

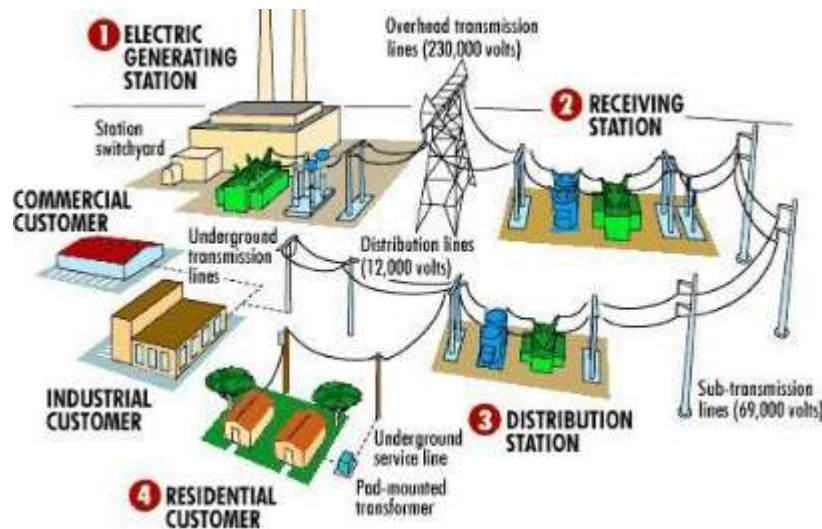
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu kesatuan yang terdiri dari komponen pembangkitan, transmisi, dan distribusi yang saling terintegrasi untuk menyalurkan energi listrik dari sumber pembangkit ke konsumen akhir secara andal dan efisien. Ketiga bagian ini memiliki peran penting dalam menjaga kontinuitas dan kualitas pasokan listrik. Energi listrik yang dibangkitkan pada pusat pembangkit dialirkan melalui jaringan transmisi bertegangan tinggi, kemudian diturunkan tegangannya melalui gardu induk untuk didistribusikan ke pelanggan melalui jaringan tegangan menengah dan rendah[8]. Dalam sistem yang kompleks ini, keandalan operasi sangat bergantung pada kondisi peralatan, terutama pada gardu induk yang menjadi titik peralihan energi listrik antara sistem transmisi dan distribusi.[9]



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

Pada tingkat distribusi tegangan menengah, khususnya sistem 20 kV, digunakan berbagai perangkat penghubung dan proteksi seperti cubicle atau panel distribusi. Cubicle 20 kV berfungsi untuk mengatur aliran daya listrik, melindungi sistem dari gangguan, serta mempermudah proses pemeliharaan jaringan. Di dalam cubicle terdapat komponen penting seperti pemutus tenaga (VCB), saklar beban (LBS), rel busbar, serta sistem isolasi yang bekerja pada tegangan tinggi. Kondisi isolasi ini sangat krusial karena berfungsi menahan tegangan listrik agar tidak terjadi loncatan arus antar konduktor. Gangguan pada sistem isolasi, seperti terjadinya *Partial Discharge*, dapat menyebabkan degradasi material isolasi yang dalam jangka panjang berpotensi menimbulkan kerusakan serius dan menurunkan keandalan jaringan distribusi listrik.[10]

Oleh karena itu, pemantauan kondisi peralatan dalam sistem tenaga listrik menjadi hal yang penting untuk menjamin keandalan penyaluran energi. Dalam konteks Gardu Induk Kolaka, keberadaan cubicle 20 kV merupakan komponen vital yang harus dijaga performanya agar tidak mengganggu kontinuitas pasokan listrik di wilayah kerja tersebut. Melalui pemantauan dan evaluasi aktivitas *Partial Discharge*, kondisi kesehatan sistem isolasi dapat diketahui sejak dini sehingga langkah pencegahan dapat dilakukan sebelum terjadi gangguan besar[11]. Dengan demikian, sistem tenaga listrik tidak hanya berfungsi sebagai jaringan penyalur energi, tetapi juga sebagai sistem yang harus dikelola secara cermat melalui pendekatan pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition Based Maintenance*) guna meningkatkan keandalan dan umur operasi peralatan distribusi.

Gardu induk memiliki fungsi penting dalam sistem tenaga listrik, yaitu sebagai tempat penurunan tegangan dari jaringan transmisi ke jaringan distribusi serta sebagai pusat pengendalian, pengukuran, dan proteksi sistem. Melalui gardu induk, energi listrik yang dikirim dari pembangkit dapat disesuaikan tegangannya agar aman dan efisien untuk disalurkan ke pelanggan[12]. Di dalam gardu induk, cubicle 20 kV menjadi salah satu peralatan utama pada sisi distribusi yang berperan dalam mengatur aliran daya dan melindungi sistem dari gangguan. Posisi cubicle ini sangat strategis karena menjadi penghubung langsung antara sistem distribusi dan beban pelanggan.

2.1.2 Gardu Induk

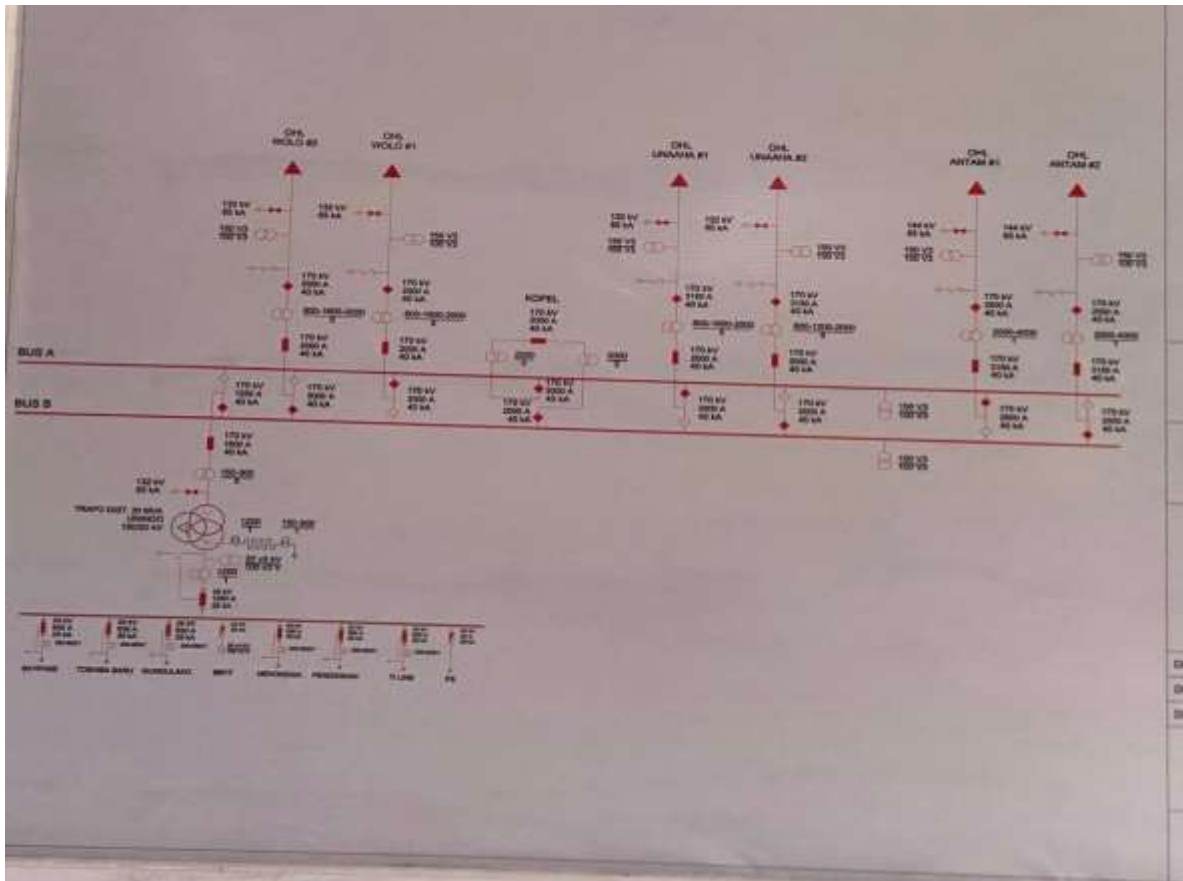
Gardu induk merupakan salah satu komponen vital dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai pusat penghubung antara jaringan transmisi dan jaringan distribusi. Pada gardu induk, energi listrik yang dikirim dari pembangkit melalui saluran transmisi bertegangan tinggi akan diturunkan tegangannya ke tingkat yang lebih rendah agar dapat disalurkan ke jaringan distribusi. Proses penurunan tegangan ini dilakukan menggunakan transformator tenaga, sedangkan pengaturan dan pengendalian arus listrik dilakukan melalui peralatan proteksi seperti pemutus tenaga (*circuit breaker*), pemisah (*disconnecting switch*), dan cubicle 20 kV. Dengan demikian, gardu induk tidak hanya berfungsi menyalurkan energi listrik, tetapi juga sebagai pusat kontrol, pengamanan, dan penyeimbang beban dalam sistem tenaga listrik.[13]



Gambar 2. 2 Gardu Induk Kolaka 150kv

Selain sebagai titik peralihan tegangan, gardu induk juga berperan penting dalam menjaga kontinuitas dan keandalan pasokan energi listrik. Keandalan gardu induk sangat dipengaruhi oleh kondisi peralatan di dalamnya, termasuk cubicle tegangan menengah yang berfungsi mengatur distribusi daya ke jaringan pelanggan. Kinerja peralatan tersebut sangat bergantung pada kualitas isolasi dan sistem proteksinya. Gangguan pada sistem isolasi,

seperti terjadinya *Partial Discharge*, dapat menurunkan performa peralatan dan memicu kegagalan sistem secara menyeluruh. Oleh karena itu, kegiatan pemantauan dan evaluasi kondisi isolasi pada gardu induk menjadi hal yang sangat penting untuk mencegah terjadinya gangguan dan menjaga kestabilan sistem distribusi tenaga listrik.[13]



Gambar 2. 2 Singel Line Diagram Gardu Induk Kolaka 150 KV

Dalam konteks Gardu Induk Kolaka, perannya semakin krusial seiring meningkatnya kebutuhan energi listrik di wilayah Sulawesi Tenggara. Gardu induk ini menjadi salah satu pusat penyaluran utama yang melayani jaringan distribusi 20 kV, sehingga setiap gangguan yang terjadi dapat berdampak langsung pada kontinuitas pasokan listrik bagi masyarakat dan industri setempat. Melalui penerapan metode pemantauan dan evaluasi *Partial Discharge*, kondisi kesehatan isolasi cubicle 20 kV dapat dipantau secara berkala untuk mendeteksi

gejala kerusakan sejak dini. Dengan cara ini, Gardu Induk Kolaka dapat mempertahankan keandalan operasionalnya sekaligus mendukung sistem distribusi listrik yang efisien, aman, dan berkelanjutan.

2.1.3. Kubikel 20kV

Kubikel tegangan menengah merupakan salah satu peralatan utama dalam sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi untuk mengatur, menghubungkan, serta melindungi aliran daya listrik dari gardu induk menuju jaringan distribusi. Pada sistem distribusi 20 kV, kubikel berperan penting sebagai titik pengendali penyulang sekaligus sebagai sistem proteksi terhadap gangguan listrik yang dapat merusak peralatan lain di dalam gardu induk. Di Gardu Induk Kolaka 150 kV, kubikel berfungsi menyalurkan energi listrik dari sisi sekunder transformator tenaga ke jaringan distribusi. Secara umum, kubikel terdiri atas beberapa komponen utama seperti pemutus tenaga (*Vacuum Circuit Breaker*), pemisah beban, busbar, isolator, rel pelindung, serta sistem proteksi yang dirancang untuk bekerja pada tegangan menengah dengan tingkat keamanan tinggi.[14]

Kinerja kubikel sangat dipengaruhi oleh kondisi sistem isolasi di dalamnya. Isolasi berfungsi menahan tegangan listrik agar tidak terjadi loncatan arus antar konduktor yang dapat menyebabkan gangguan. Namun, seiring waktu, material isolasi dapat mengalami degradasi akibat faktor lingkungan seperti kelembapan, suhu tinggi, kontaminasi debu, serta tegangan berlebih. Salah satu gejala awal terjadinya penurunan kualitas isolasi adalah munculnya fenomena *Partial Discharge* (PD) atau pelepasan muatan parsial. PD merupakan peristiwa pelepasan listrik sebagian pada area kecil bahan isolasi yang tidak sepenuhnya menembus isolasi tersebut. Aktivitas PD yang tidak dikendalikan dapat mempercepat proses penuaan isolasi dan berpotensi menimbulkan *flashover* yang menyebabkan kegagalan total kubikel.[15]



Gambar 2. 3 Kubikel 20kV GI Kolaka

Untuk mencegah terjadinya gangguan akibat degradasi isolasi, diperlukan pemantauan kondisi kubikel melalui pengukuran dan evaluasi aktivitas *Partial Discharge*. Pemantauan PD secara berkala dapat memberikan informasi mengenai kondisi kesehatan isolasi kubikel sehingga tindakan pemeliharaan dapat dilakukan sebelum terjadi kerusakan serius. Penerapan metode ini merupakan bagian dari konsep pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition Based Maintenance*), di mana perawatan dilakukan berdasarkan hasil pemantauan aktual, bukan sekadar jadwal rutin. Dengan demikian, kegiatan pemantauan *Partial Discharge* pada kubikel 20 kV di Gardu Induk Kolaka 150 kV berperan penting dalam menjaga keandalan sistem distribusi tenaga listrik, memperpanjang umur peralatan, serta mencegah terjadinya gangguan yang dapat menyebabkan pemadaman pada sistem kelistrikan.[16]

2.1.4. Patrial Discharge

Partial Discharge (PD) atau pelepasan muatan parsial merupakan fenomena kelistrikan yang terjadi ketika medan listrik di dalam bahan isolasi cukup kuat untuk

menyebabkan loncatan listrik sebagian, namun belum cukup untuk menembus seluruh lapisan isolasi. Dengan kata lain, PD adalah proses pelepasan sebagian energi listrik di dalam rongga kecil, celah udara, atau permukaan bahan isolasi yang mengalami tegangan tinggi. Fenomena ini umumnya terjadi pada peralatan tegangan menengah dan tinggi seperti transformator, kabel daya, dan kubikel 20 kV, di mana sistem isolasi bekerja dalam kondisi tegangan tinggi secara terus-menerus. Aktivitas PD yang berlangsung berulang dapat mempercepat penuaan material isolasi dan pada akhirnya menyebabkan kerusakan permanen atau *breakdown* total.[17]



Gambar 2. 4 Alat deteksi Partial Discharge

Secara umum, *Partial Discharge* dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan lokasi terjadinya. Jenis pertama adalah internal discharge, yaitu PD yang terjadi di dalam rongga atau ketidaksempurnaan bahan isolasi padat. Kedua, surface discharge, yaitu pelepasan muatan yang muncul di permukaan isolator akibat adanya kelembapan, debu, atau

kontaminasi. Ketiga, corona discharge, yang terjadi di sekitar konduktor dengan medan listrik tinggi, terutama pada bagian ujung atau sudut tajam. Setiap jenis PD menghasilkan pola gelombang, intensitas, dan suara khas yang dapat diidentifikasi menggunakan alat ukur tertentu. Aktivitas PD sering kali tidak langsung terlihat, namun dapat dideteksi melalui sinyal akustik, elektromagnetik, atau optik yang ditimbulkannya.

Fenomena PD menjadi indikator penting dalam menentukan kondisi kesehatan sistem isolasi suatu peralatan. Besarnya aktivitas PD biasanya dinyatakan dalam satuan picocoulomb (pC) yang menggambarkan energi pelepasan muatan. Semakin besar nilai PD, semakin tinggi tingkat degradasi isolasi yang terjadi. Oleh karena itu, pemantauan PD secara berkala diperlukan untuk mendeteksi gejala kerusakan sejak dini sebelum menyebabkan gangguan besar seperti *flashover* atau kegagalan peralatan. Pada kubikel 20 kV di Gardu Induk Kolaka 150 kV, aktivitas *Partial Discharge* dapat muncul akibat tegangan lebih, penuaan bahan isolasi, atau kondisi lingkungan lembap. Dengan melakukan evaluasi PD secara sistematis, kondisi isolasi kubikel dapat dinilai secara akurat sehingga tindakan pemeliharaan preventif dapat dilakukan tepat waktu guna meningkatkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik.[18]

Selain itu, fenomena Partial Discharge juga sangat dipengaruhi oleh distribusi medan listrik di dalam sistem isolasi. Ketika medan listrik tidak terdistribusi secara merata, maka pada titik tertentu akan terjadi konsentrasi medan listrik yang lebih tinggi dibandingkan area lainnya. Kondisi ini biasanya terjadi pada bagian ujung konduktor yang tajam, sambungan kabel yang tidak sempurna, atau adanya rongga kecil di dalam bahan isolasi. Konsentrasi medan listrik yang tinggi tersebut menyebabkan molekul udara di sekitar area tersebut mengalami ionisasi sehingga terbentuk jalur konduksi sementara yang memicu terjadinya pelepasan muatan parsial.

Proses terjadinya Partial Discharge berlangsung dalam waktu yang sangat singkat, namun dapat terjadi secara berulang dalam setiap siklus tegangan AC. Setiap kejadian PD menghasilkan energi panas, radiasi elektromagnetik, serta reaksi kimia yang dapat merusak

struktur material isolasi. Dalam jangka waktu panjang, proses ini menyebabkan terbentuknya jalur konduktif permanen pada isolasi yang dikenal sebagai electrical treeing. Jika fenomena ini terus berkembang tanpa dilakukan tindakan pemeliharaan, maka isolasi akan mengalami kerusakan total yang berujung pada kegagalan sistem atau breakdown.

Selain sebagai indikator degradasi isolasi, aktivitas Partial Discharge juga dapat digunakan sebagai parameter untuk menentukan kondisi kesehatan peralatan listrik. Dalam praktik industri kelistrikan modern, pengukuran PD sering dijadikan bagian dari sistem monitoring kondisi peralatan (condition monitoring). Dengan melakukan pemantauan PD secara berkala, operator dapat mengetahui perkembangan kondisi isolasi dari waktu ke waktu sehingga dapat melakukan tindakan pemeliharaan sebelum terjadi kerusakan yang lebih serius. Pendekatan ini sangat penting dalam meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik serta memperpanjang umur operasi peralatan tegangan menengah dan tinggi.

2.1.5. Metode Pengukuran Partial Discharge

Metode pengukuran Partial Discharge (PD) merupakan langkah penting dalam mendeteksi kondisi degradasi sistem isolasi pada peralatan tegangan menengah dan tinggi. Pengukuran PD dilakukan untuk mengetahui tingkat aktivitas pelepasan muatan parsial yang terjadi pada suatu peralatan tanpa harus menghentikan operasi sistem. Metode ini termasuk dalam pengujian non-destruktif karena tidak merusak atau mengganggu sistem kelistrikan yang sedang beroperasi.

Secara umum, metode pengukuran PD dapat dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu pengukuran offline dan online. Pengukuran offline dilakukan ketika peralatan dalam kondisi tidak beroperasi dan biasanya menggunakan tegangan uji tertentu. Metode ini memiliki keunggulan dalam akurasi yang tinggi, namun memiliki kelemahan karena memerlukan pemadaman sistem. Sebaliknya, metode online dilakukan saat sistem beroperasi normal sehingga lebih praktis dan sesuai dengan kebutuhan operasional industri.



Gambar 2. 5 Alat Ukur Ultratev



Gambar 2. 6 UHF

Beberapa metode pengukuran PD yang umum digunakan antara lain metode ultrasound, Transient Earth Voltage (TEV), dan Ultra High Frequency (UHF). Metode

ultrasound memanfaatkan gelombang suara frekuensi tinggi yang dihasilkan oleh aktivitas PD. Metode ini sangat efektif dalam mendeteksi corona discharge, tracking, dan arcing pada peralatan kubikel. Metode TEV digunakan untuk mendeteksi tegangan transien yang muncul akibat aktivitas PD di dalam panel tertutup. Sedangkan metode UHF digunakan untuk mendeteksi gelombang elektromagnetik yang dihasilkan oleh pelepasan muatan.

Pemilihan metode pengukuran PD bergantung pada kondisi peralatan, lokasi pengukuran, serta tujuan analisis. Dalam penelitian ini, metode ultrasound dipilih karena mampu mendeteksi aktivitas PD secara cepat, praktis, dan tanpa mengganggu operasi sistem distribusi. Dengan pemantauan yang rutin, metode ini dapat memberikan data tren kondisi isolasi sehingga dapat digunakan dalam perencanaan pemeliharaan berbasis kondisi.

Selain metode ultrasound, TEV, dan UHF, terdapat pula metode pengukuran Partial Discharge secara konvensional yang mengacu pada standar **IEC 60270**. Metode ini menggunakan rangkaian pengukuran khusus yang terdiri dari coupling capacitor, measuring impedance, serta detektor PD. Prinsip kerja metode ini adalah mengukur muatan listrik yang dilepaskan akibat aktivitas PD dalam satuan picocoulomb (pC). Metode ini banyak digunakan pada pengujian laboratorium karena memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam mendeteksi besarnya muatan parsial.

Namun dalam praktik di lapangan, khususnya pada sistem distribusi yang sedang beroperasi, metode konvensional seringkali sulit diterapkan karena memerlukan kondisi peralatan dalam keadaan tidak bertegangan. Oleh karena itu, metode pengukuran non-konvensional seperti ultrasound dan UHF lebih banyak digunakan dalam sistem monitoring online. Metode ini memungkinkan deteksi PD dilakukan tanpa menghentikan operasi sistem sehingga lebih praktis dan efisien dalam kegiatan pemeliharaan.

Keunggulan lain dari metode pengukuran PD modern adalah kemampuannya dalam melakukan analisis tren kondisi isolasi. Data hasil pengukuran dapat disimpan dan dianalisis secara berkala untuk melihat perkembangan aktivitas PD pada suatu peralatan. Jika terjadi peningkatan nilai PD secara signifikan dari waktu ke waktu, maka hal tersebut dapat menjadi

indikator adanya degradasi isolasi yang perlu segera ditangani. Dengan demikian, metode pengukuran PD tidak hanya berfungsi sebagai alat diagnosis gangguan, tetapi juga sebagai alat prediksi kondisi peralatan dalam jangka panjang.

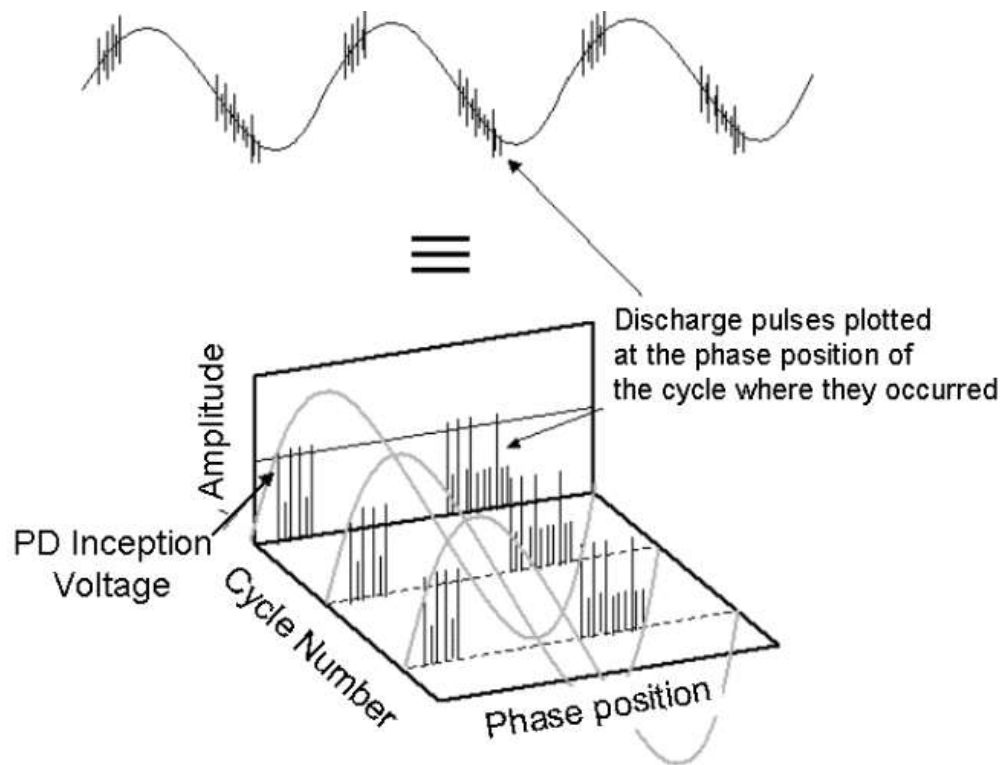
2.1.6. Analisis Pola Partial Discharge

Analisis pola Partial Discharge atau Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) merupakan teknik penting dalam evaluasi aktivitas PD. Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi jenis, lokasi, serta karakteristik pelepasan muatan berdasarkan hubungan antara fase tegangan dan sinyal PD yang terdeteksi.

Dalam sistem tenaga listrik, aktivitas PD biasanya dipengaruhi oleh kondisi medan listrik, bentuk gelombang tegangan, serta karakteristik bahan isolasi. Oleh karena itu, analisis PRPD dilakukan dengan memetakan aktivitas PD terhadap sudut fase tegangan AC. Pola yang dihasilkan memiliki karakteristik tertentu yang dapat digunakan untuk membedakan jenis gangguan isolasi.

Misalnya, internal discharge umumnya memiliki pola simetris pada kedua setengah siklus gelombang tegangan. Surface discharge menunjukkan pola yang tidak simetris dan cenderung muncul pada area permukaan isolasi. Corona discharge memiliki pola khas yang muncul pada sudut tertentu akibat konsentrasi medan listrik.

Analisis PRPD sangat penting dalam menentukan prioritas pemeliharaan. Dengan mengetahui jenis PD, operator dapat menentukan tindakan perbaikan yang tepat, seperti pembersihan isolator, penggantian komponen, atau perbaikan sistem grounding. Teknik ini juga mendukung pengembangan sistem monitoring berbasis kecerdasan buatan untuk meningkatkan akurasi diagnosis kondisi peralatan.



Gambar 2. 7 Pola Partial Discharge

2.1.7. Condition Based Maintenance

Condition Based Maintenance (CBM) merupakan strategi pemeliharaan modern yang didasarkan pada kondisi aktual peralatan. Berbeda dengan pemeliharaan preventif konvensional yang dilakukan secara berkala, CBM dilakukan berdasarkan hasil pemantauan dan analisis kondisi peralatan.

Dalam sistem tenaga listrik, CBM memiliki peran penting dalam meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional. Dengan memanfaatkan data dari pemantauan PD, operator dapat mengetahui kondisi kesehatan isolasi secara real-time. Hal ini memungkinkan tindakan pemeliharaan dilakukan sebelum terjadi gangguan besar.

Keunggulan utama CBM adalah mampu mengurangi biaya pemeliharaan, meningkatkan umur peralatan, serta mengurangi risiko pemadaman. Selain itu, CBM

memungkinkan pengalokasian sumber daya yang lebih efektif karena fokus pada peralatan yang memiliki risiko tinggi.

Dalam konteks penelitian ini, pemantauan Partial Discharge menjadi dasar utama penerapan CBM pada kubikel 20 kV di Gardu Induk Kolaka. Data PD digunakan untuk menentukan prioritas perbaikan dan menghindari kegagalan sistem secara tiba-tiba.



Gambar 2. 8 Inspeksi Patrial Discharge

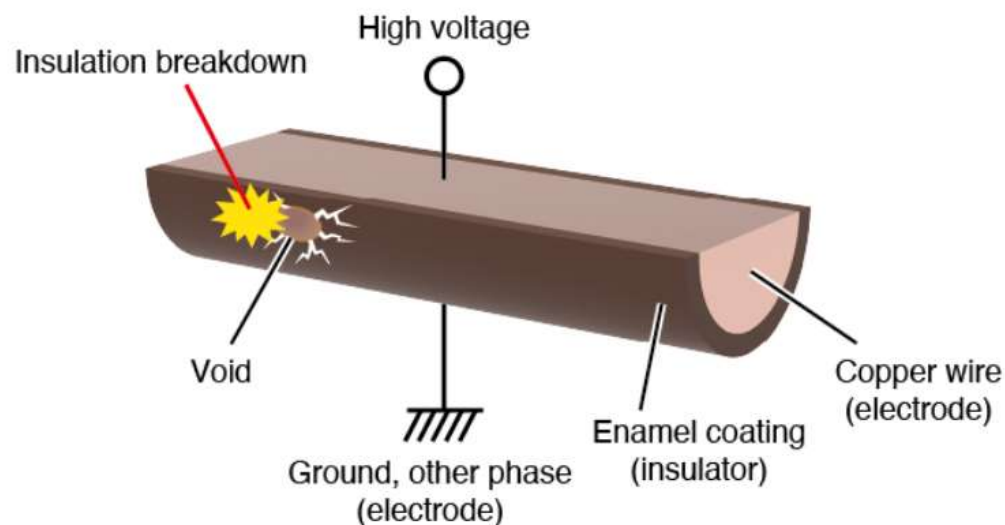
2.1.8. Faktor Penyebab Partial Discharge pada Kubikel 20 kV

Aktivitas Partial Discharge pada kubikel 20 kV dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik internal maupun eksternal. Faktor internal meliputi kualitas bahan isolasi, desain peralatan, serta proses instalasi. Ketidaksempurnaan pada bahan isolasi dapat menyebabkan terbentuknya rongga udara yang menjadi sumber PD.

Faktor eksternal meliputi kelembapan, suhu tinggi, kontaminasi debu, dan polusi lingkungan. Kondisi lingkungan tropis seperti di Indonesia memiliki tingkat kelembapan tinggi yang dapat mempercepat degradasi isolasi.

Selain itu, tegangan lebih akibat gangguan sistem juga dapat meningkatkan aktivitas PD. Beban yang tidak seimbang dan harmonisa dapat menyebabkan stres listrik pada sistem isolasi.

Dengan memahami faktor penyebab PD, tindakan pencegahan dapat dilakukan, seperti perbaikan ventilasi, pembersihan isolator, serta peningkatan sistem proteksi.



Gambar 2. 9 Faktor Penyebab Partial Discharge

2.1.9. Dampak Partial Discharge terhadap Keandalan Sistem

Partial Discharge memiliki dampak signifikan terhadap keandalan sistem tenaga listrik. Aktivitas PD yang berlangsung terus-menerus dapat menyebabkan penuaan isolasi dan akhirnya kegagalan total.

Dampak utama PD meliputi flashover, gangguan sistem, pemadaman listrik, serta kerugian ekonomi. Selain itu, PD dapat menyebabkan kerusakan permanen pada peralatan seperti kubikel, transformator, dan kabel.

Pemadaman akibat kegagalan isolasi dapat berdampak luas pada industri, rumah tangga, dan sektor pelayanan publik. Oleh karena itu, pemantauan PD sangat penting untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik.

Implementasi sistem monitoring PD terbukti mampu meningkatkan keandalan sistem dan mengurangi frekuensi gangguan.



Gambar 2. 10 Dampak Partial Discharge

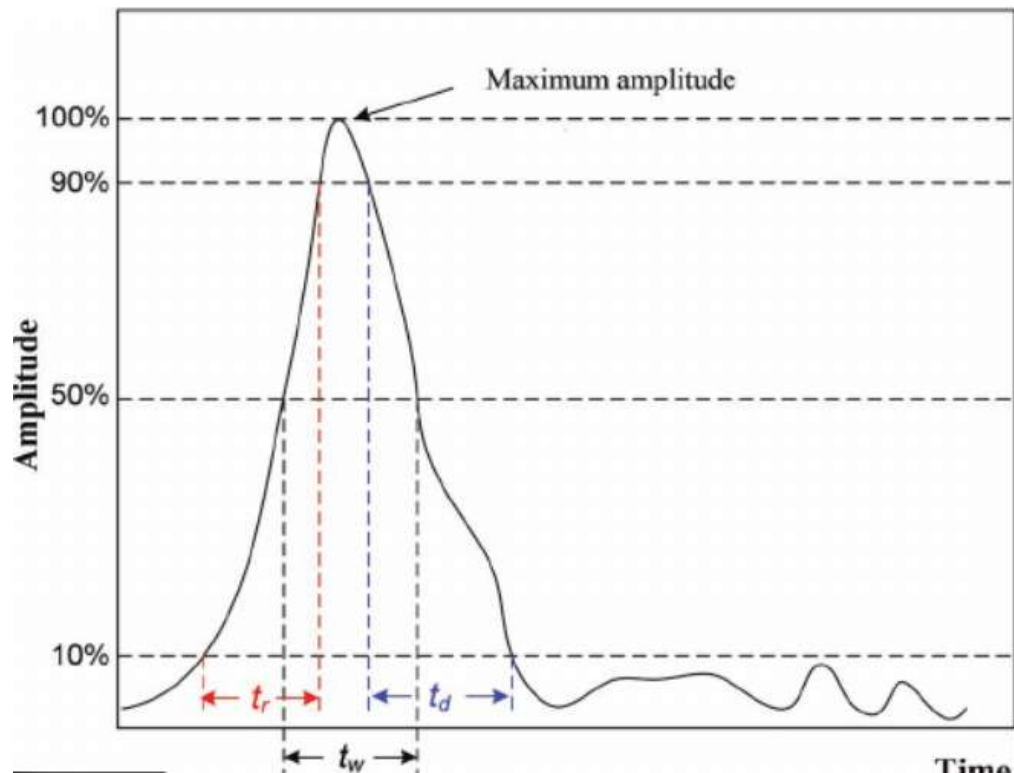
2.1.10. Karakteristik Sinyal Partial Discharge

Partial Discharge menghasilkan sinyal listrik berupa pulsa berfrekuensi tinggi dengan amplitudo kecil. Sinyal ini muncul akibat pelepasan energi listrik pada rongga isolasi atau permukaan material dielektrik. Karakteristik sinyal PD sangat kompleks karena dipengaruhi oleh bentuk gelombang tegangan, jenis isolasi, serta kondisi lingkungan.

Pulsa PD memiliki durasi sangat singkat, biasanya dalam orde nanodetik hingga mikrodetik. Frekuensi sinyal dapat mencapai ratusan MHz bahkan GHz. Oleh karena itu, pengukuran PD memerlukan sensor dengan respon frekuensi tinggi seperti UHF, TEV, dan sensor akustik.

Karakteristik utama sinyal PD meliputi amplitudo, frekuensi kejadian, fase terhadap tegangan, serta pola distribusi. Parameter ini digunakan untuk menganalisis tingkat keparahan dan jenis gangguan. Dalam praktik industri, analisis sinyal PD sering dikombinasikan dengan teknik pengolahan sinyal untuk meningkatkan akurasi diagnosis.

Menurut standar IEC 60270, pengukuran PD dilakukan dengan mengukur muatan listrik yang dilepaskan dalam satuan picocoulomb. Namun, metode non-konvensional seperti ultrasound dan UHF juga banyak digunakan dalam kondisi online karena lebih praktis.



Gambar 2. 11 Sinyal Partial Discharge

Selain parameter amplitudo dan frekuensi kejadian, karakteristik sinyal Partial Discharge juga dapat dianalisis melalui bentuk spektrum frekuensinya. Setiap jenis gangguan isolasi memiliki spektrum frekuensi yang berbeda-beda tergantung pada mekanisme pelepasan muatan yang terjadi. Misalnya, corona discharge biasanya menghasilkan spektrum frekuensi yang lebih sempit dibandingkan dengan arcing yang memiliki spektrum frekuensi lebih lebar akibat energi pelepasan yang lebih besar.

Analisis spektrum frekuensi ini sering digunakan dalam sistem monitoring berbasis digital yang memanfaatkan teknik pengolahan sinyal (signal processing). Dengan menggunakan metode seperti Fast Fourier Transform (FFT), sinyal PD yang kompleks dapat

diuraikan menjadi komponen frekuensi yang lebih mudah dianalisis. Teknik ini memungkinkan operator untuk membedakan antara sinyal PD dengan gangguan elektromagnetik dari sumber lain, seperti interferensi radio atau switching peralatan listrik.

Pengolahan sinyal PD juga dapat dikombinasikan dengan teknologi kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) untuk meningkatkan akurasi diagnosis kondisi isolasi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa algoritma machine learning mampu mengidentifikasi pola PD secara otomatis berdasarkan data historis yang dikumpulkan dari sensor monitoring. Teknologi ini membuka peluang pengembangan sistem monitoring yang lebih cerdas dan mampu memberikan peringatan dini terhadap potensi kegagalan peralatan listrik.

2.1.11. Sistem Monitoring Partial Discharge Online

Sistem monitoring PD online merupakan teknologi modern yang digunakan untuk memantau kondisi isolasi secara kontinu tanpa menghentikan operasi sistem. Sistem ini biasanya terdiri dari sensor, unit akuisisi data, perangkat komunikasi, serta perangkat analisis.

Sensor dipasang pada titik kritis seperti terminasi kabel, busbar, dan kompartemen VCB. Data yang dikumpulkan kemudian dikirim ke pusat monitoring melalui jaringan komunikasi. Sistem ini memungkinkan operator memantau tren aktivitas PD secara real-time.

Menurut IEEE Std 1434-2014, monitoring PD online sangat efektif dalam meningkatkan keandalan peralatan tegangan tinggi. Dengan analisis tren, operator dapat mendeteksi perubahan kondisi isolasi sebelum terjadi kegagalan.

Selain itu, teknologi Internet of Things (IoT) mulai digunakan dalam sistem monitoring PD. Sensor dapat terhubung dengan cloud dan sistem SCADA untuk meningkatkan efisiensi pengawasan.



Gambar 2. 12 Monitoring Partial Discharge

Perkembangan teknologi digital telah mendorong pengembangan sistem monitoring Partial Discharge yang lebih canggih dan terintegrasi. Sistem monitoring modern tidak hanya berfungsi mendeteksi aktivitas PD, tetapi juga mampu melakukan analisis data secara otomatis serta memberikan peringatan dini kepada operator apabila terjadi peningkatan aktivitas PD yang tidak normal. Hal ini memungkinkan tindakan pemeliharaan dapat dilakukan lebih cepat sebelum gangguan berkembang menjadi kerusakan yang lebih serius.

Dalam sistem monitoring PD online, data yang diperoleh dari sensor biasanya dikirim ke pusat pengolahan data melalui jaringan komunikasi seperti Ethernet, fiber optic, atau jaringan nirkabel. Data tersebut kemudian diproses menggunakan perangkat lunak khusus yang mampu menampilkan grafik tren aktivitas PD secara real-time. Operator dapat memantau kondisi peralatan dari ruang kontrol tanpa harus melakukan inspeksi langsung ke lapangan.

Selain meningkatkan keandalan sistem, penerapan monitoring PD online juga membantu dalam pengambilan keputusan pemeliharaan yang lebih efektif. Dengan mengetahui kondisi aktual isolasi peralatan, perusahaan dapat menghindari pemeliharaan yang tidak diperlukan sekaligus memprioritaskan peralatan yang memiliki risiko kegagalan lebih tinggi. Pendekatan ini dikenal sebagai predictive maintenance, yaitu metode pemeliharaan yang didasarkan pada prediksi kondisi peralatan berdasarkan data monitoring.

2.1.12. Teknologi Sensor Partial Discharge

Sensor PD merupakan komponen utama dalam sistem monitoring. Beberapa jenis sensor yang umum digunakan meliputi:

1. Ultrasound sensor, Digunakan untuk mendeteksi gelombang suara akibat aktivitas PD. Cocok untuk kubikel tertutup.
2. TEV sensor, Digunakan untuk mendeteksi tegangan transien pada permukaan logam panel.
3. UHF sensor, Digunakan untuk mendeteksi gelombang elektromagnetik.
4. Acoustic emission sensor, Digunakan untuk mendeteksi getaran akibat PD.

Menurut CIGRE Technical Brochure 444, kombinasi beberapa sensor meningkatkan akurasi deteksi. Dalam penelitian ini, sensor ultrasound dipilih karena efektif dan praktis.



Gambar 2. 13 Sensor Patrial Discharge

2.1.13. Model Degradasi Isolasi akibat Partial Discharge

Partial Discharge menyebabkan kerusakan bertahap pada material isolasi melalui beberapa mekanisme, seperti:

- Electrical treeing, yaitu terbentuknya jalur percabangan konduktif.
- Tracking, yaitu pembentukan jalur konduktif di permukaan isolasi.
- Erosi material, akibat energi pelepasan.

Menurut IEC 60502, degradasi isolasi pada kabel dan peralatan tegangan menengah sering diawali oleh PD. Jika tidak ditangani, PD dapat berkembang menjadi breakdown.

Model degradasi ini penting dalam menentukan umur sisa peralatan (Remaining Useful Life).

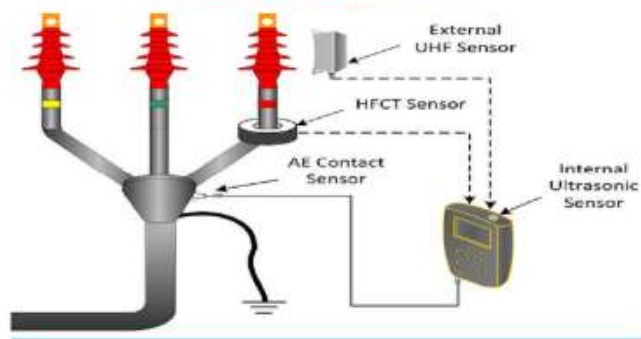
Partial Discharge (PD) is the best early warning indicator of electrical insulation degradation and faults in **HV, MV, EHV Electrical Assets**.

Helping you to **AVOID COSTLY FAILURES** and resulting in an unplanned network outage.

PD ACTIVITY IN CABLE



PD MEASUREMENT IN CABLE



Gambar 2. 14 Degradasi Akibat Partial Discharge

2.1.14. Analisis Risiko Kegagalan Kubikel

Analisis risiko kegagalan kubikel merupakan proses penting dalam menjaga keandalan sistem distribusi tenaga listrik, khususnya pada peralatan tegangan menengah seperti kubikel 20 kV. Kubikel memiliki fungsi utama sebagai penghubung, pengendali, dan pelindung sistem distribusi, sehingga kegagalan pada peralatan ini dapat menyebabkan gangguan yang luas. Risiko kegagalan kubikel umumnya dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti degradasi isolasi, kesalahan operasi, gangguan lingkungan, serta umur peralatan yang telah melewati batas desain. Oleh karena itu, analisis risiko diperlukan untuk mengidentifikasi kemungkinan kegagalan serta dampak yang ditimbulkan terhadap sistem tenaga listrik.

Menurut standar IEEE Std 3007.2-2010 tentang Electrical Power System Reliability Analysis, evaluasi risiko peralatan listrik dilakukan dengan mempertimbangkan probabilitas kegagalan dan tingkat dampak gangguan. Probabilitas kegagalan dapat dihitung berdasarkan data kondisi peralatan, seperti aktivitas Partial Discharge, temperatur, dan riwayat gangguan. Sementara itu, dampak kegagalan dinilai berdasarkan luas wilayah yang terdampak, jumlah pelanggan, serta pentingnya beban yang dilayani. Dengan pendekatan ini, peralatan yang memiliki risiko tinggi dapat diprioritaskan dalam pemeliharaan.



Gambar 2. 15 Resiko Kegagalan Isolasi

Dalam konteks penelitian ini, aktivitas Partial Discharge menjadi salah satu indikator utama dalam analisis risiko kegagalan kubikel. Semakin tinggi nilai PD, maka semakin besar probabilitas terjadinya kegagalan isolasi. Oleh karena itu, pemantauan PD secara berkala dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan prioritas perbaikan dan pemeliharaan. Pendekatan ini mendukung penerapan pemeliharaan berbasis kondisi yang lebih efisien dibandingkan metode konvensional.

Dalam analisis risiko kegagalan peralatan listrik, terdapat beberapa metode yang umum digunakan, salah satunya adalah Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi berbagai kemungkinan kegagalan yang dapat terjadi pada suatu peralatan serta dampak yang ditimbulkannya terhadap sistem. Dalam konteks kubikel 20 kV, kegagalan dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti degradasi isolasi, kesalahan operasi, kerusakan mekanis, maupun gangguan lingkungan.

Melalui pendekatan FMEA, setiap potensi kegagalan diberikan nilai berdasarkan tingkat kemungkinan terjadinya (occurrence), tingkat keparahan dampak (severity), serta kemampuan deteksi gangguan (detection). Ketiga parameter tersebut kemudian digunakan untuk menghitung Risk Priority Number (RPN) yang menunjukkan tingkat prioritas penanganan risiko. Semakin tinggi nilai RPN, maka semakin tinggi pula prioritas pemeliharaan yang harus dilakukan terhadap peralatan tersebut.

Dalam penelitian ini, aktivitas Partial Discharge dapat dijadikan sebagai indikator awal dalam menentukan probabilitas kegagalan isolasi pada kubikel. Nilai PD yang tinggi menunjukkan adanya peningkatan risiko kegagalan sehingga peralatan tersebut perlu diprioritaskan dalam kegiatan inspeksi dan pemeliharaan. Dengan pendekatan analisis risiko yang sistematis, operator gardu induk dapat mengelola peralatan listrik secara lebih efektif serta mengurangi kemungkinan terjadinya gangguan yang dapat menyebabkan pemadaman listrik.

2.1.15. Strategi Pencegahan Partial Discharge

Pencegahan Partial Discharge merupakan langkah penting dalam menjaga keandalan peralatan listrik. Strategi pencegahan meliputi desain isolasi yang baik, instalasi sesuai standar, serta pemeliharaan rutin. Salah satu metode utama adalah inspeksi berkala untuk mendeteksi gejala awal degradasi isolasi.

Selain itu, pembersihan isolator secara rutin dapat mengurangi kontaminasi yang menjadi penyebab PD. Pengendalian kelembapan dan temperatur juga sangat penting. Penggunaan heater panel dan sistem ventilasi dapat mencegah kondensasi yang memicu surface discharge.



Gambar 2. 16 Pekerjaan Perbaikan Kubikel

Menurut IEC 60076 dan IEC 62271, pemeliharaan preventif harus dilakukan berdasarkan kondisi peralatan. Pemantauan PD menjadi bagian penting dalam strategi ini karena memberikan informasi kondisi isolasi secara langsung. Dengan strategi pencegahan yang baik, umur peralatan dapat diperpanjang dan risiko gangguan dapat diminimalkan.

2.2. Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurna, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut :

1. F. Amalia Putya Adirawati dalam penelitiannya berjudul “Pengaruh Partial Discharge Pada Kubikel Incoming 20 kV dengan Metode *TEV (Transient Earth Voltage)*” membahas pengaruh aktivitas *Partial Discharge* terhadap kondisi isolasi pada kubikel 20 kV dengan menggunakan metode deteksi non-invasif TEV. Metode ini mampu mendeteksi adanya pelepasan muatan parsial tanpa harus menghentikan operasi sistem, sehingga kondisi isolasi dapat diketahui secara langsung di lapangan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai TEV yang tinggi menandakan adanya aktivitas PD yang signifikan dan berpotensi mempercepat degradasi isolasi. Penelitian tersebut menjadi referensi penting karena memiliki kesamaan dalam menganalisis fenomena *Partial Discharge* pada kubikel tegangan menengah. Namun, perbedaan penelitian ini terletak pada lokasi dan tujuannya, di mana penelitian yang dilakukan penulis berfokus pada kubikel 20 kV di Gardu Induk Kolaka 150 kV, dengan tujuan untuk melakukan pemantauan dan evaluasi PD sebagai upaya pencegahan dini gangguan sistem, serta mendukung penerapan pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition Based Maintenance*) untuk meningkatkan keandalan operasi peralatan.

2. M. Fikri *et al.* (2023) dalam penelitiannya yang berjudul “*Clustering Suara Corona Discharge Berdasarkan Tegangan Menggunakan Metode Fuzzy C-Mean*” membahas tentang proses pengelompokan atau *clustering* suara yang dihasilkan dari fenomena *Corona Discharge* pada berbagai level tegangan dengan menggunakan metode *Fuzzy C-Mean (FCM)*. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola suara *discharge* sebagai indikator kondisi isolasi listrik, sehingga dapat digunakan dalam sistem deteksi dini gangguan pada peralatan tegangan tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *Fuzzy C-Mean* mampu mengelompokkan pola suara *Corona Discharge* secara akurat berdasarkan besaran tegangan yang diberikan, sehingga membantu dalam mengenali tingkat keparahan pelepasan muatan listrik. Penelitian ini relevan dengan penelitian penulis karena sama-sama berfokus pada fenomena pelepasan muatan listrik (*Partial Discharge/Corona Discharge*) sebagai indikator kerusakan isolasi. Namun, perbedaan utamanya terletak pada objek dan metode pengujian, di mana penelitian M. Fikri berfokus pada analisis sinyal suara *Corona Discharge* menggunakan algoritma kecerdasan buatan, sedangkan penelitian ini berfokus pada pemantauan dan evaluasi aktivitas *Partial Discharge* pada kubikel 20 kV di Gardu Induk Kolaka 150 kV sebagai upaya pencegahan dini gangguan sistem distribusi tenaga listrik.

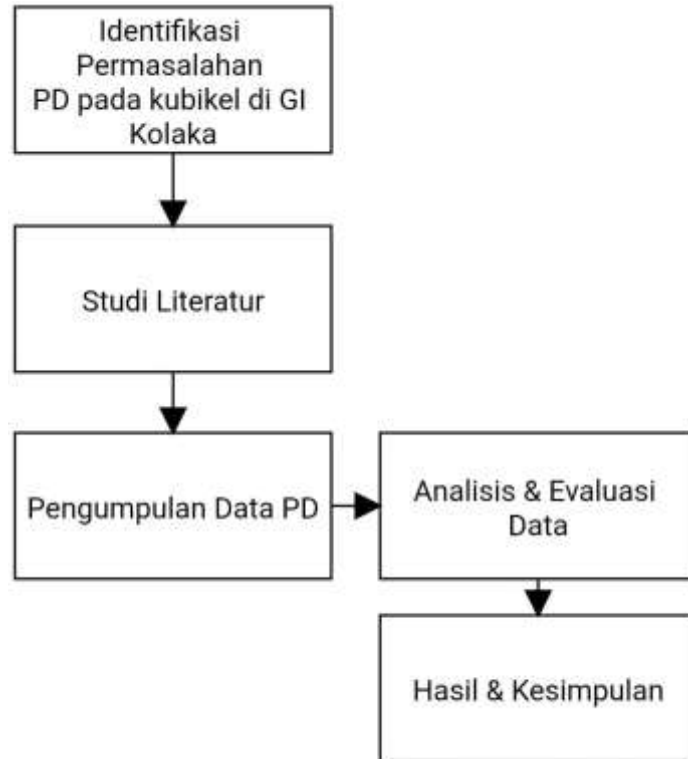
3. F. Wiherdiansyah, D. Aribowo, *J. Pendidikan Vokasional*, T. Elektro, F. Keguruan, dan I. Pendidikan dalam penelitiannya yang berjudul “Analisis Pemeliharaan Preventif Gardu Kubikal untuk Meningkatkan Keandalan Sistem Distribusi Listrik di PT. Haleyora Powerindo” membahas pentingnya pelaksanaan pemeliharaan preventif pada gardu kubikel guna menjaga keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Penelitian ini menyoroti bahwa pemeliharaan yang terjadwal dan sesuai standar dapat mengurangi potensi gangguan akibat penurunan kualitas isolasi, korosi, dan keausan komponen listrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan pemeliharaan preventif secara konsisten mampu menurunkan frekuensi gangguan serta meningkatkan kontinuitas penyaluran energi listrik ke pelanggan. Penelitian ini menjadi referensi yang relevan karena sama-sama menekankan pentingnya upaya menjaga keandalan sistem distribusi melalui perawatan kubikel. Namun, perbedaannya terletak pada pendekatan yang digunakan — penelitian Wiherdiansyah berfokus pada analisis kegiatan pemeliharaan preventif secara umum, sedangkan penelitian ini berfokus pada pemantauan dan evaluasi aktivitas *Partial Discharge* sebagai langkah pencegahan dini gangguan pada kubikel 20 kV di Gardu Induk Kolaka 150 kV.
4. N. Pasra, M. Fikri, K. T. Mauriraya, T. Rijanto, dan I. G. P. A. Buditjahjanto dalam penelitiannya yang berjudul “Deteksi Suara Corona Discharge Berdasarkan Noise” membahas metode pendeteksian fenomena *Corona Discharge* dengan menganalisis pola *noise* atau derau suara yang dihasilkan oleh pelepasan muatan listrik pada peralatan bertegangan tinggi. Penelitian ini menggunakan pendekatan pengolahan sinyal untuk memisahkan suara *Corona Discharge* dari derau lingkungan, sehingga aktivitas pelepasan muatan dapat diidentifikasi secara lebih akurat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik *noise* dapat digunakan sebagai indikator adanya pelepasan muatan listrik yang berpotensi menyebabkan degradasi isolasi. Penelitian ini relevan karena sama-sama menyoroti fenomena pelepasan muatan listrik (*Partial Discharge/Corona Discharge*) sebagai tanda awal gangguan pada sistem isolasi listrik. Namun, perbedaan mendasar terletak pada objek dan metode penelitian, di

mana penelitian Pasra berfokus pada deteksi suara *Corona Discharge* menggunakan analisis sinyal akustik, sedangkan penelitian ini menitikberatkan pada pemantauan dan evaluasi aktivitas *Partial Discharge* pada kubikel 20 kV di Gardu Induk Kolaka 150 kV sebagai upaya pencegahan dini terhadap gangguan sistem distribusi tenaga listrik.

5. M. Fikri *et al.* (2023) dalam penelitiannya berjudul “*Clustering Suara Corona Discharge Berdasarkan Tegangan Menggunakan Metode Fuzzy C-Mean*” yang dipublikasikan pada *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 11, no. 3, halaman 609, membahas pengelompokan (*clustering*) suara yang dihasilkan dari fenomena *Corona Discharge* pada berbagai level tegangan menggunakan metode *Fuzzy C-Mean (FCM)*. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola suara *discharge* sebagai indikator kondisi isolasi, di mana metode *Fuzzy C-Mean* digunakan untuk membedakan tingkat intensitas dan karakteristik *Corona Discharge* secara otomatis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode tersebut mampu mengelompokkan pola suara *Corona Discharge* dengan tingkat akurasi yang baik, sehingga dapat digunakan sebagai sistem deteksi dini gangguan pada peralatan tegangan tinggi. Penelitian ini relevan dengan penelitian penulis karena sama-sama menyoroti fenomena pelepasan muatan listrik (*Partial/Corona Discharge*) sebagai indikator penurunan kualitas isolasi. Namun, perbedaannya terletak pada pendekatan dan objek kajian, di mana penelitian M. Fikri berfokus pada analisis sinyal suara *Corona Discharge* menggunakan algoritma kecerdasan buatan, sedangkan penelitian ini berfokus pada pemantauan dan evaluasi aktivitas *Partial Discharge* pada kubikel 20 kV di Gardu Induk Kolaka 150 kV sebagai upaya pencegahan dini terhadap gangguan sistem distribusi tenaga listrik.

2.3 Kerangka Pemikiran

Penelitian ini berfokus pada pemantauan dan evaluasi *Partial Discharge* pada kubikel 20 kV di Gardu Induk Kolaka sebagai upaya menjaga keandalan sistem distribusi listrik dan mencegah kerusakan isolasi sejak dini.



Gambar 2. 17 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran pada diagram tersebut menggambarkan alur penelitian yang dimulai dari identifikasi permasalahan *Partial Discharge* (PD) pada kubikel 20 kV di Gardu Induk Kolaka sebagai dasar munculnya kebutuhan untuk melakukan pemantauan dan evaluasi kondisi isolasi. Setelah permasalahan diidentifikasi, dilakukan studi literatur untuk memperoleh landasan teori, konsep, dan referensi terkait fenomena PD, metode pengukuran, serta dampaknya terhadap keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Tahap berikutnya adalah pengumpulan data PD, di mana dilakukan proses pemantauan dan pencatatan hasil pengukuran aktivitas *Partial Discharge* pada kubikel. Data yang diperoleh kemudian masuk ke tahap analisis dan evaluasi, dengan tujuan menilai kondisi kesehatan isolasi, mengidentifikasi potensi kerusakan, serta menentukan tingkat aktivitas PD. Hasil dari analisis tersebut menjadi dasar dalam penyusunan hasil dan kesimpulan, yang memuat interpretasi temuan penelitian serta rekomendasi tindakan pencegahan dini untuk meningkatkan keandalan operasi sistem distribusi listrik di Gardu Induk Kolaka.