

**PERHITUNGAN JARAK GANGGUAN HUBUNG SINGKAT
SALURAN KABEL UDARA TEGANGAN MENENGAH 20 KV
PENYULANG KPK 01 SEMARANG**

Tugas Akhir

**Untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik
Program Studi Teknik Elektro**



**Diajukan oleh :
Fika Ardilla Rista
30601900064**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2023**

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Fika Ardilla Rista
NIM : 30601900064
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **“PERHITUNGAN JARAK GANGGUAN HUBUNG SINGKAT SALURAN KABEL UDARA TEGANGAN MENENGAH 20 KV PENYULANG KPK 01 SEMARANG”** adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam daftar pustaka. Tugas Akhir ini adalah milik saya segala bentuk kesalahan dan kekeliruan dalam Tugas Akhir ini adalah tanggung jawab saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, 21 Agustus 2023

Yang Menyatakan



Fika Ardilla Rista

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**PERHITUNGAN JARAK GANGGUAN HUBUNG SINGKAT SALURAN KABEL UDARA TEGANGAN MENENGAH 20 KV PENYULANG KPK 01 SEMARANG**” ini disusun oleh:

Nama : FIKA ARDILLA RISTA
NIM : 30601900064
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Senin
Tanggal : 21 Agustus 2023

Pembimbing I

Pembimbing II

Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, M.T.
NIDN : 0618066301

Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, M.T.
NIDN : 0628086501

Mengetahui,

Ka. Program Studi Teknik Elektro


050923
Jenny Putri Hapsari, ST., MT.
NIDN : 0607018501

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**PERHITUNGAN JARAK GANGGUAN HUBUNG SINGKAT SALURAN KABEL UDARA TEGANGAN MENENGAH 20 KV PENYULANG KPK 01 SEMARANG**” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Senin

Tanggal : 21 Agustus 2023

Tim Penguji

Tanda Tangan

Dr. Muhammad Khosyi'in, S.T., M.T.

NIDN : 0625077901

Ketua

Dr. Ir. Sukarno Budi Utomo, M.T.

NIDN : 0619076401

Penguji I

Dedi Nugroho, S.T., M.T.

NIDN : 0617126602

Penguji II

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Fika Ardilla Rista
NIM : 30601900064
Program Studi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Industri
Alamat Asal : Jl. Mayor Unus No. 21 Magelang
No. HP / Email : 085747980497/ fika.ardilla@std.unissula.ac.id

Dengan ini saya menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul **“PERHITUNGAN JARAK GANGGUAN HUBUNG SINGKAT SALURAN KABEL UDARA TEGANGAN MENENGAH 20 KV PENYULANG KPK 01 SEMARANG”** dan menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan hak bebas royalti non-eksklusif untuk disimpan, dialih mediakan, dikelola dalam pangkalan data dan publikasinya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/ Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung

Semarang, 21 Agustus 2023

Yang Menyatakan



Fika Ardilla Rista

PRAKATA

Assalamu 'alaikum Warahmtullahi Wabarakatuh

Segala Puja dan Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah dan masih memberikan anugerah Iman dan Islam sehingga masih berkesempatan untuk menuntut ilmu dalam keadaan sehat wal'afiat dikampus yang penuh berkah ini. Shalawat sertasalam semoga senantiasa tercurahkan kepada junjungan Rasulullah SAW yang selalu kita harapkan syafa'at dan pertolongannya di hari akhirat.

Penyusunan Tugas Akhir ini adalah merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana pada Fakultas Teknologi Industri di Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Dalam Penulisan Tugas Akhir ini, banyak pihak yang telah memberikan bantuan baik moril maupun materiil. Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan mensyukuri dengan doa Alhamdulillah yang tiada hingganya kepada:

1. Ibu Dr. Ir. Hj. Novi Marlyana, S.T., M.T selaku Dekan Fakultas Teknik Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Ibu Jenny Putri Hapsari, S.T, M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Haddin, M.T. selaku dosen pembimbing I serta Bapak Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, M.T. selaku dosen pembimbing II atas bimbingannya dalam penulisan Tugas Akhir ini.
4. Dosen penguji selaku tim penguji yang telah mengarahkan selama penyelesaian skripsi.
5. Bapak Dr. Muhammad Khosyi'in, S.T., M.T. selaku koordinator Tugas Akhir.
6. Admin kelas mitra yang selalu sabar dan tulus melayani.
7. Orang tua saya tak henti hentinya mengawal dengan do'a.
8. Suami dan anak-anak saya yang selalu menjadi motivasi dalam belajar dan berkarir.
9. Sahabat-sahabatku Dea dan Ami yang selalu ada dan mendukung kelulusan saya.

10. Serta teman teman sejawat kuliah dan teman teman kerja yang juga ikut mendukung dalam pembuatan Tugas Akhir saya.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini belum sempurna, baik dari segi materi maupun penyajiannya, untuk itu saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan dalam penyempurnaan Tugas Akhir ini.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Semarang, Juli 2023

Fika Ardilla Rista

NIM. 30601900064



MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan. Maka apabila kamu telah selesai (dari suatu urusan), kerjakanlah dengan sungguh-sungguh (urusan) yang lain

(Q.S Al-Insyirah 6-7)

Allah akan meninggikan orang-orang yang beriman diantaramu dan orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan beberapa derajat dan Allah Maha mengetahui apa yang kamu kerjakan.

(Q.S. Al Mujadilah 11)

PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, atas rahmat dan hidayah-Nya, saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. Karya sederhana ini ku persembahkan untuk:

- Papa dan mamaku, yang telah mendukungku, memberiku motivasi dalam segala hal serta memberikan kasih sayang yang teramat besar yang tak mungkin bisa ku balas dengan apapun. Tugas Akhir ini sebagai bukti dari janji yang pernah aku ucapkan saat meminta izin dari papa mama saat itu.
- Suami dan anakku, terimakasih telah bersabar, selalu memberiku motivasi dan senantiasa menyayangiku.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	Error! Bookmark not defined.i
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR....	Error! Bookmark not defined.v
PRAKATA.....	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
ABSTRAK	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Pembatasan Masalah	4
1.4 Tujuan dan Manfaat.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	6
2.1 Tinjauan Pustaka	6
2.2 Dasar Teori	8
2.2.1 Sistem Tenaga Listrik	8
2.2.2 Sistem Distribusi Tegangan Menengah 20kV	9
2.2.3 Gangguan pada Saluran Distribusi TM.....	16
2.2.4 Transformator Tenaga 60 MVA, 150/20 KV.....	26
2.2.5 Single Line Diagram	28
2.2.6 Perhitungan Error Histori Gangguan dan Perhitungan	29
2.2.7 Perhitungan Waktu dengan Rata-Rata Kecepatan Pencarian Letak Gangguan	30

BAB III METODE PENELITIAN	31
3.1 Model Penelitian.....	31
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	32
3.2.1 Peralatan	32
3.2.2 Bahan Penelitian	33
3.3 Flow Chart.....	37
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	38
4.1 Prosedur Pencarian Titik Gangguan pada Jalur SKUTM 20kV....	38
4.2 History Gangguan Penyulang KPK01 Tahun 2019.....	42
4.3 Analisis Perhitungan Perkiraan Jarak Gangguan KPK01	42
4.4 Simulasi Gangguan.....	45
4.5 Perbandingan perhitungan dengan histori gangguan.....	47
4.6 Perhitungan waktu pencarian letak gangguan.....	48
BAB V PENUTUP	50
5.1 Kesimpulan.....	50
5.2 Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA.....	52
LAMPIRAN.....	54

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data spesifikasi teknis penyulang KPK01	34
Tabel 3.2	Data spesifikasi teknis penyulang KPK01	34
Tabel 3.3	KHA Penghantar MVTIC yang digunakan PLN	35
Tabel 3.4	Reaktansi penghantar MVTIC tegangan 20 KV	35
Tabel 3.5	Nilai impedansi penghantar MVTIC dan netral.....	36
Tabel 4.1	Data arus gangguan yang pernah terjadi pada KPK01.....	41
Tabel 4.2	Panjang Jaringan dan pembagian setiap 50 tiang	41
Tabel 4.3	Perbandingan perhitungan dengan histori gangguan	47
Tabel 4.4	Jarak dan waktu penemuan gangguan.....	48



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem Tenaga Listrik.....	8
Gambar 2.2	Sumber Energi Pembangkit.....	8
Gambar 2.3	Skema Jaringan Distribusi.....	11
Gambar 2.4	Konduktor AAAC (kiri) dan AAAC-Shielded (kanan)	12
Gambar 2.5	Anatomi kabel MVTIC	14
Gambar 2.6	Anatomi kabel SKTM (Underground)	15
Gambar 2.7	Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah	18
Gambar 2.8	Gangguan fasa ke fasa	19
Gambar 2.9	Gangguan fasa ke fasa	20
Gambar 2.10	Gangguan hubung singkat tiga fasa	21
Gambar 2.11	Konstruksi transformator tiga fasa satu inti tunggal.....	26
Gambar 2.12	Konfigurasi transformator tiga fasa grounded wye-grounded wye	27
Gambar 2.13	Konfigurasi transformator tiga fasa delta – grounded wye	27
Gambar 2.14	Transformator Tenaga 60MVA GI Krapyak	28
Gambar 2.15	Single line diagram PLN ULP Semarang Barat	29
Gambar 3.1	Denah PMT GI Krapyak	31
Gambar 3.2	Topologi penyulang KPK01	31
Gambar 3.3	Flow Chart Penelitian	37
Gambar 4.1	GIS bentangan penyulang KPK01.....	41
Gambar 4.2	Simulasi Gangguan Ke 1	46
Gambar 4.3	Simulasi Gangguan Ke 2	46
Gambar 4.4	Simulasi Gangguan Ke 3	47

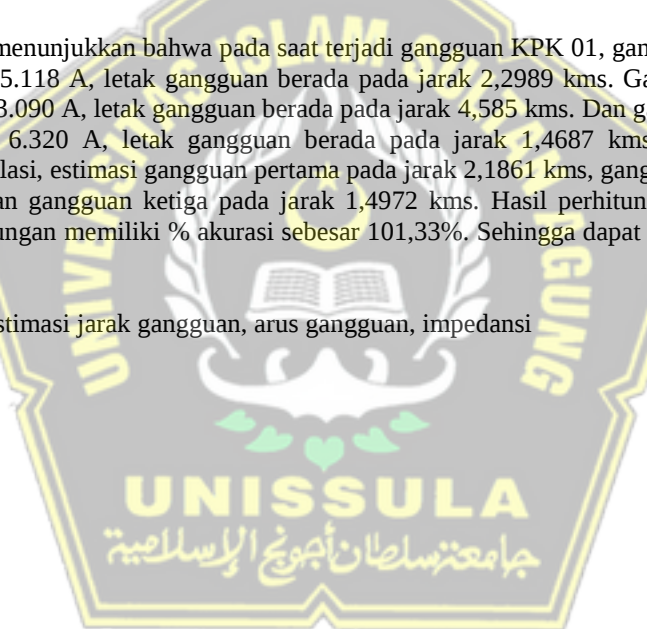
ABSTRAK

Performa penjualan energi listrik tidak dapat terlepas dari keandalan dan kontinuitas penyaluran energi kepada konsumen. Penyaluran energi listrik di Tegangan Menengah, menggunakan berbagai macam jenis saluran. Salah satunya yaitu Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM) atau sering disebut MVTIC (*medium voltage twisted insulated cable*). MVTIC memiliki tingkat keandalan lebih dibandingkan dengan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) karena minim terjadi gangguan yang diakibatkan oleh pohon, binatang dan gangguan eksternal lainnya. Permasalahannya adalah sulitnya proses pelacakan dan lama nya durasi *recovery* saat terjadi gangguan pada SKUTM. Hal ini disebabkan oleh penghantar jenis MVTIC memiliki beberapa lapisan pelindung yang tidak mudah diamati jika mengalami kerusakan, terbakar atau *breakdown*. Dampaknya adalah penyalang yang terganggu mengalami padam dalam waktu yang cukup lama. Solusinya adalah perlu diketahuinya letak gangguan.

Penelitian ini membahas tentang estimasi letak gangguan SKUTM pada penyalang 20 KV. Model ditetapkan sebagai sebuah penyalang SKUTM saat terjadi gangguan. Parameter yang ditetapkan adalah data spesifikasi transformator Gardu Induk, spesifikasi penghantar MVTIC, panjang penyalang, dan arus gangguan. Metode yang digunakan adalah menghitung jarak gangguan dengan Ms. Excel. Sebagai obyek, diambil gangguan pada penyalang KPK 01 Gardu Induk Krapyak.

Hasil menunjukkan bahwa pada saat terjadi gangguan KPK 01, gangguan pertama dengan arus gangguan 5.118 A, letak gangguan berada pada jarak 2,2989 kms. Gangguan kedua dengan arus gangguan 3.090 A, letak gangguan berada pada jarak 4,585 kms. Dan gangguan ketiga dengan arus gangguan 6.320 A, letak gangguan berada pada jarak 1,4687 kms. Perhitungan dengan kalkulator simulasi, estimasi gangguan pertama pada jarak 2,1861 kms, gangguan kedua pada jarak 4,5378 kms, dan gangguan ketiga pada jarak 1,4972 kms. Hasil perhitungan dengan kalkulator simulasi perhitungan memiliki % akurasi sebesar 101,33%. Sehingga dapat mempercepat *recovery time* gangguan.

Kata Kunci : estimasi jarak gangguan, arus gangguan, impedansi



ABSTRACT

Sales performance of electrical energy cannot be separated from the reliability and continuity of energy distribution to consumers. Distribution of electrical energy in Medium Voltage, using various types of channels. One of them is the Medium Voltage Twisted Cable Channel (SKUTM) or often called MVTIC (medium voltage twisted insulated cable). MVTIC has a higher level of reliability compared to Medium Voltage Air Lines (SUTM) because there is minimal disturbance caused by trees, animals and other external disturbances. The problem is the difficulty of the tracking process and the long duration of recovery when there is an interruption in SKUTM. This is caused by the MVTIC type conductor having several protective layers which are not easily observed if they are damaged, burnt or breakdown. The impact is that disturbed feeders experience blackouts for quite a long time. The solution is to know the location of the disturbance.

This reset discusses the estimation of the location of the SKUTM fault on a 20 KV feeder. The model is defined as a SKUTM feeder when an outage occurs. Parameters set are substation transformer specification data, MVTIC conductor specifications, feeder length, and fault current. The method used is to calculate the distance of the disturbance with Ms. Excel. As an object, interference with the feeders of the KPK 01 Krapyak Substation was taken.

The results show that when the KPK 01 disturbance occurs, the first disturbance with a fault current of 5.118 A, the location of the disturbance is at a distance of 2.2989 kms. The second disturbance with a fault current of 3,090 A, the location of the fault is at a distance of 4,585 kms. And the third fault with a fault current of 6,320 A, the fault location is at a distance of 1.4687 kms. Calculations using a simulation calculator estimate the first disturbance at a distance of 2.1861 kms, the second disturbance at a distance of 4.5378 kms, and the third disturbance at a distance of 1.4972 kms. The results of calculations with a simulation calculator have an accuracy of 101.33%. So that it can speed up the recovery time of disturbances..

Keywords: estimation of disturbance distance, fault current, impedance

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Performa penjualan energi listrik tidak dapat terlepas dari keandalan dan kontinuitas penyaluran energi kepada konsumen. Kontinuitas pelayanan aliran energi listrik kepada pelanggan menjadi salah satu indeks kinerja utama bagi perusahaan penyedia jasa utilitas kelistrikan seperti PLN. Parameter untuk mengukur tingkat keandalan adalah frekuensi dan durasi kegagalan penyaluran atau SAIDI dan SAIFI [1].

Sistem penyaluran ini terdiri dari berbagai komponen dan peralatan distribusi seperti gardu induk, penghantar, transformator distribusi, dan gardu tiang yang saling terhubung dan bekerja dengan baik dalam menghantarkan energi listrik kepada konsumen. Jaringan distribusi ini sangat kompleks karena energi listrik yang dikirim oleh utilitas harus dihantarkan menggunakan kabel dan konduktor yang letaknya jauh dari gardu induk seperti perkotaan, pedesaan dan bahkan daerah yang jauh dari pemukiman. Jaringan distribusi energi listrik hampir dapat ditemui dimana ada pemukiman dan akses jalan. Pada jaringan distribusi Tegangan Menengah 20 KV digunakan jenis penghantar sebagai berikut :

1. Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)

Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) merupakan jenis saluran dengan biaya investasi termurah untuk penyaluran tenaga listrik pada daya yang sama. Konstruksi ini masih mendominasi untuk penyaluran distribusi tenaga listrik untuk konsumen di Indonesia. Ciri utama jaringan ini adalah penggunaan penghantar terbuka (*bare conductor*) yang ditopang dengan isolator pada tiang [1].

2. Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM)

Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM) atau yang sering disebut MVTIC (*medium voltage insulated twisted cable*) . Penggunaan penghantar jenis kabel berisolasi penuh 20kV semakin populer dan banyak digunakan PLN sebagai pengganti penghantar udara telanjang konvensional

karena mempertimbangkan alasan keandalan, biaya pemeliharaan yang murah, dan semakin sempitnya ruang udara terutama di depan gardu induk. Penghantar jenis kabel berisolasi penuh memiliki banyak keuntungan terutama dari segi keandalan dan pemeliharaan [1].

3. Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM)

Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) mayoritas digunakan di daerah perkotaan yang kawasannya padat, digunakan untuk estetika, dan permintaan khusus dari pelanggan. Mengingat biaya investasi yang mahal dan keunggulannya dibandingkan dengan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) [1].

Penggunaan penghantar telanjang memiliki banyak kelebihan sehingga penggunaannya masih sangat luas antara lain: biaya investasi saluran per kilometer yang murah, pemeliharaan yang mudah, dan proses pelacakan gangguan yang sederhana sehingga lokasi dan penyebab gangguan mudah ditemukan. Namun terdapat beberapa kekurangan pada sistem saluran penghantar udara telanjang seperti tingginya angka gangguan akibat faktor eksternal seperti petir, pohon dan hewan pada musim-musim tertentu. Jenis gangguan ini sebagian besar terdiri dari gangguan satu fasa ke tanah atau *unsymmetrical fault* yang menyumbang hingga 63% jumlah gangguan menurut Burke dan Lawrence. Langkah preventif yang dilakukan oleh PLN adalah menjaga jarak aman antara saluran dengan lingkungan atau ROW seperti pohon, bangunan dan jangkauan manusia. Namun jaringan yang sangat panjang dan volume pohon yang sangat banyak menyebabkan masih tingginya angka gangguan eksternal akibat pohon, hewan dan lainnya. Dilain sisi, semakin tingginya permintaan energi listrik dikawasan industri dan adanya opsi layanan premium dari PLN yang menggunakan penyulang berjenis feeder express, penambahan jumlah penyulang baru terus dilakukan.

Apabila menggunakan MVTIC, permasalahannya adalah sulitnya proses pelacakan dan lama nya durasi *recovery* saat terjadi gangguan pada SKUTM. Hal ini disebabkan oleh penghantar jenis MVTIC memiliki beberapa lapisan pelindung

yang tidak mudah diamati jika mengalami kerusakan, terbakar atau *breakdown*. Dampaknya adalah penyulang yang terganggu mengalami padam dalam waktu yang cukup lama. Selain itu, resiko kerusakan tambahan pada penghantar karena tegangan uji dari HV Tester yang dapat merusak isolasi kabel MVTIC. Solusinya adalah perlu diketahuinya letak gangguan. dengan menggunakan estimasi jarak berdasarkan besar arus gangguan atau impedansi dapat menjadi langkah yang baik sebelum petugas melakukan pelacakan visual dan memotong kabel untuk uji kebocoran isolasi. Hal ini dapat memotong waktu pelacakan sehingga dapat menekan angka SAIDI, kerusakan kabel akibat uji tahanan isolasi dan pemotongan kabel.

Pada kasus yang pernah terjadi pada penyulang KPK 01 Semarang di tahun 2019, gangguan pada MVTIC membutuhkan waktu penanganan paling lama lebih dari 1 hari. Dikarenakan petugas belum mengetahui estimasi letak gangguan, sehingga harus melakukan penyisiran mulai dari pangkal GI sampai dengan ujung jaringan.

Berdasarkan uraian tersebut, peneliti tertarik untuk melakukan analisis dan perhitungan penentuan jarak gangguan pada penyulang yang menggunakan penghantar berjenis kabel MVTIC dengan menggunakan Microsoft Excel. Penulis berharap hasil dari penelitian ini dapat menjadi alat bantu dan referensi bagi PLN dalam merespon gangguan pada penyulang ekspres atau saluran kabel yang menggunakan kabel berisolasi penuh (MVTIC).

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan dan berdasarkan pengamatan yang dilakukan, dapat ditarik permasalahan yang dihadapi yaitu:

1. Pencarian letak gangguan pada kabel Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM) memerlukan waktu yang lama, sehingga menyebabkan *recovery time* juga menjadi lama.
2. Pengaruh besar arus gangguan terhadap jarak gangguan.
3. Bagaimana cara menentukan titik gangguan pada Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM) saat terjadi gangguan.

1.3 Pembatasan Masalah

Mengingat luas dan banyaknya hal-hal yang perlu diperhatikan dalam penelitian ini, maka penulis memberikan batasan masalah yaitu:

1. Jenis saluran yang digunakan dalam penelitian adalah Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM) dengan material kabel berbahan MVTIC
2. Estimasi jarak gangguan mengikuti desain sistem proteksi yang ada diwilayah PLN UP3 Semarang dengan pembagian zona proteksi Hubung Singkat (HS) 1 dan HS 2
3. Simulasi yang dilakukan dibatasi pada studi kasus kejadian di Penyulang KPK01 untuk memvalidasi hasil perhitungan.

1.4 Tujuan dan Manfaat

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui estimasi letak gangguan pada penyulang yang menggunakan jenis penghantar SKUTM atau MVTIC secara cepat dan akurat untuk memotong durasi (SAIDI).

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Meminimalisir penggunaan metode uji tahanan isolasi HV Test yang dapat merusak kabel SKUTM MVTIC.
2. Menjadi referensi bagi PLN untuk memudahkan dalam pelacakan gangguan penyulang berpenghantar MVTIC.

1.5 Sistematika Penulisan

Dalam penyusunan laporan penelitian, penulis membagi bahasan kedalam bab dan sub-bab yang dijelaskan pada bagian berikut:

BAB I Pendahuluan

Membahas latar belakang, perumusan masalah, pembatasan masalah, tujuandan manfaat serta sistematika penulisan Tugas Akhir.

BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

Bab ini membahas mengenai struktur jaringan distribusi secara umum dan khusus dilingkungan PLN Jawa Tengah dan DIY, Jenis-jenis penghantar yang digunakan dan sistem proteksi yang digunakan pada PLN UP3 Semarang. Kemudian pada bagian ini membahas tentang jenis-jenis gangguan hubung singkat pada saluran distribusi dan penyebabnya, jenis-jenis kegagalan operasi yang terjadi pada saluran SKUTM MVTIC. Selanjutnya pada BAB ini juga membahas dasar teori dan perhitungan yang digunakan untuk melakukan perhitungan estimasi jarak gangguan berdasarkan besar arus gangguan (impedansi).

BAB III Metodologi Penelitian

Berisi tentang lokasi penelitian, sumber data baik primer maupun sekunder, teknik pengumpulan data dan analisis data hasil pengamatan.

BAB IV Hasil Penelitian dan Pembahasan

Bab ini membahas tentang tipe topologi jaringan dan sistem proteksi yang digunakan di UP3 Semarang, perhitungan besar arus hubung singkat dan estimasi jarak gangguan berdasarkan besar impedansi gangguan dan parameter jaringan dan gardu induk yang kemudian dimasukkan kedalam tabel dengan menggunakan bantuan software Ms. Excell.

BAB V Penutup

Berisi kesimpulan dari hasil analisa dan saran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam penyusunan dan pengumpulan data penelitian ini, penulis mencari berbagai informasi dan hasil analisis dari paper dan jurnal pada penelitian sebelumnya yang pernah dilakukan sebagai bahan perbandingan dan referensi baik mengenai kekurangan atau kelebihan yang sudah ada. Selebihnya, penulis juga mencari informasi dari buku-buku *textbook* sebagai landasan ilmiah tentang teori yang berkaitan dengan judul yang digunakan. Berikut ini beberapa referensi tinjauan pustaka yang penulis gunakan sebagai dasar dalam penyusunan penelitian ini :

- a. Dalam penyaluran energi listrik dari gardu ke pusat beban diperlukan saluran distribusi. Permasalahan yang sering terjadi pada saluran distribusi adalah gangguan hubung singkat. Seringkali lokasi gangguan tidak dapat segera diketahui letak lokasinya, sehingga memperlambat proses penanganan gangguan. Dengan menggunakan metode berbasis impedansi, jarak lokasi gangguan dapat diperkirakan. Hasil perhitungan jarak lokasi kemudian diimplementasikan menggunakan GIS (geographic information Sistem) aset pemetaan PLN di Semarang, sehingga dapat memberikan visualisasi yang baik terhadap perkiraan lokasi gangguan yang terjadi [2].
- b. Perkiraan lokasi kesalahan yang akurat sangat penting untuk keandalan sistem tenaga. Pada penelitian ini, algoritma lokasi kesalahan dipelajari dan dibandingkan dalam penelitian ini. Dua metode yang digunakan dalam makalah ini adalah reaktansi sederhana dan takagi. Jenis hubung singkat yang disimulasikan dalam makalah ini adalah fasa ke tanah, fasa ke fasa, fasa ke fasa ke tanah dan tiga fase. Kedua metode menggunakan data arus dan tegangan untuk menghitung jarak gangguan pada jalur distribusi yang diperoleh dari data hasil simulasi. Persentase kesalahan karena metode reaktansi sederhana dan metode takagi dari fase tunggal

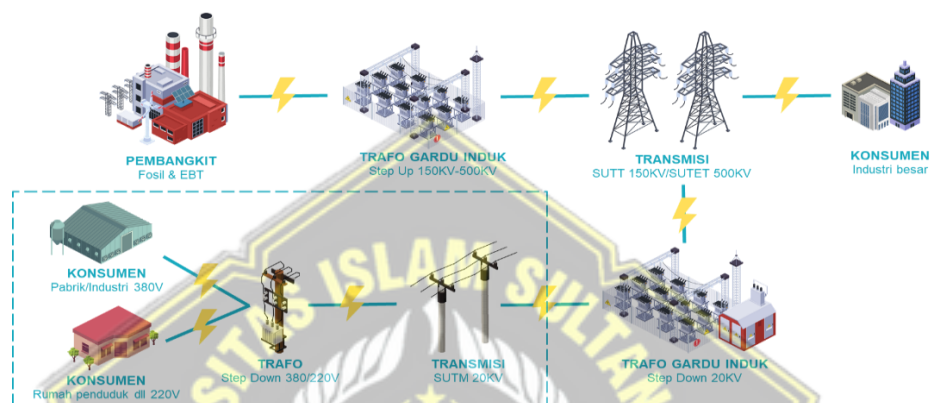
ke tanah dan kesalahan fase ke fase salah nol. Tetapi memiliki hasil yang berbeda untuk fase ke fase ke tanah dan tiga fase disalahgunakan dengan reaktansi sederhana hanya memiliki satu kesalahan dan takagi diperoleh dengan 6 kesalahan dan memiliki kesalahan tertinggi 1,2%. Hasilnya menunjukkan bahwa metode reaktansi sederhana lebih mudah dan akurat daripada metode takagi untuk memperkirakan lokasi gangguan hubungan pendek pada jalur distribusi [3].

- c. Algoritma penentuan lokasi ganggan dalam sistem distribusi, adalah pekerjaan yang menantang karena topologi distribusi jaringan, serta karakteristik jaringan yang beragam. Metode baru untuk lokasi gangguan dikembangkan untuk kondisi dimana informasi yang tersedia sangat minimal. Metode cerdas yang diusulkan didasarkan pada estimasi impedansi dan kondisi transien. Teknik ini menggunakan analisis impedansi khusus untuk menentukan kemungkinan lokasi gangguan dengan mempertimbangkan kinerja distribusi yang tidak seimbang sistem, jarak, dan berbagai resistansi gangguan. Untuk menentukan titik gangguan yang tepat, analisis komponen frekuensi dan simulasi gangguan pada titik yang memiliki kemungkinan tinggi digunakan [4].
- d. Literatur menunjukkan bahwa perhitungan estimasi jarak gangguan pada sistem distribusi pada umumnya menggunakan metode impedansi dan reaktansi untuk menentukan besar arus gangguan dan estimasi jarak gangguan yang terjadi. Metode baru menggunakan analisis komponen frekuensi juga dikembangkan untuk mencari jarak lokasi gangguan sebenarnya dengan memperhitungkan perubahan besaran frekuensi akibat gangguan hubung singkat. Pada penelitian ini penulis akan melakukan analisis perhitungan estimasi jarak gangguan menggunakan metode impedansi spesifik untuk saluran kabel udara tegangan menengah berisolasi penuh (MVTIC) untuk mempercepat proses lokalisir gangguan dan menemukan titik gangguan disepanjang saluran kabel MVTIC dengan bantuan software Ms. Excel.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem Tenaga Listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen berupa pembangkitan, transmisi, distribusi dan beban yang saling berhubungan dan bekerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan [3]. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1 :



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Pembangkit-pembangkit listrik yang ada di PLN, menggunakan 2 jenis energi yaitu energi berbahan baku fossil dan energi baru terbarukan. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Sumber Energi Pembangkit

Setelah dari pembangkit, listrik ditransformasikan melalui trafo step up 150-500 kV untuk kemudian disalurkan melalui sistem transmisi SUTT 150 kV dan SUTET 500 kV sampai dengan Gardu Induk. Kemudian listrik dapat digunakan untuk konsumen besar Tegangan Tinggi. Dan untuk konsumen Tegangan Menengah listrik ditrasformasikan kembali dengan menggunakan trafo *step down*

20 kV dan untuk Tegangan Rendah ditrasformasikan kembali dengan menggunakan trafo step down 380/220 Volt.

2.2.2 Sistem Distribusi Tegangan Menengah 20kV

Pada pendistribusian tenaga listrik ke pengguna tenaga listrik di suatu kawasan, penggunaan sistem Tegangan Menengah sebagai jaringan utama adalah upaya utama menghindarkan rugi-rugi penyaluran (*losses*) dengan kualitas persyaratan tegangan yang harus dipenuhi oleh PT PLN Persero selaku pemegang Kuasa Usaha Utama sebagaimana diatur dalam UU ketenagalistrikan No 30 tahun 2009.

Jaringan distribusi adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang berupa jaringan penghantar yang menghubungkan antara gardu induk pusat beban ke pelanggan. Jaringan distribusi ini sendiri berfungsi untuk mendistribusikan energi listrik langsung kepada konsumen sesuai dengan kebutuhan. Jaringan distribusi dalam operasinya tidak bisa dipisahkan dengan gardu induk distribusi. Gardu induk distribusi ada yang berada di ujung saluran transmisi, yang berfungsi mengatur distribusi daya yang diterima dari saluran transmisi sekaligus menurunkan tegangan dari level saluran transmisi ke level jaringan distribusi. Gardu induk juga ada yang berada di antara jaringan distribusi yang berfungsi untuk membagi aliran daya dan menurunkan tegangan distribusi ke tegangan rendah.

Sistem distribusi adalah suatu bagian dimana distribusi terhubung langsung ke peralatan-peralatan konsumen. Jaringan distribusi utama umumnya berada pada rentang 3 kV sampai dengan 34.5 kV dan menyuplai beban pada area yang telah ditentukan. Beberapa pelanggan industri kecil biasanya langsung disuplai oleh jaringan distribusi utama ini.

1. Level Tegangan Jaringan Distribusi

Pada jaringan distribusi terdapat beberapa level tegangan, berikut adalah level tegangan yang digunakan dalam sistem distribusi:

- a. Saluran tegangan menengah (TM: 20 kV)
 - Antar gardu induk (GI)
 - Antar gardu induk dan pelanggan TM
 - Antar gardu induk dan trafo distribusi TR

b. Saluran tegangan rendah

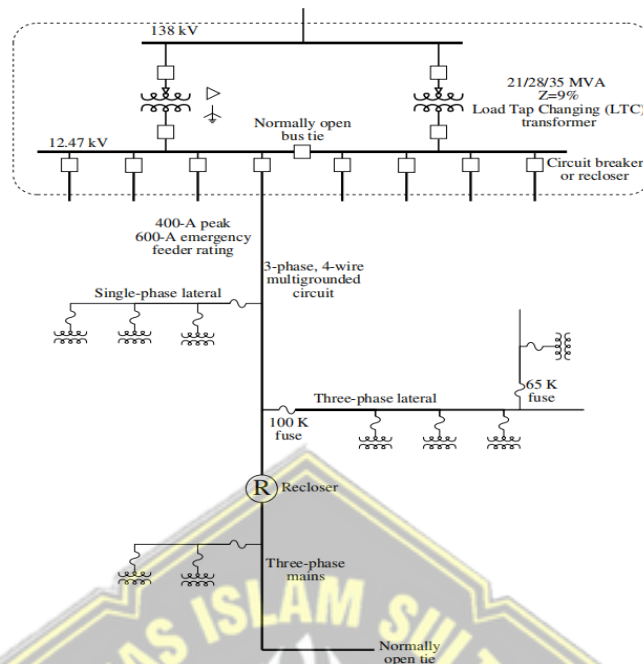
- Antar trafo tegangan dan pelanggan.

Jaringan distribusi merupakan penghubung antar gardu induk tegangan menengah atau yang menghubungkan gardu induk tegangan menengah dengan trafo distribusi tegangan rendah. Untuk beban yang relatif kecil termasuk beban rumah tangga lebih banyak menggunakan satu fase 2 kawat dengan tegangan 220 volt dari fasa ke netral. Dalam prakteknya, trafo tegangan yang digunakan mempunyai tiga terminal output, yaitu satu netral yang juga dihubungkan ke tanah dan dua terminal fasa yang mempunyai tegangan sama 220 volt.

Lingkup Jaringan Tegangan Menengah pada sistem distribusi di Indonesia dimulai dari terminal keluar (out-going) pemutus tenaga dari transformator penurun tegangan Gardu Induk atau transformator penaik tegangan pada Pembangkit untuk sistem distribusi skala kecil, hingga peralatan pemisah/proteksi sisi masuk (in-coming) transformator distribusi 20kV - 231/400V.

2. Topologi Jaringan Distribusi

Jaringan distribusi primer yaitu jaringan tenaga listrik yang keluar dari GI baik itu berupa saluran kabel tanah, saluran kabel udara atau saluran kawat terbuka yang menggunakan standard tegangan menengah dikatakan sebagai Jaringan Tegangan Menengah yang sering disebut dengan singkatan JTM. Setelah tenaga listrik disalurkan melalui jaringan distribusi primer maka kemudian tenaga listrik diturunkan tegangannya dengan menggunakan trafo distribusi (step down transformer) menjadi tegangan rendah dengan tegangan standar 380/220 Volt [5]. Tenaga listrik yang menggunakan standard tegangan rendah ini kemudian disalurkan melalui suatu jaringan yang disebut Jaringan Tegangan Rendah yang sering disebut dengan singkatan JTR, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skema Jaringan Distribusi

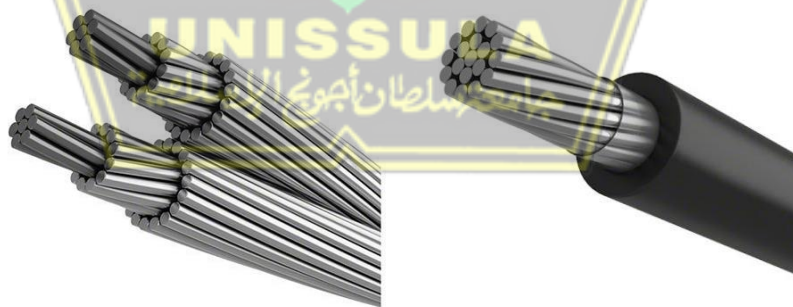
Sama halnya pada JTM jenis saluran yang dipergunakan pada JTR dapat menggunakan tiga jenis saluran yaitu SUTR untuk saluran udara tegangan rendah dengan menggunakan saluran kawat terbuka SKUTR untuk saluran udara tegangan rendah dengan menggunakan saluran kabel udara yang dikenal dengan sebutan kabel twisted yang sering disebut dengan singkatan TIC singkatan dari *Twisted Insulation Cable* SKTR untuk saluran udara tegangan rendah dengan menggunakan saluran kabel tanah. Tenaga listrik dari jaringan tegangan rendah ini untuk selanjutnya disalurkan ke rumah-rumah pelanggan (konsumen) melalui suatu sarana yang disebut Sambungan Pelayanan atau Sambungan Rumah yang dapat dipisahkan menjadi dalam 2 bagian yaitu Sambungan Luar Pelayanan dan Sambungan Masuk Pelayanan. Dalam proses bisnis PLN pelanggan-pelanggan yang mempunyai daya tersambung besar aturannya tidak disambung melalui Jaringan Tegangan Rendah (JTR) melainkan disambung langsung pada Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan yang sangat besar disambung pada Jaringan Transmisi Tegangan Tinggi, tergantung besarnya daya tersambung.

3. Jenis Saluran Distribusi

Konstruksi jaringan Tenaga Listrik Tegangan Menengah dapat dikelompokkan menjadi 3 macam konstruksi sebagai berikut:

a. Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)

Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) adalah sebagai konstruksi termurah untuk penyaluran tenaga listrik pada daya yang sama. Konstruksi ini terbanyak digunakan untuk konsumen jaringan Tegangan Menengah yang digunakan di Indonesia. Ciri utama jaringan ini adalah penggunaan penghantar telanjang berjenis AAAC (*all aluminium alloy conductor*) yang ditopang dengan isolator pada tiang besi/beton. Penggunaan penghantar telanjang, dengan sendirinya harus diperhatikan faktor yang terkait dengan keselamatan ketenagalistrikan seperti jarak aman minimum yang harus dipenuhi penghantar bertegangan 20 kV tersebut antar Fase atau dengan bangunan atau dengan tanaman atau dengan jangkauan manusia. Termasuk dalam kelompok yang diklasifikasikan SUTM adalah juga bila penghantar yang digunakan adalah penghantar berisolasi setengah AAAC-S. Penggunaan penghantar ini tidak menjamin keamanan terhadap tegangan sentuh yang dipersyaratkan akan tetapi untuk mengurangi resiko gangguan temporer khususnya akibat sentuhan tanaman [6], seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Konduktor AAAC (kiri) dan AAAC-Shielded (kanan).

b. Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM)

Untuk lebih meningkatkan keamanan dan keandalan penyaluran tenaga listrik, penggunaan penghantar telanjang atau penghantar berisolasi setengah pada konstruksi jaringan Saluran Udara Tegangan Menengah 20 kV, dapat juga

digantikan dengan konstruksi penghantar berisolasi penuh yang dipilin. Isolasi penghantar tiap Fase tidak perlu di lindungi dengan pelindung mekanis. Berat kabel pilin menjadi pertimbangan terhadap pemilihan kekuatan beban kerja tiang beton penopangnya [6]. Adapun konstruksi dari penghantar berjenis MVTIC adalah sebagai berikut:

- Konduktor

Penghantar berbahan aluminium berukuran 240mm^2 yang dikemas dalam bentuk *stranded compacted*. Konduktor dikemas dalam bentuk ini agar celah rongga menjadi minimal sehingga meminimalisir kemungkinan adanya air atau cairan yang masuk kedalam konduktor saat penyimpanan, transportasi, instalasi maupun operasi yang dapat merusak kekuatan struktur penghantar akibat panas berlebih.

- Film Semikonduktor atau *Semiconductor Screen*

Inti konduktor dari kabel MVTIC terbuat dari serat yang permukaannya tidak rata sehingga menimbulkan distribusi medan listrik yang tidak rata. Film semikonduktor dengan ketebalan 0.5mm ditambahkan pada permukaan konduktor untuk mendistribusikan medan listrik agar merata pada semua permukaan. Semiconductor screen ini juga memiliki kontak permukaan yang sangat baik dengan lapisan isolasi XLPE sehingga mengurangi partial discharge antara konduktor dan lapisan isolasi secara signifikan.

- Lapisan isolasi XLPE (Cross-Linked Polyethylene)

Lapisan XLPE merupakan lapisan isolasi utama yang melindungi kawat penghantar dari potential ground. Cross-linked polyethylene (XLPE) telah digunakan secara luas pada untuk isolasi kabel tegangan tinggi karena memiliki kapasitas dielektrik yang sangat tinggi, stabilitas thermal dan tahan terhadap cairan bahan kimia.

- Lapisan Semikonduktor

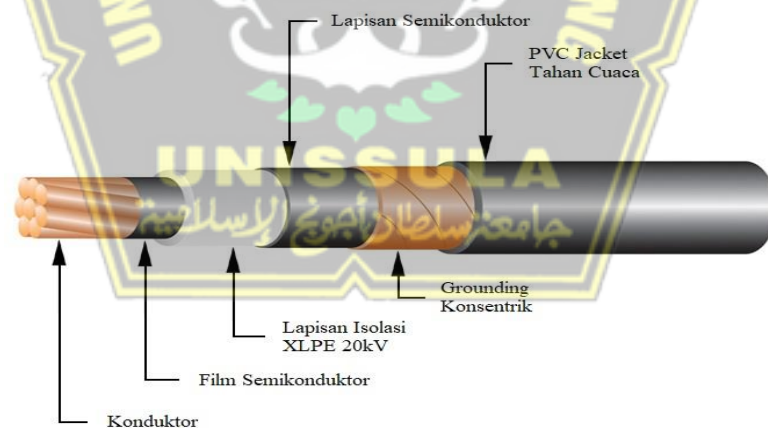
Lapisan semikonduktor yang dilapisi dengan serat kain yang berfungsi untuk menahan air atau cairan sehingga tidak mengalir didalam kabel.

- Grounding Konsentrik

Kawat ground konsentrik atau concentric neutral merupakan kawat tembaga dan pita tembaga yang dibelit pada sekeliling kabel MVTIC yang berfungsi sebagai kawat netral untuk membawa arus netral dari jaringan. Groung konsentrik ini juga berfungsi sebagai pelindung agar medan magnetic yang dihasilkan oleh konduktor tegangan tinggi tidak mengganggu atau interferensi dengan kabel telekomunikasi atau lainnya. Grounding konsentrik ini juga berfungsi sebagai safety feature saat terjadi kerusakan isolasi kabel akibat benturan. Saat lapisan XLPE rusak, kawat grounding akan bersentuhan dengan konduktor fasa sehingga mengakibatkan short circuit dan mengakibatkan peralatan proteksi bekerja.

- PVC Jacket

PVC Jacket merupakan lapisan terluar dari kabel MVTIC. Lapisan ini berfungsi sebagai lapisan pelindung kabel dari perubahan cuaca, lingkungan dan perlindungan mekanis. Lapisan PVC ini juga meningkatkan resistansi kabel terhadap api dan panas sehingga kabel lebih tahan terhadap cuaca panas dan terik matahari, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Anatomi kabel MVTIC

c. Saluran Kabel Tanah Tegangan Menengah (SKTM)

Konstruksi SKTM ini adalah konstruksi yang aman dan andal untuk mendistribusikan tenaga listrik Tegangan Menengah, tetapi relatif lebih mahal untuk penyaluran daya yang sama. Keadaan ini dimungkinkan dengan konstruksi

isolasi penghantar per Fase dan pelindung mekanis yang dipersyaratkan. Pada rentang biaya yang diperlukan, konstruksi ditanam langsung adalah termurah bila dibandingkan dengan penggunaan konduit atau bahkan tunneling (terowongan beton) [6].

Penggunaan Saluran Kabel bawah tanah Tegangan Menengah (SKTM) sebagai jaringan utama pendistribusian tenaga listrik adalah sebagai upaya utama peningkatan kualitas pendistribusian. Dibandingkan dengan SUTM, penggunaan SKTM akan memperkecil resiko kegagalan operasi akibat faktor eksternal / meningkatkan keamanan ketenagalistrikan [1]. Secara garis besar, termasuk dalam kelompok SKTM adalah :

- SKTM bawah tanah – underground MV Cable.
- SKTM laut – Submarine MV Cable

Selain lebih aman, namun penggunaan SKTM lebih mahal untuk penyaluran daya yang sama, sebagai akibat konstruksi isolasi penuh penghantar per Fase dan pelindung mekanis yang dipersyaratkan sesuai keamanan ketenagalistrikan. Penerapan instalasi SKTM seringkali tidak dapat lepas dari instalasi Saluran Udara Tegangan Menengah sebagai satu kesatuan sistem distribusi sehingga masalah transisi konstruksi diantaranya tetap harus dijadikan perhatian, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Anatomi kabel SKTM (*Underground*)

4. Sistem Jaringan Distribusi Jawa Tengah

Sistem Distribusi 20kV fasa tiga 4 kawat dengan pentanahan netral secara langsung. Pola sistem ini mulai dikembangkan di Indonesia di PLN distribusi Jawa tengah dan pola sistem distribusi ini di indentifikasi sebagai berikut:

- a. Tegangan Nominal: 20 kV
- b. Sistem Pentanahan: Netral ditanahkan sepanjang jaringan dan kawat netral dipakai bersama untuk saluran tegangan menengah dan saluran tegangan rendah dibawahnya.
- c. Konstruksi Jaringan: Terdiri dari saluran udara terutama dan saluran kabel sedang saluran udara terdiri dari: saluran utama dan saluran cabang.
- d. Saluran Utama: kawat AAAC 240 dan 150 mm² 3 fasa 4 kawat
- e. Saluran Cabang: kawat AAAC 150 dan 70 mm² 3 fasa 4 kawat dan kawat AAC 70 dan 35 Fasa satu 2 kawat (Fasa netral) Cat: Penghantar dapat dipilih yang setara
- f. Sistem pelayanan: radial dengan kemungkinan saluran utama antara jaringan yang berdekatan dapat saling berhubungan dalam keadaan darurat
- g. Pelayanan Beban: Fasa tiga 4 kawat: 20/11.6 kV, Fasa tunggal: 2 kawat 11,6 kV

2.2.3 Gangguan pada Saluran Distribusi TM

Dalam operasi sistem tenaga listrik sering terjadi gangguan yang dapat mengakibatkan terganggunya penyaluran tenaga listrik ke konsumen. Gangguan adalah suatu keadaan dari sistem penyaluran tenaga listrik yang menyimpang dari keadaan normal [6]. Berdasarkan ANSI/IEEE Std 100-1992 gangguan didefinisikan sebagai suatu kondisi fisis yang disebabkan kegagalan suatu perangkat, komponen atau suatu elemen untuk bekerja sesuai dengan fungsinya. Hubung singkat ialah suatu hubungan abnormal (termasuk busur api) pada impedansi yang relatif rendah terjadi secara kebetulan atau disengaja antara dua titik yang mempunyai potensial yang berbeda. Pada dasarnya gangguan yang sering terjadi pada sistem distribusi saluran 20 kV menjadi dua macam yaitu gangguan dari dalam sistem dan gangguan dari luar sistem. Gangguan yang berasal dari dalam sistem dapat berupa kegagalan dari fungsi peralatan jaringan, kerusakan dari peralatan jaringan dan kerusakan dari peralatan pemutus beban. Gangguan yang berasal dari luar sistem dapat disebabkan oleh sentuhan pohon atau ranting pada penghantar, sambaran petir, manusia, binatang, cuaca dan lain-lain. Jenis gangguan yang terjadi pada jaringan distribusi dapat dibagi menjadi 2, yaitu :

a. Dari lama gangguan:

- Gangguan permanen (dapat disebabkan oleh kerusakan peralatan, gangguan baru akan hilang setelah kerusakan diperbaiki).
- Gangguan temporer (gangguan yang tidak akan lama dan dapat normal atau hilang dengan sendirinya yang disusul dengan penutupan kembali peralatan hubungannya).

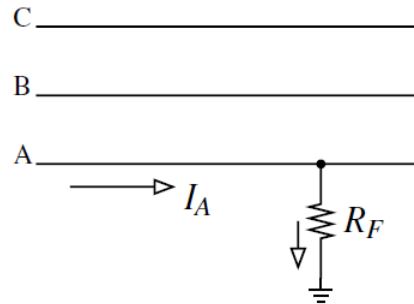
b. Dari jenis gangguan:

- Gangguan satu fasa ke tanah
- Gangguan dua fasa ke tanah
- Gangguan fasa ke fasa
- Gangguan tiga fasa ke tanah

Gangguan hubung singkat adalah gangguan yang terjadi karena adanya kesalahan antara bagian-bagian yang bertegangan dapat menyebabkan terjadinya arus yang sangat besar, sehingga dapat merusak peralatan listrik yang ada di sekitar titik gangguan. Besar dari arus gangguan hanya dipengaruhi oleh impedansi sistem dan impedansi gangguan. Impedansi sistem antara lain penghantar, peralatan switching dan transformator yang diukur dari sumber gangguan sampai ke sumber. Sedangkan impedansi gangguan meliputi impedansi penyebab gangguan seperti penghantar netral. Besar impedansi gangguan juga sangat bergantung dari jenis gangguannya. Adapun jenis-jenis gangguan hubung singkat adalah:

a. Gangguan satu fasa ke tanah

Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (*line-to-ground*) merupakan hubung singkat yang terjadi karena hubung penghantar fasa dan tanah saling bersentuhan. Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah termasuk gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri). Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah merupakan gangguan yang sering terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik, prosentase dari gangguan ini sekitar 70% dari gangguan hubung singkat yang lain. Gangguan ini bersifat temporer, tidak ada kerusakan permanen di titik gangguan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

Nilai impedansi total (Z_{eki}) diperhitungkan dengan persamaan (2.1).

$$Z_{eki} = \frac{z_1 + z_2 + z_0}{3} \quad (2.1)$$

Z_1 = impedansi urutan positif (ohm),

Z_2 = impedansi urutan negatif

Z_0 = impedansi urutan nol.

Besar arus gangguan dapat dihitung dengan persamaan (2.4) dengan asumsi impedansi urutan positif sama dengan impedansi urutan negatif [7], $Z_1 = Z_2$, sehingga

$$Z_1 + Z_2 = 2Z_1 \quad (2.2)$$

Rumus dasar yang digunakan adalah Hukum Ohm.

$$I = \frac{V}{Z} \quad (2.3)$$

Dimana :

I = arus gangguan hubung singkat

V = tegangan sumber

Z = impedansi dari sumber ke titik gangguan, impedansi ekivalent

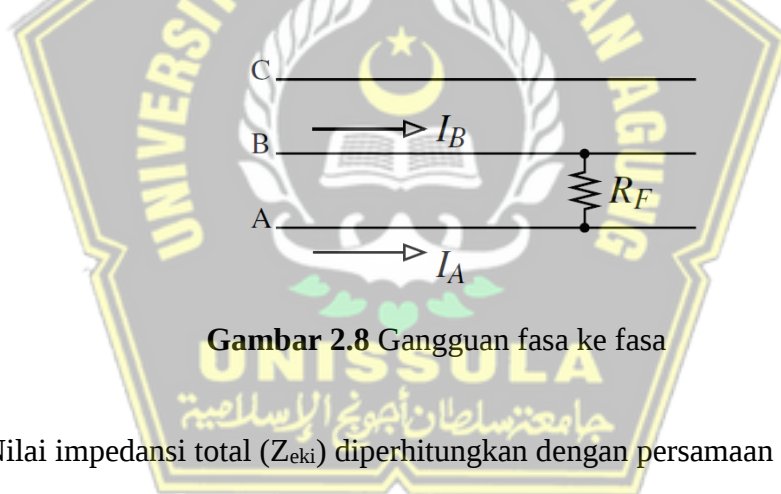
$$I_A = \frac{V_{LN}}{(2Z_1 + Z_0) + R_F} \quad (2.4)$$

V_{LN} = nilai tegangan antara fasa dengan titik referensi netral

R_F = impedansi gangguan.

b. Gangguan fasa ke fasa

Gangguan hubung singkat fasa ke fasa (*line-to-line*) merupakan gangguan hubung singkat yang terjadi karena bersentuhannya antara penghantar fasa yang satu dengan penghantar fasa yang lainnya, sehingga terjadi arus lebih (*over-current*). Gangguan hubung singkat fasa ke fasa termasuk gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8. Gangguan *line-to-line* dapat diakibatkan bersentuhannya penghantar fasa karena terkena ranting pohon yang tertiup oleh angin atau akibat konduktor yang goyang karena angin kencang. Prosentase terjadi gangguan hubung singkat line to line adalah 15%.



Gambar 2.8 Gangguan fasa ke fasa

Nilai impedansi total (Z_{eki}) diperhitungkan dengan persamaan (2.5).

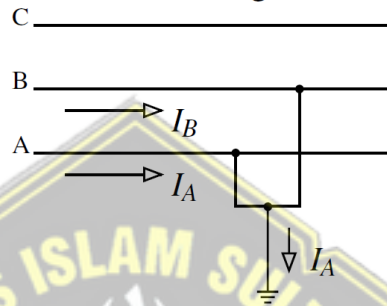
$$Z_{ekiv} = \frac{z_1 + z_2}{\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

Besar arus gangguan dapat dihitung dengan persamaan (2.6) dengan asumsi impedansi urutan positive sama dengan impedansi urutan negative, $Z_1 = Z_2$, seperti persamaan (2.2).

$$I_A = -I_B = -j \frac{\sqrt{3}V_{LN}}{2Z_1 + R_F} \quad (2.6)$$

c. Gangguan dua fasa ke tanah

Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah (*line-to-line-to-ground*) merupakan gangguan hubung singkat yang terjadi bila dua fasa salurannya atau dua fasa penghantar terhubung ke tanah, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9. Gangguan ini termasuk gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri). Prosentase terjadi gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah adalah 10%.



Gambar 2.9 Gangguan fasa ke fasa.

Nilai impedansi total (Z_{eki}) diperhitungkan dengan persamaan (2.7).

$$Z_{eki} = \frac{z_1 + z_0 \sqrt{3}}{z_1 + z_0} \quad (2.7)$$

Besar arus gangguan dapat dihitung dengan persamaan (2.8), (2.9), (2.10) berikut dengan asumsi impedansi urutan positive sama dengan impedansi urutan negative, $Z_1 = Z_2$, seperti persamaan (2.2).

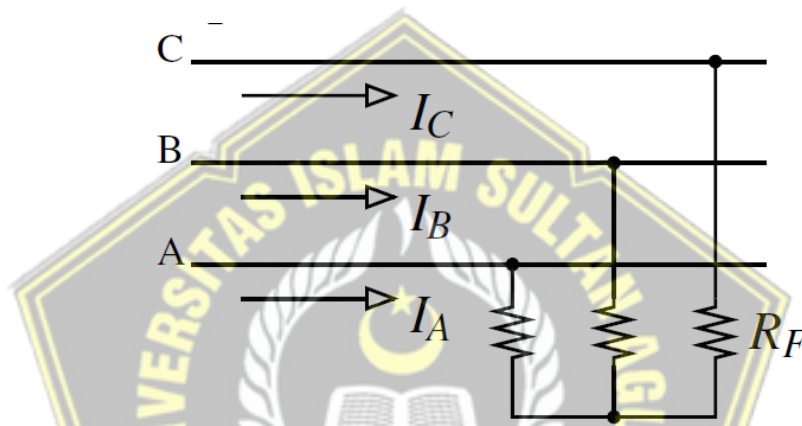
$$I_A = -j\sqrt{3} \frac{z_0 + az_1}{z_1(z_1 + 2z_0)} V_{LN} \quad (2.8)$$

$$I_B = j\sqrt{3} \frac{z_0 + a^2 z_1}{z_1(z_1 + 2z_0)} V_{LN} \quad (2.9)$$

$$I_G = \frac{-V_{LN}}{(z_1 + 2z_0)/3} \quad (2.10)$$

d. Gangguan tiga fasa

Gangguan hubung singkat tiga fasa (LLL) merupakan gangguan hubung singkat yang terjadi karena bersentuhannya ketiga penghantar fasa, gangguan ini dapat diakibatkan oleh tumbangnya pohon yang kemudian menimpa kabel jaringan, sehingga memutus kabel fasa secara bersamaan. Gangguan ini termasuk gangguan hubung singkat simetri, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10. Prosentase untuk terjadi gangguan hubung singkat ini adalah 5%.



Gambar 2.10 Gangguan hubung singkat tiga fasa

Nilai impedansi total (Z_{eki}) diperhitungkan dengan persamaan (2.11).

$$Z_{eki} = Z_1 \quad (2.11)$$

Z_1 adalah impedansi urutan positif. Besar arus gangguan dapat dihitung dengan persamaan (2.12).

$$I_A = \frac{V_{LN}}{Z_1 + R_F} \quad (2.12)$$

e. Jarak Gangguan

Besar nilai arus hubung singkat 1 fasa I_A atau $I.HS_{1\phi}$ seperti persamaan (2.4).

Atau dapat disederhanakan seperti persamaan (2.13)

$$I_{HS_{1\phi}} = 3 \times \frac{kV / \sqrt{3}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.13)$$

Jika I_{HS} 1 fasa sudah diketahui, dan ingin mencari nilai Z_{eki} maka rumusnya menjadi [20].

$$Z_{eki} = \frac{3 \text{ kV} / \sqrt{3}}{I_{HS_{1\phi}}} \quad (2.14)$$

Karena tujuan utamanya adalah mencari nilai L, maka rumus yang memiliki hubungan antara Z_{eki} dan L adalah

$$\begin{aligned} Z_1 &= \sqrt{(R_1 + R_f) + j(X_{s1} + X_{T1} + X_1)} \\ Z_2 &= \sqrt{(R_2 + R_f) + j(X_{s2} + X_{T2} + X_2)} \\ Z_0 &= \sqrt{R_0 + 3R_N + 3R_f + j(X_{s0} + X_{T0} + X_0)} \\ Z_{eki} &= Z_1 + Z_2 + Z_0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

Persamaan di atas masih dalam bentuk polar, maka diubah terlebih dahulu menjadi bentuk kompleks.

$$Z_{eki} = \sqrt{(3R_N + 3R_f + 2.L.R_1 + L.R_0)^2 + (2.X_{S1} + 2.X_T + X_0 + (2.L.X_l) + X_0.L)^2} \quad (2.16)$$

Masing-masing bagian di kwadratkan

$$Z_{eki}^2 = (3R_N + 3R_f + 2.L.R_1 + L.R_0)^2 + (2.X_{S1} + 2.X_T + X_0 + (2.L.X_l) + X_0.L)^2 \quad (2.17)$$

$$Z_{eki}^2 = (3R_N + 3R_f + (2R_1 + R_0)L)^2 + ((2.X_{S1} + 2.X_T + X_0) + (2X_1 + X_0)L)^2 \quad (2.18)$$

$$Z_{eki}^2 = [(3R_N^2 + 3R_f^2 + (2.(2R_1 + R_0).3R_f)L + (2R_1 + R_0)^2L^2] + [(2.X_{S1} + 2.X_T + X_0)^2 + (2.(2.X_{S1} + 2.X_T + X_0).(2X_1 + X_0).L) + (2X_1 + X_0)^2L^2] \quad (2.19)$$

$$Z_{eki}^2 = (2R_1 + R_0)^2L^2 + (2X_1 + X_0)^2L^2 + (2.(2R_1 + R_0).3R_f)L + (2.(2.X_{S1} + 2.X_T + X_0).(2X_1 + X_0)L) + 3R_N^2 + 3R_f^2 + (2.X_{S1} + 2.X_T + X_0)^2 \quad (2.20)$$

$$Z_{eki}^2 = ((2R_1 + R_0)^2 + (2X_1 + X_0)^2)L^2 + ((2.(2R_1 + R_0).3R_f) + (2.(2.X_{S1} + 2.X_T + X_0).(2X_1 + X_0))L + 3R_N^2 + 3R_f^2 + (2.X_{S1} + 2.X_T + X_0)^2) \quad (2.21)$$

$$0 = (((2R_1 + R_0)^2 + (2X_1 + X_0)^2)L^2 + ((2.(2R_1 + R_0).3R_f) + (2.(2.X_{S1} + 2.X_T + X_0).(2X_1 + X_0))L + 3R_N^2 + 3R_f^2 + (2.X_{S1} + 2.X_T + X_0)^2 - Z_{eki}^2)) \quad (2.22)$$

Keterangan :

L : Jarak (kms)

X_s : impedansi sekunder

X_T : impedansi trafo

R_1 : R pada impedansi urutan positif

R_0 : R pada impedansi urutan nol

x_L : X_L pada impedansi urutan positif

Z_{eki} : Z total

R_n : Pentanahan sistem

R_f : impedansi gangguan

Untuk menyelesaikan persamaan di atas, agar diperoleh nilai L (jarak), maka menggunakan rumus [21].

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.23)$$

Keterangan :

$x = L$ (jarak)

$$a = (2R_1 + R_0)^2 + (2X_1 + X_0)^2$$

$$b = (2 \cdot (2 \cdot X_{s1} + 2 \cdot X_T + X_0) \cdot (2X_1 + X_0))$$

$$c = 3R_N^2 + 3R_f^2 + (2.X_{S1} + 2.X_T + X_0)^2 - Z_{eki}^2$$

Sehingga diperoleh jarak pada gangguan 1 fasa

$$L = \frac{-2.(2.X_{S1} + 2.X_T + X_0).(2X_1 + X_0) \pm \sqrt{(2.(2.X_{S1} + 2.X_T + X_0).(2X_1 + X_0))^2 - 4.(2R_1 + R_0)^2 + (2X_1 + X_0)^2 3R_N^2 + 3R_f^2 + (2.X_{S1} + 2.X_T + X_0)^2 - Z_{eki}^2 Z_{eki}^2)}}{2.(2R_1 + R_0)^2 + (2X_1 + X_0)^2} \quad (2.24)$$

Penjabaran dari nilai X_{S1} , X_{S2} , X_{T1} , X_{T2} , X_{T0} , dan R_n

$$X_{S1} = \frac{kV^2}{MVA_{hs} \cdot 150KV} \quad (2.25)$$

$$X_{S2} = X_{S1} \quad (2.26)$$

$$X_{T1} = \%X_T \times \frac{kV^2}{MVA} \quad (2.27)$$

$$X_{T2} = X_{T1} \quad (2.28)$$

Trafo tenaga dengan hubungan Yy memiliki belitan tersier delta dengan kapasitas sepertiga kapasitas primer (sekunder)

$$X_{T0} = 3X_{T1} \quad (2.29)$$

Jika tidak ada belitan maka

$$X_{T0} = X_{T1} \quad (2.30)$$

2.2.4 Transformator Tenaga 60 MVA, 150/20 KV

1. Transformator Tiga Fasa

Transformator tiga fasa pada dasarnya adalah transformator fasa tunggal yang dihubungkan dengan hubungan tertentu. Pemilihan penggunaan transformator untuk beban tiga fasa apakah tiga unit transformator fasa tunggal atau satu unit transformator tiga fasa sangat bergantung pada kebutuhan dan medan lokasi dimana transformator dipasang. Untuk transformator distribusi, pada umumnya digunakan konstruksi tunggal untuk menghemat biaya dan ruang instalasi, namun pada transformator daya berukuran besar, biasanya menggunakan transformator fasa tunggal yang dihubungkan baik dengan skema Wye ataupun Delta, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11.



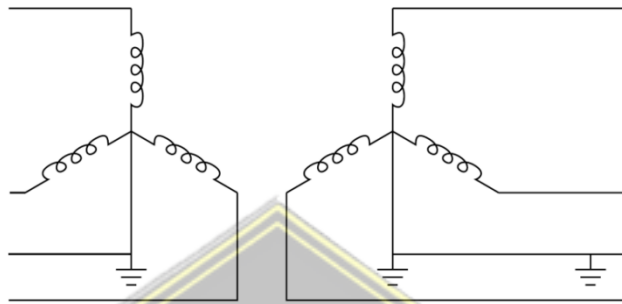
Gambar 2.11 Konstruksi transformator tiga fasa satu inti tunggal

Sebagai contoh, sebuah transformator distribusi tiga fasa 150 kVA memiliki arus maksimum pada kumparan primer yang sama dengan transformator fasa tunggal berkapasitas 50 kVA.

Terdapat banyak jenis koneksi antara kumparan primer dan kumparan sekunder pada transformator tiga fasa antara lain delta, *floating wye* dan *grounded wye*. Notasi ini menggambarkan hubungan antara terminal kumparan didalam transformator tiga fasa. Jenis hubungan belitan pada transformator ini sangat beragam dan memiliki kelebihan dan kekurangan. Konfigurasi delta – *grounded*

wye dan *grounded wye – grounded wye* adalah konfigurasi yang paling banyak ditemui pada transformator tiga fasa seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12 dan 2.13.

a. *Grounded Wye – Grounded Wye*

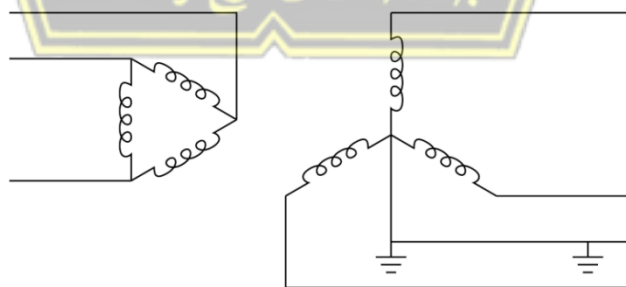


Gambar 2.12 Konfigurasi transformator tiga fasa *grounded wye – grounded wye*

Salah satu konfigurasi belitan yang paling umum adalah *grounded wye – grounded wye* dengan karakteristik utama pada sisi sumber adalah 4 konduktor dengan netral dibumikan.

b. **Delta – *Grounded Wye***

Konfigurasi ini membutuhkan arus yang relatif kecil serta biaya instalasi yang lebih ekonomis dan pengoperasian yang relatif sederhana.



Gambar 2.13 Konfigurasi transformator tiga fasa *delta – grounded wye*

2. **Tranformator Tenaga**

Transformator tenaga adalah transformator yang digunakan pada sistem pembangkitan hingga distribusi tenaga listrik, pada umumnya berkapasitas diatas

500 kVA, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.14. Pembangkit tenaga listrik, menggunakan transformator tenaga untuk menaikkan tegangan dari 6-18kV menjadi 150-500 kV. Pada sisi transmisi, terdapat transformator IBT (*Interbus Transformer*). *InterBus Transformer* (IBT) merupakan peralatangardu induk tegangan tinggi (GITET) yang vital sebagai unsur utama dalam sistem penyaluran dan distribusi tenaga listrik yang umumnya mengkonversi tegangan dari 500kV menjadi 70-150kV pada sistem PLN. Dalam operasi penyaluran tenaga listrik, IBT berfungsi untuk menyalurkan tenaga atau daya dari sisi pembangkit ke pusat beban. Pada sisi distribusi, terdapat transformator tenaga atau distribusi di gardu induk (GI) distribusi yang mengkonversi tegangan 150kV menjadi 20kV atau Tegangan Menengah (TM). Tegangan ini kemudian di salurkan menggunakan penyulang distribusi atau *feeder* dan kemudian dikonversi lagi menjadi tegangan rendah 220-380V 50Hz sesuai Standar SNI agar dapat digunakan pada peralatan elektronik konsumen.

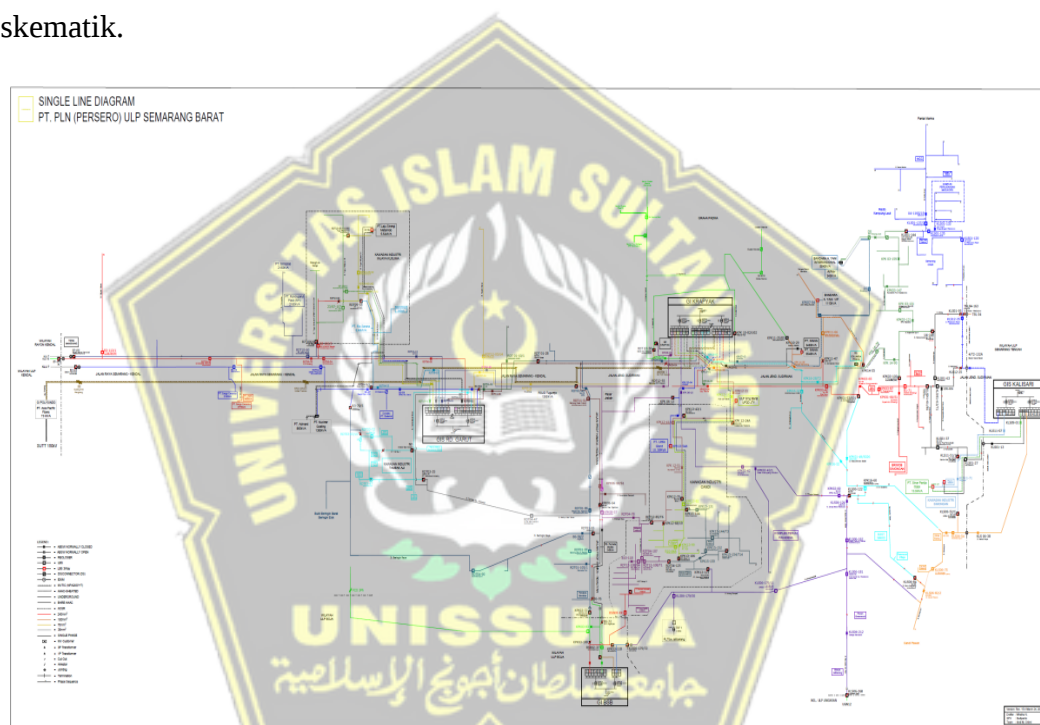


Gambar 2.14 Transformator Tenaga 60MVA GI Krapyak

2.2.5 *Single Line Diagram*

Single Line Diagram (SLD) adalah suatu teknik penggambaran konfigurasi sistem jaringan listrik baik secara skala besar maupun kecil. Simbol – simbol yang digunakan pada *single line diagram* adalah simbol-simbol standar, jadi diharapkan

semua petugas dapat membaca dan memahami gambarnya. Dalam *single line diagram* ini diusahakan harus sama dengan kondisi dan keadaan yang sebenarnya di lapangan, setiap komponen atau perangkat proteksi peralatan jaringan harus tercantum pada *single line diagram* seperti pada Gambar 2.15. Karena setiap ada pekerjaan atau ada gangguan *single line diagram* ini menjadi panduan dalam melakukan manuver (perubahan konfigurasi jaringan). Diupayakan jika ada perubahan pada jaringan feeder di lapangan secepatnya pada *single line diagram* juga disesuaikan. Antara kondisi feeder dilapangan dengan gambar yang ada pada skematik.



Gambar 2.15 Single line diagram PLN ULP Semarang Barat

2.2.6 Perhitungan *Error Histori Gangguan* dan Perhitungan

Perhitungan akurasi digunakan untuk memastikan keakuratan dari perhitungan, dan digunakan rumus (2.31).

Perhitungan akurasi :

$$Error = \left| \frac{(\text{jarak perhitungan} - \text{jarak gangguan riil})}{\text{jarak gangguan riil}} \right| \times 100\% \quad (2.31)$$

$$\% \text{ Akurasi} = 100\% - \%Error \quad (2.32)$$

2.2.7 Perhitungan Waktu dengan Rata-Rata Kecepatan Pencarian Letak Gangguan

Perhitungan waktu juga digunakan dalam penelitian ini untuk mencari waktu yang digunakan untuk menemukan letak gangguan dengan rumus (2.33) [8].

$$waktu = \frac{jarak}{kecepatan} \quad (2.33)$$



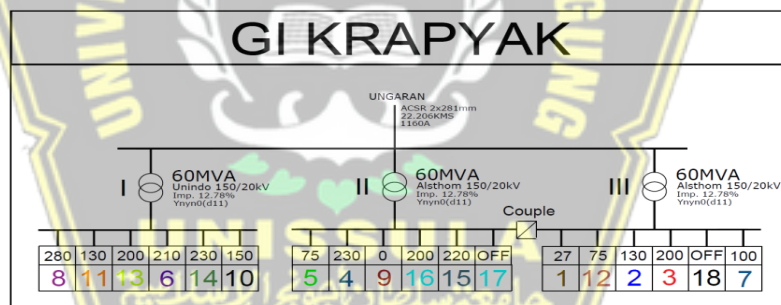
BAB III

METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian merupakan cara ilmiah untuk penulis mendapatkan data dengan tujuan dan kebutuhan tertentu. Agar mendapatkan data yang dibutuhkan dalam tugas akhir ini, maka data diperoleh melalui metode studi kasus yang terjadi langsung di lapangan dan diperoleh dari data spesifikasi kabel MVTIC baik impedansi urutan positif, negatif, dan nol yang digunakan di PT. PLN (persero) UP3 Semarang. Data-data yang didapatkan dari metode studi kasus di PLN UP3 Semarang akan didukung dengan data-data pendukung lainnya yang didapat dari buku referensi dan literatur yang digunakan oleh penulis.

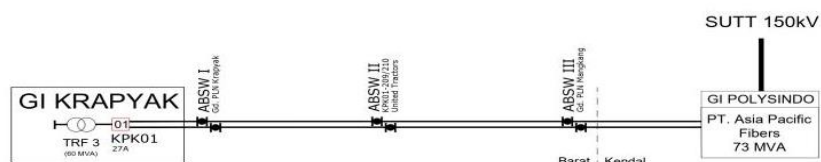
3.1 Model Penelitian

Penelitian dilakukan pada penyulang KPK01 GI Krapyak seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1 dan 3.2.



Gambar 3.1 Single line diagram GI Krapyak

FEEDER KPK01
Trafo 3
GI Krapyak



Gambar 3.2 Topologi penyulang KPK01

Penyulang KPK01 merupakan penyulang khusus yang menyuplai satu pelanggan berdaya besar yaitu PT Asia Pacific Fibers (APF). Penyulang KPK01 ini merupakan penyulang yang bersifat backup karena PT APF merupakan Pelanggan Tegangan Tinggi (TT) PLN. Gambar (3.1) merupakan topologi jaringan KPK01 secara aktual.

Penelitian dimulai dengan mempelajari data spesifikasi kabel MVTIC baik impedansi urutan positif, negatif, dan nol yang digunakan oleh PLN dari penyulang KPK01. Dilanjutkan dengan mencari data spesifikasi transformator GI yang memiliki penyulang berbahan kabel MVTIC seperti kapasitas, setting relay, kurva respons relay, arus hubung singkat fasa 3, dan impedansi transformator. Kemudian dilanjutkan dengan menghitung besar arus gangguan akibat kerusakan isolasi yang mengakibatkan grounding konsentrik bersentuhan dengan konduktor penghantar dalam berbagai skenario. Selanjutnya perhitungan jarak gangguan dilakukan dan hasilnya akan dibandingkan dengan data gangguan kabel MVTIC yang pernah terjadi di PLN UP3 Semarang.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Peralatan

Agar proses pengumpulan data dapat berjalan baik diperlukan alat-alat pendukung, berikut merupakan alat pendukung yang digunakan penulis sebagai sarana utama dalam pengamatan:

1. **Alat Tulis**

Alat tulis adalah alat yang digunakan untuk mencatat setiap catatan yang dianggap penting di lapangan. Alat tulis yang digunakan berupa pulpen, pensil, penghapus dan alat tulis lainnya.

2. **Laptop**

Laptop dan komputer digunakan untuk mengolah dan menyimpan data yang diperoleh diantaranya materi-materi dari internet seperti perhitungan perhitungan serta data dari ULP Semarang Barat.

3. Kamera

Kamera berfungsi sebagai alat untuk mengambil gambar secara langsung keadaan di lapangan.

4. Buku Catatan

Buku catatan digunakan untuk mencatat setiap kegiatan yang dilakukan dilapangan. Media catatan pengamatan berupa buku saku kecil yang bisa dibawa kemana-mana. Catatan berisikan literatur-literatur yang lengkap dan pengamatan berisi detail-detail khusus yang ditemui di lapangan.

3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan dalam penyusunan penelitian ini adalah berupa data-data yang penulis peroleh dari lapangan untuk dianalisis. Adapun jenis sumber data terbagi menjadi dua kategori yaitu sumber data primer dan sumber data sekunder. Sumber data primer adalah data yang diperoleh penulis secara langsung, sementara data sekunder adalah data yang diperoleh penulis dari sumber yang sudah ada atau literatur, paper dan *textbook*.

1. Data Primer

Data primer yang digunakan pada penulisan ini didapat dengan cara melakukan pengamatan langsung kelapangan, melakukan pengamatan sistem Penyulang KPK01 Gardu Induk 150kV Krapyak berkapasitas 60MVA, yang merupakan asset jaringan PLN ULP Semarang Barat. Berikut ini data-data yang diperlukan dibahas pada sub-bab berikut:

a. Data Bay Trafo GI Krapyak

Gardu Induk Krapyak memiliki tiga transformator tenaga yang masing-masing menyuplai enam buah feeder distribusi. Masing-masing transformator memiliki kapasitas sebesar 60MVA, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1. Penyulang KPK01 merupakan salah satu penyulang yang ada pada bay 3 GI Krapyak. Adapun penyulang yang terhubung dengan transformator bay 3 antara lain KPK01, KPK12, KPK02, KPK03, KPK18, dan KPK07.

b. Data Statistik Trafo III GI Krapyak

Trafo III GI Krapyak merupakan trafo tenaga yang memiliki kapasitas 60MVA dengan beberapa penyulang *outgoing*. Beban rata-rata yang terbaca pada *cubicle incoming transformer* 3 adalah sebesar 497,0A di fasa R. 413.0A di fasa S dan 578 di fasa T. Berikut spesifikasi lengkap Trafo III GI Krapyak, seperti ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data spesifikasi teknis penyulang KPK01

Parameter	Data
Trafo	Krapyak 3
Merk Trafo	Alsthom
Arus HS. 3 PHS	18,91 kA
Arus HS. 150kV	4914,15 MVA
Kapasitas Trafo	60 MVA
Tegangan Primer	150kV
Tegangan Sekunder	20kV
Impedansi Trafo	12,3 %
I Nominal Trafo	1732,05
In	5
Primer	600
Tipe Rele	MICOM P123
Tipe GI	Air Insulated (Switchyard)

c. Data Statistik Penyulang KPK01

Penyulang KPK01 merupakan penyulang khusus yang merupakan asset milik PLN ULP Semarang Barat. Adapun data statistik dari penyulang KPK01 seperti ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data spesifikasi teknis penyulang KPK01

Parameter	Data
Cubicle Outgoing	Schneider Areva
Tipe Rele	MICOM P123
Arus Beban Max	480A
Rasio CT	600/5
Curve	Standard Inverse (SI)
Arus Hubung Singkat HS2 Max	8640A
tHS2	0 (Instant)

Parameter	Data
Arus Hubung Singkat HS1 Max	3420A
tHS1	0,3s
Ground Fault HS2 Max	4800A
tGFR HS2	0 (Instant)
Ground Fault HS1 Max	2580A
tGFRHS1	0,3s
Jenis Penghantar	Full MVTIC
Panjang Penghantar	12,85 kms
Secondary Protection	None

2. Data Sekunder

Data Sekunder yang digunakan pada penulisan ini adalah dengan menggunakan data-data yang berkaitan dengan analisis transformator tenaga Transformator 3 Gardu Induk Krapyak 60MVA. Data sekunder yang diperlukan adalah nilai impedansi sebesar 12.3% dengan ketahanan arus hubung singkat sebesar 13,15 kA pada arus 1 fasa dan 13,35 kA pada arus 3 fasa.

Kuat Hantar Arus (KHA) dari konduktor yang digunakan pada penyulang utama di PLN pada umumnya seperti ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 KHA Penghantar MVTIC yang digunakan PLN

Luas Penampang Nominal (mm ²)	KHA	Hubung Singkat (1 detik)
240	529 A	35,66 kA

Untuk perhitungan impedansi penyulang, perhitungannya tergantung dari besarnya impedansi per km dari penyulang yang akan dihitung, dimana besar nilainya tergantung pada jenis penghantarnya, yaitu dari bahan apa penghantar tersebut dibuat dan juga tergantung dari besar kecilnya penampang dan panjang penghantarnya. Nilai impedansi per km untuk konduktor yang digunakan PLN seperti ditunjukkan pada Tabel 3.4.

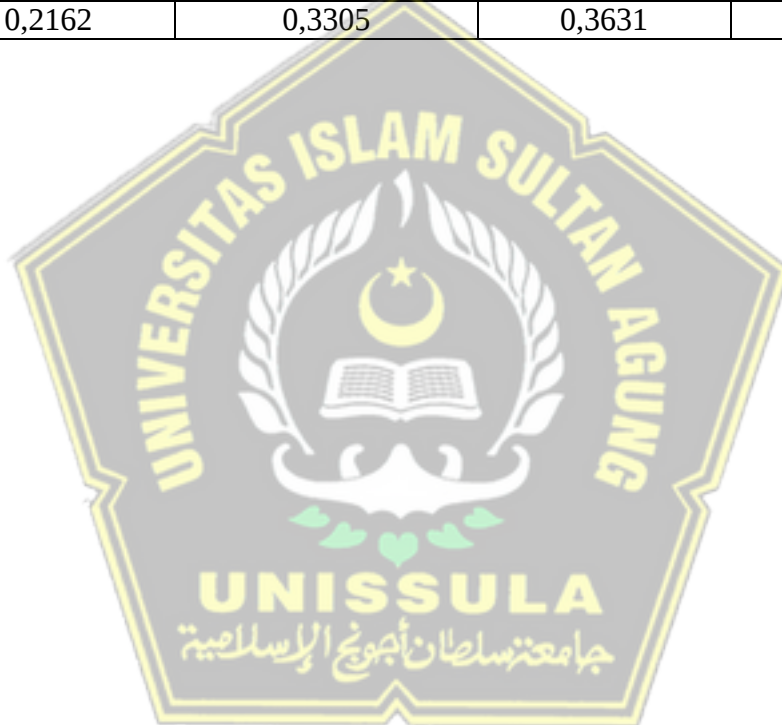
Tabel 3.4 Reaktansi penghantar MVTIC tegangan 20 kV

Jenis Penghantar	Impedansi Urutan Positif (ohm/km)	Impedansi Urutan Nol (Ohm/km)	Resistansi DC (Ohm/km)
MVTIC 3×240 mm	0,141 + j0,154	0,707 + j0,24	0,125

Untuk nilai impedansi urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol pada penghantar MVTIC dan penghantar netral ditunjukkan pada tabel 3.5.

Tabel 3.5 Nilai impedansi penghantar MVTIC dan netral

PENGHANTAR MVTIC			
Urut positif/negative		Urut nol	
R_{L1} (Ohm)	X_{L1} (Ohm)	R_{L0} (Ohm)	X_{L0} (Ohm)
0,125	0,101787602	0,2824	1,6034
Penghantar Netral			
Urut positif/negative		Urut nol	
R_{L1} (Ohm)	X_{L1} (Ohm)	R_{L0} (Ohm)	X_{L0} (Ohm)
0,2162	0,3305	0,3631	1,6034



3.3 Flow Chart



Gambar 3.3 Flow Chart Penelitian

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas perhitungan dan analisis hasil simulasi operasi yang diperoleh dari data primer dan sekunder perhitungan jarak gangguan pada saluran kabel MVTIC, uraian, analisis data-data yang diperoleh dari data primer dan sekunder penelitian. Data primer penelitian ini adalah data peralatan, beban dan pengamanan yang terpasang di lokasi penyulang KPK01. Data tersebut merupakan data pokok dimana hasilnya ditunjang oleh data-data sekunder yang analisisnya didapat dari beberapa sumber pustaka untuk memperkuat dan memperdalam hasil analisis.

4.1 Prosedur Pencarian Titik Gangguan pada Jalur SKUTM 20kV

Secara Standing Operational Procedure (SOP) yang berlaku di lingkungan PLN UP3 Semarang, prosedur pencarian titik gangguan pada jalur SKUTM cukup berbeda dengan SUTM karena jenis konstruksi dan jenis bahan penghantar yang digunakan berbeda. Untuk jenis penyulang SKUTM dengan penghantar yang menggunakan bahan kabel MVTIC, maka prosedur pencarian titik gangguan adalah sebagai berikut:

1. Broadcast informasi gangguan pada SCADA sistem oleh dispatcher UP2D kepada dispatcher UP3 Semarang

Saat terjadi gangguan pada jalur penyulang berbahan SKUTM (MVTIC) maka dispatcher akan menginfokan kepada Unit Layanan (UL) terkait mengenai event gangguan yang terjadi antara lain:

- a. Nama PMT yang mengalami gangguan
 - b. Waktu terjadinya gangguan penyulang
 - c. Jumlah fasa gangguan yang terbaca oleh relay gangguan
 - d. Besar arus gangguan yang terbaca pada relay PMT
- ##### **2. Dispatcher UP3 Semarang meneruskan informasi gangguan kepada dispatcher Unit Layanan Terkait**

Setelah Dispacther UP3 Semarang menerima informasi dari UP2D, maka Dispatcher UP3 meneruskan informasi gangguan tersebut kepada Dispatcher Unit Layanan melalui channel komunikasi terpisah namun tetap dapat dimonitor oleh Dispatcher UP2D. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa informasi yang disampaikan benar. Saat memberikan informasi kepada Dispatcher Unit Layanan, Dispatcher UP3 akan menanyakan informasi tambahan seperti keadaan cuaca setempat dan informasi lainnya sebagai informasi pendukung untuk mencari penyebab gangguan tersebut. Dari informasi jumlah fasa gangguan dan besar arus gangguan yang diberikan, maka bagian Pelayanan Teknik dan Pelayanan Gangguan melakukan analisis secara implisit untuk mengestimasi perkiraan penyebab dan lokasi gangguan berada.

3. Dispatcher Unit Layanan menugaskan Petugas Pelayanan Teknik untuk Melacak Gangguan.

Setelah dilakukan analisis jumlah fasa gangguan dan besar arus gangguan secara implisit, maka Dispatcher Unit Layanan memberikan penugasan kepada Petugas Pelayanan Teknik untuk melacak gangguan yang terjadi pada penyulang terkait dengan prosedur sebagai berikut:

- a. Dispatcher Unit Layanan membagi regu yang akan melakukan pelacakan visual berdasarkan panjang penyulang dan topologi penyulang yang mengalami gangguan. Jika penyulang yang mengalami gangguan cukup panjang, maka Dispatcher akan menugaskan lebih banyak regu untuk melakukan pelacakan dan sebaliknya.
- b. Sebelum regu melakukan pelacakan, Dispatcher memberikan informasi gangguan kepada petugas seperti jumlah fasa, besar arus dan perkiraan lokasi gangguan serta hal-hal yang harus diperhatikan saat mengamati secara visual.
- c. Untuk jalur penyulang yang menggunakan bahan berjenis MVTIC (SKUTM) maka hal-hal utama yang harus diperhatikan adalah:

- Kondisi isolasi pada titik-titik ujung kabel MVTIC yang memiliki terminasi baik pada fasa R, S dan T
 - Kondisi isolasi dan bahan kabel pada titik-titik sambungan kabel MVTIC atau Jointing kabel MVTIC
 - Kondisi bodi kabel yang memiliki tingkat stress yang tinggi seperti pada titik-titik penopang kabel.
- d. Petugas Pelayanan Teknik memberikan informasi perkembangan lapangan kepada Dispatcher Unit Layanan.

Petugas Pelayanan Teknik yang melakukan pelacakan secara kontinyu memberikan informasi perkembangan pelacakan kepada Dispatcher Unit Layanan seperti:

- Jalur Penyulang yang sudah dilakukan pelacakan secara visual
 - Kondisi medan dan lalu lintas selama proses pelacakan
 - Kesulitan-kesulitan yang dialami oleh petugas
 - Petugas Pelayanan Teknik saling berkordinasi dengan satu sama lain untuk mempercepat pelacakan dan menghindari pelacakan berulang.
 - Kebutuhan bantuan teknis jika diperlukan oleh petugas lapangan
- e. Setelah melakukan pelacakan, ada dua (2) kondisi yang ditemui:
- Saat gangguan berhasil ditemukan, maka Petugas Pelayanan Teknik memberitahukan kepada Dispatcher Unit Layanan mengenai penyebab gangguan yang ditemukan. Langkah selanjutnya adalah dispatcher akan melakukan analisis pada topologi jaringan dan mengambil keputusan lanjut mengenai langkah perbaikan yang akan dilakukan. Jika Penyulang yang mengalami gangguan memiliki titik Normally Open (N.O) yang terhubung dengan penyulang lain, maka Dispatcher akan melakukan perhitungan estimasi jumlah beban agar pelanggan yang terdampak pada jalur tersebut dapat teraliri listrik terlebih dahulu tanpa menunggu perbaikan selesai. Perbaikan

kabel dapat dilakukan dikemudian hari jika gangguan terjadi pada malam hari. Jika Penyulang yang mengalami gangguan tidak memiliki titik Normally Open (N.O) dengan penyulang lain, maka perbaikan harus dilakukan saat itu juga.

- Gangguan Tidak Ditemukan

Saat petugas tidak menemukan titik gangguan, petugas menghubungi Dispatcher untuk melaporkan bahwa gangguan tidak ditemukan namun wajib memastikan kondisi di jaringan aman saat pemasukan PMT. Dan petugas wajib menyisir kembali penyebab gangguan.

Tanggal	Jam Padam	Jam Normal	Lama Padam	Penyebab	Ket. Penyebab	Arus Gangguan				Jarak dari GI (kms)
						A	B	C	N	
1 Januari 2019	04:33	20:10	15:37	Kabel Power Gagal Isolasi (Breakdown)	Jointing Kabel MVTIC rusak di no tiang KPK01-106		5118		3704	2,30
30 November 2019	21:33	00:31	26:58	Kabel Power Gagal Isolasi (Breakdown)	Terminasi Kabel MVTIC rusak di ABSW II KPK01 no tiang KPK01-209	3090				4,59
26 Desember 2019	03:19	18:11	14:52	Kabel Power Gagal Isolasi (Breakdown)	Kabel luka kena konstruksi DB1 di no tiang KPK01-067		6320			1,47

Tabel 4.1 Data arus gangguan yang pernah terjadi pada KPK01

4.2 History Gangguan Penyulang KPK01 Tahun 2019

Pada tahun 2019, penyulang KPK01 telah mengalami gangguan yang terjadi sebanyak 3 kali. Berikut adalah serangkaian gangguan yang terjadi pada penyulang KPK01 di tahun 2019, yaitu:

1. Gangguan Penyulang KPK01 Tanggal 01 Januari 2019

Pada tanggal 01 Januari 2019 penyulang KPK01 mengalami gangguan Kabel Power Gagal Isolasi (*Break Down*) yang disebabkan *jointing* kabel MVTIC rusak di NO POLE KPK01-106. Proses pencarian gangguan berjalan selama 12 jam. Arus gangguan pada fasa S tercatat sebesar 5118 A dan 3704 A pada N.

2. Gangguan Penyulang KPK01 Tanggal 30 November 2019

Pada tanggal 30 November 2019 penyulang KPK01 mengalami gangguan Kabel Power Gagal Isolasi (*Break Down*) yang disebabkan terminal kabel MVTIC rusak di ABSW II KPK01 di NO POLE KPK01-209. Proses pencarian gangguan berjalan selama 24 jam. Arus gangguan yang tercatat terletak pada fasa R sebesar 3090 A.

3. Gangguan Penyulang KPK01 Tanggal 26 Desember 2019

Pada tanggal 26 Desember 2019 penyulang KPK01 mengalami gangguan Kabel Power Gagal Isolasi (*Break Down*) yang disebabkan kabel luka kena konstruksi DB1 di NO POLE KPK01-067. Proses pencarian gangguan berjalan selama 12 jam. Gangguan yang tercatat terletak pada fasa S dengan arus sebesar 5320 A.

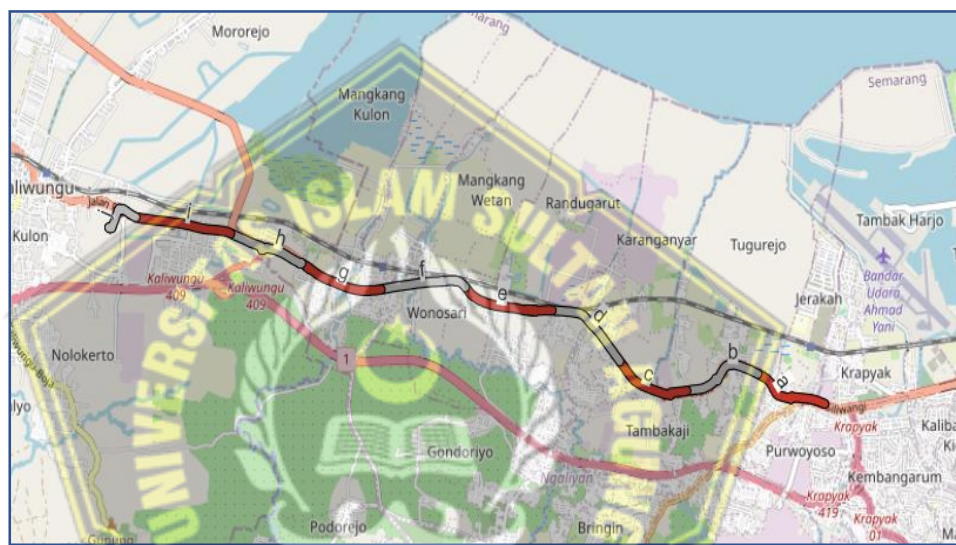
4.3 Analisis Perhitungan Perkiraan Jarak Gangguan KPK01

Panjang section jaringan KPK01 seperti ditunjukkan pada Tabel 4.1 berikut ini :

Tabel 4.2 Panjang Jaringan dan pembagian setiap 50 tiang

Urutan tiang	section	Panjang Section (ms)	Jarak Dari GI Ke Tiang per section (ms)
1-50	a	1187	0-1187
51-100	b	1263	1187-2450
101-151	c	1205	2450-3655

151-200	d	1308	3655-4963
201-250	e	1689	4963-6652
251-300	f	1334	6652-7986
301-350	g	1310	7986-9296
351-400	h	1204	9296-10500
401-450	i	1473	10500-11973
451-480	j	640	11973-12613



Gambar 4.1 GIS bentangan penyulang KPK01

Dalam mencari jarak gangguan (L), diperlukan perhitungan impedansi total (Z_{eki}), impedansi sekunder GI (X_{s1}), impedansi trafo GI (X_{T1}), serta impedansi saluran yang sudah diketahui parameternya dari spesifikasi kabel MVTIC.

Untuk mencari impedansi total (Z ekivalen) digunakan persamaan (2.14).

$$Z_{eki} = \frac{3 \times kV / \sqrt{3}}{I_{Hs\ 1\phi}}$$

dimana,

$I_{Hs\ 1\phi}$ = arus gangguan pada histori gangguan

$$Z_{eki} = \frac{3 \times 11,5\ kV}{5118\ A} = 6,7684674\ \Omega$$

Untuk mencari impedansi sekunder Gardu Induk (X_{S1}) digunakan persamaan (2.25).

$$X_{S1} = \frac{kV^2}{MVA_{hs} \text{ sisi } 150KV}$$

$$X_{S1} = \frac{20^2}{4914,15} = 0,08 \Omega$$

Untuk mencari impedansi trafo Gardu Induk (X_{T1}) digunakan persamaan (2.27).

$$X_{T1} = \%X_T \times \frac{kV^2}{MVA}$$

$$X_{T1} = \frac{12,3 \% \times 20^2}{60} = 0,82 \Omega$$

Untuk memperoleh jarak (L) estimasi lokasi gangguan pada tabel (4.1) maka digunakan persamaan (2.23) abc seperti berikut:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Untuk mendapatkan nilai a , b , c pada 1 fasa adalah:

- 1) Nilai a didapatkan dengan menggunakan persamaan:

$$a = (2R_1 + R_0)^2 + (2X_1 + X_0)^2$$

Masukkan angka,

$$a = ((2 * 0,125) + 0,3631)^2 + ((2 * 0,1017876) + 1,6034)^2$$

$$a = 3,641050998$$

- 2) Nilai b pada 1 fasa adalah hasil dari persamaan :

$$b = (2 \cdot (2 \cdot X_{S1} + 2 \cdot X_T + X_0) \cdot (2X_1 + X_0))$$

Masukkan angka,

$$b = (2(2 \times 0,08 + 2 \times 0,82 + 0,82) \times (2 \times 0,1017876 + 1,6034))$$

$$b = 9,478651516$$

3) Nilai c pada 1 fasa, dimana R_n bernilai 0,3 Ohm.

$$c = 3R_N^2 + 3R_f^2 + (2.X_{S1} + 2.X_T + X_0)^2 - Z_{eki}^2$$

Masukkan angka,

$$c = (3 \times 0,3)^2 + (3 \times 0)^2 + ((2 \times 0,08) + (2 \times 0,82) + 0,82)^2 - 6,7684674^2$$

$$c = -38,12309667$$

Setelah mendapatkan nilai a, b, c kemudian hitung menggunakan persamaan 2.23:

$$x = \frac{-9,478651516 \pm \sqrt{9,478651516^2 - 4 \times 3,641050998x - 38,12309667}}{2 \times 3,641050998}$$

$$= 2,18614382$$

Maka jarak gangguan yang didapatkan setelah perhitungan yaitu 2,1861 KM dari GI krapyak.

4.4 Simulasi Gangguan

Disimulasikan gangguan sebesar 5118 A berdasarkan rekam jejak gangguan dengan menggunakan persamaan (2.23) maka didapatkan hasil berupa jarak senilai 2,1861 KMS dengan titik 0 dimulai dari trafo 3 gardu induk krapyak. Data tersebut dapat dilihat pada (Gambar 4.2).

KALKULATOR PENGHITUNG JARAK GANGGUAN									
Arus Gangguan Hubung Singkat 3 fasa			Arus Gangguan Hubung Singkat 2 fasa			Arus Gangguan Hubung Singkat 1 fasa			
3 Φ	0	A	2 Φ	0	A	1 Φ	5118	A	
Jarak atau Letak Gangguan (KMS)									
Jarak Gangguan yang diperoleh			Jarak Gangguan yang diperoleh			Jarak Gangguan yang diperoleh			
3 Φ	#DIV/0!	KMS	2 Φ	#DIV/0!	KMS	1 Φ	2,1861438	KMS	
#DIV/0! meter			#DIV/0! meter			2186 meter			

Gambar 4.2 Simulasi Gangguan Ke 1

Pada hasil simulasi didapatkan estimasi jarak yang sama dengan hasil perhitungan sebelumnya, maka penggunaan kalkulator tersebut dapat mempercepat perhitungan untuk mencari lokasi gangguan secara akurat. Kalkulator tersebut menggunakan rumus persamaan (2.23) untuk perhitungan mendapatkan jarak gangguan.

Selanjutnya, (Gambar 4.3) adalah gambar perhitungan gangguan ke-2 pada tanggal 30 november 2019 dengan gangguan arus hubung singkat sebesar 3090 A didapatkan jarak gangguan pada jarak 4,5378 KM.

KALKULATOR PENGHITUNG JARAK GANGGUAN									
Arus Gangguan Hubung Singkat 3 fasa			Arus Gangguan Hubung Singkat 2 fasa			Arus Gangguan Hubung Singkat 1fasa			
3 Φ	0	A	2 Φ	0	A	1 Φ	3090	A	
Jarak atau Letak Gangguan (KMS)									
Jarak Gangguan yang diperoleh			Jarak Gangguan yang diperoleh			Jarak Gangguan yang diperoleh			
3 Φ	#DIV/0!	KMS	2 Φ	#DIV/0!	KMS	1 Φ	4,5378707	KMS	
#DIV/0! meter			#DIV/0! meter			4538 meter			

Gambar 4.3 Simulasi Gangguan Ke 2

Hasil tersebut adalah jarak perkiraan lokasi gangguan, jika dibandingkan dengan gambar 4.1 maka lokasi perkiraan terletak beberapa meter sebelum lokasi gangguan.

Selanjutnya pada gangguan ke-3 (Gambar 4.4) yaitu pada tanggal 26 Desember 2019 arus gangguan sebesar 6320.

KALKULATOR PENGHITUNG JARAK GANGGUAN									
Arus Gangguan Hubung Singkat 3 fasa			Arus Gangguan Hubung Singkat 2 fasa			Arus Gangguan Hubung Singkat 1 fasa			
3 Φ	0	A	2 Φ	0	A	1 Φ	6320	A	
Jarak atau Letak Gangguan (KMS)									
Jarak Gangguan yang diperoleh			Jarak Gangguan yang diperoleh			Jarak Gangguan yang diperoleh			
3 Φ	#DIV/0!	KMS	2 Φ	#DIV/0!	KMS	1 Φ	1,4972472	KMS	
#DIV/0! meter			#DIV/0! meter			1497 meter			

Gambar 4.4 Simulasi Gangguan Ke 3

Dapat diperhatikan bahwa gangguan ke-3 dimasukkan nilai arus gangguan sebesar 6320 didapatkan hasil sebesar 1,4872 KMS jika dibandingkan dengan gambar 4.1 dapat diperhatikan jarak lokasi gangguan yaitu sebesar 1,4687.

4.5 Perbandingan perhitungan dengan histori gangguan

Dari hasil perhitungan simulasi dengan kalkulator, dilakukan perbandingan dengan histori jarak gangguan yang ditemukan untuk mendapat nilai akurasi.

Tabel 4.3 Perbandingan perhitungan dengan histori gangguan

GANGGUAN	ARUS GANGGUAN (A)	HISTORI JARAK GANGGUAN (kms)	PERHITUNGAN DENGAN KALKULATOR (kms)	% akurasi
1	5118	2,2989	2,1861	-4,91%
2	3090	4,585	4,5378	-1,03%
3	6320	1,4687	1,4972	1,94%

Perhitungan error :

$$Error = \left| \frac{(\text{jarak perhitungan} - \text{jarak gangguan riil})}{\text{jarak gangguan riil}} \right| \times 100\%$$

$$Error 1 = \left| \frac{(2,1861 - 2,2989)}{2,2989} \right| \times 100\% = 4,91\%$$

$$\% \text{ Akurasi } 1 = 100\% - (-4,91\%) = 104,91 \%$$

$$\text{Error } 2 = \left| \frac{(4,5378 - 4,585)}{4,585} \right| \times 100\% = 1,03\%$$

$$\% \text{ Akurasi } 2 = 100\% - (-1.03\%) = 101,03 \%$$

$$\text{Error } 3 = \left| \frac{(1,4972 - 1,4687)}{1,4687} \right| \times 100\% = 1,94\%$$

$$\% \text{ Akurasi } 3 = 100\% - 1,94\% = 98,06 \%$$

Dari perbandingan hasil perhitungan jarak gangguan dengan histori gangguan, didapat rata-rata akurasi dari ketiga perhitungan tersebut adalah 101,33 %. Untuk itu, kalkulator simulasi jarak gangguan dapat digunakan sebagai media dalam pencarian letak gangguan.

4.6 Perhitungan waktu pencarian letak gangguan

Dalam melokalisir letak gangguan, petugas pelayanan teknik mengendarai motor atau mobil dengan rata-rata kecepatan 4 km/jam.

Tabel 4.4 Jarak dan waktu penemuan gangguan

GANGGUAN	RECOVERY TIME	HISTORI JARAK GANGGUAN (kms)	Waktu pencarian (menit)
1	5118	2,2989	13,7934
2	3090	4,585	27,51
3	6320	1,4687	8,8122

Perhitungan waktu pencarian apabila kecepatan kendaraan 10 km/jam :

$$\text{waktu} = \frac{\text{jarak}}{\text{kecepatan}}$$

$$\text{waktu } 1 = \frac{2,2989}{10} \text{ jam} = 0,22989 \text{ jam} = 13,79 \text{ menit}$$

$$\text{waktu } 2 = \frac{4,585}{10} \text{ jam} = 0,4585 \text{ jam} = 27,51 \text{ menit}$$

$$\text{waktu 3} = \frac{1,4687}{10} \text{ jam} = 0,14687 \text{ jam} = 8,8122 \text{ menit}$$

Apabila dengan perhitungan kalkulator simulasi jarak gangguan sudah ditemukan estimasi jarak gangguannya, maka petugas gangguan dapat segera melakukan pencarian letak gangguan. Dengan rata-rata kecepatan kendaraan yang digunakan adalah 10 km/jam, maka gangguan 1 akan ditemukan dalam waktu 13,79 menit, gangguan 2 dalam waktu 27,51 menit, dan gangguan 3 dalam waktu 8,812 menit. Sehingga semakin cepat letak gangguan ditemukan, semakin cepat juga petugas melakukan *recovery* gangguan.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari analisis dan simulasi yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Simulasi pertama, gangguan sebesar 5118 Ampere didapatkan hasil jarak gangguan sejauh 2,1861 KMS, kemudian pada simulasi kedua dengan gangguan arus hubung singkat sebesar 3090 Ampere didapatkan jarak gangguan pada jarak 4,5378 KMS, dan pada simulasi ketiga dimasukkan nilai arus gangguan sebesar 6320 didapatkan hasil sebesar 1,4872 KMS. Jika dibandingkan dengan histori letak gangguan, % akurasi rata-rata ketiga gangguan tersebut sebesar 101,33 %. Dapat disimpulkan bahwa kalkulator simulasi jarak gangguan dapat digunakan sebagai media pencarian letak gangguan.
- 2) Semakin besar arus gangguan yang terjadi pada penyulang maka semakin dekat jarak gangguan – lokasi perkiraan gangguan dengan sumber arus (trafo GI).
- 3) Apabila dengan perhitungan kalkulator simulasi jarak gangguan sudah ditemukan estimasi jarak gangguannya, maka petugas gangguan dapat segera melakukan pencarian letak gangguan. Dengan rata-rata kecepatan kendaraan yang digunakan adalah 10 km/jam, maka gangguan 1 akan ditemukan dalam waktu 13,79 menit, gangguan 2 dalam waktu 27,51 menit, dan gangguan 3 dalam waktu 8,812 menit. Sehingga semakin cepat letak gangguan ditemukan, semakin cepat juga petugas melakukan *recovery* gangguan.

5.2 Saran

Dari analisa dan kesimpulan, didapat saran sebagai berikut :

1. Perlu adanya perbaikan SOP *recovery* jaringan distribusi 20kV di PLN Semarang.
2. Perlu perhatian khusus terhadap penanganan gangguan, karena berpengaruh terhadap kinerja SAIDI, SAIFI, dan recovery time.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] PT. PLN (Persero). 2010. Buku 1 Kriteria Disain Enjinereng Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik Edisi 1. Jakarta.
- [2] Gord et all. 2019. Real Fault Section Estimation in Electrical Distribution Networks Based on the Fault Frequency Component Analysis. *Energies*. 12. 1145. MDPI, Denmark
- [3] Suropto, S. 2016. Buku Ajar Sistem Tenaga Listrik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
- [4] Saadat, H.. 1999. Power Sistem Analysis. Singapore: The Mc-Graw-Hill
- [5] Short, Tom. 2004. Electric Power Distribution Handbook. CRC Press, New York
- [6] PT PLN Persero. 2010. STANDAR KONSTRUKSI JARINGAN TEGANGAN MENENGAH TENAGA LISTRIK, Jalan Trunojoyo Blok M-I / 135, Kebayoran Baru Jakarta Selatan
- [7] Qoyyimi, Penangsang, Aryani. 2017. Penentuan Lokasi Gangguan Hubung Singkat pada Jaringan Distribusi 20 kV Penyulang Tegalsari Surabaya dengan Metode Impedansi Berbasis GIS. *Jurnal Teknik ITS* Vol. 6, No. 1 ITS, Surabaya
- [8] Utama, Wahyu. 2015. Kumpulan Rumus Terlengkap Matematika-Fisika-Kimia: (Chapter 2 Fisika)
- [9] Willis, H. Lee. 2004. Power Distribution Planning Reference Book. Marcel Dekker, Inc, North Carolina USA
- [10] Burke and Lawrence. 1983. EPRI 1209-1. Electric Power Research Institute
- [11] Edy Ervianto dan Agus. 2016. Menentukan Lokasi Gangguan Dengan Metode Simple Reactancedan Takagi Pada Saluran Distribusi Bangko PT. Chevron Pacific Indonesia Menggunakan Software ETAP 12.6.0. Jom FTEKNIK Volume 3 N0.2 Universitas Riau, Pekanbaru
- [12] Suswanto, D. 2009. Sistem Distribusi Tenaga Listrik. Padang: Universitas Negeri Padang

- [13]Mulya, Rifqi Annora, Lukmanul Hakim, dan Dikpride Despa. 2016. Pemodelan Saluran Udara untuk Menghitung Impedansi Urutan dengan Metode Carson pada Penyulang Katu Gardu Induk Menggala PT PLN (Persero) Distribusi Lampung. Universitas Lampung. Jurnal Electrician - Rekayasa dan Teknologi Elektro Volume 10 Nomor 02. Bandar Lampung
- [14]Nurdiana, Nita. 2016. Analisa Gangguan Arus Hubung Singkat Pada Penyulang Nakula Gardu Induk Talang Kelapa. Universitas PGRI Palembang. Jurnal Ampere. Volume 01 Nomor 01. Palembang
- [15]Setiyawan, Dani Suryana. 2021. Prototype Sistem Pergudangan Otomatis dengan Electric Overhead Traling (EOT). Skripsi UNNES. Semarang
- [16]Aryamantara, Komang Jaryanta dan Wayan Sukerayasa. 2018. Analisis Hubung Singkat Pada Jaringan Tegangan Menengah 20 kV Kedonganan. Majalah Ilmiah Teknologi Elektro Udayana Volume 17 Nomor 02. Bali
- [17]Hakim, Lukmanul, Alex Munandar, Diah Permata, et all. 2017. Overhead Medium Voltage Twisted Insulated Cable Models for Three-Phase Power Flow Analysis. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Volume 12 Nomor 12
- [18]Maulandari, Erlinda Zuli. 2018. Analisis Hasil Pengukuran Impedansi Listrik dengan Menggunakan Metode Injeksi Arus Tipe Floating dan Howland. Skripsi UB. Malang
- [19]Kume, Jeandy T.I., Fielman Lisi, dan Sartje Silimang. 2016. Analisa Gangguan Hubung Singkat Saluran Kabel Bawah Tanah Tegangan 20 kV Penyulang SL 3 GI Teling Manado. E-Journal Teknik Elektro dan Komputer UNSRAT Volume 05 Nomor 14. Manado
- [20]Haddin, Muhammad. 2022. Studi Kelayakan Instalasi Listrik Rumah Tangga Berumur Di atas 15 Tahun. Universitas Islam Sultan Agung
- [21]Zuhal. 2000. Dasar Teknik Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya. PT Gramedia Pustaka Utama
- [22]Kemdikbud, Imsspada. Materi V Persamaan Kuadrat. Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan