

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel ((PLTD)

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) ialah Pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak utama untuk memutar rotor di generator. Pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak mula (prime mover) untuk menghasilkan energi mekanis yang diperlukan untuk memutar rotor generator guna menghasilkan energi listrik. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel biasanya digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik dalam jumlah beban kecil, terutama pada daerah baru yang terpencil atau listrik pedesaan dan memasok kebutuhan listrik suatu pabrik. [15].

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) merupakan salah satu penyokong utama dalam sistem pembangkitan energi di wilayah terpencil atau sebagai sumber cadangan energi. Namun, sistem kontrol konvensional yang digunakan pada PLTD masih sangat bergantung pada manualitas dan keahlian operator. Keterbatasan ini sering kali menyebabkan lambatnya respons terhadap gangguan yang dapat berdampak pada meningkatnya waktu perbaikan, turunnya efisiensi operasional, serta menurunnya keandalan sistem secara keseluruhan. Selain itu, minimnya pemantauan real-time terhadap parameter kritis seperti temperature air jacket, temperature oli, tekanan, dan temperature bantalan mesin, meningkatkan risiko kerusakan besar yang sering kali sulit diprediksi [19].

Perkembangan teknologi di bidang ketenagalistrikan menuntut adanya pengelolaan dan pengawasan yang baik terhadap sistem elektrikal pada pembangkit listrik, khususnya di Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Pengelolaan tersebut mencakup tahap perencanaan, pemasangan, pengujian, pengoperasian, hingga pemeliharaan peralatan listrik, agar sistem dapat beroperasi secara aman, andal, dan efisien. Energi listrik merupakan kebutuhan yang sangat vital bagi masyarakat, sehingga kontinuitas pasokan listrik harus

selalu terjaga. Oleh karena itu, generator set (genset) di PLTD berperan sebagai sumber utama pembangkit energi listrik yang harus selalu berada dalam kondisi siap operasi.

Sistem utama pada PLTD terdiri dari mesin diesel, generator (*alternator*), sistem bahan bakar, sistem pelumasan, sistem pendinginan, sistem udara masuk dan gas buang, serta panel kontrol. Mesin diesel berfungsi menghasilkan tenaga putar, sedangkan generator berfungsi mengubah tenaga putar tersebut menjadi energi listrik. Panel kontrol berperan dalam mengatur, memantau, dan melindungi operasi PLTD, termasuk pengendalian *start-stop*, monitoring parameter operasi, serta sistem proteksi terhadap gangguan seperti suhu tinggi, tekanan oli rendah, dan gangguan kelistrikan.

Dalam operasionalnya, PLTD memiliki keunggulan berupa waktu start yang cepat, fleksibilitas terhadap perubahan beban, serta kemudahan dalam pengoperasian dan pemeliharaan. Namun demikian, PLTD juga memiliki beberapa keterbatasan, antara lain biaya bahan bakar yang relatif tinggi, tingkat kebisingan, serta emisi gas buang yang perlu dikendalikan. Oleh karena itu, pengoperasian PLTD harus didukung dengan manajemen pemeliharaan yang baik, seperti pemeliharaan preventif, prediktif, dan korektif, untuk menjaga keandalan peralatan dan meminimalkan downtime.

Dalam pembangkit seperti PLTD Lasikin, penerapan sistem monitoring dan pemeliharaan yang terencana sangat penting untuk memastikan kontinuitas pasokan listrik, terutama bagi masyarakat di wilayah yang bergantung pada PLTD sebagai sumber energi utama. Dengan pengelolaan yang tepat, PLTD dapat beroperasi secara optimal, andal, dan berkelanjutan.

PLTD merupakan suatu instalasi pemabangkit listrik yang terdiri dari suatu unit pembangkit (SPD) dan sarana pembangkitan. Mesin Diesel adalah penggerak utama untuk mendapatkan energi listrik dan dikeluarkan oleh Generator . Pada mesin Diesel Energi Bahan bakar diubah menjadi energi mekanik dengan proses

pembakaran di dalam mesin itu sendiri. Mesin Diesel pada saat ini sudah banyak mengalami perkembangan dalam pemakaian untuk angkutan darat dan laut, kemudian pembangkitan dalam daya kecil dan menengah bahkan sampai daya besar sudah ada yang menggunakannya. Untuk mempermudah dalam melakukan pemeliharaan Mesin Diesel para teknisi harus mempunyai dasar-dasar pengetahuan mengenai Mesin Diesel yang baik, agar setiap melakukan pemeliharaan para teknisi dapat memperlakukan setiap komponen yang berada dalam mesin, sesuai dengan konstruksinya.

Yang dimaksud dengan Unit PLTD adalah kesatuan peralatan-peralatan utama dan alat-alat bantu serta perlengkapannya yang tersusun dalam hubungan kerja, membentuk sistem untuk mengubah energi yang terkandung didalam bahan bakar minyak menjadi tenaga mekanis dengan menggunakan mesin diesel sebagai penggerak utamanya. dan seterusnya tenaga mekanis tersebut oleh generator diubah menjadi tenaga listrik. PLTD adalah suatu instalasi pembangkit listrik yang terdiri dari suatu unit pembangkit (SPD) dan sarana pembangkitan. Mesin Diesel adalah penggerak utama untuk mendapatkan energi listrik dan dikeluarkan oleh Generator. Pada mesin Diesel Energi Bahan bakar diubah menjadi energi mekanik dengan proses pembakaran didalam mesin itu sendiri. Mesin Diesel pada saat ini sudah banyak mengalami perkembangan dalam pemakaian untuk angkutan darat dan laut, kemudian pembangkitan dalam daya kecil dan menengah bahkan sampai daya besar sudah ada yang menggunakannya. Untuk mempermudah dalam melakukan pemeliharaan Mesin Diesel para teknisi harus mempunyai dasar-dasar pengetahuan mengenai Mesin Diesel yang baik, agar setiap melakukan pemeliharaan para teknisi dapat memperlakukan setiap komponen yang berada dalam mesin, sesuai dengan konstruksinya. Karakteristik utama meliputi:

1. Mampu beroperasi dan memasok daya dengan cepat
2. Biasanya digunakan di daerah dengan beban listrik kecil
3. Terutama menggunakan High Speed Diesel (HSD) atau tenaga surya sebagai bahan bakar

4. Menghadapi tantangan terkait biaya bahan bakar dan berkelanjutan lingkungan

Generator di PLTD bekerja secara terus-menerus maupun dalam sistem beban tertentu, sehingga berpotensi mengalami penurunan kinerja akibat pemakaian jangka panjang. Kondisi tersebut menuntut dilaksanakannya pemeliharaan berkala generator set secara terencana dan berkesinambungan. Pemeliharaan berkala merupakan tindakan preventif yang bertujuan untuk mencegah terjadinya kerusakan mendadak, mengurangi tingkat gangguan operasional, serta mempertahankan keandalan dan efisiensi kerja generator set. Generator set yang tidak mendapatkan pemeliharaan secara rutin dapat mengalami peningkatan frekuensi gangguan, penurunan performa mesin, hingga kegagalan operasi yang berdampak pada terganggunya pasokan listrik.

Generator merupakan komponen vital dalam pengembangan sistem pembangkitan energi listrik. Dengan perkembangan teknologi yang semakin canggih serta maju, menuntut bangsa Indonesia untuk dapat menguasai guna menunjang pembangunan yang sedang berlangsung di Indonesia. Sektor industri dengan segala kemampuan teknologinya menjadi prioritas bangsa kita sebagai sarana dalam mewujudkan masyarakat adil dan makmur yang berkesinambungan. Generator sebagai sumber energi listrik dalam sistem perlu diamankan agar tidak mengalami kerusakan. Kerusakan generator akan mengganggu jalannya operasi sistem tenaga listrik. Generator merupakan peralatan yang penting dan nilainya juga cukup mahal, sehingga diusahakan untuk mencegah gangguan dengan secara cepat dan tepat. Sistem daya elektrikal utamanya terdiri dari sebuah generator, jalur transmisi dan distribusi beban.

2.2 Grounding

2.2.1 Pengertian *Grounding*

Pembumian (*grounding*) listrik adalah suatu sistem instalasi yang bisa meniadakan beda potensial sebagai pelepasan muatan listrik berlebih pada suatu instalasi listrik dengan cara mengalirkannya ke tanah sehingga istilah sehari-hari yang biasa disebut dengan istilah pentanahan atau pengardean. Yang dimaksud beda potensial biasa berupa adanya kebocoran arus listrik dan yang utamanya adalah sambaran petir. Sistem pentanahan pada sebuah pabrik, pasar, gedung, pusat perbelanjaan sampai rumah tempat tinggal sangat diperlukan yang berfungsi untuk mengamankan peralatan kelistrikan dan peralatan elektronik yang terpasang tiap bangunan tersebut [20].

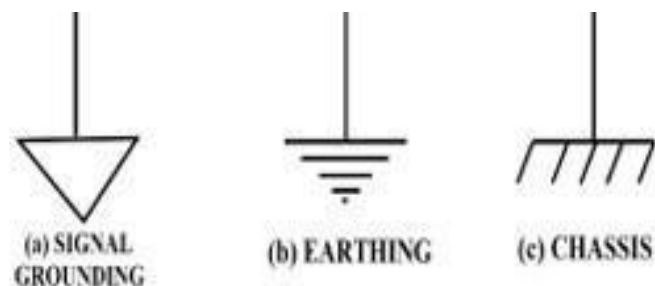
Maka dari itu, sistem hubungan pentanahan adalah sistem hubungan pengantar yang menyatukan antara sistem, badan peralatan dan instalasi dengan bumi/tanah yang berfungsi untuk mencagay cantuman manusia terhadap sengatan listrik dan mencagay ancaman bagi komponen-komponen instalasi terhadap tegangan/arus *ordinary*. Oleh karena itu, sistem hubungan pentanahan merupakan bagian yang esensial dari sistem tenaga listrik. Pentanahan tidak terbatas pada sistem tenaga; pentanahan juga meliputi sistem peralatan elektronik seperti telekomunikasi, komputer, dll. Secara garis besar, sistem hubungan pentanahan mempunyai tujuan, diantaranya, mencantuman orang terhadap sengatan listrik baik dalam keadaan regular atau tidak dari tegangan sentuh dan tegangan langkah, mencantuman kerja peralatan listrik/elektronik, mengantisipasi kerusakan peralatan listrik/elektronik, dan merkam energi serangan petir ke tanah [5].

Sistem pentanahan merupakan tindakan protektif dalam konteks sistem kelistrikan. Gunakan perangkat yang disebut resistansi pentanahan netral. NGR adalah metode pentanahan yang digunakan untuk mengatasi tantangan tegangan berlebih akibat transien dan untuk mengurangi dampak aliran "arus gangguan"

dari generator atau transformator daya ke peralatan gardu induk. Tindakan ini diperlukan untuk mengurangi risiko kerusakan peralatan. NGR bertindak sebagai resistor dan pembatas arus ketika terjadi gangguan fasa ke tanah; hal ini membuat arus memiliki besaran yang lebih kecil daripada arus nominal pada transformator.

Sistem grounding memperhatikan atau menganalisa komponen pokok lain, yakni material konduktor *grounding rod* dan SR atau *soil resistivity*. Nilai SR sebagai faktor penunjang dalam menentukan jenis konduktor dan type sistem instalasi grounding yang akan dibuat. Hal ini dikarenakan SR dengan nilai minimal akan menghasilkan nilai ground resistance yang minimal pula. Kondisi SR dan GR dalam kondisi nilai minimal bisa mengurangi atau menghilangkan pemakaian material konduktor. Dengan begitu, maka produksi sistem grounding dapat dilakukan dengan biaya yang lebih murah.

Instalasi grounding didalam gambar atau diagram instalasi listrik disimbolkan dengan beberapa bentuk dan disesuaikan dengan jenis instalasi listrik. Simbol grounding ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2.1 Simbol Grounding

Pada Gambar 2.1 dijelaskan simbol *grounding* antara lain yaitu gambar (a) adalah simbol secara umum untuk menjelaskan tentang posisi grounding dalam sebuah diagram listrik. Gambar (b) adalah simbol grounded atau ground konduktor untuk instalasi bangunan di darat. Gambar (c) adalah instalasi grounding untuk instalasi permesinan dan peralatan bergerak [1].

Sistem grounding berfungsi sebagai proteksi jaringan listrik dan keselamatan instalasi. Kelebihan instalasi sistem grounding pada jaringan listrik yaitu:

1. Menjaga instalasi listrik tetap dalam kondisi baik dan konstan meskipun saat terjadi gangguan satu jalur phase.
2. Memudahkan pemasangan penggunaan perangkat pelindung otomatis sehingga secara cepat mengisolasi sistem jika terjadi kesalahan dan kerusakan.
3. Menghilangkan tegangan berlebih seperti hubungan singkat ataupun sengatan petir, sehingga mudah untuk menyalurkan dan melepaskan tegangan lebih ke ground atau tanah.
4. Menjamin keselamatan operator atau personel, keselamatan permesinan dan peralatan listrik secara menyeluruh.

2.2.2 Metode Grounding Generator

Salah satu aspek utama dalam *system grounding* pada generator adalah menjaga keandalan sistem dan keamanan. *System grounding* pada generator digunakan tidak hanya sebagai jalur arus gangguan yang mengarah ke tanah, tetapi juga pengendali tegangan berlebih, serta proteksi peralatan terhadap potensi kerusakan. Generator memiliki titik netral dari stator yang dapat dihubungkan ke tanah langsung atau melalui suatu impedansi – resistor atau reaktor. Setiap metode mempunyai karakteristik tertentu dalam mengontrol arus gangguan satu fasa ke arah tanah dan pengaruh ketidakstabilan *directional system*.if pada berbagai kondisi lokasi.

Secara umum, metode pentanahan yang berbeda memengaruhi perilaku arus gangguan tanah di berbagai koneksi transformator. Penelitian ini secara kolektif menekankan bahwa pemilihan metode pentanahan sangat penting untuk meminimalkan kerusakan generator selama gangguan pentanahan stator ,

metode grounding pada generator dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, yaitu *solid grounding*, *resistance grounding*, *reactance grounding*, *high-impedance grounding*, dan *hybrid grounding*. Penjelasan masing-masing metode adalah sebagai berikut:

1. *Solid Grounding* (Pembumian Langsung)

Solid Grounding adalah sambungan listrik langsung dari titik rangkaian atau konduktor ke bumi, yang dirancang untuk mencegah paparan tegangan berbahaya dan melindungi dari gangguan listrik, bukti menunjukkan bahwa pembumian langsung memiliki fungsi keselamatan yang penting: mencegah kontak antara makhluk hidup dan tegangan berbahaya yang terpapar selama kegagalan isolasi, dan membatasi penumpukan tegangan statis saat menangani produk yang mudah terbakar [17].

Metode lain dari sistem pentanahan netral generator adalah *solid grounding*, yaitu kondisi dimana titik netral generator dihubungkan langsung ke tanah tanpa penambahan impedansi berupa resistor maupun reaktansi. Pada konfigurasi ini, hubungan antara netral dan bumi bersifat langsung (*low impedance path*), sehingga tidak terdapat pembatas arus gangguan tanah. Akibatnya, ketika terjadi gangguan satu fasa ke tanah, arus gangguan yang mengalir menuju bumi dapat bernilai sangat besar.

Secara prinsip, *solid grounding* dirancang untuk memastikan bahwa setiap gangguan ke tanah dapat dideteksi dan dieliminasi secepat mungkin. Karena tidak ada elemen pembatas arus, arus gangguan yang besar akan dengan mudah terdeteksi oleh peralatan proteksi, khususnya relay arus lebih (*overcurrent relay*) maupun *ground fault relay*. Kondisi ini memberikan keuntungan utama berupa kecepatan kerja sistem proteksi, sehingga pemutus tenaga (*circuit breaker*) dapat segera mengisolasi bagian sistem yang terganggu sebelum gangguan berkembang menjadi lebih serius. Dengan demikian, risiko kerusakan meluas pada sistem tenaga listrik dapat diminimalkan.

Selain meningkatkan sensitivitas proteksi, solid grounding juga membantu menjaga tegangan fasa yang sehat tetap mendekati kondisi normal saat terjadi gangguan satu fasa ke tanah. Hal ini berbeda dengan sistem ungrounded yang dapat mengalami pergeseran tegangan netral (*neutral shift*) yang cukup besar. Oleh karena itu, dalam beberapa aplikasi, solid grounding dipilih karena memberikan stabilitas tegangan yang lebih baik selama kondisi gangguan.

Namun demikian, sistem solid grounding juga memiliki beberapa kelemahan yang perlu diperhatikan secara serius. Karena arus gangguan tanah yang mengalir sangat besar, maka tegangan transient yang muncul pada saat gangguan maupun saat pemutusan oleh circuit breaker dapat menjadi cukup tinggi. Lonjakan tegangan ini dapat menimbulkan tekanan listrik (*electrical stress*) yang besar pada sistem isolasi peralatan, khususnya pada lilitan stator generator, kabel, dan peralatan hubung.

Tekanan listrik yang berulang akibat arus gangguan besar dan fenomena transient berpotensi mempercepat proses penuaan isolasi (*insulation aging*). Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat menurunkan kekuatan dielektrik isolasi, meningkatkan risiko kegagalan isolasi, serta memperpendek umur operasi generator. Pada kasus yang lebih ekstrem, arus gangguan yang sangat besar juga dapat menimbulkan kerusakan termal lokal pada titik gangguan sebelum sistem proteksi bekerja sepenuhnya.

Selain itu, besarnya arus gangguan pada sistem solid grounding juga menuntut kapasitas pemutus tenaga dan peralatan proteksi yang lebih tinggi. Jika koordinasi proteksi tidak dirancang dengan baik, maka terdapat risiko trip yang tidak selektif atau bahkan kerusakan mekanis pada peralatan switching akibat arus hubung tanah yang terlalu besar.

Dengan mempertimbangkan kelebihan dan kekurangannya, pemilihan sistem solid grounding harus disesuaikan dengan karakteristik sistem tenaga,

kapasitas generator, serta filosofi proteksi yang digunakan. Pada sistem dengan kebutuhan deteksi gangguan yang sangat cepat dan kemampuan peralatan yang memadai, solid grounding dapat menjadi pilihan yang efektif. Namun, untuk sistem yang sensitif terhadap stres isolasi atau ingin membatasi arus gangguan tanah, metode grounding dengan impedansi (*resistance grounding* atau *reactance grounding*) sering kali menjadi alternatif yang lebih aman [8].

Sistem solid grounding umumnya digunakan pada sistem tegangan rendah (≤ 600 V) di mana nilai arus gangguan masih bisa ditoleransi, misalnya pada generator cadangan (*genset*) di fasilitas kecil atau bangunan komersial.

2. *Resistance Grounding* (Pembumian Melalui Resistor / NGR – Neutral Grounding Resistor)

Resistance grounding merupakan salah satu metode pentanahan yang paling umum diterapkan pada generator industri maupun pembangkit listrik. Pada metode ini, titik netral generator tidak dihubungkan langsung ke tanah, melainkan melalui sebuah resistor khusus yang dikenal sebagai *Neutral Grounding Resistor* (NGR). Pemasangan NGR bertujuan untuk membatasi besarnya arus gangguan satu fasa ke tanah pada level yang aman dan terkendali.

Secara prinsip, ketika terjadi gangguan hubung tanah pada salah satu fasa, arus gangguan akan mengalir melalui NGR menuju sistem pentanahan. Keberadaan resistor ini memberikan impedansi tambahan sehingga arus gangguan tidak mengalir secara berlebihan seperti pada sistem solid grounding. Dalam praktiknya, nilai arus gangguan yang diizinkan biasanya berada pada kisaran 100 A hingga 1.000 A, tergantung pada kapasitas generator, tingkat tegangan sistem, serta filosofi proteksi yang digunakan.

Penggunaan *resistance grounding* dengan NGR memiliki beberapa keunggulan penting. Pertama, sistem ini mampu membatasi arus gangguan tanah sehingga kerusakan termal pada lilitan stator, kabel, maupun peralatan

proteksi dapat diminimalkan. Arus gangguan yang terlalu besar berpotensi menimbulkan panas berlebih (*overheating*) dan tekanan elektromagnetik yang merusak, sehingga pembatasan arus melalui NGR menjadi sangat krusial bagi keandalan generator.

Kedua, resistance grounding membantu menekan lonjakan tegangan transien yang biasanya muncul saat terjadi gangguan tanah. Pada sistem yang tidak dibatasi, tegangan lebih (*overvoltage*) dapat mempercepat degradasi isolasi. Dengan adanya NGR, profil tegangan sistem menjadi lebih terkendali sehingga umur isolasi peralatan listrik dapat diperpanjang.

Ketiga, metode ini memungkinkan sistem proteksi bekerja lebih selektif dan akurat. Arus gangguan yang berada pada rentang terukur memudahkan relay proteksi untuk mendeteksi kondisi fault secara tepat tanpa menimbulkan *false trip*. Hal ini sangat penting pada sistem pembangkit yang menuntut kontinuitas operasi tinggi, karena trip yang tidak perlu dapat menyebabkan gangguan pasokan daya dan kerugian operasional. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Utami dan Trisnawati pada sistem PLTU PT Sugar Labinta menunjukkan efektivitas penerapan NGR dalam menurunkan arus gangguan satu fasa ke tanah. Dalam studi tersebut, arus gangguan yang semula mencapai sekitar 3.600 A berhasil dibatasi menjadi kurang lebih 847 A setelah pemasangan NGR. Penurunan ini terbukti mampu mengurangi stres termal pada generator, melindungi sistem isolasi, serta menekan potensi kerusakan akibat arus gangguan yang berlebihan.

Dengan demikian, resistance grounding menggunakan NGR dapat dikatakan sebagai solusi kompromi yang optimal antara aspek keselamatan peralatan, keandalan sistem, dan sensitivitas proteksi. Oleh karena itu, metode ini sangat direkomendasikan untuk diterapkan pada sistem generator di pembangkit listrik yang memerlukan tingkat keandalan dan perlindungan yang tinggi [9]. Mereka juga menemukan bahwa resistor dapat melebur guna layanan di antara, mengurangi instalasi grounding resistance dari 36 ohm

menjadi 18 ohm. Resistor dapat berupa resistor logam atau resistor cair tergantung pada kebutuhan disipasi panas. Sistem ini sangat disarankan oleh standar IEEE Std 142-2007 dan IEC 60034 -3 untuk sistem generator tegangan menengah.

Dibandingkan dengan *solid grounding*, penggunaan NGR mampu mengurangi energi panas (*thermal stress*), gaya elektromagnetik, serta kerusakan pada lilitan generator atau transformator akibat arus gangguan yang terlalu besar. Selain itu, pembatasan arus gangguan juga dapat mengurangi risiko busur listrik (*arc flash*) dan meningkatkan umur peralatan listrik. Namun demikian, resistor harus dirancang sesuai kapasitas sistem karena NGR umumnya hanya mampu menahan arus gangguan dalam waktu singkat hingga sistem proteksi bekerja memutus gangguan[19].

3. *Reactance Grounding* (Pembumian Melalui Reaktansi)

Metode reactance grounding yang terakhir diketahui adalah metode pemasangan netral generator ke tanah dengan sistem reaktor, atau dikenal dengan reactor grounding. Reaktansi merupakan induktansi yang dimanfaatkan untuk membatasi arus gangguan satu fasa ke tanah dengan menggunakan sifat impedansi induktifnya [10]. Berbeda dengan sifat resistor yang hanya akan menyerap energi berupa panas, reaktansi memiliki sifat yang dapat menyimpan energi dengan cara menyimpannya dalam medan magnet, sehingga sistem ini memungkinkan untuk dapat mengendalikan arus gangguan tanpa terjadi disipasi energi yang amat besar. Kekurangan sistem ini terletak pada potensi terjadi osilasi tegangan dan sulitnya kalibrasi reaktansi agar memiliki karakteristik sesuai dengan sistem. Reactor grounding ini biasanya digunakan pada sistem tegangan menengah hingga tinggi 6,6 kV – 13,8 kV dimana bisa diterapkan kebutuhan kontrol arus gangguan yang stabil namun tetap menjaga kestabilan tegangan fasa.

4. *High-Impedance Grounding* (Pembumian Impedansi Tinggi)

Metode grounding high-impedance menggunakan resistor atau

kombinasi resistor-reaktor dengan impedansi sangat tinggi (biasanya dirancang untuk membuat arus tanah bocor tidak lebih banyak dari 10A). Ini adalah sistem umum yang digunakan pada instalasi dengan lini kritis seperti generator listrik, rumah sakit atau pusat data di mana operasi terus menerus sangat penting, [11] Keuntungan utama dari metode ini adalah bahwa gangguan satu fasa ke tanah tidak kemudian menimbulkan trip, sehingga sistem tetap dapat beroperasi sementara dan analisis gangguannya tidak dikenali. Namun, karena gangguan arus yang sangat rendah, perlindungan sistem harus memiliki *ground fault detector* yang sensitif [12]

5. *Hybrid Grounding* (Kombinasi Metode)

Metode pembumian gabungan merupakan kombinasi dari dua atau lebih metode pembumian dan fungsinya adalah mendapat keuntungan dari kedua sistem, yaitu pembatasan arus gangguan yang cukup namun tetap menjaga stabilitas operasi sistem. Dalam metode ini, sistem secara otomatis dapat beralih dari mode high-impedance ke mode low-impedance jika mendeteksi gangguan berat yang menyebabkan aliran besar arus gangguan, agar proteksi bisa bekerja cepat. Sistem hybrid ini banyak diterapkan pada pembangkit besar dan sistem kelistrikan modern yang memerlukan kestabilan tinggi [13]. Menurut penelitian Bey (2006) dalam pengalaman *Grounding of AC Generators and Switching the Neutral*, sistem hybrid sangat efektif dalam mengurangi efek switching transien pada netral generator, serta menjaga koordinasi antar proteksi [11]

6. *Isolated (Ungrounded System)*

Dalam sistem ungrounded, titik netral generator tidak dihubungkan ke tanah sama sekali. Jika itu terjadi bisa disebabkan arus gangguan satu fasa ke tanah hanya akan sangat kecil, karena hanya berdasar pada kapasitansi parasitik dari tanah. Metode ini dapat menjaga perdagangan stabil, tetapi itu memiliki kelemahan fatal: ketika satu fasa terganggu dan tidak segera diperbaiki, tegangan dua fasa lain terhadap tanah akan meningkat dua kali lipat,

yang efeknya berkemungkinan rusak isolasi generator. Dengan demikian, sistem ini tidak cocok untuk generator besar atau permanen, tetapi hanya berguna pada sistem portabel berkapasitas kecil yang dipasang di lapangan [12]

2.2.3 Faktor Yang Mempengaruhi Tahanan Pentanahan

Besarnya tahanan pentanahan pada suatu sistem grounding dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, antara lain resistivitas tanah, panjang elektroda, diameter elektroda, serta kondisi lingkungan di sekitar elektroda. Keempat faktor ini saling berkaitan dalam menentukan seberapa efektif arus gangguan dapat dialirkan dari sistem listrik menuju bumi. Dalam praktik perancangan sistem pentanahan, pemahaman terhadap faktor-faktor tersebut menjadi sangat penting agar diperoleh nilai tahanan pentanahan yang memenuhi standar keselamatan.

Di antara berbagai faktor tersebut, resistivitas tanah (ρ) merupakan parameter yang paling dominan karena secara langsung menentukan kemampuan tanah dalam menghantarkan arus listrik. Resistivitas tanah menggambarkan tingkat hambatan tanah terhadap aliran arus. Semakin kecil nilai resistivitas tanah, maka semakin baik konduktivitas tanah sehingga arus gangguan dapat mengalir ke bumi dengan lebih mudah. Kondisi ini akan menghasilkan nilai tahanan pentanahan yang lebih kecil. Sebaliknya, tanah dengan resistivitas tinggi seperti tanah kering, berbatu, atau berpasir akan menghambat aliran arus sehingga nilai tahanan pentanahan cenderung lebih besar.

Selain resistivitas tanah, panjang elektroda pentanahan (L) juga memiliki pengaruh yang signifikan. Elektroda yang ditanam lebih dalam akan memperluas area kontak antara elektroda dan lapisan tanah yang lebih lembap dan lebih konduktif. Umumnya, semakin panjang elektroda yang tertanam, maka tahanan pentanahan akan semakin menurun karena jalur penyebaran arus ke tanah menjadi lebih luas. Oleh karena itu, dalam praktik lapangan, peningkatan kedalaman elektroda sering menjadi metode yang efektif untuk menurunkan

nilai tahanan pentanahan tanpa harus menambah jumlah elektroda.

Diameter elektroda (d) juga turut mempengaruhi nilai tahanan pentanahan, meskipun pengaruhnya relatif lebih kecil dibandingkan panjang elektroda. Peningkatan diameter elektroda akan menambah luas permukaan kontak dengan tanah, namun efek penurunannya tidak sebesar jika panjang elektroda ditambah. Oleh karena itu, secara ekonomis dan teknis, peningkatan panjang elektroda biasanya lebih diprioritaskan dibandingkan memperbesar diameter elektroda.

Selain faktor geometris elektroda, kondisi lingkungan tanah di sekitar elektroda juga sangat berpengaruh. Beberapa parameter lingkungan yang penting antara lain:

1. Kelembapan tanah → tanah yang lebih lembap memiliki konduktivitas lebih baik karena kandungan air meningkatkan mobilitas ion.
2. Temperatur tanah → suhu yang terlalu rendah dapat meningkatkan resistivitas tanah, terutama pada daerah yang mengalami pengeringan atau pembekuan.
3. Kandungan mineral dan garam terlarut → tanah dengan kandungan ion yang tinggi (misalnya tanah liat atau tanah yang mengandung garam) umumnya lebih konduktif.
4. Tingkat pemadatan tanah → tanah yang lebih padat memiliki kontak partikel yang lebih baik sehingga resistivitasnya cenderung lebih rendah dibanding tanah yang gembur.

Tanah yang lembap dan kaya mineral pada umumnya memiliki resistivitas yang lebih rendah dibandingkan tanah kering, berpasir, atau berbatu. Oleh karena itu, dalam perencanaan sistem grounding, survei resistivitas tanah menjadi langkah awal yang sangat penting untuk menentukan jenis dan konfigurasi elektroda yang paling sesuai.

Secara keseluruhan, nilai tahanan pentanahan merupakan hasil interaksi kompleks antara sifat listrik tanah, dimensi elektroda, serta kondisi lingkungan sekitar. Untuk memperoleh sistem *grounding* yang efektif dan memenuhi

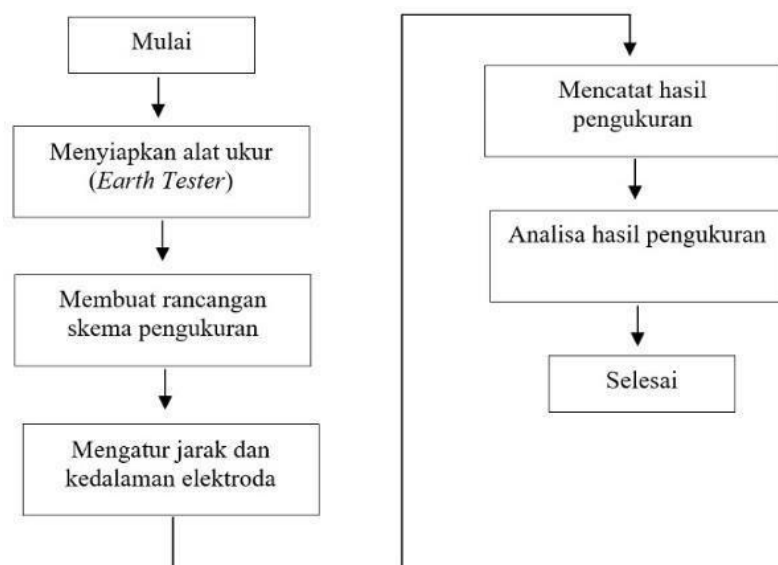
standar, diperlukan pendekatan desain yang mempertimbangkan seluruh faktor tersebut secara komprehensif. Selain itu, pemeliharaan kondisi tanah di sekitar elektroda juga perlu diperhatikan karena perubahan lingkungan dari waktu ke waktu dapat mempengaruhi performa sistem pentanahan.

2.2.4 Pengukuran Tahanan Pentanahan (*Grounding*)

Pada Sistem Pentanahan atau *Grounding* merupakan sistem yang dibuat untuk menyalurkan arus lebih ke bumi. Penyaluran arus ke bumi menjadikan perangkat elektronika yang ada diruangan dapat terhindar dari pengaruh petir baik secara langsung ataupun tidak langsung. Resistansi tanah (*Earth Resistance*) merupakan suatu nilai resistansi dari tanah yang dapat menjadikan media aliran arus listrik. Secara umum tanah merupakan penghantar atau konduktor tidak bagus, jika dibandingkan dengan kawat penghantar seperti kabel tembaga, besi atau lainnya. Namun tanah juga dapat difungsikan sebagai tempat aliran arus listrik, pada kondisi hujan deras dan disertai petir. Nilai resistansi yang terdapat didalam tanah tersebut bisa berkurang dan menjadi konduktor yang baik pada kondisi tertentu. Petir merupakan keadaan yang sering kali terjadi pada saat hujan. Definisi dari petir adalah suatu peristiwa yang peluahan muatan listrik di udara, terjadi diantara awan dengan awan, antara pusat-pusat muatan didalam awan dan antara awan dengan tanah. Sistem pengukuran menggunakan alat ukur *Earth Resistance Tester*. Alat ukur ini berfungsi untuk melakukan pengukuran pentanahan atau *Grounding*.

Pada saat melakukan pengukuran terkait pentanahan atau *Grounding* dibutuhkan beberapa alat ukur dan bahan lainnya. Diantaranya adalah alat ukur *Earth Tester* (alat ukur pentanahan), 3 (Tiga) kabel untuk penentuan titik (biasanya dibuat dengan warna yang berbeda) dan probe besi yang ditancapkan didalam tanah dengan jarak tertentu dari titik pentanahan yang hendak diukur. Karakteristik tanah yang hendak diukur juga memiliki tingkat keasaman yang berbeda-beda. Di Indonesia karakteristik tanahnya ada yang berupa tanah

berbatu, tanah berair, tanah kering, tanah pasir dan tanah rawa. Pada umumnya sistem pentanahan merupakan suatu sistem yang terdiri dari elektroda pentanahan yang digunakan bersama elektroda pentanahan dan alat ukur *Earth Tester*. Elektroda pentanahan dapat berupa batang yang ditancap secara tegak lurus atau ditanam sejajar dengan permukaan tanah, dan berupa lempeng atau plat, yang kesemuanya ini dirancang untuk memperkecil nilai tahanan pentanahan. Untuk hal tersebut terlebih dahulu harus ditentukan bahan maupun sifat elektrodanya, yang terutama harus mempunyai konduktifikasi yang tinggi serta resistivitas yang rendah, agar arus yang mengalir cepat ke dalam tanah. Perlu diingat dalam pemilihan elektroda harus tahan terhadap korosi. Pengukuran Sistem Pentanahan atau Grounding menggunakan 2 (Dua) metode yaitu metode tiga titik dan metode empat titik.



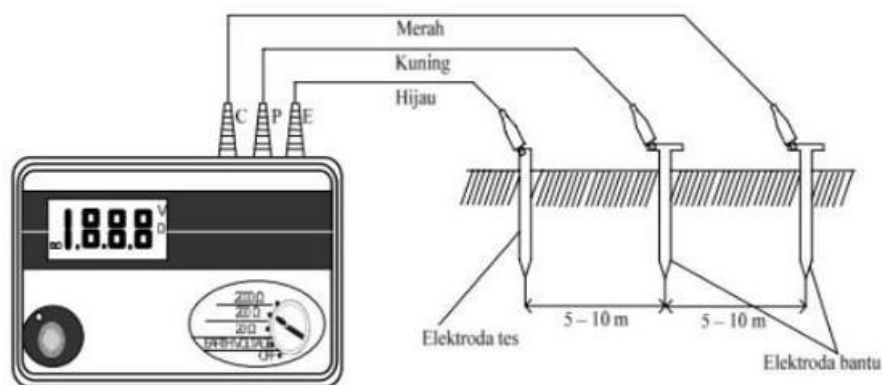
Gambar 2.2 Diagram alir/Flowchart 1
kegiatan pengukuran tahanan dengan elektroda

a. Metode Tiga Titik (*Three-Point Methode*)

Sistem pentanahan (*grounding*) diukur menggunakan metode tiga titik (*three-point method*) untuk mengetahui besarnya nilai tahanan pentanahan suatu instalasi. Metode ini merupakan salah satu teknik pengukuran yang paling umum digunakan karena mampu memberikan hasil yang akurat terhadap nilai resistansi elektroda pentanahan tanpa dipengaruhi oleh tahanan penghantar. Pada metode ini digunakan tiga buah elektroda, yaitu elektroda yang diuji (E), elektroda arus (C), dan elektroda potensial (P). Elektroda arus dipasang pada jarak tertentu dari elektroda yang diuji, sedangkan elektroda potensial ditempatkan di antara keduanya sesuai dengan ketentuan pengukuran.

Prinsip kerja metode tiga titik adalah dengan menginjeksikan arus listrik melalui elektroda arus (C) dan elektroda yang diuji (E), kemudian mengukur beda potensial yang terjadi melalui elektroda potensial (P). Berdasarkan nilai arus dan tegangan yang diperoleh, alat ukur akan menghitung besarnya nilai tahanan pentanahan menggunakan Hukum Ohm ($R = V/I$). Semakin kecil nilai tahanan pentanahan yang diperoleh, maka semakin baik kemampuan sistem pentanahan dalam mengalirkan arus gangguan ke dalam tanah sehingga dapat meningkatkan keselamatan peralatan maupun personel.

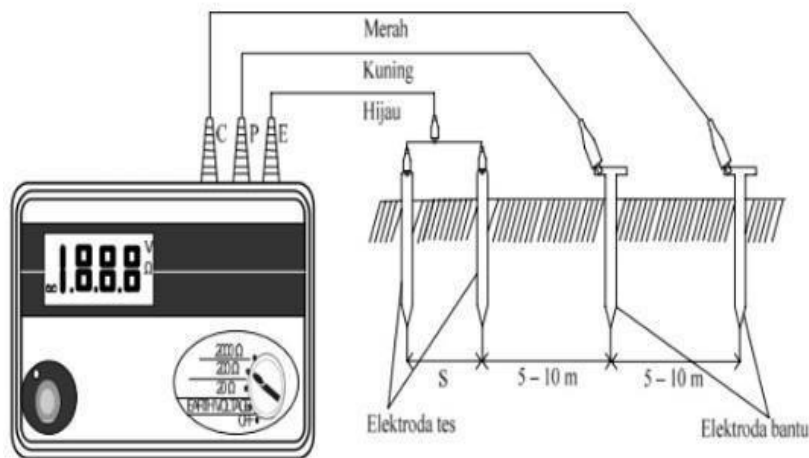
Berikut merupakan gambar pengukuran sistem pentanahan menggunakan metode tiga titik (*three-point method*):



Gambar 2.3 Pengukuran tanahan metode tiga 1

b. Metode Empat Titik (Four Electrode Methode)

Metode 4 (empat) titik ini menggunakan alat ukur dengan 4 (empat) terminal atau probe yang ditancapkan ke dalam tanah dengan jarak yang seragam, satu dengan lainnya. Keempat *probe* tersebut selanjutnya dihubungkan dengan kabel ke alat ukur. Alat ukur *Earth Resistance Tester* yang digunakan disarankan menggunakan alat ukur digital. Maksud menggunakan alat ukur digital supaya lebih mudah dalam pembacaan dalam melakukan pengukuran. Kalau menggunakan alat ukur yang sifatnya analog dikhawatirkan keliru dalam pembacaan hasil pengukuran. Berikut adalah gambar pengukuran dengan metode 4 (empat) titik (*four electrode methode*):



Gambar 2.4 Pengukuran tanah metode 4 titik 1

Sistem pentahanan (Grounding System) merupakan instalasi yang menghubungkan bagian-bagian peralatan listrik atau sistem tenaga listrik dengan tanah untuk tujuan keselamatan, seperti mencegah sengatan listrik dan melindungi peralatan dari gangguan seperti lonjakan tegangan petir. Sistem ini bekerja dengan mengalirkan arus listrik berlebih ke bumi melalui elektroda yang ditanam di tanah.



Gambar 2.5 Metode Pengukuran Pembumian 3 Titik dan Foto Hasil 1

Sistem pentahanan ialah jaringan penghantar yang mengalirkan sistem, komponen perangkat serta instalasi dengan tanah, sehingga manusia bisa terlindungi dari listrik serta perangkat instalasi bisa terjaga dari bahaya akibat tegangan atau arus yang tidak normal. Untuk meminimalkan risiko yang disebabkan oleh arus gangguan, nilai tahanan pentanahan harus dijaga serendah mungkin. Sebuah gedung harus memiliki nilai tahanan pentanahan di bawah 5Ω untuk menghindari risiko sambaran petir, sementara peralatan elektronik memerlukan nilai tahanan di bawah 3Ω , dan perangkat yang lebih sensitif bahkan memerlukan nilai di bawah 1Ω . Mencapai nilai pentanahan di bawah 3Ω untuk peralatan elektronik bisa menjadi tantangan, sebab nilai itu dipengaruhi faktor-faktor seperti jenis tanah, suhu, kelembaban, dan kondisi elektrolit tanah. Keseimbangan antara resistansi pembumian dan kapasitansi di sekitarnya dipengaruhi oleh nilai resistansi atau tahanan jenis tanah (ρ). Tahanan jenis tanah ini cenderung bervariasi pada kedalaman khusus, dan tidak bersifat seragam di seluruh lapisan tanah

a. Standar Pentanahan

Standar yang umum digunakan dalam sistem pentanahan adalah PUIL 2011 dan standar internasional IEEE Std 142. Berdasarkan ketentuan tersebut, nilai tahanan pentanahan untuk instalasi tenaga listrik umumnya disyaratkan tidak melebihi 5Ω . Nilai tahanan yang lebih kecil dari batas tersebut menunjukkan bahwa sistem grounding mampu mengalirkan arus gangguan dengan baik ke bumi. Sebaliknya, apabila nilai tahanan melebihi

standar, maka perlu dilakukan perbaikan sistem pentanahan, seperti penambahan elektroda, peningkatan kedalaman penanaman, atau perbaikan kondisi tanah.

b. Alasan Ilmiah Pentanahan

1. Mengurangi Risiko Kecelakaan: Pentanahan mengurangi risiko kecelakaan akibat sentuhan langsung atau tidak langsung dengan bagian listrik.
2. Mengurangi Tegangan Listrik: Pentanahan mengurangi tegangan listrik pada peralatan listrik dan manusia.
3. Meningkatkan Keamanan: Pentanahan meningkatkan keamanan sistem listrik dengan mengurangi risiko kebakaran dan ledakan.
4. Mengurangi Interferensi Elektromagnetik: Pentanahan mengurangi interferensi elektromagnetik yang dapat mempengaruhi peralatan Listrik
5. Meningkatkan Efisiensi: Pentanahan meningkatkan efisiensi sistem listrik dengan mengurangi rugi-rugi listrik.

c. Prinsip Dasar Pentanahan

1. Koneksi ke Tanah: Pentanahan harus terhubung ke tanah dengan resistansi yang rendah.
2. Penggunaan Konduktor: Konduktor pentanahan harus memiliki kemampuan menghantar listrik yang baik
3. Penggunaan Baut dan Mur: Baut dan mur harus digunakan untuk menghubungkan konduktor pentanahan.
4. Penggunaan Pengaman: Pengaman seperti fuse atau circuit breaker harus digunakan untuk melindungi sistem listrik

d. Jenis Pentanahan

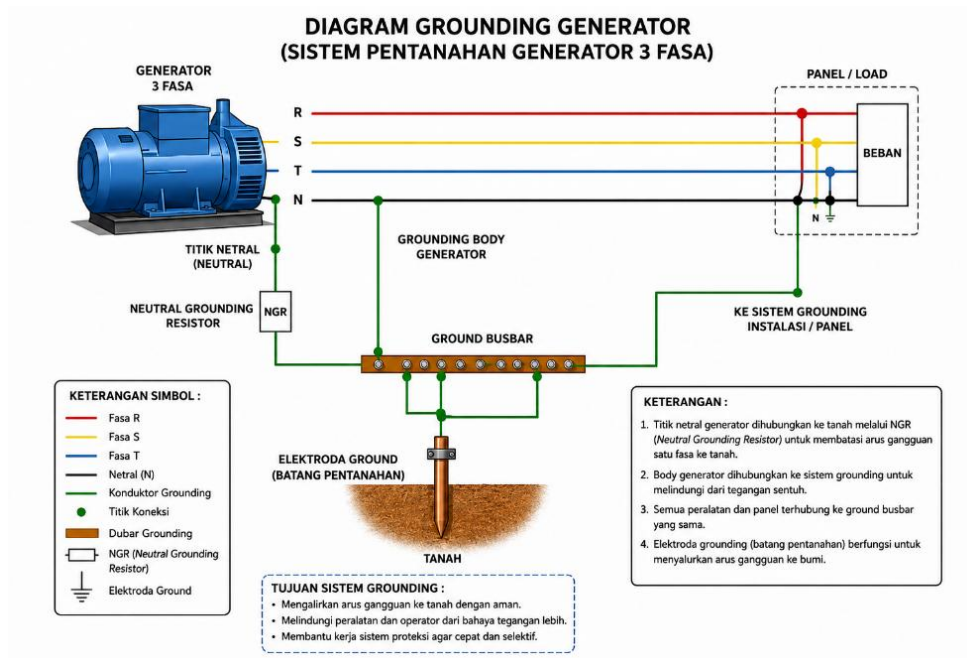
1. Pentanahan Langsung: Pentanahan langsung ke tanah.

2. Pentanahan Tidak Langsung: Pentanahan melalui perantara seperti transformer.
3. Pentanahan Kombinasi: Pentanahan kombinasi langsung dan tidak langsung

e. **Komponen Pentanahan**

1. Konduktor Pentanahan: Konduktor yang menghubungkan peralatan listrik ke tanah.
2. Pengaman Pentanahan: Pengaman yang melindungi sistem listrik dari arus listrik yang tidak diinginkan.
3. Baut dan Mur: Baut dan mur yang digunakan untuk menghubungkan konduktor pentanahan.
4. Penghubung Pentanahan: Penghubung yang menghubungkan konduktor pentanahan ke peralatan Listrik

f. **Diagram Sistem *Grounding***



Gambar 2.6 Diagram sistem grounding 1

Diagram grounding generator menunjukkan sistem pentanahan pada generator 3 fasa di Pembangkit Listrik Tenaga Diesel. Sistem ini berfungsi untuk menyalurkan arus gangguan atau arus bocor ke tanah agar generator, panel, dan operator terlindungi dari bahaya listrik. Titik netral generator dihubungkan ke tanah melalui *Neutral Grounding Resistor* (NGR) untuk membatasi arus gangguan, sedangkan *body generator* dihubungkan ke elektroda *grounding* agar aman dari tegangan sentuh. Sistem grounding membantu menjaga kestabilan tegangan dan meningkatkan keandalan sistem kelistrikan.

2.3 *Singel Line Diagram* (SDL)

2.3.1 Pengertian SDL

***Single Line Diagram* (SLD)** sistem grounding adalah gambar atau diagram satu garis yang digunakan untuk menggambarkan hubungan dan susunan sistem pembumian pada suatu instalasi listrik secara sederhana. Diagram ini menunjukkan hubungan antara sumber atau panel listrik, penghantar proteksi (PE), terminal pembumian, konduktor pembumian, elektroda bumi, hingga hubungan dengan tanah. SLD digunakan karena rangkaian instalasi listrik yang sebenarnya dapat memiliki banyak penghantar dan komponen, sedangkan diagram satu garis menyederhanakannya menjadi satu garis untuk mempermudah pembacaan, analisis, perencanaan, dan pemeriksaan sistem. Dalam ketentuan teknis Indonesia, diagram satu garis digunakan untuk menunjukkan rangkaian listrik dan fasilitas utama dalam konfigurasi instalasi.

Dalam sistem pembumian, elektroda bumi merupakan penghantar yang ditanam di dalam tanah dan membuat kontak langsung dengan bumi. Elektroda tersebut dihubungkan ke terminal pembumian utama menggunakan konduktor pembumian.

2.3.2 Tujuan SLD

Tujuan pembuatan Single Line Diagram sistem grounding antara lain:

1. Menunjukkan hubungan system grounding
SLD memperlihatkan hubungan antara panel, penghantar PE, ground bar, konduktor pembumian, elektroda bumi, dan tanah.
2. Mempermudah pemahaman sistem
Sistem kelistrikan yang kompleks dapat digambarkan secara sederhana sehingga lebih mudah dipahami.
3. Mempermudah pemeriksaan instalasi
Diagram dapat digunakan sebagai acuan untuk mengetahui jalur pembumian dan memastikan setiap bagian yang membutuhkan proteksi terhubung dengan sistem grounding.
4. Mendukung keselamatan manusia dan peralatan
Sistem pembumian merupakan salah satu bagian dari upaya proteksi terhadap bahaya listrik. IEC 60364 menetapkan prinsip keselamatan instalasi untuk melindungi manusia, hewan, dan properti dari bahaya yang dapat timbul dalam penggunaan instalasi listrik.
5. Membantu proses pemeliharaan
SLD dapat menjadi acuan teknisi ketika melakukan pemeriksaan, pengukuran tahanan grounding, perbaikan, maupun pengembangan instalasi.
6. Menunjukkan jalur arus gangguan
Saat terjadi gangguan pada peralatan, sistem grounding menyediakan jalur penghantar yang sesuai sehingga sistem proteksi dapat bekerja sebagaimana dirancang.
7. Sebagai dokumentasi instalasi
SLD dapat digunakan sebagai dokumen teknis untuk menggambarkan kondisi dan konfigurasi sistem kelistrikan yang terpasang.

2.3.3 Fungsi SLD

Secara umum, sistem grounding memiliki beberapa fungsi penting:

1. Mengurangi risiko sengatan listrik pada manusia.
2. Menyediakan jalur bagi arus gangguan.
3. Membantu perangkat proteksi bekerja ketika terjadi gangguan.

4. Menjaga bagian logam peralatan agar berada pada potensial yang lebih aman.
5. Membantu melindungi peralatan listrik dari kondisi gangguan tertentu.
6. Mendukung keselamatan dan keandalan instalasi listrik.

IEC 60364-5-54 secara khusus mengatur *earthing arrangements* dan *protective conductors* untuk memenuhi aspek keselamatan instalasi listrik.

2.4 Penelitian Relevan

Peneliti melakukan tinjauan pustaka terhadap beberapa penelitian sebelumnya yang relevan dengan topik analisis sistem grounding pada generator. Tinjauan ini bertujuan untuk memperoleh dasar empiris, mengetahui perkembangan metode grounding yang digunakan, serta mengidentifikasi kesenjangan penelitian (research gap) yang dapat dijadikan dasar penelitian ini. Beberapa penelitian terdahulu yang dijadikan acuan adalah sebagai berikut:

1. Utami & Trisnawati (2022) dalam jurnal ELECTRICIAN – Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro berjudul “Analisa Pengaruh Sistem Pembumian pada Generator menggunakan Metode NGR untuk Mereduksi Arus Gangguan Satu Fasa ke Tanah pada PLTU PT Sugar Labinta”. Penelitian ini menganalisis sistem pembumian generator menggunakan Neutral Grounding Resistor (NGR) dan menunjukkan bahwa sistem ini mampu menurunkan arus gangguan dari 3.600 A menjadi 847 A. Hasil penelitian menunjukkan metode NGR efektif dalam menjaga keandalan sistem dan melindungi peralatan terhadap arus gangguan satu fasa ke tanah.
2. Fitriani, Siregar & Syafriwel (2023) dalam Journal of Electrical Engineering, Mechatronics and Computer Science (JEEMECS) meneliti “Implementation of Generator Grounding Parameters through Distribution Transformer using LabVIEW”. Penelitian ini melakukan simulasi sistem grounding generator melalui transformator distribusi menggunakan aplikasi LabVIEW. Hasilnya

menunjukkan parameter grounding seperti tahanan pentanahan, arus bocor, dan potensial netral sangat berpengaruh terhadap kestabilan sistem tenaga.

3. Oktari (2023) dalam jurnal J-Innovative menulis “Evaluasi Sistem Grounding pada Generator LM2000 di PLTG Borang”. Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi efektivitas sistem grounding terhadap stabilitas tegangan dan proteksi peralatan. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem grounding yang baik dapat menurunkan risiko gangguan tegangan berlebih hingga 40%.
4. Bey (2006) dalam laporan teknis Grounding of AC Generators and Switching the Neutral menjelaskan bagaimana pengaturan sistem netral dan pembumian pada generator memengaruhi proteksi sistem tenaga, khususnya pada sistem darurat dan standby generator. Hasil kajian menunjukkan bahwa hybrid grounding dapat meningkatkan kean
5. Multiquip (2019) melalui publikasi teknis Grounding & Bonding; Temporary Power Generation and Electrical Distribution memberikan panduan penerapan sistem dalam sistem sekaligus mengurangi efek lonjakan tegangan akibat switching. grounding pada generator portabel dan sistem sementara. Panduan ini menekankan pentingnya pemilihan metode grounding yang sesuai dengan jenis beban dan kondisi lingkungan untuk menjamin keselamatan operator.

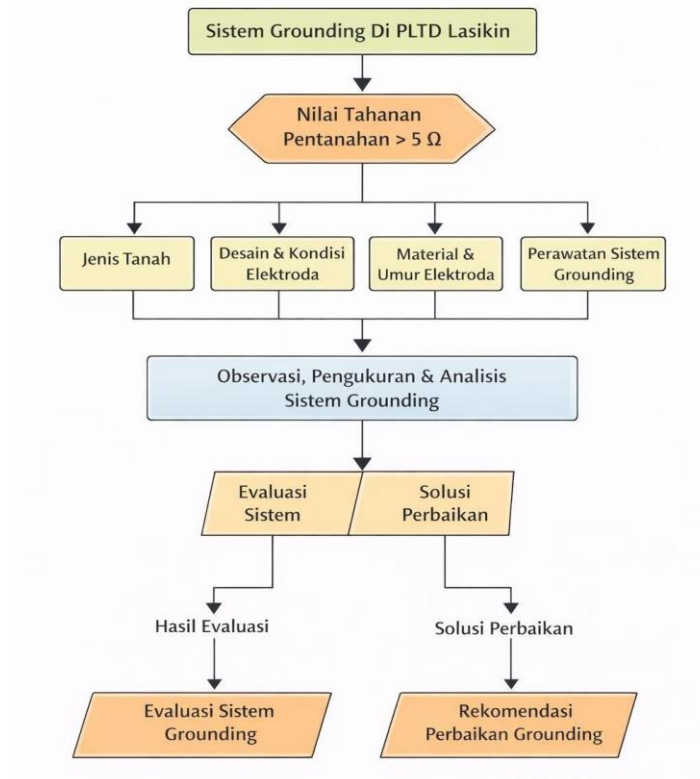
Tabel 2.1 penelitian yang relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Research Gap
1	<i>Analisa Pengaruh Sistem Pembumian pada Generator</i>	Arus gangguan satu fasa ke tanah terlalu	Analisis Kuantitatif menggunakan Simulasi	NGR menurunkan Arus gangguan	Belum membahas efek NGR Terhadap

	<i>menggunakan Metode NGR untuk Mereduksi Arus Gangguan Satu Fasa ke Tanah pada PLTU PT Sugar Labinta (Utami & Trisnawati, 2022)</i>	besar pada sistem pembumian langsung.	ETAP.	dari 3.600 A menjadi 847 A.	Kestabilan tegangan dan umur isolasi generator.
2.	<i>Implementation of Generator Grounding Parameters through Distribution Transformer using LabVIEW (Fitriani et al., 2023)</i>	Belum ada sistem pemantauan otomatis untuk parameter grounding generator.	Simulasi dan pengukuran parameter grounding menggunakan LabVIEW.	Sistem LabVIEW dapat memonitor tahanan pentanahan secara real-time.	Belum diterapkan pada kondisi lapangan yang sebenarnya.
3.	<i>Evaluasi Sistem Grounding pada Generator LM2000 di PLTG</i>	Tidak adanya evaluasi efektivitas grounding terhadap kestabilan sistem	Studi kasus dengan pengukuran langsung di PLTG.	Grounding menurunkan tegangan berlebih hingga 40%.	Belum mengkaji hubungan resistansi tanah dengan kondisi lingkungan.

	<i>Borang</i> (Oktari, 2023)	tegangan.			
4	<i>Grounding of AC Generators and Switching the Neutral</i> (Bey, 2006)	Tegangan transien tinggi akibat sistem netral tidak stabil.	Studi pustaka dan eksperimen sistem hybrid grounding.	Hybrid grounding efektif mengurangi efek Switching dan gangguan transient	Tidak membahas penerapan pada generator modern berbasis digital relay.
5	<i>Grounding & Bonding; Temporary Power Generation and Electrical Distribution</i> (Multiquip, 2019)	Kurangnya pemahaman instalasi grounding untuk generator portabel.	Studi teknis dan pengujian lapangan.	Memberikan panduan instalasi grounding aman untuk sistem sementara.	Tidak mengevaluasi performa sistem grounding terhadap kestabilan arus netral.

2.5 Kerangka pemikiran



Gambar 2.7 kerangka pemikiran 1

Menurut kerangka pemikiran penulis, Penelitian ini terdiri dari pencarian alur berpikir dan proses penelitian. Dalam kasus ini, penelitian ini dimulai dengan mengemukakan masalah. Untuk ini, gangguan berulang pada tegangan yang dapat ditemukan di generator, kesalahan arus bocor dan stabilitas sistem disajikan sebagai argumen. Sebagai korupsi daripada kinerja, digambarkan bahwa sistem grounding tidak mematuhi standar. Langkah-langkah selanjutnya mencakup langsung pengumpulan data penyelidikan pengukuran; pengukuran tahanan pembumian; analisis hasil data; simpulkan pendapat mengenai efektivitas sistem pembumian.