

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Berdasarkan tema pembahasan penelitian tugas akhir yang berjudul “Analisis *Setting Kerja Differential Relay 87T* pada *Generator Transformer 2.2* PLTGU Tambak Lorok”, terdapat beberapa referensi penelitian yang dapat digunakan sebagai pedoman dan pembanding dalam penyusunan tugas akhir ini, diantaranya:

1. Khoirul Aziz (2018) membuat jurnal mengenai “Simulasi dan Analisis Sistem Proteksi *Differential Relay Main Transformer (87 GT)* pada PLTP Unit 5 (Lima) PT Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang dengan Software Etap 12.6”. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil bahwa perbandingan nilai *setting* secara perhitungan dengan menggunakan rumus dan data aktual memiliki perbedaan yang sangat tipis. Sedangkan ketika dilakukan simulasi didapatkan hasil bahwa kerja dari *relay* ini masih tergolong normal atau dapat bekerja dengan baik sesuai dengan *setting* yang ada. Sehingga untuk mendapatkan nilai yang akurat serta kemudahan pembacaan ketika terjadi gangguan perlu adanya *setting* ulang sesuai dari data perhitungan rumus untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.
2. Syukriadin, Syahrizal, dan Cut Rizky Nakhrisya (2011) membuat jurnal yang membahas tentang “Analisis Proteksi *Relay Differential* Terhadap Gangguan Internal dan Eksternal Transformator Menggunakan PSCAD/EMTDC”. Didalam jurnal tersebut penulis membahas mengenai kondisi kerja dari relai diferensial terhadap kondisi transformator ketika terjadi suatu gangguan. Pada penelitian tersebut dipaparkan hasil ketika relai berada dikondisi normal, gangguan internal, dan juga gangguan eksternal. Dari pengujian yang dilakukan maka dihasilkan kondisi dimana relai bekerja ketika gangguan internal muncul baik pada sisi primer maupun sekundernya. Kerja relai ditunjukkan dengan memberikan isyarat *trip*

kepada PMT 1 maupun PMT 2. Sebaliknya ketika relai mendapati kondisi gangguan eksternal maka relai akan tetap pada kondisi normalnya karena gangguan tersebut tidak akan membahayakan daerah yang diproteksi atau dalam hal ini adalah transformator.

3. Widi Agung Prasetyo (2018) membuat “Analisis *Rele* Proteksi Diferensial (87B) pada Busbar di Switchyard 150 Kv Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Unit 4 PT Pertamina Geothermal Energi Area Kamojang”. Pada penelitian tersebut dipaparkan kondisi ketika terdapat gangguan kerja busbar 150 Kv yang dapat mempengaruhi kerja dari relai 87B. Dari data yang ada juga dilakukan simulasi menggunakan program ETAP 12.6.0 dan juga perhitungan rumus manual. Hasil dari pengujian yang dilakukan ialah kondisi relai berada diposisi tidak bekerja, hal tersebut dikarenakan *short circuit* yang ada berada pada daerah luar pengamanan dari relai. Karena kondisi tersebut maka relai tidak akan mengintruksikan *circuit breaker* ataupun PMT untuk memutus jaringan listrik.
4. Ananta Setia Dewangga (2015) memaparkan mengenai penelitian yang berjudul “Studi Koordinasi Proteksi *Rele* Arus Lebih, Diferensial dan *Ground Fault* pada PT. Linde Indonesia, Cilegon”. Dari penelitian tersebut diambil beberapa data uji terhadap komponen proteksi baik dari segi prinsip kerja dan juga keandalannya. Hasilnya adalah didapatkan beberapa relai mengalami kesalahan baca atau kesalahan *setting*, hal tersebut ditunjukkan dengan adanya ketidak sesuaian nilai *time delay* dengan standar IEEE 242 *grading time*. Kesalahan tersebut juga muncul seperti adanya ketidak tepatan penentuan arus *pick up*, % *slope*, dan juga ketidak sesuaian terhadap nilai minimum *setting* yang telah diatur. Dampaknya ialah sistem kerja dari relai menjadi tidak akurat dan handal yang bisa menyebabkan ancaman terhadap daerah sistem yang diproteksi.
5. Rizkaurum Nur Fadliyah (2017) yang memiliki judul penelitian “Evaluasi Kegagalan *Setting Rele* Diferensial pada Bus 18 Kv Di Sistem Kelistrikan

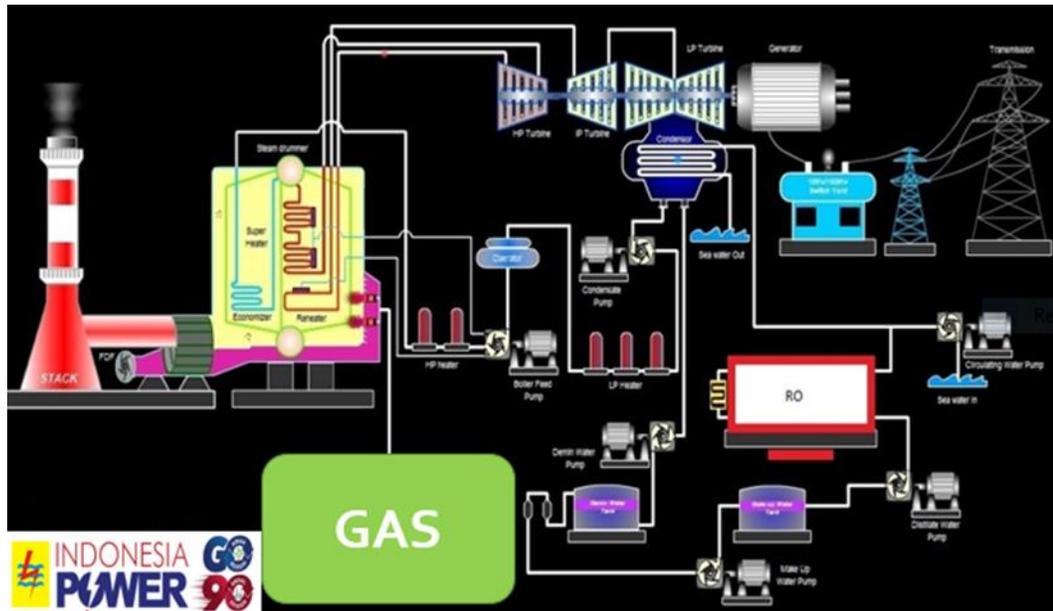
PLTU UP Paiton Unit 1”. Pada penelitian ini membahas mengenai relai 87B yang bekerja pada busbar dengan dibatasi oleh CT yang terpasang pada sisi *incoming* dan *outgoing*. Dari perhitungan *setting* yang telah dilakukan didapatkan hasil bahwa nilai *setting* relai ini mengalami kesalahan dimana relai bekerja ketika terjadi gangguan eksternal yang seharusnya tidak membahayakan daerah pengamanan relai. Relai seharusnya tidak akan bekerja ketika kondisi normal dan ketika kondisi gangguan diluar daerah pengamanan, sehingga relai hanya akan bekerja ketika terjadi gangguan yang nilai I_{diff} dan *slope* nya melewati *setting* yang telah diatur.

6. Muhammad Rizki Muharam (2018) yang memiliki judul penelitian “Analisis Performa Relay Differensial Transformator pada Gardu Induk Cilegon Lama”. Pada penelitian ini dilakukan pembahasan mengenai relai diferensial 87T yang terpasang pada transformator 1 GI Cilegon Lama 56 MVA. Dari pengujian yang telah dilakukan baik menggunakan rumus teori maupun software simulasi 87T by Sumandari didapatkan nilai bahwa hasil *setting* berdasarkan perhitungan teori tidak dapat diterapkan karena dapat menyebabkan seringnya *trip* dan menghambat proses distribusi gardu. *Setting* yang digunakan dilapangan sesuai dengan standar yang direkomendasikan oleh PLN yaitu *slope* 1 sebesar 30 % dan *slope* 2 sebesar 80 %.
7. Muhammad Arfianda (2019) membuat penelitian dengan judul “Analisa Penguasaan Rele Diferensial Sebagai Proteksi pada Transformator Daya Gardu Induk Paya Pasir (PT. PLN PERSERO)”. Dalam penjelasannya dibahas mengenai kerja relai diferensial pada transformator daya yang mana digunakan analisis menggunakan rumus teori yang ada. Hasilnya adalah berdasarkan rumus teori memiliki nilai arus *setting* yang lebih rendah dari data lapangan. Hal tersebut menyebabkan relai akan bekerja sesuai standar *setting* lapangan yang lebih tinggi.

8. Yuniarto, Arkhan Subari, dan Dinda Hapsari Kusumastuti (2015) yang memiliki judul “*Setting Relay Differensial pada Gardu Induk Kaliwungu Guna Menghindari Kegagalan Proteksi*”. Dalam penjelasannya didapatkan bahwa error mismatch yang ada pada trafo arus Gardu Induk Kaliwungu masih berada dibawah batas maksimal yaitu 5%. Arus diferensial yang telah dihitung juga memiliki nilai yang sama dengan data lapangan yang ada, hal tersebut menjadikan kerja relai memiliki kondisi yang baik sesuai data perhitungan dan juga data lapangan.
9. Nor Ria Fitriani (2017) yang melakukan penelitian berjudul “*Analisis Penggunaan Rele Diferensial Sebagai Proteksi pada Transformator Daya 16 MVA Di Gardu Induk Jajar*”. Hasil dari penelitiannya didapatkan relai diferensial memiliki area kerja pada daerah pengamanan trafo tenaga dengan hasil perhitungan arus *setting* sebesar 0,3 Ampere. Dengan kondisi perhitungan yang baik maka diharapkan relai diferensial dapat bekerja secara optimal sesuai dengan fungsinya.
10. Ulul Fauzani Rohman (2017) dengan hasil penelitiannya yang berjudul “*Analisis Proteksi Rele Diferensial pada Trafo Gardu Induk Konsumen Tegangan Tinggi Di Gardu Induk Semen Merah Putih Rembang*”. Setelah dilakukan perhitungan maka didapatkan hasil yang baik dimana relai dapat bekerja sesuai dengan fungsinya. Arus *setting* yang diperoleh memiliki nilai sesuai dengan standar sehingga relai dikatakan masih dalam kondisi layak.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Siklus Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)



Gambar 2. 1 Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pada pembangkitan Listrik Tenaga Uap atau yang biasa disebut dengan PLTU merupakan salah satu pembangkit listrik yang umum dijumpai di Indonesia. Sesuai namanya pembangkit ini bekerja dengan sumber tenaga uap sebagai tenaga produksinya. Pembangkit jenis ini menggunakan uap air sebagai penggerak turbin dengan memanfaatkan beberapa bahan bakar seperti, minyak, gas, dan juga batubara. Pada umumnya pembangkit jenis ini menggunakan bahan bakar batu bara sebagai bahan bakar untuk menjadikan air sebagai uap pemutar turbin. Untuk membangkitkan listrik diperlukan beberapa tahap yang cukup panjang mulai dari penyiapan bahan bakar hingga dihasilkannya listrik bertegangan tinggi.

1. Proses Persiapan Bahan Bakar

Siklus jalannya proses pembangkitan dimulai dengan pendistribusian bahan bakar utama (batubara) menggunakan kapal kargo ataupun kapal tongkang muatan besar yang membawa muatan batubara

untuk berlabuh ke tepi laut. Hal ini lah yang menyebabkan PLTU harus dibangun dekat dengan tepian laut guna mempermudah proses pengambilan bahan bakar. Setelah kapal berhasil berlabuh di dermaga maka muatan batubara akan dipindahkan menggunakan alat raksasa yang bernama *shape unloader*, alat ini akan memindahkan muatan batubara dalam kapal ke bagian hopper atau alat penyaring batubara. Dari hopper batubara akan diangkut dengan alat berbentuk ban berjalan yang disebut dengan *conveyor*, kemudian batubara akan diteruskan menuju tempat penempatan sementara (*coal bunker*). Dari *bunker* batubara dibawa ke *coal feeder* untuk dilakukan penggilingan bongkahan menjadi serbuk halus dan lembut dengan ukuran *mesh* 200 agar lebih mudah dalam proses pembakaran.

Serbuk batubara tersebut kemudian dimasukkan dalam alat pembakaran atau *boiler* untuk dicampurkan dengan udara panas yang di dapat dari *Force Draft Fan (FD Fan)*. Udara diproduksi oleh *Force Draft Fan (FD Fan)* dengan mengambil udara luar untuk membantu proses pembakaran di *boiler*. Dalam perjalananya menuju *boiler*, udara tersebut dinaikkan suhunya oleh *air heater* atau pemanas udara agar proses pembakaran bisa terjadi dengan mudah di *boiler*. Syarat terjadinya api pembakaran adalah adanya segitiga api yang meliputi bahan bakar, udara (O_2), dan pemantik api yang biasanya menggunakan busi sebagai *start* awal pembakaran. Busi ini akan bekerja hanya dalam hitungan detik dan akan mati ketika pembakaran sudah berlangsung.

Pada PLTU Tambak Lorok baik blok satu, dua, maupun blok tiga saat ini telah menggunakan bahan bakar jenis gas dimana sebelumnya juga menggunakan bahan bakar jenis *Marine Fuel Oil* atau yang biasa disebut dengan MFO. Penggunaan bahan bakar gas ini tentunya memiliki tujuan yang mana bahan bakar jenis gas dinilai lebih efisien, murah, memiliki kinerja yang baik, dan juga mudah dalam pengoperasiannya. Lain halnya

dengan MFO yang memiliki sifat seperti lumpur sehingga pada beberapa kasus sering menimbulkan sumbatan pada pipa bahan bakar.

Gas ini didapatkan dari PT Kalimantan Jawa Gas (PT KJG) yang bekerjasama dengan PT Indonesia Power UP Semarang selaku konsumen. Gas didistribusikan melalui pipa bawah tanah dari sumber gas yang berada di daerah Cepu, Kabupaten Blora, Provinsi Jawa Tengah.

2. Proses Produksi

Proses produksi listrik PLTU dimulai dengan proses suplai air dimana air demin yang sudah disimpan pada *hotwell* yang letaknya berada dibawah kondensor dan berfungsi sebagai tempat penampungan air demin dan juga penampung air hasil kondensasi uap bekas di dalam kondensor sebagai pemasok utama sistem air kondensat. Dari *hotwell* air menuju *condensate pump* atau pompa kondensor untuk kemudian dipompa menuju *low pressure heater (LP Heater)* yang berfungsi sebagai penghangat tahap awal proses produksi.

Pada umumnya peletakan *hotwell* dan juga *condensate pump* terletak pada lantai paling dasar. Selanjutnya air dialirkan menuju *deaerator* dan disini air akan mengalami proses pelepasan ion-ion mineral yang masih tersisa di air dan yang tidak diperlukan seperti oksigen (O_2) dan sebagainya. Dengan kata lain *deaerator* ini berguna untuk menghilangkan gelembung (*bubble*) yang biasanya terdapat pada permukaan air. Agar proses pelepasan ini dapat berjalan dengan baik maka temperatur air haruslah memenuhi temperatur suhu yang disyaratkan. Oleh sebab itu selama perjalanan air mengalami beberapa proses pemanasan yang dilakukan oleh *low pressure heater (LP Heater)*.

Penempatan *deaerator* berada dibagian lantai atas untuk kemudian mengalirkan air turun kembali ke lantai dasar. Sesampainya di dasar, air langsung dipompakan kembali oleh *Boiler Feed Pump (BFP)* atau bisa

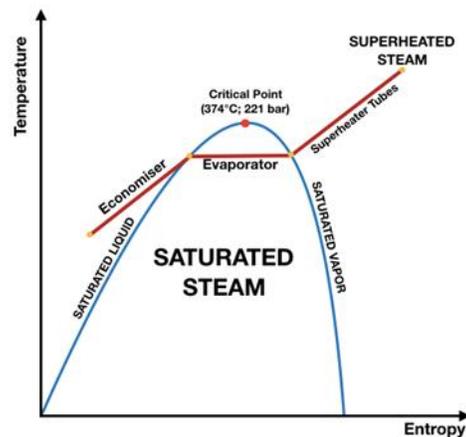
dikatakan pompa air pengisi yang menuju ke *boiler* untuk dimasak. *Boiler* merupakan alat yang cukup besar seperti *drum* dimana *drum* ini menjadi tempat proses pemasakan air dengan tingkat temperatur suhu yang sangat tinggi yaitu ratusan derajat celcius. Salah satu alasan diletakkannya *deaerator* dibagian lantai atas adalah untuk terciptanya air bertekanan tinggi akibat meluncurnya air dari ketinggian. Kemudian air yang dipompakan oleh BFP haruslah air yang telah bertekanan tinggi agar uap yang dihasilkan juga merupakan uap air yang bertekanan tinggi.

Sebelum masuk ke proses pemanasan yang lebih lanjut, air yang sebelumnya telah mengalami proses pemanasan awal (*LP Heater*) akan masuk ke dalam proses *High Pressure Heater (HP Heater)* dimana pada proses ini air telah panas dan menjadi uap. Akan tetapi uap yang dihasilkan pada *HP Heater* belum dapat digunakan untuk memutar turbin uap, sebab uap yang dihasilkan masih berupa uap jenuh atau merupakan uap yang masih memiliki kadar air didalamnya. Uap jenuh ini dapat membahayakan turbin karena dengan uap yang masih terkandung air maka dapat mengikis permukaan atau sudu-sudu turbin yang mana turbin ini berputar sangat cepat yaitu 3000 rpm sesuai dengan frekuensi kelistrikan di Indonesia yaitu 50 Hz.

Untuk dapat menghilangkan kadar air tersebut maka uap jenuh yang dihasilkan *HP Heater* akan dimasukkan ke proses pemanasan paling tinggi yaitu *Super Heater* pada area *boiler* sehingga uap yang dihasilkan merupakan uap kering dengan kadar uap sempurna tanpa air. Uap kering yang dihasilkan *super heater* inilah yang akan digunakan sebagai pemutar turbin uap.

Namun, sebelum masuk pada tahap *super heater* uap air dari proses *HP Heater* akan menuju *boiler* pada tahap *economizer* terlebih dahulu. Disini uap air akan dipanaskan untuk menuju pada *tanki* atau *drum* guna

dilakukan pemisahan antara uap dengan cairan dengan cara melanjutkan pada proses *superheater* agar menjadi uap kering.



Gambar 2. 2 Kurva Diagram Kerja *Superheater*

Diagram diatas merupakan diagram temperatur-entropi yang memperlihatkan bagaimana *boiler super heater* bekerja. Fungsi dari adanya *economizer* ialah kondisi dimana air hanya mengalami adanya kenaikan temperatur suhu tanpa adanya perubahan fase. Sedangkan adanya *evaporator* ialah guna membentuk uap-uap yang ada. Dan yang terakhir ialah *super heater* dimana kondisi di sini uap benar-benar mengalami pemanasan tingkat akhir yang menyebabkan uap berada pada fase gas tanpa adanya kelembaban seperti sebelumnya.

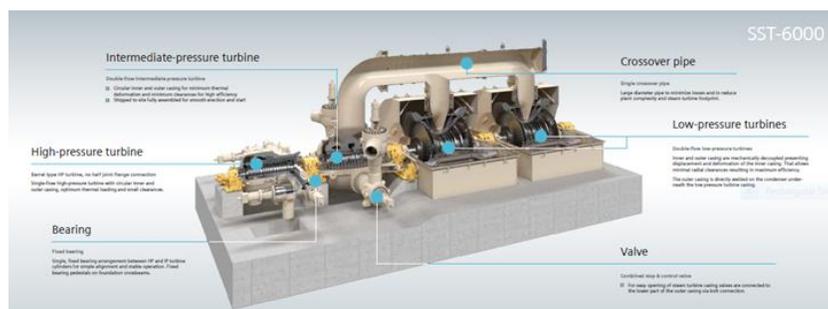
Ketika turbin uap telah berhasil berputar maka secara otomatis generator juga akan mengikuti putaran dari turbin karena letak turbin dengan generator adalah satu poros lurus. Putaran pada poros generator inilah yang akan menimbulkan energi listrik untuk disalurkan ke *transformator*.

Pada generator terdapat sebuah medan magnet raksasa yang mana perputaran poros generator menghasilkan beda potensial pada magnet tersebut. Beda potensial inilah yang merupakan cikal bakal timbulnya

energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan oleh generator selanjutnya dikirim dan diteruskan ke *transformator* atau *generator transformer* (GT) untuk dilakukan perubahan tegangan. Tegangan yang dihasilkan oleh generator bervariasi seperti, 11 kv hingga 23 kv. Namun, untuk di PLTGU Blok 2 generator menghasilkan tegangan sebesar 11,5 Kv yang mana tegangan generator ini selanjutnya akan dinaikkan oleh GT sebelum masuk ke sistem transmisi. Sistem transmisi yang banyak digunakan di Indonesia pada umumnya adalah 150 kv atau 500 kv. *Generator transformer* yang ada ialah GT 11,5 / 150 Kv atau bisa dikatakan trafo *step up* 11,5 Kv ke 150 Kv.

Setelah dilakukan proses penaikan tegangan menjadi tegangan transmisi maka selanjutnya arus listrik akan masuk ke dalam *switch yard* atau gardu induk pembangkit. Di sini arus listrik akan dipisahkan sesuai dengan kebutuhan dan jalur yang akan dilewati menuju transmisi. *Switch yard* juga berguna sebagai pengaman karena didalamnya terdapat beberapa komponen pengaman seperti *Disconnecting switch* (DS) dan juga *breaker* jika sewaktu-waktu terjadi gangguan yang dapat merusak komponen utama pembangkitan.

Pada PLTU terdapat tiga buah turbin pembangkit, turbin tersebut meliputi *High Pressure Turbine* (HP Turbine), *Intermediate Pressure Turbine* (IP Turbine), dan yang terakhir adalah *Low Pressure Turbine* (LP Turbine).

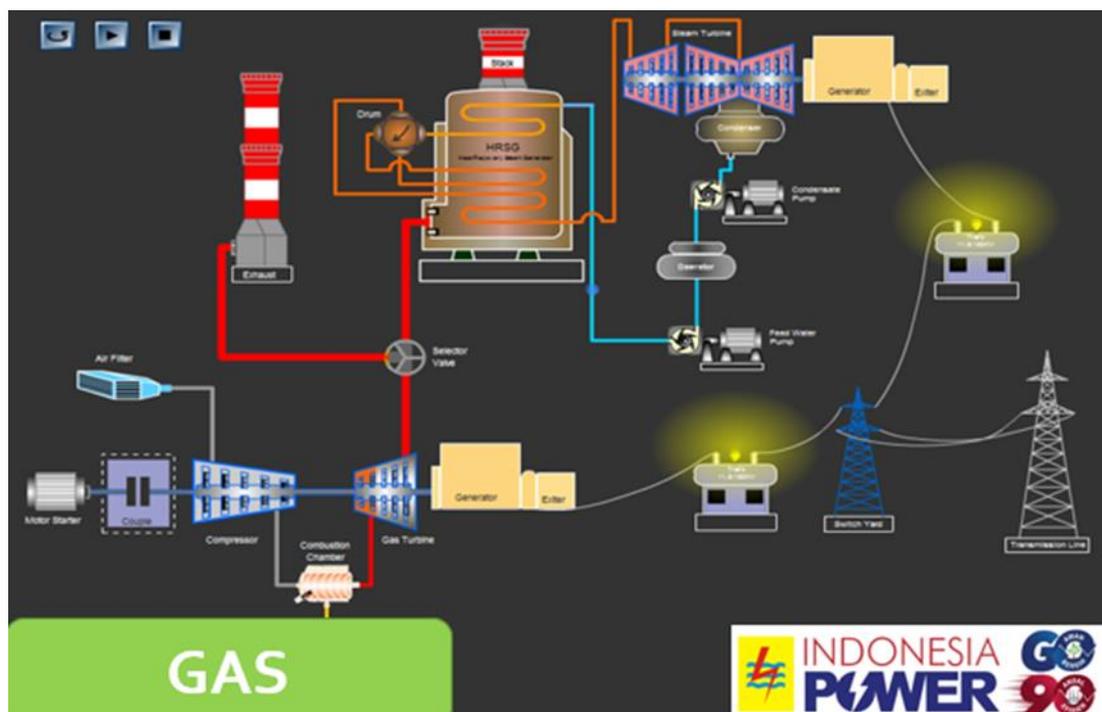


Gambar 2. 3 Steam Turbine PLTU

Uap kering yang keluar dari *boiler* akan langsung masuk ke turbin pertama yaitu *HP Turbine* dengan tekanan paling tinggi, kemudian uap akan keluar dari turbin pertama untuk kembali masuk ke *boiler* guna dilakukan pemanasan ulang atau yang biasa disebut *re-heater*. Pada proses ini uap akan dipanaskan kembali dan selanjutnya masuk ke turbin tahap dua yaitu *IP Turbine* yang mana turbin ini akan tersambung ke turbin tahap tiga yaitu *LP Turbine* melalui pipa tanpa ada proses *re-heater* lagi.

Selanjutnya uap kering yang telah digunakan untuk memutar turbin akan turun kembali ke lantai dasar, uap tersebut mengalami proses kondensasi di dalam kondensor sehingga uap panas akan berubah wujud kembali ke asalnya berupa air dan masuk kedalam *hotwell*.

2.2.2 Siklus Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)



Gambar 2. 4 Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)

PLTGU merupakan salah satu pembangkit utama yang ada dan selalu diandalkan oleh PT Indonesia Power UP Semarang. Pembangkit jenis ini menggunakan sistem *Compressed Natural Gas* sebagai bahan bakar utama guna memutar sudu-sudu turbin. Seperti namanya, pembangkit ini merupakan penggabungan jenis pembangkit listrik tenaga uap dan juga tenaga gas. Untuk pengoperasiannya sendiri terdapat dua siklus kerja yang digunakan, siklus tersebut adalah:

1. *Open Cycle*

Pada siklus ini gas sisa dari pembakaran di turbin gas akan langsung dibuang ke udara melalui cerobong pertama yang disebut dengan *exhaust stack*. Dengan demikian fungsi dari pembangkit ini berubah menjadi pembangkit listrik bertenaga gas saja atau PLTG. Kondisi ini berlaku jika kebutuhan listrik yang diperlukan hanya sedikit sehingga gas sisa dari turbin gas tidak diperlukan sebagai bahan bakar pada *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)*.

2. *Combined Cycle*

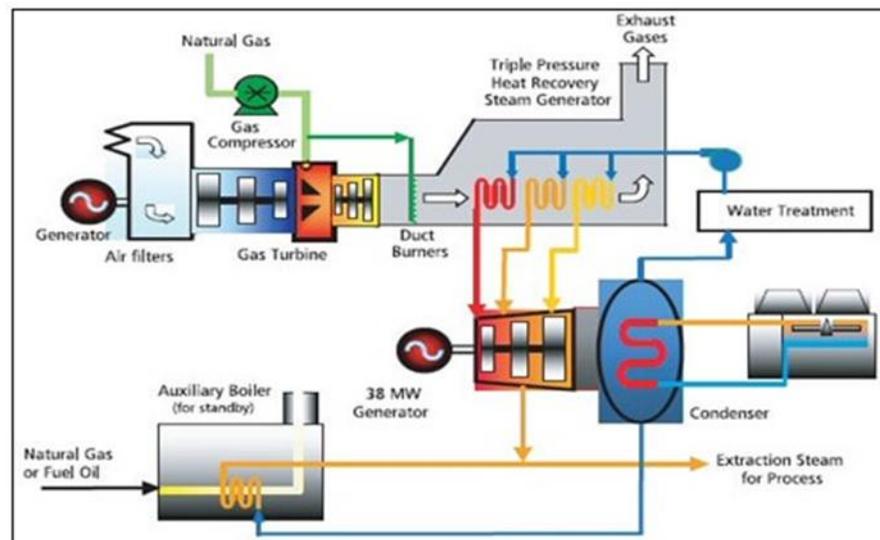
Proses kedua ialah *combined cycle*, proses ini terjadi dengan melakukan penutupan cerobong pada cerobong pertama (*exhaust stack*) agar gas sisa pembakaran pada turbin gas dapat diteruskan ke *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)* melalui *diffuser* guna melakukan proses pembakaran (memasak) air. Gas sisa dari proses memasak air di HRSG akan dibuang melalui *exhaust stack* yang ada di atasnya. Sehingga HRSG dapat menghasilkan uap panas untuk memutar turbin uap.

Penyusunan konfigurasi pada PLTGU memiliki beberapa macam urutan dan jumlah yang ada. Setiap konfigurasi tentunya memiliki kelebihan dan kekurangannya baik dari segi biaya, hasil, dan juga keandalan. Berikut beberapa macam konfigurasi PLTGU yang umum dijumpai pada pembangkit listrik yang ada di Indonesia:

1. Konfigurasi 1-1-1

Sesuai namanya konfigurasi PLTGU jenis ini hanya menggunakan satu buah turbin gas, satu buah HRSG, dan satu buah STG yang menjadikan konfigurasi jenis ini adalah jenis yang paling sederhana. Pada beberapa pembangkit bahkan memiliki penyusunan yang hanya terdapat satu buah generator saja. Jenis penyusunan ini biasa disebut dengan *single shaft combined cycle*. Penyusunannya dapat dengan cara meletakkan generator diantara turbin gas dan turbin uap, atau bisa juga dengan memposisikan turbin uap berada diantara turbin gas dan generator.

Kelebihan yang didapat dari jenis konfigurasi ini ialah cepatnya proses produksi listrik karena siklus yang pendek dan juga kecilnya konsumsi air, bahan bakar, serta listrik pemakaian sendiri (*work power*).

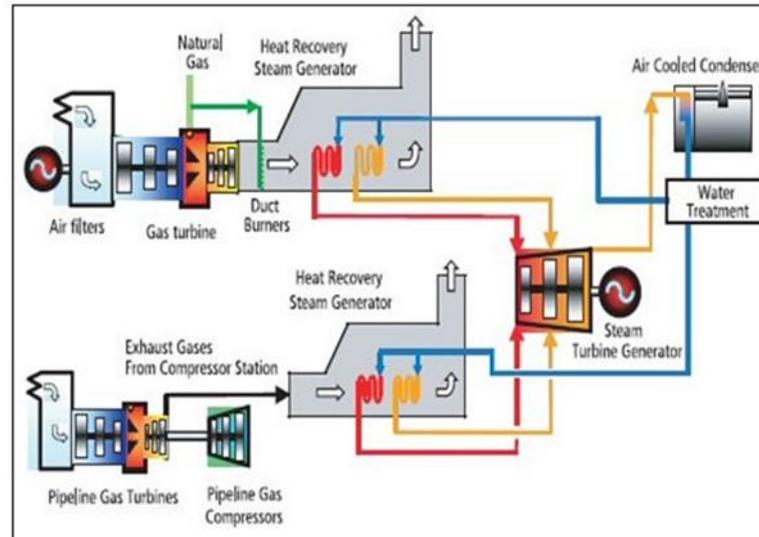


Gambar 2. 5 Diagram Konfigurasi PLTGU 1-1-1

2. Konfigurasi 2-2-1

Konfigurasi kedua ini merupakan penambahan dari konfigurasi pertama dimana jenis ini memiliki dua buah gas turbin dan juga dua buah HRSG. Keuntungan yang didapat dari jenis konfigurasi ini ialah jika terjadi

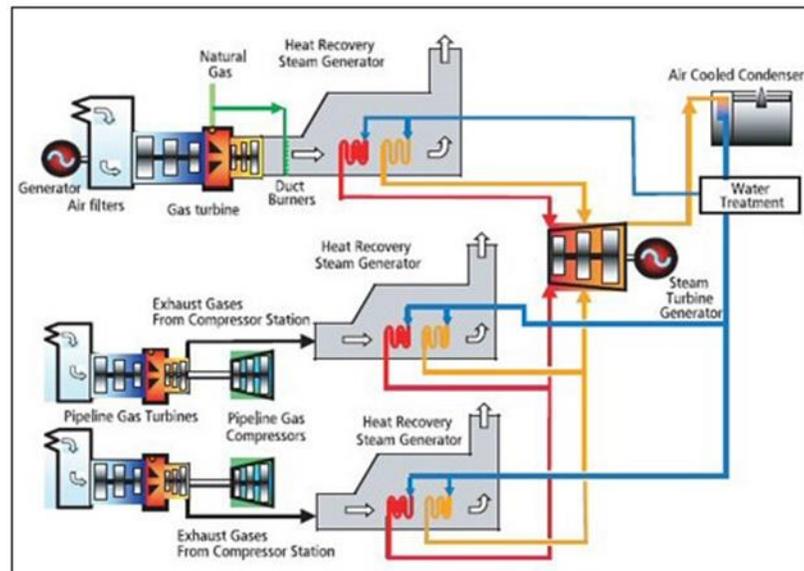
gangguan pada salah satu gas turbin maka gas turbin lain dapat dijadikan alternatif. Sedangkan ketika salah satu HRSG terganggu maka salah satu siklus dapat dilakukan untuk *open cycle*.



Gambar 2. 6 Diagram Konfigurasi PLTGU 2-2-1

3. Konfigurasi 3-3-1

Jenis konfigurasi PLTGU yang terakhir adalah jenis konfigurasi yang paling unggul dalam segi pengoperasian yang *flexible* dan juga memiliki variasi pengoperasian paling banyak. Disisi lain jenis konfigurasi ini juga dapat menghasilkan output yang paling besar karena banyaknya turbin yang dapat dijalankan baik dengan sistem *open cycle* maupun *combined cycle*.



Gambar 2. 7 Diagram Konfigurasi PLTGU 3-3-1

Dari beberapa konfigurasi yang ada, saat ini PT Indonesia Power UP Semarang hanya menggunakan konfigurasi jenis 3-3-1 untuk PLTGU baik blok 1 maupun 2. Hal tersebut tentunya menjadi sebuah pertimbangan untuk PT Indonesia Power UP Semarang agar dapat memberikan pelayanan terbaiknya. Walaupun jenis konfigurasi memiliki penyusunan yang berbeda-beda, tetapi secara umum didalamnya memiliki komponen utama yang sama.

2.2.3 Sistem Proteksi

Pada intinya suatu sistem tenaga listrik merupakan satu kesatuan dari pembangkitan, transmisi, dan distribusi yang mana tugasnya adalah sebagai pembangkit, mentransmisikan, dan juga pendistribusian tenaga listrik guna dapat dikonsumsi oleh masyarakat luas. Sistem proteksi adalah suatu pengaman yang mana tugasnya ialah melindungi bagian-bagian atau zona yang memiliki potensi adanya suatu gangguan ataupun memiliki potensi bahaya. Sistem proteksi ini memiliki tugas dan peranannya masing-masing yang akan disesuaikan dengan

kebutuhan, zona, dan seberapa besar potensi timbulnya suatu gangguan pada daerah pengamanan.

Pembangkitan tenaga listrik yang memiliki kategori baik ialah pembangkit yang aman dengan risiko kerugian seminimal mungkin baik pada daerah lingkup manusia maupun perangkat pembangkitan itu sendiri. Beberapa upayanya dapat dilakukan dengan memaksimalkan penggunaan sumber energi sebaik mungkin, meningkatkan nilai efisiensi energi, dan yang terakhir pembangkit haruslah memiliki keandalan yang mumpuni. Akan tetapi, sebaik apapun *design* perencanaan yang telah dibuat sejak awal dengan berbagai pertimbangan yang matang tetaplah tidak dapat mengimbangi risiko ataupun potensi adanya suatu gangguan yang mungkin akan timbul setiap saat tanpa diduga-duga. Pada setiap bagian dari pembangkit listrik memiliki potensi yang sama akan adanya suatu gangguan, sehingga gangguan ini tidak dapat dihindari walaupun risiko yang dihasilkan tidaklah fatal.

2.2.4 Standar Persyaratan Sistem Proteksi

Sistem proteksi utama merupakan sistem proteksi yang mana fungsinya sangat vital guna mengamankan daerah-daerah utama pada suatu pembangkit listrik. Proteksi ini akan bekerja pada saat kondisi-kondisi kurang normal, dimana pengamanan ini memiliki ciri khusus, yaitu:

1. Kecepatan kerja yang relatif lebih cepat berdasarkan waktu.
2. Tidak memiliki ketergantungan terhadap kerja relai yang lain.
3. Daerah kerja atau daerah pengamanan memiliki dua buah *current transformer* yang bekerja di sisi satu dengan sisi lainnya.
4. Tidak dapat dirangkai secara paralel dengan proteksi yang lain.

Mengingat fungsinya yang sangat penting, sistem proteksi haruslah memiliki beberapa kemampuan yang wajib dimiliki. Hal tersebut sangat berguna dalam menunjang kerja dari proteksi itu sendiri. Berikut beberapa persyaratan wajib yang harus dimiliki oleh sistem proteksi:

1. Keterandalan (*reliability*)

Sistem proteksi yang banyak digunakan pada setiap komponen haruslah bekerja ketika berada dalam kondisi gangguan dan tidak akan bekerja pada saat kondisi normal. Sistem ini harus dapat mengenali gangguan yang terjadi dan jangan sampai tidak dapat mengenali ketika terdapat gangguan yang mengancam alat yang diproteksi. Disisi lain juga harus dapat membedakan antara musuh sebenarnya dan juga musuh yang seharusnya tidak merupakan kapasitas dari kerja sistem itu sendiri. Sebagai contoh, relai dikatakan tidak andal ketika kondisi dimana keadaan normal tanpa gangguan tetapi relai melakukan intruksi *trip* kepada PMT. Relai termasuk andal jika memiliki *range* keandalan sebesar 90% hingga 99% atau mendekati nilai sempurna 100%.

2. Selektivitas (*selectivity*)

Pada sistem proteksi keamanan suatu alat harus memiliki daya beda untuk memilih keadaan-keadaan yang terjadi pada saat kondisi sistem kelistrikan berjalan. Sistem harus bisa mendeteksi adanya gangguan secara tepat dan cepat untuk memisahkan sebuah jalur yang terkena gangguan dengan jalur yang normal. Jangan sampai hanya diam tanpa adanya tindakan pemutusan arus sebagai langkah proteksi. *Tripping* atau pemutusan jaringan akan dilakukan sesuai dengan *setting* yang telah ditentukan pada saat perancangan.

3. Sensitivitas (*sensitivity*)

Sistem keamanan yang digunakan harus memiliki kepekaan yang tinggi terhadap gangguan sesuai dengan *rating* tegangan atau arus yang ditentukan, baik dalam satuan persentase maupun nominal berdasarkan

kurva kerja. Cara suatu alat proteksi untuk dapat menentukan musuh yang sebenarnya juga merupakan bagian penting yang harus dimiliki.

4. Kecepatan Kerja (*Speed*)

Alat pengaman relai yang digunakan harus memiliki kecepatan kerja yang mumpuni setelah mendeteksi adanya tanda-tanda gangguan yang mengancam. Kecepatan inilah yang nantinya akan menentukan kualitas, kuantitas, keseimbangan kerja, serta keamanan dalam pelayanan. Namun, kecepatan yang diterapkan tidak boleh terlalu cepat dan terlalu lambat agar sistem penyaluran listrik tetap stabil sesuai dengan prinsip kerjanya. Seperti halnya sebuah gangguan pada daerah pengamanan sering kali terjadi masalah yang bersifat sementara, sehingga kecepatan kerja perlu diperlambat atau dalam hal ini biasa disebut dengan istilah *time delay*.

5. Ekonomis

Sistem proteksi yang dipergunakan harus memiliki nilai yang ekonomis atau wajar sebanding dengan kinerjanya seimbang dengan pemakaian yang sederhana tetapi tetap efisien. Jangan sampai nilai dari alat proteksi hanya akan membebani sistem pembangkitan dari segi pembiayaan.

2.2.5 Penyebab Gangguan pada Daerah Pengamanan

Pada suatu pembangkit, sudah sangat wajar jika sewaktu-waktu dapat timbul suatu gangguan yang dapat merugikan baik dari segi biaya, produksi, maupun efek langsung pada konsumen. Dari beberapa gangguan yang sudah pernah terjadi, terdapat beberapa masalah atau penyebab yang dinilai dapat memicu suatu gangguan. Hal tersebut tentunya dapat memicu timbulnya *short circuit* atau hubung singkat pada jaringan. Sumber masalah tersebut diantaranya:

1. Kelalaian manusia

Faktor kelalaian manusia merupakan suatu gangguan yang mungkin sering terjadi, hal tersebut menyangkut pada standar keamanan yang telah ditetapkan oleh perusahaan. Walaupun sudah terdapat standar yang jelas, akan tetapi kelalaian tetap dapat timbul akibat kurang adanya ketelitian. Beberapa masalah yang akan timbul akibat faktor kelalaian manusia seperti, kesalahan kalibrasi, kesalahan penyambungan suatu rangkaian, dan ketidak telitian dalam pengecekan mutu suatu komponen.

2. Faktor internal

Internal disini dimaksudkan pada daerah itu sendiri, dalam hal ini adalah relai. Kasus yang biasa dijumpai adalah dilihat dari kondisi fisik relai, kondisi usia pakai, kondisi koil pada relai, dan masih banyak lagi. Kondisi-kondisi tersebut tentu akan berpengaruh pada sensitivitas kerja dari suatu relai dalam melakukan tugasnya sebagai pengaman. Sering kali kondisi ini menyebabkan kesalahan dalam pembacaan atau kesalahan dalam memberikan sebuah intruksi.

3. Faktor Eksternal

Terakhir ialah kondisi faktor eksternal yang mana merujuk pada kondisi sekitar daerah pengamanan. Kondisi diluar daerah pengamanan tentu juga dapat mempengaruhi kerja dari komponen yang ada. Gangguan tersebut timbul akibat keadaan cuaca, petir, bencana alam, genangan air disekeliling, dan juga kekuatan angin yang meungkin dapat berdampak langsung kepada komponen kelistrikan yang terpasang. Selain dari faktor alam yang sudah disebutkan, terdapat juga gangguan yang disebabkan oleh makhluk hidup. Tumbuhan adalah makhluk hidup yang tidak seharusnya tumbuh disekeliling pembangkit, ada juga binatang liar seperti tikus, burung, dan juga tupai yang mungkin dapat merusak isolasi pada kabel pembangkit.

2.2.6 Sistem Proteksi pada Generator Transformer

Transformator atau juga sering disebut dengan istilah “trafo” merupakan salah satu komponen utama pada sistem tenaga listrik baik pada bagian transmisi maupun distribusi kelistrikan. Perannya berada pada sumber pembangkitan (*power plant*), gardu induk (*switch yard*), hingga pada daerah pendistribusian ke pelanggan. Generator Transformer (GT) atau Transformator Generator merupakan kelompok dari transformator tenaga yang rangkaiannya terhubung langsung ke panel keluaran (*output*) generator. Sebuah transformator memiliki kemampuan untuk melakukan perubahan arus dan tegangan yang dilewatkan yang mana didapatkan dari adanya suatu kumparan sebagai penaik tegangan (*step up*) dan kumparan penurun tegangan (*step down*) dengan frekuensi yang bernilai tetap sama. Dalam hal ini, GT termasuk dalam transformator *step up* yang memiliki fungsi sebagai penaik tegangan dari hasil keluaran pada generator untuk dapat memenuhi tegangan yang bernilai lebih tinggi dari aslinya. Penggunaan skenario *step up* bertujuan untuk mengurangi atau meminimalisir nilai rugi-rugi daya (*losses*) yang akan timbul pada daerah transmisi. Bagian primer GT akan terhubung langsung dengan bagian keluaran dari generator, sedangkan bagian sekunder GT akan terhubung dengan jaringan inter koneksi atau dalam hal ini adalah gardu induk. Berikut merupakan tampilan generator transformer yang dimiliki oleh PT Indonesia Power UP Semarang Unit 2.2 tergambar pada gambar 2.8 :



Gambar 2. 8 *Generator Transformer* PLTGU Tambak Lorok Unit 2.2

Pada sistem tenaga listrik tentu sudah sangat wajar jika sewaktu-waktu timbul adanya hubung singkat pada rangkaian. Oleh sebab itu, sistem pengamanan atau proteksi disini sangat diperlukan guna melindungi peralatan utama saat terjadi gangguan. Sistem ini harus mampu melakukan pemutusan atau pemisahan jaringan yang sedang berada pada kondisi gangguan dengan daerah yang aman dari gangguan. Dengan begitu diharapkan gangguan yang timbul tidak akan menyebar pada daerah lain, sehingga kerusakan jaringan akibat dari adanya gangguan dapat diminimalisir walaupun mungkin tetap akan ada kerugian yang timbul setelahnya. Terdapat beberapa rangkaian dari pengamanan pada daerah GT seperti, relai diferensial yang merupakan komponen utama dalam pengamanan, *current transformer* (CT) yang akan mengapit diantara kedua sisi, dan juga PMT yang akan terangkai satu sama lain agar dapat bekerja sesuai dengan tugasnya dalam upaya mengamankan daerah proteksi.

1. Gangguan Generator Transformer

Pada suatu transformer pasti akan ada beberapa potensi timbulnya suatu gangguan atau permasalahan, baik yang berakibat fatal maupun gangguan ringan. Berikut gangguan yang muncul pada trafo GT sesuai dengan pengelompokannya:

A. Gangguan internal

Sesuai namanya, gangguan ini muncul didalam daerah pengamanan baik didalam sebuah trafo GT maupun dibagian luar dari trafo GT itu sendiri selama masih pada area dua buah CT yang mengapitnya. Terdapat beberapa penyebab yang bisa menimbulkan gangguan internal, diantaranya:

- 1) Gangguan isolasi *bushing*
- 2) Gangguan pada sirkulasi pendinginan
- 3) Rembes atau kebocoran minyak trafo
- 4) Kondisi kabel terurai
- 5) Kegagalan isolasi

B. Gangguan eksternal

Gangguan ini timbul diluar area pengamanan yang diproteksi oleh sistem proteksi (relai). Pada kondisi yang tepat, seharusnya ini tidak akan mempengaruhi kerja dari sebuah relai karena gangguannya akan diproteksi oleh sistem proteksi diluar daerah trafo GT.

2. Fungsi Pengamanan Generator Transformer

Sekecil apapun potensi untuk terjadinya gangguan tentu perlu adanya upaya pencegahan dengan pemasangan sistem proteksi pada daerah-daerah yang dianggap vital atau dalam hal ini adalah trafo GT. Tujuan dari adanya proteksi disini ialah untuk mendapatkan mutu, kualitas, dan efisiensi dalam suatu pembangkitan guna mengurangi adanya

kerugian besar akibat terjadi suatu gangguan. Oleh sebab itu, sistem proteksi yang kan digunakan harus memiliki standar dan kemampuan yang sesuai dengan kebutuhan pada daerah pengamanan. Perancangan ini harus tepat untuk dapat memaksimalkan kerja dari sebuah proteksi dan mencegah kerusakan pada transformator yang ada. Berikut merupakan jenis-jenis dari relai proteksi yang terlihat pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Jenis-Jenis Relai Beserta Fungsinya

No.	Nama	Fungsi
1.	<i>Distance rele</i> (relai jarak)	Sebagai pendeteksi gangguan dua atau tiga fasa di muka <i>generator</i> sampai dengan batas jangkauannya.
2.	Relai periksa sinkron	Pengamann bantu <i>generator</i> guna mendeteksi persyaratan sinkronisasi/ paralel.
3.	<i>Under voltage Rele</i> (relai tegangan kurang)	Pendeteksi turunnya tegangan sampai dibawah harga yang wajar atau ditentukan.
4.	<i>Reverse power rele</i> (relai daya balik)	Pendeteksi daya balik untuk mencegah generator bekerja sebagai motor.
5.	Relai kehilangan medan penguat	Pendeteksi kehilangan medan penguat <i>generator</i> .
6.	Relai fasa urutan negatif	Pendeteksi arus urutan negatif yang timbul akibat beban tidak seimbang pada batasan-batasan yang tidak diizinkan.

7.	<i>Over current rele instantenous</i> (relai arus lebih seketika)	Pendeteksi besaran arus yang melebihi batas wajar dalam waktu seketika.
8.	<i>Time over current rele</i> (relai arus lebih dengan waktu tunda)	Pendeteksi besaran arus yang melebihi batasan dalam kondisi waktu yang ditetapkan.
9.	<i>Over excitation rele</i> (relai penguat lebih)	Pendeteksi penguat lebih pada <i>generator</i> .
10.	Relai tegangan lebih	-Jika terpasang pada titik netral <i>generator</i> atau <i>voltage transformer</i> yang terhubung segitiga terbuka guna mendeteksi gangguan stator hubungan tanah. -Jika terpasang pada terminal <i>generator</i> guna mendeteksi tegangan lebih.
11.	<i>Voltage balanced rele</i> (relai keseimbangan tegangan)	Pendeteksi hilangnya tegangan dari trafo tegangan pengatur tegangan otomatis (AVR dan relai).
12.	<i>Time delay</i> (relai waktu)	Guna memperlambat waktu.
13.	<i>Stator ground fault rele</i> (relai stator gangguan tanah)	Pendeteksi kondisi a sinkron pada <i>generator</i> yang telah paralel dengan sistem.
14.	<i>Out of step rele</i> (relai kehilangan sinkronisasi)	Pendeteksi kondisi a sinkron pada <i>generator</i> yang telah paralel dengan sistem.
15.	<i>Lock out rele</i> (relai pengunci)	Penerima <i>signal trip</i> dari relai-relai pengaman untuk kemudian

		meneruskan <i>signal trip</i> kepada PMT, <i>alarm</i> dan juga peralatan lainnya serta melakukan penguncian.
16.	<i>Frequency rele</i> (relai frekuensi)	Pendeteksi besaran frekuensi lebih ataupun rendah diluardari harga yang telah ditetapkan.
17.	<i>Differential rele</i> (relai diferensial)	Pendeteksi gangguan hubung singkat di daerah pengamanan relai diferensial.

Dari tabel 2.1 terlihat berbagai macam jenis relai yang biasa digunakan pada suatu sistem tenaga listrik, setiap relai memiliki fungsi dan cakupan kerjanya sendiri. Sebagai contoh *differential rele* atau relai diferensial yang memiliki tugas dan fungsi sebagai pendeteksi gangguan hubung singkat di daerah pengamanan relai diferensial. Sehingga untuk hal-hal yang berkaitan dengan hubung singkat maka dapat melihat salah satu relai yaitu relai diferensial sebagai alat pengaman yang akan dilindungi guna mencegah kerusakan akibat gangguan hubung singkat.

2.2.7 Pengertian Relai Diferensial

Relai merupakan suatu komponen yang prinsipnya menyerupai saklar (*switch*) yang umum digunakan pada peralatan kelistrikan rumah. Relai ini dioperasikan menggunakan listrik dan merupakan komponen elektromekanikal (*electromechanical*) yang terdiri dari dua buah bagian penting yaitu elektromagnet atau dalam hal ini adalah sebuah *coil* dan mekanikal yang merupakan semacam perangkat kontak atau saklar (*switch*). Alat ini bekerja dengan menggunakan prinsip elektromagnetik untuk dapat menggerakkan kontak saklar sehingga dengan

arus listrik mengalir yang kecil dapat menghantarkan energi listrik dengan tegangan yang lebih tinggi. Relai diferensial merupakan salah satu jenis relai pengaman utama dalam sistem tenaga listrikan. Relai semacam ini dapat bekerja secara instan seketika atau *instaneous* dan juga dapat bekerja tanpa adanya koordinasi dari relai yang lainnya. Dari kondisi tersebut maka waktu tunda atau *time delay* pada relai diferensial dapat *disetting* dengan secepat mungkin. Kondisi area kerja yang diamankan akan diapit oleh dua buah *current transformer* (CT) sehingga membuat relai ini bekerja secara individu atau menjadi buah relai pengaman utama untuk daerah yang diproteksi. Dengan begitu, relai diferensial hanya dapat dijadikan sebuah relai pengaman utama sebab kondisinya yang memproteksi dari sisi *incoming* hingga *outgoing*.



Gambar 2. 9 Tampilan Relai Diferensial 87T MBCH 12D

Relai diferensial merupakan jenis relai yang mana bekerja berdasarkan prinsip keseimbangan atau *balance*. Maksud dari keseimbangan ialah dengan melakukan perbandingan antara nilai arus sekunder pada *current transformer* yang terpasang diantara intalasi kelistrikan yang akan diamankan. Pada umumnya relai diferensial digunakan sebagai relai proteksi pada beberapa daerah seperti, generator, transformator daya, *generator transformer* atau *main transformer*, *bus bar*, dan juga pada daerah transmisi listrik. Relai ini merupakan relai pengaman utama (*main protection*) pada daerah *generator transformer* (GT) guna mencegah kerusakan sekaligus mengamankan apabila suatu saat terjadi gangguan yang dapat membahayakan kondisi kerja GT. Relai ini memiliki selektivitas yang tinggi dan waktu kerja yang instan. Seperti yang telah disebutkan diatas, relai diferensial bekerja dengan prinsip keseimbangan dimana relai akan membandingkan nilai arus masukan (I_p) dengan nilai arus keluaran (I_s), sehingga dapat diperoleh persamaan sebagai berikut:

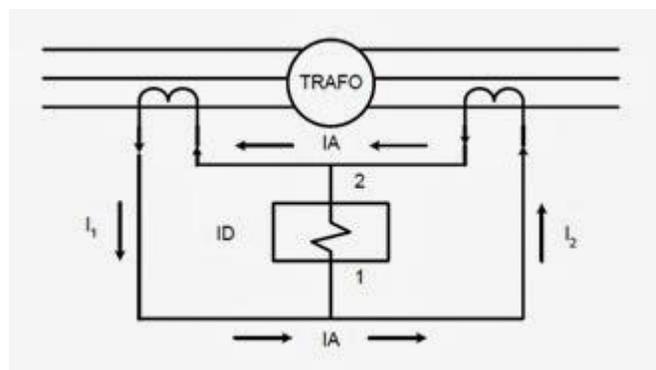
$$I_{diferensial} (I_d) = \vec{I}_p + \vec{I}_s \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

I_d = Arus diferensial (A)

I_p = Arus primer atau arus sisi masukan (A)

I_s = Arus sekunder atau arus sisi keluaran (A)



Gambar 2. 10 Relai Diferensial dalam Kondisi Normal

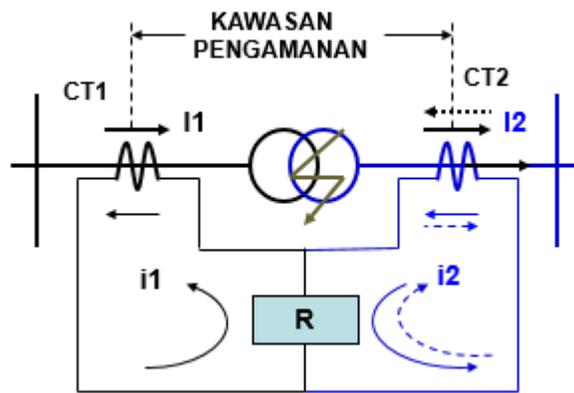
$$I_d = \vec{I}_p + \vec{I}_s = 0 \text{ Ampere}$$

Pada gambar 2.10 terlihat dimana kondisi relai dalam keadaan normal tanpa gangguan. Terlihat arus yang mengalir pada daerah pengamanan memiliki alur yang teratur, dimana I_p dan I_s bernilai sama besar dan memiliki arah yang saling berlawanan. Maka tidak terdapat arus yang mengalir melalui *coil* dari relai, sehingga relai diferensial tidak akan bekerja untuk memutus PMT.

Dalam kondisi lain, relai dapat menerima keadaan saat terjadi gangguan. Banyak hal yang dapat menyebabkan relai ini bekerja saat gangguan. Namun, gangguan sendiri tidak semuanya menyebabkan relai diferensial bekerja. Adapun kondisi gangguan yang merupakan daerah penanganan relai yaitu gangguan internal dan ada juga gangguan yang bukan merupakan tugas dari relai yaitu gangguan eksternal. Berikut merupakan penjelasan dari dua kondisi tersebut:

1. Gangguan internal

Gangguan ini merupakan gangguan yang terjadi pada area kerja relai diferensial. Kondisi tersebut terjadi ketika gangguan arus yang muncul mengalir di zona yang merupakan cakupan kerja dari relai. Oleh karena itu, relai akan mendeteksi adanya suatu masalah yang dapat membahayakan daerah pengamanan (*generator transformer*). Ketika arus gangguan ini telah melebihi dari arus yang telah ditetapkan (I_{set}) maka relai akan memberikan intruksi kepada alat Pemutus Tenaga (PMT) untuk segera melakukan pemutusan jaringan, sehingga *generator transformer* dapat diamankan dan tidak menimbulkan kerugian yang lebih parah. Berikut dapat dilihat pada gambar 2.11 mengenai skema kerja relai diferensial saat mengalami kondisi gangguan internal.

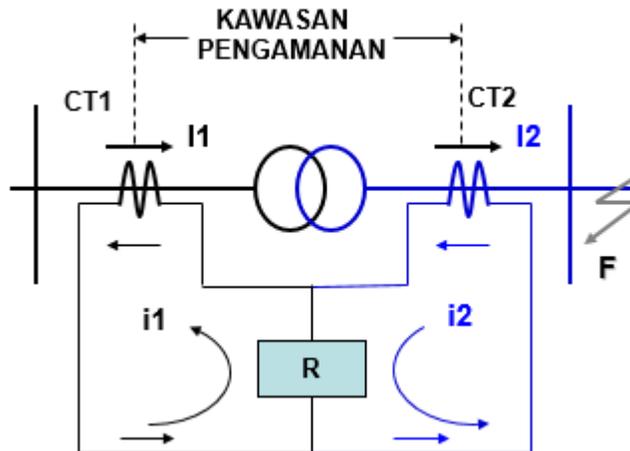


Gambar 2. 11 Gangguan Internal Relai Diferensial

Pada skema kerja relai diferensial gambar 2.11 terlihat dimana gangguan terjadi di area pengamanan relai. Gangguan yang timbul di daerah pengamanan menyebabkan kekacauan kerja dari arus yang mengalir mulai sisi primer hingga sekunder. Gangguan tersebut nampak pada kondisi arah arus sekunder yang melewati *Current Transformer 2* (CT2) mengalami perubahan arah. Perubahan tersebut diakibatkan oleh gangguan yang berada pada daerah pengamanan, sehingga semua arus menjadi menuju ke arah titik gangguan (*Generator Transformer*).

2. Gangguan eksternal

Gangguan eksternal merupakan gangguan yang muncul diluar daerah pengamanan dari relai diferensial. Gangguan ini tidak akan menyebabkan relai bekerja karena besaran arus primer dan sekunder memiliki nilai yang sama dan arah arus yang melewati dua buah CT tetap berlawanan. Skema kerjanya dapat dilihat pada gambar 2.12 berikut ini:



Gambar 2. 12 Gangguan Eksternal Relai Diferensial

Dari skema kerja relai diferensial gambar 2.12 saat terjadi gangguan diluar area pengamanan relai maka terlihat dimana arus yang tersirkulasi didaerah pengaman tetap berada pada kondisi normal. Arus akan mengalir dari sisi primer (*incoming*) generator transformer menuju ke sisi sekunder (*outgoing*), sedangkan arus yang melewati antara CT1 dengan CT2 memiliki arah yang saling berlawanan sehingga nilai arus diferensial yang muncul adalah nol “0” ($I_{dif} = I_p + I_s = 0$ Ampere). Dari kondisi tersebut maka relai diferensial pada generator transformer tidak akan mendeteksi adanya suatu gangguan dan relai tidak akan memberi intruksi “*trip*” kepada PMT.

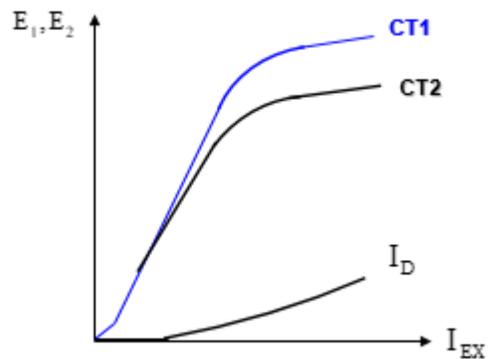
2.2.8 Karakteristik Relai Diferensial

Relai diferensial memiliki karakter khusus yang mana akan bekerja dengan prinsip keseimbangan arus (*current balance*) untuk menghindarinya timbulnya suatu kesalahan kerja sewaktu-waktu. Kesalahan kerja yang dimaksud dalam hal ini adalah disebabkan oleh *current transformer* (CT) dimana terjadinya pergeseran

anatar fasa yang timbul karena adanya belitan pada *generator transformer* hubungan Y- Δ (*star-delta*).

Perubahan posisi dan rasio *tap changer* pada *generator transformer* dan *auxiliary*-nya oleh *on load tap changer* (OLTC) dapat menyebabkan CT mengalami perubahan kondisi. Arus sekunder pada CT dapat dibuat menjadi *match* hanya pada satu titik dari rentang pengubahan *tap* saja. Kesalahan dan ketidakakuratan semacam inilah yang juga dapat menimbulkan ketidakseimbangan arus atau biasa juga disebut dengan *unbalance current* (I_{μ}).

Pada saat kondisi lain, ketika terjadi adanya gangguan eksternal yang berada diluar pengamanan relai dimana karakteristik CT yang tidak sama akan menimbulkan tegangan pada tiap-tiap sekunder CT yang tidak sama pula. Panjang kabel kontrol CT yang tidak sama juga akan menjadi suatu kelemahannya.



Gambar 2. 13 Karakteristik *Current Transformer*

Dari permasalahan yang timbul seperti gambar 2.13, maka perlu adanya solusi dimana relai dapat diatasi dengan menggunakan relai diferensial bias/persentase. Pada relai ini akan ditambahkan kumparan yang dapat menahan kerja relai pada *unbalance current zone* atau ketidakseimbangan. Kumparan tersebut dinamakan *restrain coil* yang akan melakukan penahan kerja relai, sedangkan kumparan yang akan melakukan intruksi kerja pada relai dinamakan *operating coil*. Arus kedua CT akan memasuki kedua kumparan tersebut dimana sistem

operasinya adalah penjumlahan antara keduanya. Kedua arus tersebut dinamakan dengan arus sekunder kumparan primer (I_1) dan arus sekunder kumparan sekunder (I_2).

Arus yang timbul didalam kumparan tersebut akan terjadi dalam dua kondisi, kondisi pertama adalah arus akan berjalan searah dimana kedua arus akan masuk menuju relai dan kemudian meninggalkan relai. Saat kondisi tersebut maka relai dapat melakukan penjumlahan antara kedua arus tersebut. Sedangkan kondisi kedua adalah kebalikan dari kondisi pertama yaitu arus akan berjalan berlawanan dimana salah satu arus akan masuk menuju relai dan arus yang lainnya akan meninggalkan relai. Kondisi berlawanan tersebut akan menyebabkan relai melakukan penjumlahan yang sama seperti kondisi pertama, namun yang terjadi adalah pengurangan akibat dari arah arus yang saling berlawanan arah. Sedangkan untuk perhitungan dari arus *restrain* (penahan) didapat dengan melakukan penjumlahan antara arus kumparan primer (I_1) dengan arus kumparan sekunder (I_2) untuk kemudian dibagi dengan dua.

$$I_o = I_1 + I_2 \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\begin{aligned} I_o &= I_1 + (-I_2) \\ &= I_1 - I_2 \dots\dots\dots (2.3) \end{aligned}$$

$$I_r = \frac{I_1 + I_2}{2} \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

I_o = Arus *operating*

I_r = Arus *restrain*/ penahan

I_1 = Arus kumparan primer

I_2 = Arus kumparan sekunder

Kondisi arus *operate* (I_o) pada rumus yang pertama merupakan kondisi arus yang memiliki arah sama menuju ke relai. Sedangkan rumus I_o ke dua merupakan kondisi arus yang memiliki arah sirkulasi berlawanan (saling mengurangi).

Slope merupakan kecuraman kurva yang mana nilai *slope* ini didapatkan dengan cara membagi arus diferensial relai dengan arus *restrain* relai. Untuk satuan *slope* menggunakan persen sehingga untuk perhitungannya akan dilakukan pengalihan dengan 100%. *Slope* pertama merupakan kecuraman kurva yang akan menentukan kondisi kerja relai saat terjadi gangguan pada daerah pengamanan (*internal fault*) dan juga pada saat kondisi normal dimana relai akan menghitung besaran nilai arus diferensial yang muncul. Sedangkan untuk *slope* kedua merupakan kecuraman kurva yang akan menentukan kondisi relai tidak bekerja walaupun terdapat perubahan nilai arus yang cukup besar akibat dari adanya gangguan diluar daerah pengamanan (*external fault*). Kurva *slope* kedua memiliki titik batas kecuraman yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan kurva *slope* pertama.

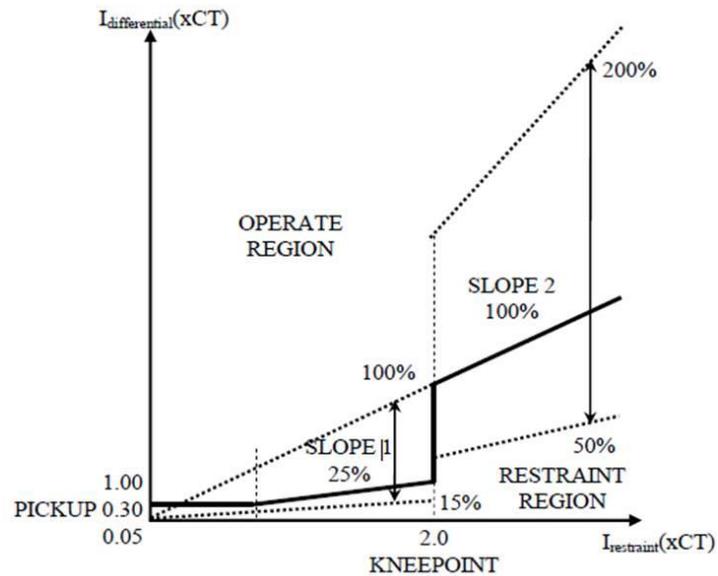
$$\%Slope = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan:

$\%Slope$ = Besaran nilai kecuraman kurva dalam persen

I_d = Arus diferensial

I_r = Arus *restrain*/ penahan



Gambar 2. 14 Karakteristik Relai Diferensial

Pada gambar skema dari gambar 2.14 tentang karakteristik relai diferensial tersebut terlihat dimana terdapat kurva karakteristik yang mana kurva atas merupakan wilayah kerja dari relai diferensial. Kurva atas memiliki dua tingkatan, yang pertama adalah wilayah kerja *slope* pertama dan yang lebih tinggi adalah wilayah kerja *slope* ke dua. Sedangkan kurva terbawah adalah kurva yang menjadi penentu *hibernate zone* dimana pada zona ini relai akan berstatus *stand by* jika sewaktu-waktu arus akan mengalami kenaikan dengan melakukan *scanning* arus.