

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transformator tenaga merupakan salah satu komponen utama dalam sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik, yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk kepada pelanggan dengan tingkat efisiensi yang tinggi. Di Provinsi Sulawesi Selatan, khususnya di Kota Makassar, Gardu Induk (GI) Panakkukang memiliki peran strategis dalam menjaga kontinuitas dan stabilitas pasokan listrik bagi masyarakat. Untuk menjamin keandalan operasi transformator tenaga, diperlukan sistem proteksi yang handal, khususnya relai diferensial yang berfungsi mendeteksi serta mengisolasi gangguan internal. Meskipun teknologi relai diferensial telah berkembang secara signifikan, tantangan dalam memastikan keakuratan dan keandalannya di lapangan masih tetap dihadapi, yang tercermin pada kejadian tanggal 7 Desember 2024 pada relai diferensial Transformator #2 di GI Panakkukang, di mana relai terindikasi mengalami *misoperation* akibat pengaruh arus gangguan eksternal dari penyulang yang berada di luar daerah pengamanan, sehingga menyebabkan peningkatan arus diferensial yang tidak diimbangi secara memadai oleh arus penahan, dan pada akhirnya memicu respon operasi relai yang tidak sesuai dengan prinsip selektivitas dan karakteristik kerja yang diharapkan.

Permasalahan utama dalam sistem proteksi transformator tenaga adalah adanya ketidaksesuaian antara kinerja relai diferensial di lapangan dengan hasil simulasi yang diperoleh pada tahap perencanaan. Beberapa temuan lapangan menunjukkan bahwa relai diferensial terkadang gagal mendeteksi gangguan internal atau bahkan mengalami trip palsu (*false trip*), yang pada akhirnya dapat menyebabkan pemadaman yang tidak diperlukan. Kondisi ini semakin kompleks dengan adanya faktor-faktor pendukung seperti ketidakstabilan jaringan, pengaruh harmonisa, serta variasi kondisi operasional. Di samping itu, keterbatasan ketersediaan data lapangan yang komprehensif dan terintegrasi dengan model simulasi turut menyulitkan proses evaluasi kinerja relai diferensial. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut guna mengidentifikasi penyebab ketidakakuratan tersebut serta mengembangkan metode optimalisasi untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi.

Berbagai penelitian terdahulu telah dilakukan untuk mengevaluasi kinerja relai diferensial melalui pendekatan simulasi maupun analisis data lapangan. Misalnya, Ilma et al. (2024) mengembangkan model simulasi berbasis ETAP untuk menganalisis kinerja relai diferensial pada transformator tenaga. Namun, penelitian tersebut masih terbatas pada kondisi ideal dan belum sepenuhnya mempertimbangkan dinamika kondisi lapangan. Sementara itu, penelitian oleh Hariyono (2019) lebih menitikberatkan pada analisis data lapangan, namun tidak mengintegrasikannya dengan pemodelan simulasi, sehingga hasil yang diperoleh

iberikan gambaran yang komprehensif. Dengan demikian, dapat bahwa salah satu keterbatasan utama dalam penelitian sebelumnya n optimalnya integrasi antara data lapangan dan simulasi, serta belum



adanya kajian yang secara khusus mempertimbangkan variabilitas kondisi operasional. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan dengan menganalisis dan membandingkan data lapangan dengan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP, sehingga diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai kinerja relai diferensial.

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang sistem proteksi tenaga listrik melalui integrasi antara data lapangan dan simulasi ETAP dalam menganalisis kinerja relai diferensial. Melalui pendekatan tersebut, diharapkan berbagai faktor yang berpotensi menyebabkan ketidakakuratan kerja relai dapat diidentifikasi secara lebih tepat. Selain itu, penelitian ini juga menyusun rekomendasi teknis untuk meningkatkan kinerja sistem proteksi, antara lain melalui optimalisasi pengaturan relai serta penerapan program pemeliharaan yang lebih efektif. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan tidak hanya melengkapi kajian sebelumnya, tetapi juga memberikan solusi praktis yang dapat diterapkan pada sistem proteksi transformator di GI Panakkukang.

Secara umum, tujuan utama penelitian ini adalah mengevaluasi kinerja relai diferensial pada transformator tenaga di Gardu Induk Panakkukang melalui perbandingan antara hasil analisis data lapangan dan simulasi ETAP. Dari sisi teoritis, penelitian ini berkontribusi dalam pengembangan metode evaluasi sistem proteksi yang lebih komprehensif dan akurat, sehingga dapat menjadi rujukan bagi penelitian selanjutnya. Dari sisi praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat dimanfaatkan oleh PT. PLN (Persero) dalam meningkatkan keandalan sistem proteksi, meminimalkan potensi pemadaman listrik, serta menjaga stabilitas pasokan tenaga listrik bagi masyarakat.

1.2 Tinjauan Pustaka

1.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Suripto S. (2017) menjelaskan bahwa secara umum, sistem diartikan sebagai suatu kesatuan yang terdiri beberapa komponen atau elemen yang dihubungkan untuk memudahkan aliran informasi, materi atau energi untuk mencapai suatu tujuan. Dengan demikian, sebuah sistem pasti terdiri dari beberapa komponen penyusun yang dihubungkan sedemikian rupa sehingga dapat bekerja sesuai perannya masing-masing untuk mencapai tujuan tertentu. Bila dikaitkan dengan tenaga listrik, maka yang akan mengalir dalam sistem itu adalah tenaga listrik. Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen, antara lain unit pembangkitan, saluran transmisi, gardu induk dan jaringan distribusi yang berhubungan sedemikian rupa dan berkerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan. Secara garis besar sistem tenaga listrik dapat digambarkan dengan skema gambar berikut.



tegangan ekstra tinggi dan bus tegangan tinggi, sehingga sering disebut *inter bus transformer (IBT)*. Trafo ini biasanya berkapasitas besar dan disusun dari tiga buah trafo satu fase yang dirangkai menjadi sistem trafo tiga fase, untuk kepentingan kemudahan transportasi dan pemasangan. Sedangkan pada gardu induk tegangan tinggi, trafo daya berfungsi menurunkan tegangan tinggi dari saluran transmisi ke tegangan menengah untuk memasok daya di jaringan distribusi. Kapasitas trafonya relatif kecil, sehingga digunakan satu atau beberapa trafo tiga fase (Suripto S., 2017).

1.2.2.1.1 *Circuit Breaker (CB)*

Peralatan penghubung dan pemutus tenaga atau *Circuit Breaker (PMT/CB)* digunakan untuk memutus rangkaian baik dalam keadaan normal maupun ketika gangguan. Nilai arus gangguan jauh lebih besar daripada arus pada saat beban normal, bahkan bisa sampai beberapa kalinya. Kapasitas peralatan penghubung dan pemutus tenaga harus mampu beroperasi pada saat terjadi gangguan, baik gangguan arus lebih, tegangan lebih maupun hubung singkat. Kontak hubung pada PMT ditempatkan dalam tabung atau ruang tertutup, sehingga keadaan kontaknya tidak nampak, apakah kondisi membuka atau menutup. Pada saat memutus arus beban atau arus gangguan, pada kontak CB akan timbul bunga api akibat nilai arus yang cukup besar. Untuk menghindari panas berlebihan yang timbul, diperlukan pemadam busur api. Pemadam busur api pada CB atau PMT ada yang menggunakan minyak, semburan gas, medan magnet atau yang lainnya. Pemutus tenaga di gardu induk dirancang agar dapat bekerja secara otomatis ketika terjadi gangguan pada sistem dengan bantuan rele proteksi. Sedangkan untuk memutus atau menghubungkan rangkaian saat beban normal, PMT dioperasikan manual (Suripto S., 2017).



Gambar 2. Pemutus tenaga tegangan tinggi dengan SF₆
Sumber: Suripto S., 2017



1.2.2.1.2 *Disconnecting Switch (DS)*

Saklar Pemisah atau *Disconnecting Switch* (PMS/DS) yang biasa dipasang seri dengan pemutus tenaga digunakan untuk memisahkan rangkaian peralatan gardu induk dari sistem saluran transmisi maupun sistem distribusi. Perbedaannya dengan pemutus tenaga adalah kontak pemisah diletakkan di tempat terbuka, sehingga nampak jelas posisi kontakanya terputus atau terhubung, sedangkan pada PMT, kontak diletakkan pada tabung tertutup. PMS tidak dirancang untuk memutus arus beban, apalagi arus gangguan. PMS hanya digunakan untuk memisahkan rangkaian secara fisik, sehingga PMS hanya dioperasikan pada saat rangkaian tidak berbeban. Dengan kata lain PMS hanya dioperasikan pada saat PMT pada posisi terbuka atau OFF, sehingga ketika dioperasikan tidak terjadi loncatan bunga api yang besar (Suripto S., 2017).



Gambar 3. *Disconnecting Switch*
Sumber: Affif A., 2018

1.2.2.1.3 *Lightning Arrester (LA)*

Lightning Arrester (LA) merupakan peralatan perlindungan atau proteksi peralatan gardu induk dari bahaya akibat tegangan lebih yang disebabkan oleh sambaran petir atau surja hubung. LA dipasang di dekat peralatan yang akan dilindungi, seperti titik masuk saluran transmisi ke gardu induk, di dekat peralatan pemutus tenaga dan di dekat trafo daya. LA merupakan peralatan perlindungan yang mempunyai nilai resistansinya dapat berubah-ubah. Salah satu ujung arester dihubungkan dengan kawat penghantar fase, sedang ujung yang lain dihubungkan dengan tanah atau *ground*. Dalam keadaan normal, yaitu saat tidak terjadi gangguan petir atau surja hubung, LA bersifat isolatif, sehingga tidak ada arus yang mengalir dari kawat jaringan ke tanah lewat LA. Ketikapada jaringan terjadi gangguan tegangan lebih sesaat yang menyebabkan LA bekerja, maka LA berubah sifat duktif, sehingga dapat menyalurkan arus listrik akibat tegangan lebih itu. Dengan demikian peralatan lain yang terhubung dengan jaringan tersebut aman dari petir atau surja hubung berhenti, maka LA akan kembali bersifat isolatif sehingga sistem kembali bekerja normal (Suripto S., 2017).

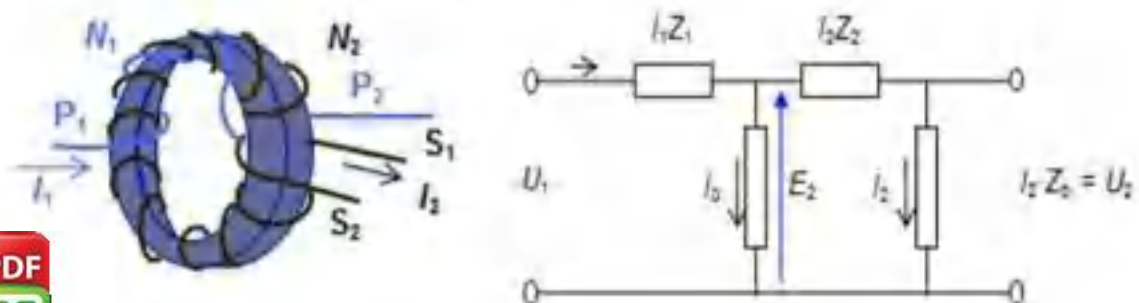




Gambar 4. *Lightning Arrester* untuk melindungi trafo daya
Sumber: Sripto S., 2017

1.2.2.1.4 Current Transformer (CT)

Trafo Arus (CT) adalah peralatan yang digunakan untuk melakukan pengukuran besaran arus pada instalasi tenaga listrik disisi primer (TET, TT, dan TM) yang berskala besar dengan melakukan transformasi dari besaran arus yang besar menjadi besaran arus yang kecil yang di pergunakan dalam rangkaian arus bolak balaik (AC) dengan secara akurat dan teliti untuk keperluan proteksi dan metering. CT juga merupakan trafo yang digunakan untuk mengambil input data masukan berupa besaran arus dengan cara perbandingan belitan pada belitan primer atau sekunder. Trafo ini biasa digunakan untuk pengukuran tak langsung beban arus yang mengalir ke pelanggan kemudian membatasinya. Selain itu bisa juga besaran arusnya diambil sebagai input data masukan peralatan pengaman jaringan. Trafo arus pengukuran untuk metering memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja (daerah pengenalnya) 5% - 120% arus nominalnya tergantung dari kelasnya dan tingkat kejenuhan yang relatif rendah dibandingkan trafo arus untuk proteksi. Trafo arus dengan spesifikasi ratio 200/5A, klas 0,5 dan dibebani sebesar 80A maka kesalahan maksimum rasionya adalah $\pm 1,5\%$ dan pergeseran fasa sebesar $\pm 90/60$ derajat (Tolibin, M. dan Fatkhurrohman, M. 2025).



Gambar 5. Rangkaian CT
Sumber: PLN, 2014



CT memiliki beberapa fungsi pada sistem tenaga listrik diantaranya, yaitu:

1. Mengkonversi besar arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi sekunder untuk keperluan metering dan sistem proteksi.
2. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, sebagai penagaman terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran.
3. Memungkinkan standarisasi rating arus listrik (Ampere) untuk peralatan sisi sekunder.

Secara fungsinya, CT dapat dibedakan menjadi dua yaitu:

1. Trafo arus pengukuran
 - a. Trafo arus pengukuran untuk metering memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja (daerah pengenalnya) 5%- 120% arus nominalnya tergantung dari kelasnya dan tingkat kejenuhan yang relatif rendah dibandingkan trafo arus untuk proteksi.
 - b. Penggunaan trafo arus pengukuran untuk Amperemeter, Watt-meter, VARh-meter, dan $\cos \phi$ meter.
2. Trafo arus proteksi
 - a. Trafo arus untuk proteksi, memiliki ketelitian tinggi pada saat terjadi gangguan dimana arus yang mengalir beberapa kali dari arus pengenalnya dan tingkat kejenuhan cukup tinggi.
 - b. Penggunaan trafo arus proteksi untuk relai arus lebih (OCR dan GFR), relai beban lebih, relai diferensial, relai daya dan relai jarak.



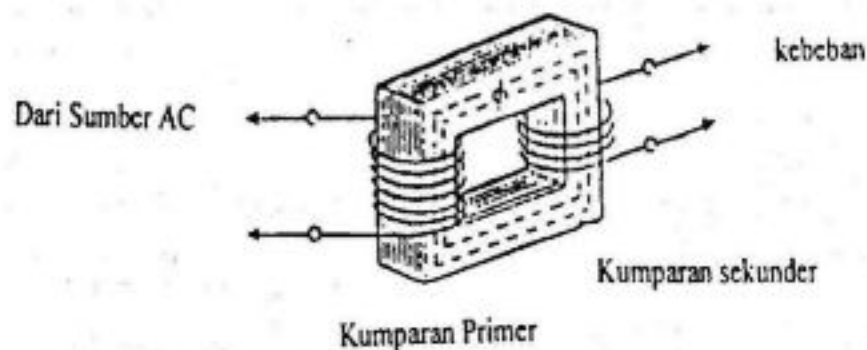
Gambar 6. Kurva Kejenuhan CT untuk Pengukuran dan Proteksi
Sumber: PLN, 2014

Prinsip kerja dari *Current Transformer* (CT) sama dengan trafo pada umumnya, yaitu dengan menggunakan belitan untuk mentransformasikan nilai arusnya. Dengan mempunyai dua lilitan primer dan sekunder dimana antara kedua belitan terisolasi satu dengan yang lainnya. Prinsip kerja transformator berdasarkan induksi medan magnetic tanpa merubah frekuensinya. Bila belitan primer (N_1) transformator dengan sumber tegangan V_1 maka yang terbentuk sinusoidal akan s pada belitan primer yang dinamakan arus eksitasi. Karena output trafo can untuk proteksi dan metering, maka perlu dilakukan pemeliharaan us untuk menjaga performa dari trafo arus itu sendiri.



1.2.3 Transformator

Citarsa et al. (2022) mengatakan bahwa suatu transformator adalah suatu peralatan/mesin listrik statis (tidak bergerak/berputar) yang dapat memindahkan, serta mengubah/mentransformasi besaran daya listrik dari satu rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain pada frekuensi yang sama. Suatu transformator dapat menaikkan atau menurunkan tegangan dari suatu rangkaian listrik akan tetapi diikuti dengan turun atau naiknya aliran arus pada rangkaian listrik yang lain. Proses pemindahan dayanya dilakukannya melalui suatu gandengan magnetik antara kedua rangkaian listrik yang dihubungkan, sementara proses transformasi besarnya menggunakan prinsip induksi elektromagnetik di dalam gandengan magnetik tersebut. Transformator pada dasarnya terbentuk dari dua kumparan induktif yang terpisah/terisolasi satu sama lain secara elektrik (agar tak terjadi aliran arus hubung singkat antara keduanya) tetapi tergandeng secara magnetik melalui suatu rangkaian magnetik berupa aliran fluks dalam suatu inti besi yang memiliki nilai reluktansi rendah.



Gambar 7. Bagian utama transformator
Sumber: Citarsa et al., 2022

Citarsa et al. (2022) juga mengemukakan bahwa bagian utama dari suatu transformator sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 5. adalah sebagai berikut:

1. Kumparan primer Kumparan yang terbentuk dari lilitan kawat tembaga, dimana ujung-ujungnya akan terhubung pada rangkaian listrik yang akan mensuplai tegangan dan arus listrik kepada rangkaian listrik yang terhubung pada kumparan sekunder. Kumparan ini berfungsi sebagai tempat menerima masukan arus dari sumber tegangan listrik, juga sebagai tempat dihasilkannya gaya gerak magnet (sumber fluks magnet) dan gaya gerak listrik (sumber arus listrik).
2. Kumparan sekunder Kumparan yang terbentuk dari lilitan kawat tembaga, dimana ujung-ujungnya akan terhubung pada rangkaian listrik yang menerima suplai tegangan dan arus listrik dari rangkaian listrik yang terhubung pada kumparan primer. Kumparan ini berfungsi sebagai tempat mengalirkan an arus ke beban listrik, juga sebagai tempat dihasilkannya gaya erak (sumber arus listrik) dan gaya gerak magnet (sumber fluks magnet).
Merupakan tempat dililitkannya kumparan primer dan sekunder, a antara kumparan dengan inti besi diberi isolasi agar tak terjadi aliran



arus hubung singkat antara keduanya karena inti besi juga memiliki konduktifitas walaupun rendah. Inti besi berfungsi sebagai medium hantaran fluks magnetik yang akan menjadikan adanya gandengan/rangkaian magnetik antara kumparan/rangkaian primer dengan sekunder. Umumnya dibentuk dari hasil laminasi lempengan baja dengan kandungan silikon yang tinggi. Ini akan menghasilkan inti besi dengan tingkat permeabilitas (kemampuan hantar fluks) yang tinggi sekaligus rugi histeresis yang rendah.

Citarsa et al. (2022) mengatakan bahwa prinsip kerja transformator untuk memindahkan dan mengubah energi listrik dari rangkaian primer ke rangkaian sekunder dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Pada saat kumparan primer dihubungkan dengan suatu sumber tegangan ac (V_1), karena kumparan primer sekarang merupakan rangkaian tertutup, walaupun belum ada beban pada sisi kumparan sekunder, akan mengalir arus ac (disebut sebagai arus beban nol) pada kumparan primer (I_1) yang terlilit pada inti besi.
2. Aliran arus ac (bolak balik) pada kumparan primer ini akan menyebabkan timbulnya gaya gerak magnet (ggm) ac pada kumparan primer dan inti besi tempat kumparan primer tersebut dililitkan.
3. Timbulnya ggm ac ini akan menyebabkan mengalirnya hantaran fluks magnet Φ ac dari posisi kumparan primer dililitkan ke sekeliling lintasan inti besi. Fluks magnet ac ini juga akan melintasi posisi dimana kumparan sekunder dililitkan pada inti besi.
4. Berdasarkan hukum induksi Faraday, $e = N (d\Phi/dt)$, maka akibat aliran fluks magnet ac (yang berubah terhadap waktu, $d\Phi/dt$) yang melintasi kumparan primer dan sekunder (N_1 dan N_2) akan terinduksi suatu gaya gerak listrik ac pada kumparan primer dan sekunder (E_1 dan E_2) yang besarnya tergantung jumlah lilitan tiap kumparan.
5. Jika ujung-ujung kumparan sekunder tersebut dihubungkan dengan beban listrik, karena sekarang telah menjadi rangkaian tertutup, akan mengalir arus ac dari kumparan sekunder (I_2) menuju beban listrik sehingga akan timbul tegangan (V_2) pada beban tersebut.
6. Pada saat ini dikatakan bahwa transformator telah bekerja untuk memindahkan dan mengubah energi listrik dari rangkaian primer ke rangkaian sekunder.

Untuk dapat memahami lebih dalam mengenai prinsip kerja transformator secara kenyataan (praktis), maka pertama-tama transformator akan dianggap sebagai suatu transformator yang ideal. Transformator ideal adalah suatu transformator yang:

1. Tidak memiliki rugi-rugi, baik rugi beban nol (terdiri dari rugi inti besi dan rugi tembaga beban nol) maupun rugi beban penuh (terdiri dari rugi tembaga penuh).



2. Inti besinya memiliki permeabilitas yang tak terhingga (inti besi tak pernah jenuh), sehingga penambahan arus akan selalu proporsional/linier dengan penambahan fluks yang dihasilkan ($\Phi \approx N \times I$) untuk sepanjang waktu.
3. Tidak terjadi kebocoran fluks pada kumparannya, sehingga semua fluks bersirkulasi di dalam inti besi.

1.2.3.1 Gangguan pada Transformator

Aryawansa (2021) menjelaskan macam-macam gangguan transformator dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Gangguan luar (*External Fault*). Gangguan luar dimaksud adalah gangguan yang terjadinya diluar daerah pengaman transformator yang dapat menyebabkan kerusakan pada transformator. Gangguan-gangguan tersebut antara lain:
 - a. Beban lebih (*Overload*). Pembebanan lebih yang melampaui kapasitasnya menyebabkan pemanasan yang berlebihan akibat kenaikan suhu. Suhu yang tinggi dapat mengakibatkan
 - 1) Memperpendek umur transformator (*Life time*).
 - 2) Merusak isolasi dan material belitan. Kenaikan suhu pada trafo dapat dideteksi oleh temperatur relai, dimana temperatur relai juga berfungsi untuk mengontrol suhu transformator dengan menjalankan *cooling fan*.
 - b. Hubung singkat diluar (*External short circuit*). Terjadinya hubung singkat baik fasa ke fasa maupun fasa ke tanah diluar daerah pengaman transformator dapat merusak 5 bagian-bagian transformator akibat arus hubung singkat yang besar. Untuk proteksi yang dapat digunakan yaitu *overcurrent relay*.
2. Gangguan dalam (*Internal fault*). Gangguan dalam yang dimaksudkan adalah gangguan yang bersumber dan dalam transformator itu sendiri. Gangguan dalam pada transformator dapat diklasifikasikan sebagai berikut:
 - a. Gangguan listrik. Gangguan ini tergolong gangguan berat yang umumnya adalah gangguan listrik dan langsung dapat menyebabkan kerusakan pada bagian-bagian transformator. Gangguan tersebut antara lain:
 - 1) Gangguan hubung singkat fasa ke fasa atau fasa ke tanah pada terminal belitan tegangan tinggi atau rendah.
 - 2) Gangguan hubung singkat fasa ke fasa atau fasa ke tanah pada belitan tegangan tinggi atau rendah.
 - 3) Hubung singkat diantara gulungan lilitan tegangan tinggi atau rendah.
 - 4) Hubung singkat pada lilitan tertier atau hubung singkat diantara belitan tertier.
 - b. Gangguan awal. Gangguan ini sering diistilahkan (*Incipient Fault*) yang gangguan yang tergolong ringan dan berawal dari gangguan kecil namun nudian secara perlahan-lahan berkembang menjadi gangguan berat yang mengakibatkan kerusakan apabila tidak segera terdeteksi. Gangguan-gangguan tersebut antara lain:
 - 1) Kendornya baut-baut atau *ring* pada terminal konduktor.



- 2) Gangguan pada inti besi akibat kerusakan laminasi isolasi yang menimbulkan percikan bunga api dibawah minyak.
- 3) Gangguan di sistem pendingin, seperti kerusakan pada pompa sirkulasi minyak, kipas pendingin dan bagian-bagian dari sistem pendingin lainnya yang dapat menyebabkan kenaikan suhu operasi yang tinggi, meskipun transformator masih beroperasi dibawah beban penuh.
- 4) Adanya kemungkinan pengentalan minyak atau kebuntutan pada bagian-bagian tertentu, sehingga sirkulasi minyak menjadi terganggu yang dapat mengakibatkan pemanasan setempat pada bagian belitan.
- 5) Gangguan atau tidak berfungsinya bagian-bagian mekanik dari tap perubah bebahan (*Load tap changer*) akibat pemasangan yang kurang sempurna (*Loss contact*, getaran dan lain sebagainya).
- 6) Kebocoran minyak dari bagian las-lasan.
- 7) Gangguan pada terminal *bushing* akibat adanya kontaminasi, keretakan, penuaan dan binatang

1.2.4 Sistem Proteksi

Menurut Pabla A. S. (2011), kebutuhan akan sistem proteksi dalam suatu rangkaian listrik ditentukan oleh potensi bahaya yang mungkin timbul, tingkat proteksi relatif yang diperlukan terhadap masing-masing bahaya, serta kemampuan pihak penyelenggara dalam menanggung biaya perangkat proteksi yang diperlukan. Sistem proteksi dirancang untuk meminimalkan risiko-risiko berikut dalam instalasi listrik:

1. Arus lebih yang berlangsung terus-menerus (*overload*)
2. Energi berlebih yang terjadi selama kondisi kelebihan beban sesaat, seperti pada gangguan hubung singkat (*short circuit*)
3. Risiko sengatan listrik
4. Potensi terjadinya kebakaran
5. Hilangnya selektivitas (*discrimination*) dalam sistem
6. Gangguan terhadap kontinuitas pasokan daya listrik

Pabla, A. S (2011) melanjutkan bahwa pada saat yang sama, sistem proteksi harus mampu berfungsi secara efektif dengan menimbulkan gangguan sekecil mungkin terhadap operasi normal sistem, baik pada cabang yang diproteksi maupun pada cabang-cabang lainnya. Dengan kata lain, sistem harus mempertahankan selektivitas pada setiap tingkatan arus gangguan, meminimalkan gangguan akibat pemutusan pasokan, serta memungkinkan pemulihan pasokan dengan cepat setelah gangguan diatasi.

Hubungan singkat (*short circuits*) dan kondisi abnormal lainnya sering terjadi pada sistem tenaga listrik. Arus besar yang diakibatkan hubung singkat dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan jika rele proteksi dan pemutus tenaga (CB)

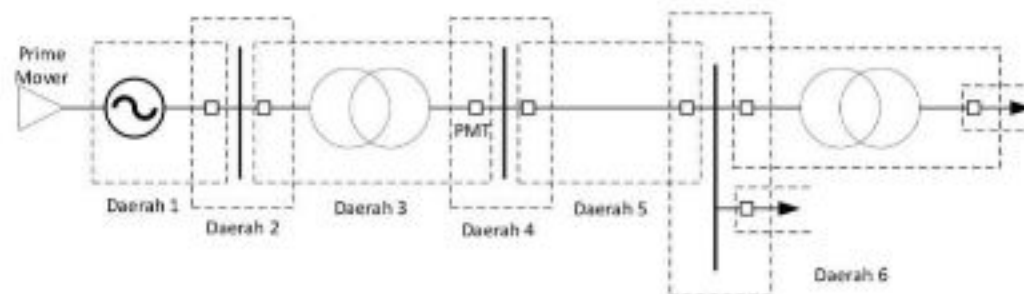


untuk proteksi tiap seksi sistem tenaga. Hubung singkat (*short circuits*) dikatakan sebagai "gangguan". Istilah "gangguan (*faults*)" dapat berarti "defect)". Beberapa "kerusakan", selain hubung singkat, juga dikatakan

sebagai gangguan, contohnya kegagalan konduksi suatu konduktor. Jika sebuah gangguan terjadi pada komponen sistem tenaga, piranti proteksi yang bekerja otomatis dibutuhkan untuk mengisolasi elemen terganggu secepat mungkin, guna menjaga bagian sistem yang sehat dapat bekerja normal. Jika gangguan hubung singkat terjadi dalam waktu yang lama, maka dapat menyebabkan kerusakan terutama pada bagian-bagian penting sistem. Arus gangguan hubung singkat yang sangat besar dapat menyebabkan kebakaran (Syahputra, R. 2022).

1.2.4.1 Pembagian Daerah Proteksi

Arywansa (2021) mengatakan bahwa suatu sistem tenaga listrik dibagi ke dalam seksi-seksi yang dibatasi oleh PMT. Tiap seksi memiliki relai pengaman dan memiliki daerah pengamanan (*Zone of Protection*). Bila terjadi gangguan, maka relai akan bekerja mendeteksi gangguan dan PMT akan trip. Gambar 8. berikut ini dapat menjelaskan tentang konsep pembagian daerah proteksi.



Ket :

- Daerah 1 : Zona Pembangkit
- Daerah 2 : Zona Bus
- Daerah 3 : Zona Transformator Daya 6,6 kv / 150 kv
- Daerah 4 : Zona Bus
- Daerah 5 : Zona Saluran Transmisi
- Daerah 6 : Zona Saluran Distribusi 150 kv / 20 kv

Gambar 8. Pembagian Daerah Proteksi pada Sistem Tenaga
Sumber: Aryawansa, 2021

Pada Gambar 8. di atas dapat dilihat bahwa daerah proteksi pada sistem tenaga listrik dibuat bertingkat dimulai dari pembangkitan, gardu induk, saluran distribusi primer sampai ke beban. Aryawansa (2021) juga mengatakan bahwa garis putus-putus menunjukkan pembagian sistem tenaga listrik ke dalam beberapa daerah proteksi. Masing-masing daerah memiliki satu atau beberapa komponen sistem daya disamping dua buah pemutus rangkaian. Setiap pemutus dimasukkan ke dalam dua daerah proteksi berdekatan. Batas setiap daerah menunjukkan bagian sistem yang bertanggung jawab untuk memisahkan gangguan yang terjadi di daerah tersebut dengan sistem lainnya. Aspek penting lain yang harus diperhatikan dalam pembagian daerah proteksi adalah bahwa daerah yang saling berdekatan harus saling tumpang



ap), hal ini dimaksudkan agar tidak ada sistem yang dibiarkan tanpa proteksi. Pembagian daerah proteksi ini bertujuan agar daerah yang tidak terdampak oleh gangguan tetap dapat beroperasi dengan baik sehingga dapat meminimalkan dampak terjadinya pemadaman.

1.2.4.2 Komponen Peralatan Proteksi

Aryawansa (2021) mengemukakan bahwa seperangkat peralatan/komponen proteksi utama dapat dibedakan berdasarkan fungsinya menjadi:

1. Relai proteksi. Relai adalah sebuah alat yang bekerja secara elektromagnetis mengatur dan memasukkan suatu rangkaian listrik (rangkai trip atau rangkaian alarm,) akibat adanya perubahan rangkaian lain. Relai proteksi adalah suatu relai listrik yang digunakan untuk mengamankan peralatan-peralatan listrik terhadap kondisi abnormal. Relai proteksi pembangkit adalah suatu relai proteksi yang digunakan untuk mengamankan peralatan-peralatan listrik seperti generator, trafo utama, trafo bantu dan motor-motor listrik pemakaian sendiri suatu pembangkit.
2. Pemutus Tenaga (PMT). Dari semua peralatan yang diklasifikasikan sebagai peralatan hubung, pemutus tenaga dirancang untuk memutus arus gangguan tingkat paling tinggi didalam sistem. Disamping itu ia dapat juga memutus arus tingkat rendah seperti arus magnetisasi transformator, arus pengisian jaringan sebagaimana juga arus beban sepele semua peralatan hubung, pemutus tenaga beroperasi untuk memisahkan konduktor listrik yaitu kontak kontak.
3. Transformator ukur (*Instrument Transformer*). *Instrument transformer* digunakan dalam sistem operasi ac untuk mendapatkan parameter arus dan tegangan, yang digunakan untuk indikasi, inputan bagi meter-meter, relai proteksi, alarm dan tujuan lainnya. *Instrument transformer* memungkinkan pemasangan alat ukur dan relai menjadi lebih mudah, murah dan andal. Bila pemasangan dilakukan langsung dari sisi tegangan primer (tinggi) tentunya menjadi lebih sulit. Dengan menggunakan *instrument transformer*, alat-alat ukur dan relai dapat dipasang jauh dari sistem yang akan diukur maupun diproteksi.

1.2.5 Sistem Proteksi Transformator

Pengembangan suatu sistem tenaga listrik berbanding lurus dengan majunya perkembangan teknologi. Dengan teknologi yang semakin modern akan membuat semakin handalnya sistem proteksi yang digunakan pada transformator daya. Proteksi transformator daya pada prinsip kerjanya dilakukan dengan menghindarkan transformator daya mengalami panas yang berlangsung pada kurun waktu yang cukup lama. Hal ini membuktikan bahwa transformator daya harus diisolasi untuk menghindari terjadinya gangguan. Secara teknis dan ekonomis, transformator daya kecil dapat diamankan menggunakan relai arus lebih, sedangkan untuk transformator daya yang berukuran besar, setiap gangguan yang terjadi harus diisolasi sesegera mungkin tanpa keterlambatan waktu. Hal ini mengingat besarnya pengaruh gangguan yang terjadi yang dapat memengaruhi stabilitas, keandalan operasi sistem tenaga listrik, dan termasuk faktor ekonomis mengingat harga transformator yang sangat

a sampai mengalami kerusakan (Aryawansa, 2021).
ransformator terdiri dari beberapa jenis relai yang bekerja berdasarkan ona kerja yang berbeda. namun saling melengkapi satu sama lain untuk



memberikan perlindungan menyeluruh terhadap gangguan listrik maupun gangguan non-listrik. Secara umum, sistem proteksi transformator meliputi:

1. **Relai Diferensial.** Relai ini merupakan proteksi utama (main protection) yang paling penting untuk mendeteksi gangguan internal pada transformator, seperti hubung singkat antar fasa maupun antar lilitan. Prinsip kerja relai ini didasarkan pada perbandingan arus masuk dan arus keluar dari transformator. Dalam kondisi normal, arus pada kedua sisi seimbang setelah disesuaikan dengan rasio trafo arus. Namun, apabila terjadi gangguan internal, akan timbul perbedaan arus yang signifikan (arus diferensial), sehingga relai akan memerintahkan pemutusan transformator dari sistem. Relai diferensial memiliki keunggulan berupa kecepatan dan selektivitas yang tinggi, namun dapat kurang sensitif terhadap gangguan tanah dengan resistansi tinggi.
2. **Restricted Earth Fault (REF) Relay.** Relai ini berfungsi untuk mendeteksi gangguan tanah di zona terbatas, khususnya pada transformator dengan belitan Y grounded. Prinsip kerja relai REF adalah membandingkan jumlah arus fasa dengan arus yang mengalir melalui konduktor netral. Jika terjadi ketidakseimbangan akibat arus gangguan ke tanah di dalam zona proteksi, relai akan bekerja. REF memiliki sensitivitas lebih tinggi terhadap gangguan tanah dibandingkan relai diferensial, terutama pada gangguan dengan arus kecil atau resistansi tinggi, meskipun area proteksinya terbatas hanya pada sebagian lilitan dekat titik netral. Mendeteksi gangguan tanah pada zona terbatas di sisi netral transformator.
3. **Relai Overcurrent (OCR) dan Ground Fault Relay (GFR).** Kedua relai ini berfungsi sebagai proteksi cadangan untuk mendeteksi gangguan eksternal seperti arus lebih antar fasa maupun gangguan satu fasa ke tanah di luar zona proteksi utama. Relai OCR bekerja bila arus yang mengalir melebihi nilai setting tertentu dan berlangsung dalam waktu tertentu sesuai dengan karakteristik waktu tunda yang ditetapkan. Sementara itu, relai GFR secara khusus dirancang untuk mendeteksi ketidakseimbangan arus akibat arus ke tanah. Kedua relai ini memiliki keunggulan berupa kesederhanaan dan kemampuan melindungi sistem eksternal, tetapi kurang selektif terhadap gangguan internal karena prinsip kerjanya berdasarkan besarnya arus tanpa membedakan arah atau lokasi gangguan.

Dengan kombinasi berbagai sistem proteksi tersebut, transformator memperoleh perlindungan yang komprehensif terhadap berbagai jenis gangguan, baik listrik maupun mekanis. Relai diferensial dan REF berperan sebagai proteksi utama, sementara OCR, GFR, dan relai mekanik berfungsi sebagai proteksi cadangan atau pendukung. Koordinasi yang tepat antarproteksi menjadi kunci utama agar sistem proteksi transformator dapat bekerja secara cepat, selektif, dan andal, serta mencegah kerusakan serius pada peralatan dan gangguan meluas pada sistem



1.2.5.1 Prinsip Kerja Relai Diferensial

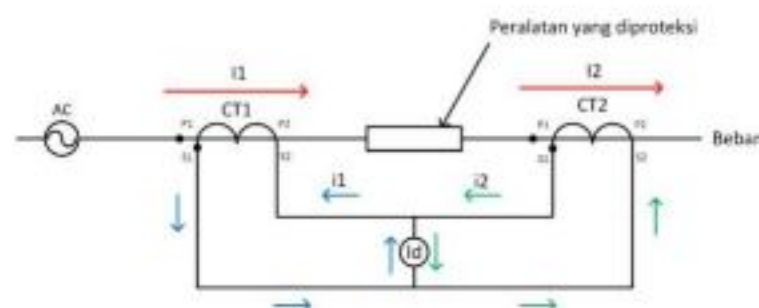
Arywansa (2021) mengatakan bahwa *Differential Relay* adalah relai proteksi utama pada transformator yang dibuat bekerja secepat mungkin saat terjadi gangguan karena bekerja seketika tanpa koordinasi dengan relai lainnya. *Differential Relay* tidak dapat dijadikan sebagai relai cadangan dikarenakan pemasangannya dibatasi oleh kedua transformator arus disisi masuk dan keluar. Proteksi *Differential Relay* bekerja dengan metode keseimbangan arus yakni sesuai dengan hukum arus kirchoff, yaitu arus yang menuju atau masuk sama dengan arus yang meninggalkan atau keluar pada titik sambungan atau cabang.

Karakteristik relai proteksi yang baik yaitu:

1. Selektif, relai proteksi harus selektif terhadap gangguan yang terjadi sehingga relai akan bekerja apabila terjadi gangguan dan tidak akan bekerja dalam kondisi normal.
2. Handal, relai proteksi harus dapat bekerja apabila terjadi gangguan sehingga diperlukan pengujian secara periodik untuk mengetahui keandalannya.
3. Ekonomis, relai dapat bekerja dengan optimal meskipun dengan biaya yang ekonomis.
4. Sensitif, relai dapat merangsang gangguan yang akan terjadi sehingga arus gangguan dapat terdeteksi.
5. Sederhana, peralatan relai harus fleksibel dari segi bentuk.
6. Cepat, relai dapat bekerja dengan cepat apabila terjadi gangguan sehingga komponen yang dilindungi aman.

1.2.5.2 Relai Diferensial dengan Sistem Sirkulasi Arus

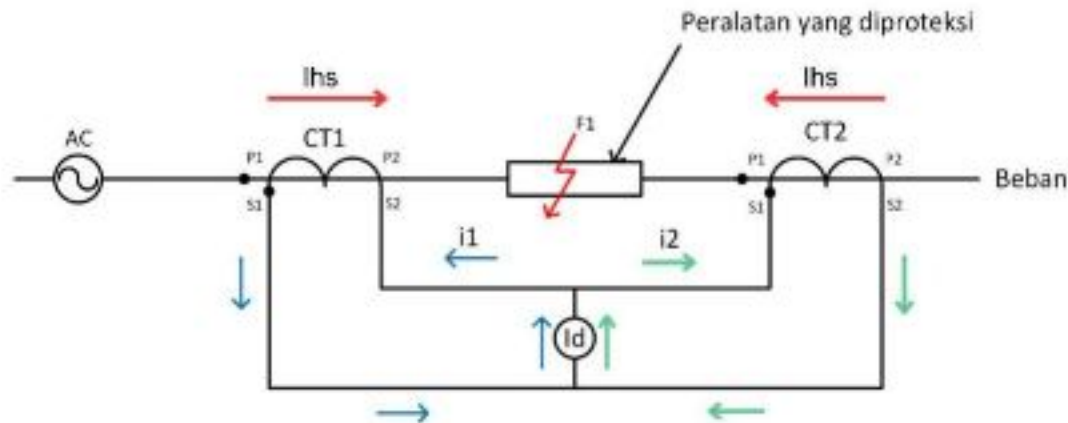
Relai dengan sistem sirkulasi arus paling umum dikenal dengan sebagai diferensial relai. Prinsip kerja relai proteksi diferensial adalah membandingkan dua vektor arus atau lebih yang masuk ke relai, dapat dilihat pada Gambar 9. dengan pemasangan rasio yang sama. Apabila pada CT₁ dialiri arus primer (i_1) masuk dari P₁ dan keluar dari P₂, maka arus sekunder CT₁ (i_1) akan keluar dari S₁ dan masuk ke S₂. Begitupun pada CT₂ ketika dialiri arus sekunder (i_2) masuk dari P₁ dan keluar dari P₂, maka arus sekunder CT₂ (i_2) akan keluar dari S₁ dan masuk ke S₂. pada saat yang sama sisi sekunder kedua CT, akan mengalir arus i_1 dan i_2 kedalam relai diferensial yang besarnya sama. Sehingga besarnya arus diferensial $I_d = |i_1 - i_2| = 0$ maka relai tidak bekerja, karena tidak ada selisih arus (Arywansa, 2021).



Gambar 9. Rangkaian Differential Relai keadaan arus normal
Sumber: Arywansa, 2021

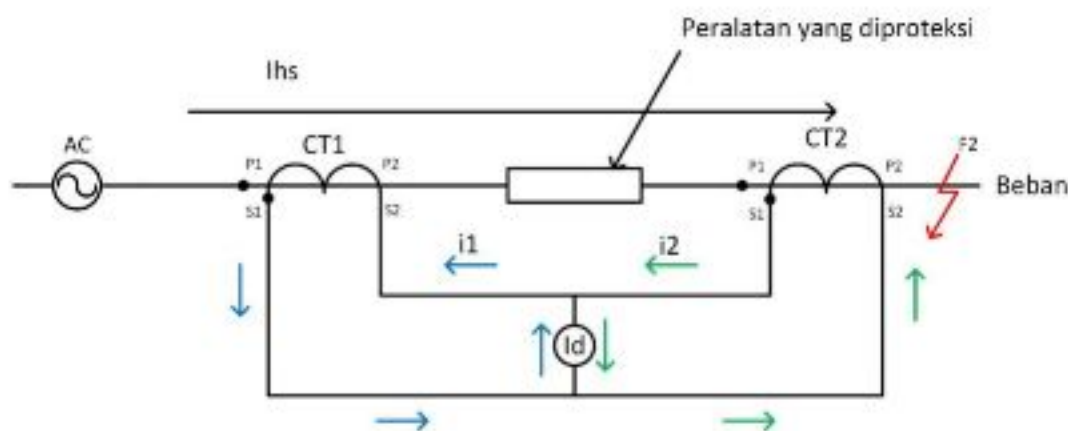


Arywansa (2021) melanjutkan bahwa ketika terjadi gangguan F_1 pada peralatan yang diproteksi (Gambar 10) maka arus hubung singkat (I_{hs}) akan mengalir dari sumber ke arah F_1 , sehingga pada kedua sekunder CT akan mengalir arus sekunder $i_1 = I_{hs}$ dan $i_2 = 0$. Kedua arus tersebut akan mengalir ke dalam relai dan jika $I_d = |i_1 - i_2| = I_{hs}$ lebih besar dari *setting* maka relai akan bekerja, karena adanya selisih arus.



Gambar 10. Differensial Relai saat Gangguan dalam Zona
Sumber: Aryawansa, 2021

Namun jika gangguan terjadi pada F_2 (Gambar 11) maka relai tidak akan bekerja, karena arus hubung singkat (I_{hs}) melalui kedua CT sedangkan rasio keduanya sama, sehingga arus sekunder $i_1 = i_2 = I_{hs}$. Maka $I_d = |i_1 - i_2| = 0$ dan relai tidak bekerja, karena tidak ada selisih arus pada relai.



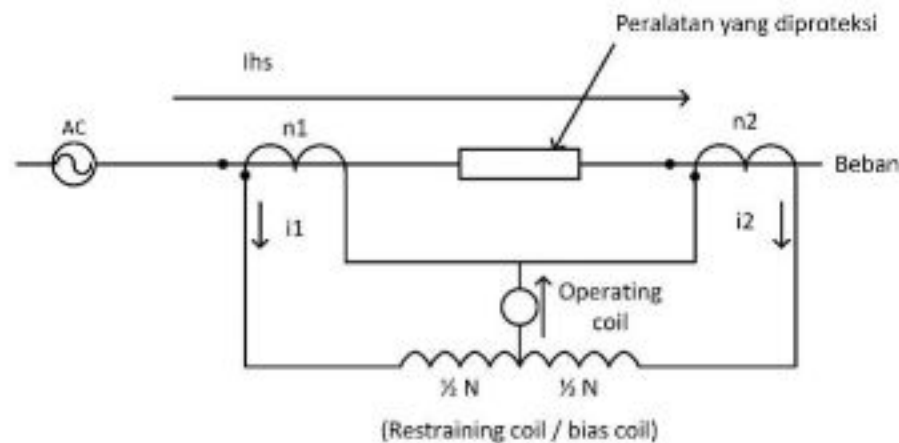
Gambar 11. Differensial Relai saat Gangguan luar Zona
Sumber: Aryawansa, 2021

Karena relai ini hanya bekerja, apabila gangguan terjadi pada daerah antara kedua CT maka relai ini digolongkan sebagai relai daerah proteksi terbatas (*restricted protection relay*). Relai tipe ini dikenal dengan beberapa nama antara lain, *Longitudinal differential relay* (LDR) atau pada negara yang memakai *British* enal dengan nama Merz Prize relai (Arywansa, 2021).



1.2.5.3 Percentage Differential Relay

Pada *Longitudinal differential relay*, operasi relai begitu sederhana dengan hanya melihat selisih arus *operating coil*. Namun dalam aplikasinya, ada beberapa hal yang dapat menyebabkan terjadinya kesalahan arus diferensial, antara lain kesalahan ratio dan saturasi CT, yang tentu saja tidak bias kita abaikan. Oleh karenanya lahirlah *Percentage differential relay* (PDR) yang memiliki *restraining coil* yang tidak terdapat pada LDR, dimana gaya yang ditimbulkan oleh *restraining coil* berlawanan dengan gaya yang ditimbulkan oleh *operating coil* (Aryawansa, 2021).



Gambar 12. *Percentage differential relay*

Sumber: Aryawansa, 2021

Berdasarkan Gambar 12., maka persamaan gaya operasi (*operating force*) F_{op} dan gaya lawan (*restraining force*) F_R , dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} F_{op} &= k \cdot N_{op} \cdot i_{op} \\ &= k \cdot N_{op} \cdot (i_1 - i_2) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} F_R &= F_{R1} + F_{R2} \\ &= k \left(\frac{1}{2} N_R \cdot i_1 + \frac{1}{2} N_R \cdot i_2 \right) \\ &= k \cdot \frac{N_R}{2} \cdot (i_1 + i_2) \end{aligned} \quad (2)$$

dimana:

- k = konstanta
- N_R = jumlah lilitan *restraining coil*
- N_{op} = jumlah lilitan *operation coil*
- i_1 = arus sekunder CT₁
- i_2 = arus sekunder CT₂
- i_{op} = $i_1 - i_2$



Pada saat kondisi seimbang dimana $F_{op} = F_R$, maka diperoleh:

$$k(i_1 - i_2)N_0 = k(i_1 - i_2) \frac{N_R}{2} \quad (3)$$

$$\frac{N_R}{N_0} = \frac{(i_1 - i_2)}{(i_1 + i_2) \frac{1}{2}} \rightarrow \frac{N_R}{N_0} = \frac{(i_1 - i_2)}{(i_1 + i_2)} = \frac{k_1}{k_2} \quad (4)$$

sehingga: $k_2(i_1 - i_2) = k_1 \left(\frac{i_1 + i_2}{2} \right)$, apabila $(i_1 - i_2)$ dan $(i_1 + i_2)$

Diambil nilai modulusnya, maka persamaan di atas akan membentuk persamaan garis lurus dengan:

sumbu y = modulus $(i_1 - i_2)$

sumbu x = modulus $\frac{i_1 + i_2}{2}$

1.2.5.4 Penyebab Gagal Operasi (*Malfunction*) Relai Diferensial

Relai diferensial dirancang untuk bekerja cepat dan selektif terhadap gangguan internal pada transformator, seperti hubung singkat antar lilitan atau antar fasa. Namun dalam praktiknya, terdapat sejumlah kondisi teknis yang dapat menyebabkan relai tidak bekerja (*fail to operate*) meskipun gangguan berada di dalam zona proteksi. Fenomena ini disebut *malfunction* atau *misoperation* relai diferensial. Adapun penyebab gagal operasi relai diferensial dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Kesalahan *Setting* Relai, merupakan penyebab paling umum dari tidak bekerjanya relai diferensial. Parameter penting seperti *pickup current* dan *slope* harus disesuaikan dengan karakteristik arus nominal transformator dan rasio CT. Jika nilai *pickup* terlalu tinggi, relai tidak akan sensitif terhadap gangguan internal dengan arus diferensial kecil, seperti gangguan tanah resistansi tinggi. Sebaliknya, jika *slope* terlalu besar, relai akan menahan diri (*restrain*) meskipun sudah ada perbedaan arus yang signifikan, sehingga tidak memberikan perintah trip.
2. Ketidakseimbangan Rasio CT. Relai diferensial bekerja berdasarkan keseimbangan arus dari sisi primer dan sekunder yang diukur oleh CT. Apabila rasio CT di kedua sisi tidak identik (karena perbedaan tegangan nominal, konfigurasi belitan, atau kesalahan pemilihan rasio), maka arus yang diterima relai tidak akan seimbang meskipun dalam kondisi normal. Akibatnya, relai menerima arus diferensial palsu atau, sebaliknya, tidak mendeteksi perbedaan arus yang sebenarnya ada.
3. Kesalahan Polaritas CT. Polaritas CT harus diatur dengan benar agar arah arus yang dikirim ke relai dari sisi primer dan sekunder saling meniadakan



kondisi normal. Jika terjadi kesalahan polaritas, maka arus dari kedua istru akan saling memperkuat, menyebabkan relai menerima arus isial besar meskipun tidak ada gangguan internal. Sebaliknya, jika

polaritas salah pada salah satu fasa, relai dapat gagal mendeteksi gangguan internal karena arah arus yang seharusnya berlawanan menjadi searah.

4. Saturasi CT. CT bekerja linear hanya sampai titik saturasi magnet inti. Ketika arus gangguan besar melewati CT, terutama saat gangguan asimetris, CT dapat jenuh sehingga arus sekunder tidak lagi proporsional dengan arus primer. Dalam kondisi ini, relai menerima bentuk gelombang arus yang terdistorsi, dan nilai arus diferensial yang terbaca menjadi lebih kecil dari sebenarnya. Akibatnya, relai tidak mencapai nilai *pickup* dan gagal memberikan perintah trip.
5. Resistansi Gangguan yang Tinggi. Gangguan internal dengan resistansi tinggi menghasilkan arus gangguan yang kecil. Pada kondisi ini, perbedaan arus antara sisi primer dan sekunder juga kecil sehingga tidak melebihi nilai *pickup* relai diferensial. Kasus seperti ini umum terjadi pada gangguan fasa ke tanah dengan kontak tidak sempurna, seperti antara belitan dan inti besi melalui minyak trafo. Karena arus gangguan kecil, relai diferensial menganggap sistem masih normal, padahal telah terjadi *fault internal*.

Gagalnya relai diferensial untuk mendeteksi gangguan internal dapat menyebabkan sistem proteksi tidak selektif, karena proteksi *backup* seperti OCR atau GFR yang akhirnya bekerja memutus seluruh sistem. Hal ini meningkatkan waktu *clearing fault* dan dapat menyebabkan kerusakan termal pada belitan transformator. Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi menyeluruh terhadap penyebab *malfunction* melalui analisis data gangguan lapangan dan simulasi sistem menggunakan perangkat lunak seperti ETAP, untuk memastikan bahwa relai diferensial berfungsi sesuai desain proteksi.

1.2.5.5 Evaluasi Relai Diferensial

Evaluasi relai diferensial adalah proses menilai dan menyesuaikan parameter kerja relai diferensial agar dapat melindungi peralatan listrik (seperti generator, transformator, atau busbar) secara akurat, cepat, dan selektif terhadap gangguan internal, tanpa salah kerja pada gangguan eksternal (Syukriyadin, 2011). Parameter evaluasi relai diferensial adalah sebagai berikut:

1. Perhitungan Rasio CT Ideal. Pemilihan trafo arus disesuaikan dengan alat ukur dan proteksi. Pemilihan trafo arus dengan kualitas baik akan memberikan perlindungan sistem yang baik pula. Relai diferensial sangat tergantung terhadap karakteristik trafo arus. Jika karakteristik trafo arus bekerja dengan baik, maka sistem akan terlindungi oleh relai diferensial ini secara optimal. Trafo arus ditempatkan dikedua sisi peralatan yang akan diamankan (transformator tenaga) (Yuniarto, 2015).

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \times V_p} \quad (5)$$

$$I_s = \frac{S_s}{\sqrt{3} \times V_s} \quad (6)$$



ngan:
: arus nominal (A)

S = daya tersalur (MVA)

V = tegangan keluaran (V)

Transformator dapat menarik beban lebih hingga 110% dari kapasitasnya, selama temperatur belitan dibawah temperatur maksimumnya.

$$I_{rating} = 110 \% \times I \quad (7)$$

Maka perbandingan ratio trafo arus dapat dihitung dari nilai arus rating dikedua sisi tegangan transformator tenaga tersebut dan disesuaikan dengan spesifikasi rasio trafo arus yang ada dipasaran sedangkan nilai sekunder trafo arus (5A atau 1A) disesuaikan dengan peralatan proteksinya (Yuniarto, 2015).

- Perhitungan *Error Mismatch*. *Error Mismatch* adalah kesalahan dalam membaca perbedaan arus dan tegangan di sisi primer dan sekunder transformator tenaga. *Error mismatch* diharapkan nilainya sekecil mungkin agar proteksi relai diferensial bekerja secara optimal dalam mengamankan transformator tenaga. Dengan syarat kesensitifan relai diferensial dalam pengoperasian *Mismatch error* tidak boleh lebih dari 5%. Syarat ini ditentukan untuk proteksi agar optimal menjaga sistem tenaga listrik dari gangguan. *Error mismatch* didapatkan dari perbandingan nilai ratio CT ideal dengan nilai ratio CT yang terpasang atau yang ada dipasaran. Berikut adalah persamaannya (Yuniarto, 2015).

$$Error\ Missmatch = \frac{rasio\ CT_{ideal}}{rasio\ CT_{terpasang}} \times 100\% \quad (8)$$

Persamaan untuk menghitung nilai rasio CT ideal adalah (Yuniarto, 2015):

$$Rasio\ CT1\ (ideal) = rasio\ CT2 \times \frac{V_s}{V_p} \quad (9)$$

$$Rasio\ CT2\ (ideal) = rasio\ CT1 \times \frac{V_p}{V_s} \quad (10)$$

keterangan:

Rasio CT (ideal) = Rasio transformator arus ideal

Rasio CT = Rasio transformator terpasang

Vp = Tegangan Primer (V)

Vs = Tegangan Sekunder (V)

- Menghitung Arus Sekunder CT. Arus yang dikeluarkan oleh trafo arus disebut arus sekunder, dibawah ini merupakan persamaan untuk menghitung nilai arus sekunder yaitu (Yuniarto, 2015):

$$I_s = \frac{1}{rasio\ CT} \times I_n \quad (11)$$

I_s = arus sekunder CT (A)

I_n = arus nominal (A)

Rasio CT = nilai rasio trafo arus (A)

- Menghitung Arus *Restrained*. Arus *restrain* adalah arus penahan yang digunakan sebagai parameter kerja dari relai diferensial. Arus *restrain* digunakan untuk mengetahui arus rata-rata yang mengalir pada transformator sisi tegangan dengan sisi tegangan rendah (Sidik, 2018).



$$I_r = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (12)$$

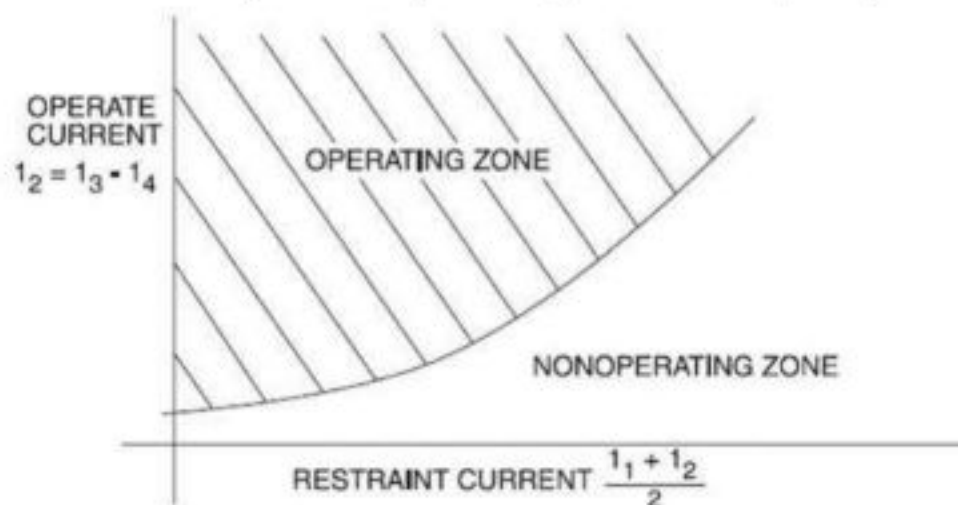
keterangan:

I_r = arus *restrain* (A)

I_1 = arus sekunder CT1 (A)

I_2 = arus sekunder CT2 (A)

Jumlah elemen penahan dalam relai adalah fungsi aplikasi di mana relai dirancang. Sebuah generator atau relai diferensial motor berisi dua elemen penahan, di mana relai yang ditujukan untuk proteksi bus atau transformator dapat memiliki beberapa elemen penahan (IEEE Standard, 2001).



Gambar 13. Karakteristik Operasi Penahan dari Persentase Tetap Relai Diferensial

Sumber: IEEE Standard, 2001

- Menghitung *Persen Slope*. *Slope* didapat dengan membagi antara komponen arus diferensial dengan arus penahan. *Slope 1* akan menentukan arus diferensial dan arus penahan pada saat kondisi normal dan memastikan sensitifitas relai pada saat gangguan internal dengan arus gangguan yang kecil. Sedangkan *Slope 2* berguna supaya relai tidak kerja oleh gangguan eksternal yang berarus sangat besar sehingga salah satu Trafo Arus mengalami saturasi (diset dengan *Slope* lebih dari 50%) Persamaan *Percent Slope*. Berikut persamaan untuk menghitung *percent Slope* (Sidik, 2018):

$$\%slope_1 = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% \quad (13)$$

keterangan:

I_d = arus *restrain* (A)

I_r = arus sekunder CT1 (A)

Setting slope 1 untuk memastikan relai bekerja pada saat gangguan internal engantisipasi kesalahan perbandingan arus diferensial akibat *mismatch* faktor kesalahan tersebut sebagai berikut:

Kesalahan CT: 10 %

Mismatch: 4%



- Arus eksitasi: 1%
- Faktor keamanan: 5 %

Oleh karena itu *setting slope* 1 dipilih = 25% - 35%

Setting slope 2 untuk mengantisipasi kesalahan yang cukup besar pada CT akibat kondisi saturasi saat terjadi arus gangguan eksternal yang cukup besar.

Setting slope 2 dipilih = 50% - 80% (Karyana, 2013).

6. Menghitung Arus *Setting*. Arus *setting* merupakan batasan dalam menentukan apakah relai diferensial akan bekerja atau tidak dengan cara membandingkan dengan arus diferensial. Jika arus diferensial nilainya melebihi arus *setting* maka relai akan bekerja. Berikut merupakan persamaan untuk menghitung arus *setting* (Yuniarto, 2015):

$$I_{set} = \%slope_1 \times I_r \quad (14)$$

keterangan:

I_{set} = arus *setting* relai diferensial (A)

I_r = arus *restrain* (A)

$\%Slope_1$ = *setting* kecuraman 1 (%)

1.2.6 ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*)

Krismanto (2019) mengungkapkan bahwa ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan *offline* untuk simulasi tenaga listrik, *online* untuk pengelolaan data *real-time* atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara *real time*. Fitur yang terdapat didalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik. ETAP ini awalnya dibuat dan dikembangkan untuk meningkatkan kualitas kearnanan fasilitas nuklir di Arnerika Serikat yang selanjutnya dikembangkan menjadi sistem monitor manajemen energi secara *real time*, simulasi, kontrol, dan optimasi sistem tenaga listrik. ETAP dapat digunakan untuk membuat proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (*one line diagram*) dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai bentuk analisis, antara lain aliran daya, hubung singkat, *starting motor*, *trancient stability*, koordinasi relai proteksi dan sistem harmonisasi. Proyek sistem tenaga listrik memiliki masing-masing elemen rangkaian yang dapat diedit langsung dari diagram satu garis dan atau jalur sistem pentanahan. Untuk kemudahan hasil perhitungan analisis dapat ditampilkan pada diagram satu garis.

Dalam menganalisa sistem tenaga listrik, suatu diagram saluran tunggal (*single line diagram*) merupakan notasi yang disederhanakan untuk sebuah sistem tenaga listrik tiga fasa. Sebagai ganti dari representasi saluran tiga fasa yang terpisah, digunakanlah sebuah konduktor. Hal ini memudahkan dalam pembacaan diagram maupun dalam analisa rangkaian. Elemen elektrik seperti misalnya pemutus ansformator, kapasitor, busbar maupun konduktor lain dapat ditunjukkan menggunakan simbol yang telah distandarisasi untuk diagram saluran nen pada diagram tidak mewakili ukuran fisik atau lokasi dari peralatan merupakan konvensi umum untuk mengatur diagram dengan urutan kiri-



ke-kanan yang sama, atas-ke-bawah. ETAP memiliki 2 macam standar yang digunakan untuk melakukan analisa kelistrikan, ANSI dan IEC. Pada dasarnya perbedaan yang terjadi di antara kedua standar tersebut adalah frekuensi yang digunakan, yang berakibat pada perbedaan spesifikasi peralatan yang sesuai dengan frekuensi tersebut. Simbol elemen listrik yang digunakan dalam analisa dengan menggunakan ETAP pun berbeda (Multa, L. dan Aridani, R.P., 2013).

1.2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu terkait proteksi transformator menggunakan relay diferensial telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Syukriyadin, Syahrizal, dan Cut Rizky Nakhriya (2011) melakukan analisis proteksi relai diferensial terhadap gangguan internal dan eksternal transformator dengan simulasi menggunakan perangkat lunak PSCAD/EMTDC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa relai diferensial dapat bekerja secara selektif, yaitu memberikan sinyal trip pada pemutus tenaga (PMT) ketika terjadi gangguan di dalam zona proteksi (internal), namun tidak bereaksi terhadap gangguan eksternal. Kelebihan penelitian ini adalah pendekatan simulasi memungkinkan pemodelan yang detail serta pengujian berbagai kondisi gangguan dengan hasil yang cepat dan aman, sehingga memudahkan analisis unjuk kerja relay. Namun, keterbatasannya adalah hasil penelitian hanya berbasis simulasi, sehingga tidak sepenuhnya menggambarkan kondisi nyata di lapangan yang dapat dipengaruhi faktor teknis lain seperti ketidakakuratan CT atau kesalahan *setting* proteksi.

Sementara itu, penelitian oleh Dedi Hariyono (2019) menganalisis proteksi relai diferensial terhadap gangguan eksternal transformator dengan menggunakan data lapangan dari PLTU Unit 4 Belawan. Penelitian ini menekankan pada perhitungan matematis, meliputi rasio *current transformer* (CT), *error mismatch*, arus diferensial, arus *restrain*, serta penentuan arus *setting*. Hasilnya menunjukkan bahwa relai diferensial akan bekerja apabila arus diferensial melebihi nilai arus *setting*, dengan batas arus maksimal yang diperbolehkan mengalir pada sisi tegangan tinggi sebesar 7132 A. Kelebihan penelitian ini adalah penggunaan data lapangan sehingga hasilnya lebih representatif terhadap kondisi nyata sistem tenaga listrik. Namun, kelemahannya terletak pada terbatasnya variasi kondisi gangguan yang diuji, serta tidak adanya simulasi skenario kompleks yang mungkin terjadi pada sistem transmisi.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan yang akan dibahas yaitu:

1. Bagaimana kondisi aktual dan karakteristik kerja relai diferensial yang melindungi Transformator #2 60 MVA di Gardu Induk Panakkukang berdasarkan data lapangan?



2. Bagaimana hasil simulasi kinerja relai diferensial transformator menggunakan perangkat lunak ETAP?

3. Bagaimana perbandingan antara hasil pengujian lapangan dengan hasil simulasi ETAP dalam menilai kinerja relai diferensial?

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis kinerja relai diferensial pada Transformator #2 60 MVA berdasarkan data hasil pengujian di lapangan.
2. Melakukan simulasi sistem proteksi diferensial transformator menggunakan *software* ETAP.
3. Membandingkan hasil simulasi dengan data lapangan untuk mengetahui tingkat kesesuaian dan keandalan relai diferensial.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Bagi PLN dan industri ketenagalistrikan dalam mengevaluasi dan mengoptimalkan kinerja relai diferensial pada transformator tenaga, sehingga dapat meningkatkan keandalan sistem proteksi dan mengurangi risiko pemadaman listrik. Selain itu, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar dalam pengembangan kebijakan pemeliharaan dan pengoperasian sistem proteksi yang lebih adaptif.
2. Bagi mahasiswa dan akademisi, penelitian ini menjadi referensi ilmiah dalam memahami sistem proteksi tenaga listrik, khususnya terkait relai diferensial dan analisis berbasis simulasi ETAP. Selain itu, penelitian ini mendorong studi lanjutan dalam pengembangan metode optimasi sistem proteksi transformator.
3. Bagi peneliti dan pengembang sistem proteksi, penelitian ini memberikan wawasan tentang perbedaan performa relai diferensial antara kondisi operasional nyata dan simulasi, sehingga dapat digunakan untuk meningkatkan desain sistem proteksi yang lebih cerdas dan *responsive*.

1.6 Ruang Lingkup

Karena luasnya permasalahan pada Tugas Akhir ini, maka pembahasan dibatasi pada:

1. Penelitian difokuskan pada relai diferensial yang melindungi Transformator #2 60 MVA di Gardu Induk Panakkukang.
2. Analisis dilakukan dengan data sekunder berupa hasil pengujian relai yang dilakukan pada tanggal 10 September 2024 dan parameter transformator yang diperoleh dari pihak PLN.
3. Simulasi dilakukan menggunakan ETAP dengan skenario gangguan internal dan eksternal transformator.



uasi hanya difokuskan pada kinerja relai diferensial, tidak mencakup proteksi lain.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini yang masing-masing diuraikan secara garis besar dapat dijelaskan sebagai berikut:

Sistematika penulisan tugas akhir ini terbagi dalam empat bab dengan harapan maksud dan tujuan dari penulisan ini dapat terangkum seluruhnya. Pembagian bab tersebut adalah sebagai berikut:

- BAB I Berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah penelitian, dan sistematika penulisan, serta landasan teori yang relevan mengenai transformator, prinsip kerja relai diferensial, serta dasar-dasar simulasi sistem proteksi menggunakan ETAP.
- BAB II Berisi tentang metode penelitian yang digunakan, pengumpulan data, langkah-langkah simulasi ETAP, dan analisis data.
- BAB III Berisi tentang hasil pengukuran di lapangan dan hasil simulasi ETAP, kemudian membahas perbandingan kinerja relai diferensial berdasarkan kedua data tersebut.
- BAB IV Berisi tentang kesimpulan dari pembahasan, menjawab rumusan masalah dan saran terkait penelitian yang dilakukan dan selanjutnya.



BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian



Gambar 14. Lokasi GI Panakkukang
Sumber: Google Maps

Penelitian ini dilakukan di PT. PLN (Persero) GI Panakkukang, Jl. Hertasning Bar, Blk. P, Pandang, Kec. Panakkukang, Kota Makassar, Sulawesi Selatan dan Riset Group Pembangkitan Terdistribusi, Energi, dan Lingkungan, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Waktu penelitian dilakukan pada bulan Juli 2025 sampai dengan bulan Oktober 2025, dengan data pengujian yang dilakukan pada tanggal 10 September 2024.

Tabel 1. Jadwal Penelitian

Kegiatan	Tahun 2025										Tahun 2026
	April	Mei	Juni	Juli	Agustus	September	Oktober	November	Desember	Januari	
Studi Literatur	■	■									
Pembuatan Proposal	■	■									
Seminar Proposal			■								
Pemitungan dan Simulasi Data				■	■	■	■				
Penyelesaian Skripsi							■	■			
Seminar Hasil									■		
Ujian Tutup										■	

2.2 Alat dan Bahan

Pada penelitian ini, peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut:



1) dengan *Software Electrical Transient & Analyzer Program (ETAP)* simulasi sistem tenaga dan analisis relai.

2) data untuk konfigurasi sistem proteksi transformator (data CT, relai, transformator, dan

2.3 Data yang Diperlukan

Data yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi dua jenis, yaitu data primer dan data sekunder:

1. Data Primer.

Data primer yaitu data yang diperoleh langsung dari subjek yang akan diteliti, guna memperoleh data-data yang dibutuhkan untuk mengetahui situasi dan kondisi di objek yang akan diteliti. Data primer dalam penelitian ini diperoleh dengan mengumpulkan data langsung dari lapangan yang berupa pengambilan data lapangan. Data primer yang dipakai untuk mendukung penelitian ini antara lain:

- a. Hasil pengujian relai diferensial di lapangan.
- b. Hasil pengujian transformator di Gardu Induk Panakkukang.

2. Data Sekunder

Data sekunder yang akan dikumpulkan dan digunakan pada penelitian ini yaitu:

- a. *Single Line Diagram* (SLD) Gardu Induk Panakkukang.
- b. Spesifikasi teknis peralatan-peralatan GI Panakkukang, seperti transformator #2 60 MVA, relai diferensial, pemutus tegangan, *current transformer*, dll.

2.4 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian disusun secara sistematis seperti terlihat pada Gambar 14., dan dijelaskan dalam urutan berikut:

1. Studi Literatur.

Mengkaji teori-teori terkait transformator tenaga, prinsip kerja relai diferensial, sistem proteksi, dan perangkat lunak simulasi ETAP. Literatur yang digunakan meliputi buku referensi, jurnal, standar proteksi (IEEE, IEC), dan dokumentasi teknis dari sistem tenaga.

2. Pengumpulan Data Lapangan.

Mendapatkan data aktual dari Gardu Induk Panakkukang. Data yang dikumpulkan, antara lain spesifikasi transformator, *setting* relai diferensial (arus setelan, waktu, dan lainnya), hasil pengujian atau gangguan sebelumnya, data dari *Current Transformer* (CT).

3. Melakukan Perhitungan Matematis.

Setelah memperoleh data, dilakukan perhitungan nilai rasio CT dan parameter relai diferensial. Parameter yang dihitung meliputi arus primer dan sekunder CT, arus diferensial (I_{diff}) dan arus bias (I_{rest}), dan parameter lainnya.

4. Perbandingan Hasil Perhitungan dengan Data Lapangan.

Nilai-nilai parameter yang diperoleh dari hasil perhitungan dibandingkan dengan data pengujian aktual di lapangan untuk mengetahui tingkat keakuratan dan efektivitas kerja relai diferensial.

Perbandingan Data menggunakan ETAP.



Data yang telah diperoleh disimulasikan menggunakan perangkat lunak ETAP. Simulasi dilakukan untuk memodelkan kondisi normal dan gangguan, serta memverifikasi apakah relai diferensial bekerja sebagaimana mestinya.

6. Analisis Kondisi Sistem Proteksi.

Dari hasil simulasi, dilakukan analisis dengan kondisi:

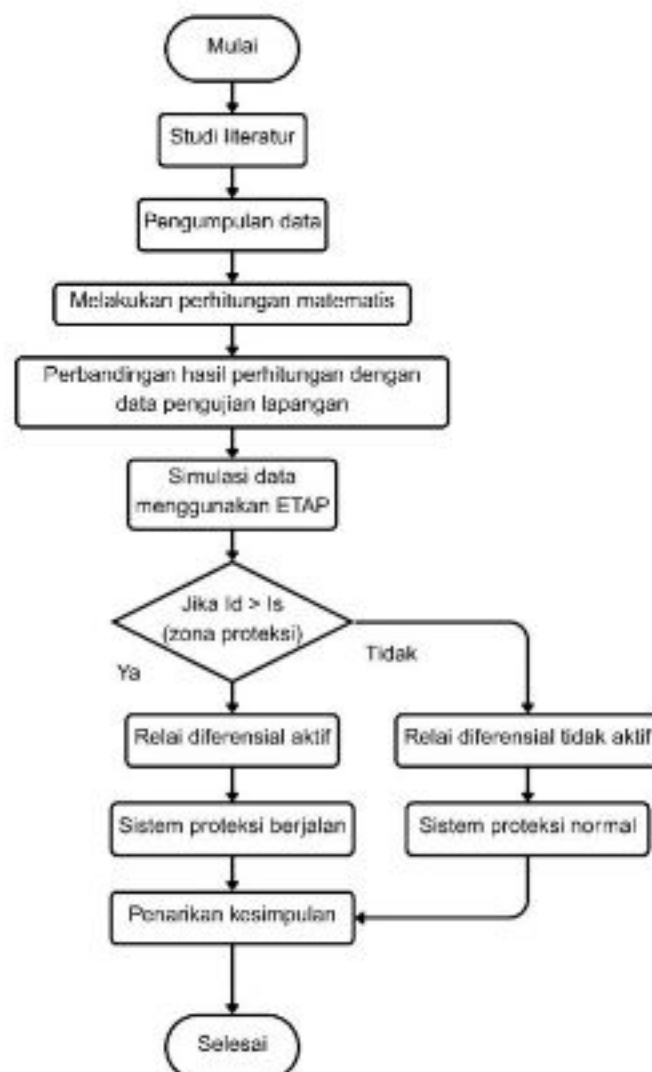
- Jika arus diferensial (I_d) lebih besar dari arus setelan (I_s), maka relai diferensial seharusnya aktif dan sistem proteksi bekerja.
- Jika $I_d \leq I_s$, maka relai tidak aktif dan sistem bekerja dalam kondisi normal.

7. Evaluasi dan Penarikan Kesimpulan.

Setelah memperoleh hasil dari analisis perbandingan antara data lapangan dan simulasi, dilakukan evaluasi terhadap kinerja sistem proteksi, efektivitas setelan relai, dan rekomendasi optimalisasi sistem proteksi. Hasil ini kemudian dirangkum dalam bentuk kesimpulan dan saran.

2.5 Diagram Alir Penelitian

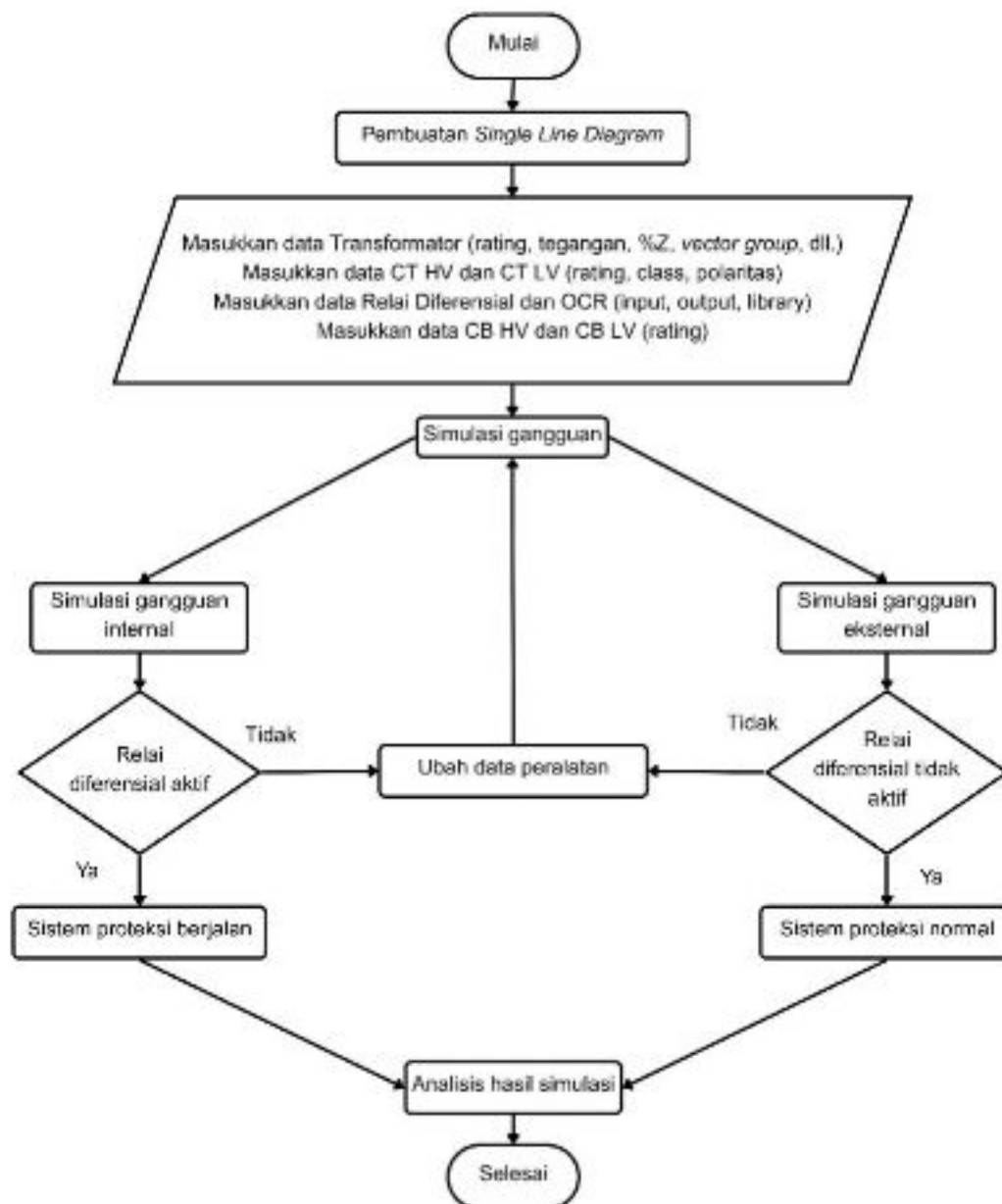
Berikut diagram alir (*flowchart*) metodologi penelitian yang menggambarkan alur kegiatan secara keseluruhan:



Gambar 15. Diagram alir penelitian



Adapun diagram alir simulasi ETAP untuk mengetahui kerja relai diferensial dapat ditunjukkan oleh Gambar 16.



Gambar 16. Diagram alir simulasi ETAP

Simulasi diawali dengan membangun *single line diagram* sistem tenaga di ETAP, yang terdiri dari sumber, transformator, beban, serta pemasangan CT pada sisi primer dan sekunder. Setelah diagram terbentuk, langkah berikutnya adalah memasukkan data transformator secara lengkap, meliputi *rating* daya, tegangan nominal, persentase impedansi, dan konfigurasi *vector group*. Data ini penting karena akan mempengaruhi besarnya arus nominal, sudut fasa, serta perhitungan arus ketika terjadi gangguan.



lanjutnya adalah memasukkan data CT pada kedua sisi transformator, yang harus diisi antara lain rasio CT, kelas akurasi, serta polaritas. Rasio CT sangat menentukan hasil simulasi, karena kesalahan rasio akan

menyebabkan perbedaan arus yang seolah-olah terbaca sebagai arus diferensial. Setelah itu, relai diferensial dipasang pada transformator dengan memilih relai pada *library* sesuai relai yang ada di lapangan.

Setelah semua parameter siap, dilakukan studi hubung singkat untuk dua kondisi, yaitu gangguan internal pada transformator dan gangguan eksternal di luar zona proteksi. Pada saat studi hubung singkat dijalankan di aplikasi ETAP, perangkat lunak akan membaca seluruh model sistem tenaga listrik yang telah dibuat pada *single line diagram*, termasuk sumber, transformator, saluran, beban, CT, dan relai proteksi. Berdasarkan data tersebut, ETAP membentuk jaringan impedansi ekuivalen sistem. Selanjutnya, ETAP menempatkan titik gangguan pada lokasi yang ditentukan dan menghitung arus hubung singkat yang mengalir dengan mempertimbangkan impedansi sistem serta kontribusi dari sumber. Arus yang diperoleh kemudian diproyeksikan ke sisi CT untuk menghitung arus sekunder. Selanjutnya, ETAP menghitung arus diferensial (I_{diff}) dan arus penahan (I_{rest}) dari arus sisi primer dan sekunder, kemudian membandingkannya dengan karakteristik dan *setting* relai yang telah ditentukan. Hasil perbandingan ini digunakan untuk menentukan apakah kondisi gangguan menyebabkan relai bekerja atau tertahan, yang selanjutnya ditampilkan dalam bentuk status trip, nilai arus gangguan, serta waktu yang dibutuhkan untuk kerja.

Pada kondisi tersebut, ETAP akan menampilkan arus gangguan serta bekerja tidaknya relai diferensial terhadap gangguan. Tahap terakhir adalah mengevaluasi hasil simulasi dan mendokumentasikannya sebagai bahan analisis penelitian.

