S_{SC}) dari PLN adalah parameter penting untuk memahami kapasitas sumber daya listrik yang terhubung ke PLTS dan menganalisis pengaruh nilainya terhadap *breaker* yang digunakan. Data ini akan disajikan seperti pada **Tabel 3.4**

Tabel 3.4 Data MVA_{SC} PLN

No	Lokasi Pengukuran	Tegangan Sistem (V)	Short Circuit (S_{ac}) (MVA)
1.	Gardu Induk	20000	22,724
2.	Titik Masuk PLN	20000	10,002

V. SIMPULAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan analisis dan penelitian yang telah dilakukan mengenai sistem kelistrikan PLTS Itera dengan menggunakan aplikasi ETAP versi 19.0.1, ada beberapa kesimpulan yang dapat diambil sebagai berikut.

1. Bus tegangan menengah (Bus1) sebagai titik hubung antara jaringan PLN yang bertegangan 20 kV dengan trafo yang memiliki kapasitas 1250 Kva melalui kabel sepanjang 140 meter memiliki arus hubung singkat yang lebih kecil dibanding dengan dua bus lainnya yaitu sebesar 0,765 kA dengan jenis gangguan tiga fasa dan nilai impedansi yang lebih besar dibandingkan dengan dua bus lainnya, nilai impedansinya sebesar 17,202 ohm. Bus2 titik interkoneksi dari jaringan PLTS dan jaringan PLN yang bertegangan rendah sebesar 0,4 kV karena telah diturunkan oleh trafo memiliki arus hubung singkat yang paling besar yaitu 25,741 kA pada jenis gangguan dua fasa ke tanah dan impedansi yang paling kecil, yakni sebesar 0,011 ohm. Titik beban pada Gedung Laboratorium Teknik 3 atau Bus3 memiliki nilai arus hubung singkat dan impedansi yang lebih besar dari Bus1 dan lebih kecil dari Bus2, arus hubung singkatnya sebesar 18,39 kA dan nilai impedansinya sebesar 0,014 ohm.
2. Analisis yang telah dilakukan menunjukkan adanya korelasi yang signifikan antara impedansi dan arus hubung singkat di ketiga titik kritis dalam sistem. Korelasi ini sesuai dengan hukum ohm dimana nilai arus hubung singkat berbanding terbalik dengan nilai impedansi, semakin besar arus hubung singkatnya, maka impedansinya semakin kecil. Impedansi yang kecil juga terlihat dari susunan kabel dan jarak antar bus, kondisi Bus2 yang memiliki

nilai arus hubung singkat terbesar dan impedansi terkecil memiliki panjang kabel sebesar 5 meter dari trafo. Hal ini penting untuk menjadi acuan dalam menentukan sistem proteksi yang baik.

3. Seluruh sistem proteksi (CB) yang terpasang pada sistem PLTS Itera berdasarkan Tabel 4.7 memiliki kapasitas yang memadai untuk menangani potensi gangguan arus hubung singkat pada ketiga titik. Namun, *breaker* pada Bus3 memiliki kapasitas yang mendekati batas dengan arus puncak (31,014 kA) yang mendekati ambang batas kapasitas pemutus (I_{cu}) 65 kA. Kejadian nyata di lapangan pada 7 Agustus 2024 terdapat gangguan dua fasa pada Bus2 yang menyebabkan *breaker* mengalami trip hingga tombol reset aktif. Pengukuran menunjukkan nilai tahanan antar fasa sebesar 0 ohm yang mendukung bukti adanya gangguan dua fasa di lapangan dan juga menunjukkan bahwa *breaker* mampu bekerja dengan baik tanpa mengalami kerusakan. namun perlu adanya pemeriksaan berkala dan penyesuaian setting proteksi agar sistem tetap aman.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil yang telah diperoleh, beberapa saran yang diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan untuk pengembangan sistem proteksi ke depan untuk meningkatkan keandalan dan keselamatan di lingkungan kampus Itera.

1. Melakukan penggantian CB jika ditemukan kapasitas CB yang mendekati atau bahkan lebih kecil dari arus hubung singkat dari hasil simulasi dengan CB yang memiliki kapasitas yang lebih tinggi untuk meningkatkan keamanan sistem dari gangguan.
2. Melakukan pemeriksaan dan perawatan isolasi secara berkala terhadap jalur distribusi yang memiliki potensi menghasilkan impedansi yang rendah seperti yang telah terjadi pada 7 Agustus 2024 pada titik interkoneksi (Bus2).
3. Menyesuaikan CB yang memiliki potensi arus gangguan tinggi agar sistem dapat merespon dengan cepat dan tepat.

4. Memperbarui simulasi ETAP ketika terjadi perubahan sistem seperti penambahan beban, penggantian CB, atau modifikasi distribusi untuk memastikan sistem tetap terlindungi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulrazak, M. (2018). Power System Analysis using ETAP for Short Circuit Calculation. *Jurnal Teknik Listrik*, 10(3), 225–232.
- Abidin, Z. (2014). Penyedia Daya Cadangan Menggunakan Inverter. *INTEKNA*, 14(2), 102–209.
- Alcala-Gonzalez, D., Toro, E. M. G. del, Más-López, M. I., & Pindado, S. (2021). Effect of Distributed Photovoltaic Generation on Short-Circuit Currents and Fault Detection in Distribution Networks: A Practical Case Study. *Applied Sciences*, 11(1), 405.
- Alfaridzi, S. M., Nugroho, A., & Sinuraya, E. W. (2020). Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya dengan Menggunakan Software ETAP V.12.6 di Departemen Teknik Industri Universitas Diponegoro. *Jurnal Teknik Elektro*, 9(2), 143–147. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/transient.v9i2.143-147>
- Anggraini, D. (2022). *Kenali Jenis Kabel Listrik*. Monotaro. <https://www.monotaro.id/blog/artikel/kenali-jenis-kabel-listrik>
- Anshar, C. N., & Budiman, B. (2022). Studi Analisa Arus Gangguan Hubung Singkat Berdasarkan Lokasi Titik Gangguan Pada Saluran Udara Tegangan Menengah 20 kV. *Jurnal Teknik, Komputer, Agroteknologi Dan Sains*, 1(1), 140–149. <https://doi.org/10.56248/marostek.v1i1.25>
- Anugerah Putra, B., Ridwan, E., & Ridlwan, H. M. (2021). Prototipe Sistem Proteksi Arus Beban Lebih pada Panel Surya. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta* (pp. 254–259). <http://prosiding.pnj.ac.id>
- Aulia, A. I. (2024). *Energi Surya: Pengertian, Manfaat, dan Contoh Pemanfaatannya*. Megah Anugrah Energi. <https://solarindustri.com/blog/energi-surya/>
- Budiyanto, M. (2018). *Mengenal Kabel Listrik*. Universitas Gadjah Mada. <https://listrik.sv.ugm.ac.id/2018/06/25/mengenal-kabel-listrik-1/>
- Chowdhury, S., & Aziz, A. (2021). Simulation of Short-Circuit Scenarios in Solar Power Plants Using PVSyst and ETAP. *Journal of Solar Energy Systems*, 45(2), 67–78.

- Darmana, T., Yuliansyah, W., & Elektro, T. (2015). Arus Hubung Singkat Diamankan Oleh Pengaruh Kecepatan Pmt. *Jurnal Sutet*, 5(2), 85–90.
- Galih. (2024). *Apa itu Impedansi Listrik: Pengertian, Jenis, dan Pengaruhnya*. WikiElektronika.
- Hasjanah, K. (2022). *Apa itu Energi Surya dan Bagaimana Pengembangannya di Indonesia?* Institute for Essential Services Reform. <https://iesr.or.id/apa-itu-energi-surya-dan-bagaimana-pengembangannya-di-indonesia/>
- Hayusman, L. M., Hidayat, T., Saleh, C., Wartana, I. M., & Herbasuki, T. (2017). Pelatihan Software ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) Bagi Siswa dan Guru SMK Nasionl Malang. *Jurnal Teknik Industri*, 7(1), 7–11. <https://ejournal.itn.ac.id/index.php/industri/article/view/856>
- Hendriyadi. (2017). Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Jaringan Distribusi di Kota Pontianak. *Jurnal Teknik Elektro*, 1, 7.
- Hughes, E. (2005). *Hughes electrical and electronic technology* (ninth edit). Pearson Prentice Hall.
- Hutauruk, S., Sihombing, R., Purba, D., & Richardo, S. (2024). Analisis gangguan listrik melalui kualitas dan pemasangan kabel listrik. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 5(2), 584–588.
- Jamal, I., Elmorshedy, M. F., Dabour, S. M., Rashad, E. M., Xu, W., & Almakhlles, D. J. (2022). A Comprehensive Review of Grid-Connected PV Systems Based on Impedance Source Inverter. *IEEE Access*, 10(August), 89101–89123. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3200681>
- Kanoun, Olfa; Kallel, Ahmed Yahia; Nouri, Hanen; Atitallah, Bilel Ben; Haddad, Dhia; Hu, Z. (2022). Impedance Spectroscopy: Applications, Advances and Future Trends. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 23(3), 11–21. <https://doi.org/10.1109/MIM.2022.9759355>
- Kiswanton, A. (2024). Pengembangan Sistem Energi Terbaru: Pendekatan Multigenerator Dan Simulasi ETAP. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 12(2), 1163–1169. <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i2.4147>
- Lavanya, A., Akshaya, R., Latha, D. S., Bhuvanaa, V., Rajkumar, K., & Revathi, S. (2024). Data Integrity Attacks and their Impact on Cyber- Physical Power System Control Applications. *Power Research*, 20(1), 1–6.
- Liu, D., Xiong, P., Tang, J., Li, L., Wang, S., & Cao, Y. (2024). Real-Time Short-Circuit Current Calculation in Electrical Distribution Systems Considering the Uncertainty of Renewable Resources and Electricity Loads. *Applied Sciences*, 14(23), 1–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app142311001>
- Lubna, Sudarti, & Yushardi. (2021). Potensi Energi Surya Fotovoltaik Sebagai Sumber Energi Alternatif. *Penelitian Dan Karya Ilmiah*, 21(1), 76–79. <https://doi.org/10.33592/pelita.v21i1.1269>
- Mahdi, A., & Ramadhan, A. (2019). ETAP in Electrical System Design. *Jurnal Teknik Elektro*, 7(2), 115–123.

- Marwan, L. R., & Samsul, N. M. (2016). Analisis Gangguan Tidak Seimbang pada Line Transmisi GI Sungguminasa-GI Tallasa. *INTEK*, 3(2), 102–108. <https://doi.org/10.31963/intek.v3i2.60>
- Maulandari, E. (2018). Analisis Hasil Pengukuran Impedansi Listrik dengan menggunakan Metode Injeksi Arus Tipe Floating dan Howland. In *Universitas Brawijaya* (Vol. 76). Universitas Brawijaya. [https://repository.ub.ac.id/id/eprint/168431/1/Erlinda Zuli Maulandari.pdf](https://repository.ub.ac.id/id/eprint/168431/1/Erlinda%20Zuli%20Maulandari.pdf)
- Miftahul. (2021). *Dasar-Dasar Sistem Proteksi dan Definisi sistem Proteksi*. Pengetahuan Listrik. <https://pengetahuan-listrik.blogspot.com/2021/12/dasar-dasar-sistem-proteksi-dan.html>
- Nurdiana, N. *et al.* (2016). Analisa Gangguan Arus Hubung Singkat Pada Penyulang Nakula Gardu Induk Talang Kelapa. *Ampere*, 1(1), 26–36.
- Pamungkas, F. H. J., Sujanarko, B., & Gozali, M. (2019). Rancang Bangun Inverter 1 Fasa dengan Teknik Modulasi Third Harmonic Injection Pulse Width Modulation untuk Panel Surya 1 KWP. *Jurnal Arus Elektro Indonesia*, 1(1), 1–5.
- Panggayuh, B. G., & Kurniawan, I. H. (2020). Perancangan dan Simulasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Kapasitas 27 kWp di Kota Cilacap. *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*, 2(1), 1–6. <https://doi.org/10.30595/jrre.v2i1.6484>
- Pramudyastuti, T. U. (2024). *6 Jenis Kabel Listrik dan Spesifikasinya untuk Berbagai Kebutuhan*. Synergy Solusi. <https://synergysolusi.com/artikel-qhse/6-jenis-kabel-listrik-dan-spesifikasinya-untuk-berbagai-kebutuhan/>
- Puji, A. E. P. L., & Oetomo, P. (2021). Analisis Pemilihan Penghantar Tenaga Listrik Paling Effisien pada Gedung Bertingkat. *Sinusoida*, 23(2), 61–68.
- Purwo, S., & H. Sitompul, Y. A. (2023). Analisa Pengaruh Penyambungan Plts 1 Mw Terhadap Arus Hubung Singkat Dan Loadflow Pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik 87,2 Mw Di Daerah X. *Jurnal Elektrro*, 11(1), 24–34.
- Rakhman, A. (2020). *Sistem Proteksi*. Rakhman. <https://rakhman.net/electrical-id/sistem-proteksi/>
- Ramadhan, I. (2024). *Impedansi Adalah: Pengertian, Fungsi, Rumus, Jenis & Simbol*. TeckMarky. <https://techmarky.com/impedansi-adalah/>
- Ramschie, D., Wenas, L., Katuuk, R., & Ramschie, A. (2023). Implementasi Sistem Proteksi Dan Automatic Transfer Switch (ATS) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). *Elektrik*, 2(1), 16–26.
- Rasya, T. D. U., Afandi, A. N., & Rahmawati, Y. (2023). Power System Analysis of Steam Power Plant Using ETAP at ULPL Indralaya South Sumatra. *Jurnal Teknologi Informasi Dan Pendidikan*, 16(2), 1–20. <https://doi.org/10.24036/jtip.v16i2.785>
- Rufato, E. J., & Oliviera, C. C. B. de. (2005). Short Circuit Test For Detection of High Impedance Faults. *Cired*, 1(1), 6–9.

- Safitri, N., Rihayat, T., & Riskina, S. (2020). *Teknologi Photovoltaic* (Issue July 2019). Yayasan Puga Aceh Riset.
- Samin, T. (2019). Analisa Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Jaringan Distribusi 20 KV PT. PLN (PERSERO) Sebatik menggunakan Software ETAP Power Station 12.6.0. *Jurnal Elektriكا Borneo*, 5(1), 19–24. <https://doi.org/10.35334/jeb.v5i1.590>
- Sampeallo, A. S., Nursalim, & Fischer, P. J. (2015). Analisis Gangguan Hubung Singkat pada Jaringan Pemakaian Sendiri PLTU Bolok PT. SMSE (IPP) Unit 3 dan 4 Menggunakan Software ETAP 12.6.0. *Teknik Elektro*, 1(0380), 1–10.
- Samsurizal;, Mauriraya;, K. T., Fikri;, M., Pasra;, N., & Christiono; (2021). *Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)*. Institut Teknologi PLN.
- Sari, C. M. (2016). *Pengukuran Impedans Listrik Suatu Larutan dengan Menggunakan Probe Plat Sejajar* (Vol. 4, Issue June). Universitas Brawijaya.
- Schmidt, J., Bayer, A., & Breyer, C. (2018). Photovoltaic System Protection Strategies Against Short-Circuit Currents. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(4), 678–689.
- Siagian, P., Suleman, N., Asrim, J. S. P., Tambi, Prihatini, S. E. W. W. O. Z., Budirohmi, A., & Armus, R. (2023). Energi Baru Terbarukan Sebagai Energi Alternatif. In *Yayasan Kita Menulis*. <https://medium.com/@arifwicaksanaa/pengertian-use-case-a7e576e1b6bf>
- Subandi, & Hani, S. (2015). Pembangkit Listrik Energi Matahari Sebagai Penggerak Pompa Air dengan Menggunakan Solar Cell. *Jurnal Teknologi Technoscientia*, 7(2), 157–163. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-457-2.X5000-8>
- Syah, F. R., Haryudo, S. I., Kartini, U. T., & Kholis, N. (2021). Analisis Hubung Singkat pada Sistem Distribusi 20 kV PT. Pertamina EP Asset 4 Field Cepu Distrik Ledok menggunakan ETAP 12.6.0. *Jurnal Teknik Elektro*, 10(3), 699–706.
- Tukiman, Handono, K., & Satmoko, A. (2017). Analisis arus hubung singkat pada sistem catu daya listrik iradiator gamma. *Rekayasa Fasilitas Nuklir*, 1, 1–9.
- Yulisman. (2018). Analisis Arus Gangguan Hubung Singkat Sistem Tenaga Listrik Dengan Aplikasi Matlab. *UMSB, I*(1), 43–51.
- Zain, A., & Afwan, R. C. (2020). Analisis Gangguan Arus Hubung Singkat Trafo Distribusi 48-PT-33-7 Menggunakan ETAP (Studi Kasus Di Perumahan PT. Badak NGL). *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, 17(2), 99–116. <https://doi.org/10.31963/sinergi.v17i2.2073>