

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Sejumlah penelitian terdahulu telah menyoroti pentingnya kualitas dan spesifikasi isolator terhadap keandalan sistem tenaga listrik, khususnya pada lingkungan dengan tingkat polusi dan kelembapan tinggi. Salah satu penelitian yang relevan dilakukan oleh Diantari (2025) seorang dosen Institut Teknologi PLN (ITPLN), yang mengkaji peningkatan performa isolator keramik pasang luar melalui pelapisan material alami berbasis gondorukem (gum rosin) dan RTV *silicone rubber*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan sifat hidrofobisitas permukaan isolator mampu menurunkan kecenderungan arus bocor serta meningkatkan ketahanan terhadap kontaminasi lingkungan. Temuan ini menegaskan bahwa karakteristik permukaan dan material isolator memiliki pengaruh signifikan terhadap performa dielektrik pada instalasi luar ruang.

Selain itu, Hidayat dan Prakoso (2022) menganalisis gangguan pada sistem tenaga listrik di wilayah pesisir dan menemukan bahwa lebih dari 25% kejadian *trip* sistem disebabkan oleh kontaminasi permukaan isolator, kelembapan, serta gangguan hewan kecil. Penelitian tersebut merekomendasikan peningkatan jarak merayap (*creepage distance*) dan pemeliharaan berkala sebagai langkah mitigasi untuk menekan risiko arus bocor dan *flashover*.

Penelitian lain oleh Santoso (2023) mengevaluasi kinerja isolator melalui metode *partial discharge* dan menyimpulkan bahwa isolator dengan tingkat aktivitas PD rendah memiliki umur pakai lebih panjang serta risiko kegagalan dielektrik yang lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa pengujian PD dapat digunakan sebagai indikator awal degradasi isolasi sebelum terjadi kegagalan total.

Meskipun penelitian-penelitian tersebut telah membahas peningkatan performa isolator melalui modifikasi material, peningkatan *creepage distance*, maupun evaluasi berbasis *partial discharge*, belum banyak penelitian yang secara kuantitatif mengkaji peningkatan spesifikasi tegangan isolator di atas tegangan operasi sistem sebagai strategi peningkatan margin isolasi. Oleh karena itu, penelitian ini mengkaji

penggunaan post isolator dengan rating lebih tinggi (70 kV) pada sisi sekunder Trafo 4 di Gardu Induk Jababeka, serta mengevaluasi dampaknya terhadap tahanan isolasi, arus bocor, dan aktivitas *partial discharge* secara terpadu untuk menilai peningkatan keandalan operasional dalam lingkungan industri dengan tingkat polusi tinggi.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Post Isolator pada Sistem Distribusi

Post isolator merupakan salah satu jenis isolator listrik yang digunakan untuk menopang dan memisahkan konduktor bertegangan dengan struktur penyangga yang dihubungkan ke tanah. Berbeda dengan isolator gantung (*suspension insulator*) yang berfungsi menahan konduktor yang melintang di udara, *post isolator* memiliki konstruksi yang kaku dan dipasang menempel pada penyangga sehingga mampu menahan beban mekanis yang lebih besar. Dalam sistem distribusi tenaga listrik 20 kV, *post isolator* biasanya digunakan di gardu induk untuk menopang rel plat atau sambungan kabel daya yang menghubungkan bushing transformator ke peralatan lain.

Karakteristik penting isolator meliputi jarak merayap (*creepage distance*), yaitu jarak sepanjang permukaan isolator yang dilalui oleh arus bocor, serta tegangan tembus (*breakdown voltage*) yang menunjukkan kemampuan isolator menahan tegangan tinggi tanpa terjadi loncatan listrik. Isolator dengan spesifikasi 70 kV memiliki jarak merayap lebih panjang dan kemampuan dielektrik lebih besar dibandingkan isolator standar 20 kV. Peningkatan spesifikasi ini tidak dimaksudkan untuk mengganti standar peralatan distribusi, melainkan sebagai upaya inovatif untuk meningkatkan margin keamanan isolasi dan mengurangi risiko gangguan akibat kondisi lingkungan yang berat.



Gambar 2. 1 Post Isolator

2.2.2 Medan Listrik pada Sistem Isolasi

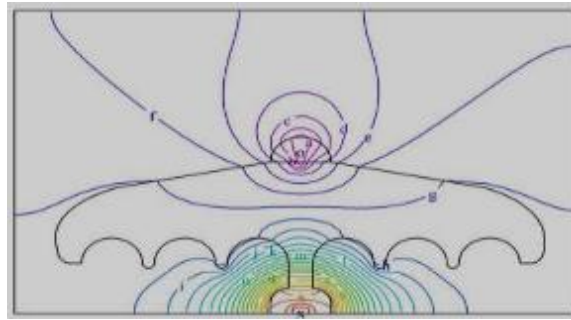
Medan listrik adalah gaya yang dialami muatan listrik di suatu titik akibat keberadaan beda potensial antara dua elektroda. Dalam konteks sistem tenaga listrik, medan listrik timbul di antara konduktor bertegangan dengan bagian yang di-*ground*-kan. Besarnya medan listrik secara sederhana dapat ditentukan oleh persamaan:

$$E = \frac{V}{d} \quad (2.1)$$

di mana E adalah medan listrik (kV/cm), V adalah tegangan (kV), dan d adalah jarak antara konduktor dengan elektroda atau permukaan isolator (cm).

Distribusi medan listrik di sekitar isolator harus diperhatikan karena medan yang terlalu terkonsentrasi pada area tertentu dapat melampaui kekuatan dielektrik material isolator dan memicu loncatan listrik (*flashover*). Bentuk geometri dan panjang jalur merayap permukaan isolator memengaruhi distribusi medan ini. Isolator dengan jarak merayap yang lebih panjang dan bentuk sirip yang aerodinamis dapat meratakan medan listrik serta meningkatkan kemampuan menahan tegangan lebih seperti lonjakan akibat petir atau switching.

Penelitian Engla Harda Arya (2016) yang dimuat di Jurnal Sainstek STT Pekanbaru meneliti medan listrik pada isolator *suspension* berbahan keramik menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method* – FEM) melalui perangkat lunak FlexPDE. Studi tersebut menyoroti bahwa tingkat kontaminasi permukaan isolator berpengaruh signifikan terhadap distribusi medan listrik. Pada kondisi isolator bersih, medan listrik maksimum di area dekat konduktor tercatat sekitar 4,3 kV/cm, sedangkan pada permukaan sirip hanya berkisar 0–3,7 kV/cm. Namun, ketika isolator dikontaminasi dengan larutan kaolin dan NaCl, medan listrik meningkat menjadi 3,9 kV/cm pada konduktivitas 6 mS, 4,5 kV/cm pada 12 mS, dan mencapai 5,8 kV/cm pada 24 mS.



Gambar 2. 2 Distribusi medan listrik pada isolator

Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi konduktivitas kontaminan di permukaan isolator, semakin besar pula medan listrik yang terbentuk, khususnya pada area dekat konduktor. Peningkatan medan listrik akibat polusi ini berpotensi menurunkan tegangan tembus (*breakdown voltage*) isolator dan memperbesar risiko terjadinya arus bocor dan *flashover*.

Penelitian Arya menegaskan bahwa desain geometri isolator dengan jarak merayap yang lebih panjang dapat membantu meratakan distribusi medan listrik, sehingga mengurangi konsentrasi medan di titik kritis. Prinsip ini mendukung penggunaan isolator 70 kV yang memiliki jarak merayap lebih besar pada sistem distribusi 20 kV sebagai langkah inovatif untuk meningkatkan margin keamanan isolasi terhadap kondisi lingkungan yang lembap dan terpolusi.

Dengan demikian, pemahaman tentang medan listrik dan pengaruhnya terhadap performa isolator menjadi landasan penting dalam perencanaan pemilihan dan pengujian isolator di gardu induk maupun jaringan distribusi.

2.2.3 Tahanan Isolasi dan Arus Bocor

Tahanan isolasi (*insulation resistance*) adalah parameter penting yang menunjukkan kemampuan isolator menahan aliran arus bocor yang mengalir melalui permukaan atau inti isolator. Semakin tinggi tahanan isolasi, semakin baik kualitas isolator karena hanya sedikit arus bocor yang mengalir. Hubungan antara tegangan, arus bocor, dan tahanan isolasi dapat dihitung dengan persamaan Ohm:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.2)$$

dengan R adalah tahanan isolasi ($M\Omega$), V adalah tegangan uji (kV), dan I adalah arus bocor (μA atau mA).

Arus bocor (*leakage current*) muncul akibat adanya lapisan air, debu, atau kontaminan pada permukaan isolator yang bersifat konduktif, sehingga memungkinkan aliran arus listrik dari konduktor menuju tanah. Pada lingkungan tropis dengan kelembapan tinggi seperti di Indonesia, arus bocor sering meningkat saat musim hujan atau ketika isolator tidak terawat, yang dapat menurunkan efisiensi sistem dan menimbulkan risiko hubung singkat (*short circuit*).

Penggunaan isolator dengan spesifikasi lebih tinggi, seperti isolator 70 kV, yang memiliki tahanan isolasi yang lebih besar, diharapkan dapat menurunkan arus bocor pada sistem distribusi 20 kV. Hal ini mendukung efisiensi energi, mengurangi potensi *flashover*, serta memperpanjang umur pakai isolator.

2.2.4 Partial discharge

Partial discharge (PD) adalah pelepasan muatan listrik sebagian yang terjadi pada sebagian kecil isolator akibat ketidaksempurnaan material, adanya rongga udara (*void*), atau kontaminasi permukaan. PD tidak langsung menyebabkan kegagalan isolator, tetapi aktivitas yang terus-menerus dapat mempercepat degradasi material, menimbulkan jalur bocor permanen, dan pada akhirnya mengakibatkan kegagalan dielektrik.

Menurut IEC 60270, isolator baru yang berkualitas baik harus memiliki nilai PD di bawah 10–20 pC. Nilai PD yang rendah menunjukkan bahwa isolator bebas dari cacat internal dan memiliki kualitas material yang baik. Pengujian PD menjadi penting dalam memastikan bahwa isolator yang dipasang di lapangan tidak memiliki cacat bawaan yang dapat memengaruhi keandalan jangka panjang.

Dalam penelitian ini, pengujian PD dilakukan untuk mengevaluasi kondisi isolator 70 kV setelah pemasangan dan untuk memastikan bahwa isolator tersebut tidak memiliki cacat yang dapat memicu kerusakan selama operasi.

2.2.5 Standar Teknis Isolator

Desain dan pemilihan isolator untuk sistem distribusi mengacu pada standar internasional IEC 60137 dan IEC 61109, yang menetapkan persyaratan isolator untuk peralatan tegangan menengah dan tinggi. Standar ini mencakup kriteria jarak

merayap minimum, tegangan tembus, ketahanan terhadap polusi, ketahanan mekanis, dan daya tahan terhadap pengaruh lingkungan.

PLN, melalui pedoman teknisnya, menetapkan bahwa isolator distribusi 20 kV harus memiliki jarak merayap sekitar 25–30 mm/kV untuk daerah dengan tingkat polusi sedang hingga tinggi. Isolator 70 kV yang digunakan dalam penelitian ini memiliki jarak merayap ≥ 875 mm, yang jauh melampaui kebutuhan minimum sistem distribusi 20 kV. Keunggulan ini memberikan margin keamanan tambahan terhadap lonjakan tegangan dan kontaminasi lingkungan.

Dengan mengikuti standar teknis tersebut, penggunaan isolator 70 kV pada sistem distribusi 20 kV diharapkan dapat meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem, terutama di wilayah dengan kelembapan tinggi dan polusi permukaan yang signifikan.

Tabel 2. 1 Matriks perbandingan isolator 20kV dan 70kV

Parameter	Post Isolator 20 kV (Standar Distribusi)	Post Isolator 70 kV (Inovasi)	Keterangan/Standar
Tegangan nominal	20 kV	70 kV	IEC 60137, PLN TM 20 kV
Tegangan tembus (<i>dry flashover voltage</i>)	± 60 kV	± 170 kV	IEC 61109
Tegangan tembus saat basah (<i>wet flashover</i>)	± 50 kV	± 150 kV	IEC 61109
Jarak merayap (<i>creepage distance</i>)	500–600 mm	≥ 875 mm	Sesuai kategori polusi (25–30 mm/kV)
Kekuatan mekanis tekan (<i>mechanical failing load</i>)	8–10 kN	12–16 kN	IEC 61109
Tahanan isolasi pada 20 kV (kondisi kering)	≥ 5 G Ω	≥ 10 G Ω	Diukur dengan Megger kV
Ketahanan terhadap polusi	Kategori II – III (sedang)	Kategori IV (Very Heavy)	Sesuai IEC/PLN (ISO 6951 untuk polusi)
Umur pakai desain (<i>design life</i>)	± 20 tahun	≥ 30 tahun	Berdasarkan material dan kondisi operasi

2.2.6 Teori Alat Uji Berdasarkan Manual Book

Pada penelitian ini digunakan tiga jenis alat ukur utama untuk mendukung kegiatan pengujian, yaitu *Insulation Resistance Tester* (megger), Tang Ampere (*Clamp Meter*), dan *Partial discharge Detector* (PD *Detector*). Ketiga alat tersebut digunakan untuk memperoleh data primer berupa nilai tahanan isolasi, arus bocor, serta aktivitas *partial discharge* sebelum dan sesudah penggantian *post* isolator dari spesifikasi 20 kV menjadi 70 kV.

Setiap alat memiliki karakteristik teknis dan prinsip kerja yang berbeda, sehingga pemahaman terhadap fungsi dan cara penggunaannya menjadi penting agar hasil pengujian valid serta sesuai dengan standar pengujian PLN dan IEC. Uraian berikut disusun berdasarkan manual book resmi dari masing-masing alat ukur.

2.2.6.1 *Insulation Resistance Tester – Kyoritsu KEW 3125A*

Kyoritsu KEW 3125A merupakan alat ukur tahanan isolasi bertegangan tinggi yang dirancang untuk pengujian isolator, kabel, dan peralatan listrik pada sistem distribusi dan transmisi. Berdasarkan *Kyoritsu Instruction Manual* (*Kyoritsu Electrical Instruments Works, Ltd., Japan*), alat ini mampu mengukur tahanan isolasi hingga 1 T Ω dengan rentang tegangan uji antara 250 V sampai 5000 V DC.



Gambar 2. 3 *Insulation Tester* Kyoritsu KEW 3125A

Prinsip kerjanya adalah memberikan tegangan DC tinggi antara dua terminal pengujian dan mengukur arus bocor yang mengalir melalui material isolasi.

Kelebihan utama alat ini dibandingkan megger konvensional adalah adanya fitur:

- *Polarization Index (PI)* dan *Dielectric Absorption Ratio (DAR)* untuk menilai kualitas dielektrik isolasi;
- *Auto discharge function* yang secara otomatis membuang muatan sisa setelah pengujian, memastikan keselamatan pengguna;
- *Digital backlight display* dan *auto power-off* untuk efisiensi penggunaan di lapangan;
- Pengaman kejut listrik (IEC 61010-1) untuk kategori pengukuran CAT IV 600 V.

Dalam konteks penelitian ini, alat ini digunakan untuk menguji:

1. *Post isolator 20 kV lama* (setelah dilepas) – untuk mengetahui kondisi tahanan isolasinya.
2. *Post isolator 70 kV baru* (sebelum pemasangan) – untuk memastikan kualitas isolasi sesuai standar IEC 61109.

Hasil pengukuran dibandingkan dengan batas minimum $\geq 1000 \text{ M}\Omega$ sesuai Standar PLN SPLN D3.002-1:2010.

2.2.6.2 *Tang Ampere Digital – Kyoritsu KEW SNAP 2432 (Leakage Current Clamp Meter)*

Kyoritsu KEW SNAP 2432 merupakan alat ukur khusus untuk pengukuran arus bocor (*leakage current*) pada sistem kelistrikan. Alat ini dirancang untuk mendeteksi arus kecil yang mengalir melalui konduktor pembumian atau *ground-shield* tanpa perlu memutus rangkaian, sehingga sangat sesuai untuk pengukuran pada sistem yang sedang beroperasi (*energized*).



Gambar 2. 4 Tang ampere digital Kyoritsu KEW SNAP 2432

KEW SNAP 2432 memiliki rentang pengukuran mulai dari miliampere hingga ampere, dengan resolusi tinggi untuk mendeteksi variasi kecil arus bocor yang disebabkan oleh degradasi isolasi, kontaminasi permukaan, dan kelembapan lingkungan. Dalam penelitian ini, alat ini digunakan untuk mengukur arus bocor total sistem kabel power 20 kV dengan cara menjepitkan clamp pada konduktor ground-shield utama yang menghubungkan plat terminal ground-shield ke sistem pembumian.

Penggunaan Kyoritsu KEW SNAP 2432 memungkinkan evaluasi kondisi isolasi secara langsung pada kondisi operasi aktual, sehingga data yang diperoleh merepresentasikan tingkat kebocoran arus yang sesungguhnya terjadi di lapangan. Oleh karena itu, hasil pengukuran arus bocor dengan alat ini digunakan sebagai salah satu indikator utama dalam penilaian keandalan sistem distribusi setelah penggantian *post* isolator.

2.2.6.3 *Partial discharge Detector – EA Technology Ultra TEV Plus²*

Pengujian *partial discharge* (PD) pada penelitian ini menggunakan *Ultra TEV Plus²* yang dikembangkan oleh *EA Technology*. Berdasarkan manual pabrikan, alat ini dirancang untuk mendeteksi aktivitas PD secara on-line pada sistem tenaga listrik yang sedang beroperasi, tanpa memerlukan pemadaman peralatan. Salah satu metode utama yang didukung adalah *Transient Earth Voltage* (TEV), yang umum digunakan untuk inspeksi kabel dan peralatan tegangan menengah.

Metode TEV bekerja dengan mendeteksi pulsa tegangan transien berfrekuensi tinggi yang muncul pada permukaan isolasi akibat aktivitas PD internal di dalam sistem kabel atau di sekitar sambungan dan terminal. Sensor

TEV pada Ultra TEV Plus² ditempelkan langsung pada permukaan luar isolasi kabel XLPE, sesuai dengan rekomendasi pabrik, untuk menangkap sinyal TEV yang kemudian ditampilkan dalam satuan desibel (dB).



Gambar 2. 5 ULTRA TEV Plus²

Hasil pengukuran TEV ditampilkan dalam desibel (dB) dan diinterpretasikan sebagai berikut:

Tabel 2. 2 Interpretasi hasil pengukuran PD

Level (dB)	Klasifikasi	Indikasi Umum
< 20 dB	Normal	Tidak ada PD signifikan
20–30 dB	Warning	Kemungkinan PD ringan
> 30 dB	Critical	PD aktif, perlu inspeksi lanjut

Dalam penelitian ini, Ultra TEV Plus² digunakan sebagai alat utama untuk mendeteksi dan mengevaluasi aktivitas PD pada kabel power sisi 20 kV, karena kesesuaiannya dengan kondisi operasi gardu induk dan ketersediaan data pengujian yang konsisten.

2.2.7 Pengaruh Polusi terhadap Performa Isolator Tegangan Menengah

Isolator pada sistem tenaga listrik berfungsi untuk memisahkan bagian bertegangan dengan bagian yang ditanahkan serta menjaga jarak isolasi agar tidak terjadi loncatan listrik. Pada kondisi ideal, permukaan isolator memiliki resistansi

tinggi sehingga arus bocor yang mengalir melalui permukaan sangat kecil. Namun pada lingkungan dengan tingkat polusi tinggi, performa isolator dapat mengalami penurunan akibat kontaminasi permukaan.

Polusi industri, debu konduktif, partikel logam, asap pabrik, serta deposit garam atau bahan kimia dapat menempel pada permukaan isolator dan membentuk lapisan kontaminan. Ketika lapisan ini bercampur dengan kelembapan udara atau air hujan, terbentuk jalur konduktif pada permukaan isolator. Kondisi ini menyebabkan resistansi permukaan menurun dan arus bocor meningkat. Fenomena ini dikenal sebagai *pollution-induced leakage current* dan telah banyak dilaporkan sebagai penyebab utama gangguan isolator luar ruang (Gorur et al., 1999).

Peningkatan arus bocor akibat polusi tidak hanya berdampak pada rugi daya, tetapi juga dapat memicu terbentuknya *dry band*. *Dry band* terjadi ketika sebagian permukaan isolator mengering akibat pemanasan lokal yang ditimbulkan oleh arus bocor. Pada area *dry band* ini terjadi konsentrasi medan listrik yang lebih tinggi dibandingkan area sekitarnya. Konsentrasi medan listrik tersebut dapat memicu pelepasan muatan parsial (*partial discharge*) atau bahkan percikan listrik kecil yang disebut *dry band arcing*. Jika kondisi ini berulang, maka dapat berkembang menjadi fenomena *tracking*, yaitu terbentuknya jalur karbon permanen pada permukaan isolator.

Tracking yang berlangsung terus-menerus dapat menurunkan kekuatan dielektrik material isolator dan dalam kondisi ekstrem menyebabkan *flashover*, yaitu loncatan listrik dari konduktor bertegangan ke tanah melalui permukaan isolator. *Flashover* pada sistem tegangan menengah dapat mengakibatkan *trip* transformator, gangguan suplai, bahkan kerusakan mekanis pada isolator.

Standar internasional seperti IEC 61109 menegaskan bahwa performa isolator pada lingkungan terkontaminasi sangat dipengaruhi oleh panjang jarak rambat (*creepage distance*) dan karakteristik permukaan material. Isolator dengan spesifikasi tegangan yang lebih tinggi umumnya memiliki *creepage distance* yang lebih panjang serta geometri yang lebih kompleks, sehingga lebih tahan terhadap pengaruh polusi. Peningkatan *creepage distance* memberikan jalur rambat yang lebih panjang bagi arus bocor, sehingga menurunkan densitas arus permukaan dan mengurangi risiko terjadinya *tracking* maupun *flashover*.

Selain itu, studi mengenai performa isolator di lingkungan industri menunjukkan bahwa peningkatan margin isolasi dapat secara signifikan menurunkan probabilitas kegagalan akibat kontaminasi (Gorur et al., 1999). Oleh karena itu, pada gardu induk yang berada di kawasan industri dengan tingkat polusi tinggi, pendekatan peningkatan spesifikasi isolator menjadi salah satu *strategi* mitigasi teknis yang rasional untuk meningkatkan keandalan sistem.

Dalam konteks penelitian ini, Gardu Induk Jababeka yang terletak di kawasan industri padat memiliki potensi tingkat polusi yang tinggi. Kondisi tersebut dapat mempercepat degradasi permukaan *post* isolator 20 kV dan meningkatkan arus bocor. Oleh karena itu, peningkatan spesifikasi isolator menjadi 70 kV diharapkan mampu meningkatkan margin isolasi, memperpanjang *creepage distance* efektif, serta menekan risiko terbentuknya jalur konduktif akibat kontaminasi permukaan.

2.2.7.1 *Parameter Kontaminasi dan Evaluasi Tingkat Polusi*

Untuk mengukur tingkat kontaminasi pada isolator luar ruang, digunakan parameter yang dikenal sebagai *Equivalent Salt Deposit Density* (ESDD). ESDD merupakan ukuran kuantitatif yang menyatakan jumlah deposit garam ekuivalen yang menempel pada permukaan isolator, dinyatakan dalam mg/cm². Parameter ini digunakan secara luas dalam standar internasional untuk mengklasifikasikan tingkat polusi lingkungan.

Menurut IEC 60815, tingkat polusi lingkungan dikategorikan menjadi empat kelas utama, yaitu ringan, sedang, berat, dan sangat berat. Pada lingkungan industri dengan aktivitas manufaktur, pembakaran bahan bakar, atau proses kimia, tingkat polusi umumnya berada pada kategori berat hingga sangat berat. Pada kondisi tersebut, isolator standar dengan *creepage distance* minimal sering kali tidak memiliki margin keamanan yang cukup.

Tingkat ESDD yang tinggi berkorelasi langsung dengan peningkatan arus bocor permukaan. Ketika kontaminan yang bersifat konduktif menyerap kelembapan, resistansi permukaan isolator menurun secara signifikan. Penurunan resistansi ini dapat dijelaskan secara sederhana melalui hubungan hukum Ohm, di mana arus bocor akan meningkat ketika resistansi permukaan menurun pada tegangan operasi yang tetap. Dengan demikian, semakin tinggi

tingkat kontaminasi, semakin besar potensi arus bocor yang mengalir menuju sistem *grounding*.

2.2.7.2 Hubungan Arus Bocor, Medan Listrik, dan Partial discharge

Arus bocor yang meningkat akibat polusi permukaan tidak hanya menjadi indikator penurunan kualitas isolasi, tetapi juga mempengaruhi distribusi medan listrik pada permukaan isolator. Ketika arus bocor mengalir melalui jalur konduktif yang tidak seragam, terjadi konsentrasi medan listrik pada titik-titik tertentu, terutama di area dengan ketebalan kontaminan yang berbeda atau pada daerah yang mengalami pengeringan lokal.

Konsentrasi medan listrik ini dapat memicu terjadinya pelepasan muatan parsial (*partial discharge*). *Partial discharge* merupakan fenomena pelepasan muatan listrik yang terjadi secara lokal tanpa menyebabkan breakdown menyeluruh pada sistem isolasi. Walaupun energi yang dilepaskan relatif kecil, aktivitas PD yang berlangsung secara terus-menerus dapat mempercepat degradasi material isolasi dan memperbesar risiko kegagalan total.

Dalam lingkungan berpolusi tinggi, fenomena yang sering terjadi adalah dry band arcing. Arus bocor yang mengalir melalui lapisan kontaminan menghasilkan pemanasan lokal sehingga sebagian permukaan mengering dan membentuk zona resistansi tinggi (*dry band*). Pada zona ini, tegangan jatuh menjadi tinggi sehingga dapat terjadi percikan listrik kecil. Percikan ini, apabila berulang, dapat membentuk jalur karbon permanen pada permukaan isolator, yang dikenal sebagai *tracking*. *Tracking* merupakan salah satu penyebab utama kegagalan isolator luar ruang.

2.2.7.3 Pengaruh Creepage Distance dan Margin Isolasi

Creepage distance adalah jarak rambat terpendek sepanjang permukaan isolator antara bagian bertegangan dan bagian yang ditanahkan. Dalam kondisi lingkungan bersih, *creepage distance* minimum biasanya sudah mencukupi. Namun pada lingkungan berpolusi tinggi, diperlukan *creepage distance* yang lebih panjang untuk menjaga densitas arus permukaan tetap rendah.

- Isolator dengan spesifikasi tegangan lebih tinggi umumnya memiliki:
- *Creepage distance* lebih panjang

- Profil sirip (*shed profile*) lebih kompleks
- Jarak antar sirip yang dirancang untuk meningkatkan kemampuan *self-cleaning*

Peningkatan *creepage distance* memberikan jalur rambat yang lebih panjang bagi arus bocor, sehingga arus permukaan terdistribusi lebih merata dan tidak terkonsentrasi pada satu titik. Dengan demikian, risiko terbentuknya dry band arcing dan *tracking* dapat ditekan.

Secara konseptual, peningkatan spesifikasi isolator dari 20 kV menjadi 70 kV berarti peningkatan margin isolasi terhadap tegangan operasi sistem. Margin yang lebih besar ini memberikan toleransi tambahan terhadap kondisi polusi, variasi kelembapan, serta gangguan eksternal seperti hewan kecil yang dapat memperpendek jarak isolasi efektif.

2.2.7.4 Relevansi terhadap Lingkungan Industri GI Jababeka

Gardu Induk Jababeka berada di kawasan industri padat yang memiliki potensi paparan partikel debu, asap industri, dan polutan kimia. Lingkungan seperti ini secara teoritis termasuk dalam kategori polusi sedang hingga berat menurut klasifikasi IEC. Pada kondisi tersebut, isolator dengan spesifikasi nominal minimum dapat memiliki margin yang terbatas terhadap degradasi permukaan.

Dengan mempertimbangkan teori pengaruh polusi, peningkatan spesifikasi *post* isolator menjadi 70 kV merupakan pendekatan mitigasi berbasis peningkatan margin isolasi. Strategi ini bertujuan untuk:

- Meningkatkan *creepage distance* efektif,
- Mengurangi densitas arus bocor permukaan,
- Menekan konsentrasi medan listrik lokal,
- Mengurangi potensi terjadinya *partial discharge* dan *flashover*.

Pendekatan ini sejalan dengan praktik rekayasa sistem tenaga yang menekankan peningkatan keandalan melalui peningkatan ketahanan peralatan terhadap kondisi lingkungan ekstrem.

2.2.8 Konsep Keandalan Sistem Tenaga dan *Condition-Based Maintenance*

Keandalan (*reliability*) dalam sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan sistem untuk menjalankan fungsinya secara kontinu dalam periode waktu tertentu tanpa mengalami kegagalan. Dalam konteks gardu induk, keandalan tidak hanya ditentukan oleh kapasitas transformator atau sistem proteksi, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kondisi isolasi peralatan tegangan menengah dan tinggi.

Secara umum, keandalan sistem tenaga dapat ditinjau dari dua aspek utama, yaitu keandalan sistem secara keseluruhan dan keandalan peralatan individual. Kegagalan satu komponen kritis, seperti isolator pada sisi sekunder transformator, dapat menyebabkan *trip* transformator dan mengganggu kontinuitas suplai daya. Oleh karena itu, sistem isolasi merupakan salah satu elemen vital dalam menjaga stabilitas operasional gardu induk.

Dalam teori keandalan, kegagalan peralatan sering dikaitkan dengan laju kegagalan (*failure rate*) dan probabilitas kegagalan dalam periode tertentu. Pada peralatan luar ruang seperti isolator, laju kegagalan dipengaruhi oleh faktor lingkungan, usia material, serta tingkat kontaminasi. Degradasi isolasi yang tidak terdeteksi sejak dini dapat meningkatkan probabilitas kegagalan mendadak (*sudden failure*).

Untuk mengurangi risiko kegagalan tersebut, dikembangkan pendekatan pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*). Berbeda dengan pemeliharaan berbasis waktu (*time-based maintenance*), pendekatan ini mengandalkan parameter diagnostik aktual seperti arus bocor dan *partial discharge* untuk menilai kondisi isolasi secara langsung. Dengan demikian, keputusan pemeliharaan atau penggantian peralatan dilakukan berdasarkan data aktual, bukan hanya interval waktu rutin.

Pengujian tahanan isolasi, arus bocor, dan *partial discharge* termasuk dalam kategori teknik diagnostik kondisi yang banyak direkomendasikan dalam standar internasional seperti IEC 60270 dan IEEE 400.3. Parameter-parameter tersebut mampu mendeteksi degradasi isolasi pada tahap awal sebelum berkembang menjadi gangguan sistem yang lebih besar.

Dalam sistem dengan tingkat polusi tinggi, monitoring berkala menjadi sangat penting karena degradasi isolasi dapat berlangsung lebih cepat dibandingkan

lingkungan normal. Peningkatan margin isolasi melalui penggunaan peralatan dengan spesifikasi lebih tinggi merupakan salah satu *strategi* untuk menurunkan laju kegagalan dan meningkatkan *mean time between failures* (MTBF). Dengan margin isolasi yang lebih besar, sistem memiliki toleransi lebih tinggi terhadap variasi kondisi lingkungan dan gangguan eksternal.

Dalam konteks penelitian ini, penggantian *post* isolator 20 kV menjadi 70 kV tidak hanya dimaksudkan untuk meningkatkan nilai tahanan isolasi secara sesaat, tetapi juga untuk menurunkan probabilitas kegagalan isolasi dalam jangka menengah. Monitoring arus bocor mingguan serta pengujian *partial discharge* periodik dilakukan sebagai implementasi pendekatan *condition-based maintenance* untuk memastikan bahwa peningkatan performa isolasi bersifat berkelanjutan.

Dengan demikian, evaluasi hasil pengujian dalam penelitian ini tidak hanya dilihat sebagai perbandingan teknis sebelum dan sesudah penggantian, tetapi juga sebagai indikator peningkatan keandalan operasional sisi sekunder Trafo 4 secara sistemik.

2.2.9 Konsep Margin Tegangan dan *Overrating* Peralatan Tegangan Menengah

Dalam perancangan sistem tenaga listrik, setiap peralatan memiliki spesifikasi tegangan nominal yang menunjukkan batas maksimum operasi kontinu yang aman. Namun dalam praktik rekayasa, sering diterapkan konsep margin tegangan (*voltage margin*) atau *overrating*, yaitu penggunaan peralatan dengan spesifikasi tegangan lebih tinggi dari tegangan operasi sistem.

Konsep margin tegangan bertujuan untuk memberikan faktor keamanan tambahan terhadap kondisi abnormal seperti lonjakan tegangan, distribusi medan listrik yang tidak merata, serta pengaruh lingkungan eksternal. Margin ini penting terutama pada peralatan luar ruang yang terpapar langsung terhadap kontaminasi, kelembapan, dan gangguan eksternal.

Secara teoritis, isolator dengan spesifikasi tegangan lebih tinggi memiliki karakteristik sebagai berikut:

- Jarak rambat (*creepage distance*) lebih panjang
- Jarak udara (*clearance distance*) lebih besar
- Profil geometri yang dirancang untuk mengurangi konsentrasi medan listrik

- Kapasitas tahan terhadap tegangan lebih (*overvoltage withstand capability*) lebih tinggi

Peningkatan *creepage distance* secara langsung menurunkan densitas arus permukaan ketika terjadi kontaminasi. Jika tegangan operasi sistem jauh di bawah rating maksimum isolator, maka distribusi medan listrik pada permukaan isolator menjadi lebih merata dan tidak mencapai ambang kritis yang memicu *partial discharge*.

2.2.9.1 Distribusi Medan Listrik pada Isolator

Medan listrik pada isolator tidak selalu terdistribusi secara seragam. Pada kondisi ideal, garis medan listrik menyebar merata sepanjang permukaan isolator. Namun pada kondisi kontaminasi atau geometri yang kurang optimal, dapat terjadi konsentrasi medan listrik pada titik tertentu.

Apabila jarak efektif (*creepage* atau *clearance*) diperbesar, maka intensitas medan listrik menurun. Penurunan intensitas medan listrik ini sangat penting karena *partial discharge* umumnya terjadi ketika medan listrik lokal melebihi kekuatan dielektrik medium di sekitarnya.

Dengan menggunakan isolator 70 kV pada sistem 20 kV, maka rasio tegangan operasi terhadap rating maksimum menjadi lebih kecil. Hal ini menyebabkan medan listrik aktual yang bekerja pada permukaan isolator berada jauh di bawah kapasitas kritisnya. Kondisi ini meningkatkan stabilitas dielektrik sistem dalam jangka panjang.

2.2.9.2 Relevansi Overrating terhadap Lingkungan Polusi Tinggi

Pada lingkungan industri seperti GI Jababeka, kombinasi antara kontaminasi permukaan dan kelembapan dapat memperbesar risiko breakdown isolasi. Dalam kondisi tersebut, penggunaan isolator dengan rating nominal minimum sering kali tidak memberikan margin keamanan yang memadai.

Dengan meningkatkan rating isolator menjadi 70 kV, diperoleh beberapa keuntungan teknis:

- Toleransi lebih tinggi terhadap tegangan lebih transien
- Distribusi medan listrik lebih stabil
- Risiko *flashover* akibat kontaminasi lebih kecil

- Ketahanan lebih baik terhadap gangguan eksternal seperti hewan kecil

Pendekatan ini bukan sekadar peningkatan spesifikasi, tetapi merupakan *strategi* mitigasi berbasis peningkatan margin isolasi untuk meningkatkan keandalan sistem dalam jangka menengah.

2.2.10 Analisis Teknis Perbandingan Post Isolator 20 kV dan 70 kV

Penggantian *post* isolator dari rating 20 kV menjadi 70 kV pada sistem sisi sekunder transformator bukan hanya perubahan nominal tegangan, tetapi perubahan karakteristik desain yang berdampak langsung terhadap performa dielektrik, distribusi medan listrik, dan ketahanan terhadap polusi lingkungan. Analisis berikut membahas perbedaan teknis secara lebih spesifik.

2.2.10.1 Perbandingan Parameter Dimensi dan Geometri

Secara fisik, *post* isolator 70 kV memiliki dimensi yang lebih besar dibandingkan isolator 20 kV. Peningkatan dimensi ini mencakup tinggi total isolator, diameter maksimum sirip (*shed diameter*), jumlah sirip, serta jarak antar sirip. Perbedaan ini tidak hanya berfungsi untuk memenuhi persyaratan tegangan yang lebih tinggi, tetapi juga mempengaruhi distribusi medan listrik dan karakteristik rambatan arus permukaan.

Isolator dengan tinggi yang lebih besar memberikan jarak pemisah yang lebih panjang antara konduktor bertegangan dan struktur yang ditanahkan. Jarak ini meningkatkan *clearance distance* sehingga memperkecil kemungkinan terjadinya loncatan listrik melalui udara. Selain itu, jumlah sirip yang lebih banyak memperpanjang jalur rambat arus permukaan, yang sangat penting pada kondisi kontaminasi.

Konfigurasi geometri yang lebih kompleks pada isolator 70 kV juga dirancang untuk meminimalkan penumpukan air dan polutan. Profil sirip yang menjorok keluar membantu proses *self-cleaning* saat terjadi hujan, sehingga kontaminasi dapat berkurang secara alami. Dengan demikian, dari sisi desain fisik, isolator 70 kV memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap kondisi lingkungan ekstrem dibandingkan isolator 20 kV.

2.2.10.2 Perbandingan Creepage Distance dan Dampaknya

Creepage distance merupakan salah satu parameter paling penting dalam menentukan performa isolator di lingkungan berpolusi. *Creepage distance* adalah panjang jalur rambat terpendek sepanjang permukaan isolator antara titik bertegangan dan titik yang ditanahkan. Pada lingkungan dengan tingkat polusi tinggi, panjang *creepage* yang lebih besar sangat diperlukan untuk mengurangi densitas arus permukaan.

Isolator 20 kV dirancang untuk memenuhi *creepage* minimum sesuai standar tegangan nominalnya. Namun, pada kondisi polusi berat, *creepage* minimum tersebut sering kali hanya memberikan margin keamanan yang terbatas. Sebaliknya, isolator 70 kV memiliki *creepage distance* yang dirancang untuk sistem dengan tegangan jauh lebih tinggi. Ketika isolator 70 kV digunakan pada sistem 20 kV, maka *creepage distance* aktual menjadi jauh lebih besar dari kebutuhan minimum sistem.

Hal ini memberikan keuntungan signifikan karena arus bocor yang mengalir melalui permukaan harus melewati jalur yang lebih panjang, sehingga resistansi total jalur meningkat. Dengan meningkatnya resistansi permukaan, arus bocor yang mengalir akan menurun sesuai prinsip hukum Ohm. Penurunan arus bocor ini secara langsung mengurangi pemanasan lokal dan risiko terbentuknya dry band arcing.

2.2.10.3 Analisis Distribusi Medan Listrik Permukaan

Distribusi medan listrik pada isolator sangat dipengaruhi oleh geometri dan jarak isolasi. Pada isolator dengan jarak pendek, gradien medan listrik cenderung lebih tinggi, terutama pada bagian dekat konduktor. Medan listrik yang tinggi ini meningkatkan risiko ionisasi udara atau inisiasi *partial discharge* pada kondisi tertentu.

Dengan menggunakan isolator 70 kV pada sistem 20 kV, medan listrik rata-rata yang bekerja pada permukaan isolator menjadi lebih rendah karena tegangan operasi jauh di bawah rating desainnya. Secara konseptual, intensitas medan listrik dapat diasumsikan berbanding lurus dengan tegangan dan berbanding terbalik dengan jarak efektif isolasi.

Penurunan intensitas medan listrik ini sangat penting karena *partial discharge* umumnya terjadi ketika medan listrik lokal melebihi kekuatan dielektrik material atau medium sekitarnya. Dengan medan listrik yang lebih rendah dan terdistribusi lebih merata, potensi terjadinya pelepasan muatan parsial dapat ditekan.

2.2.10.4 Ketahanan terhadap Fenomena Dry Band dan Tracking

Fenomena dry band terjadi ketika arus bocor yang mengalir melalui permukaan kontaminan menyebabkan pemanasan lokal, sehingga sebagian area menjadi kering dan membentuk zona resistansi tinggi. Pada zona ini, tegangan jatuh meningkat dan dapat memicu percikan listrik kecil yang berulang.

Pada isolator 20 kV dengan *creepage* yang relatif terbatas, dry band dapat terbentuk lebih cepat ketika terjadi polusi dan kelembapan tinggi. Namun pada isolator 70 kV, jalur rambat yang lebih panjang menyebabkan arus bocor lebih kecil, sehingga pemanasan lokal berkurang dan pembentukan dry band menjadi lebih sulit terjadi.

Jika dry band tidak mudah terbentuk, maka risiko berkembangnya *tracking* dan karbonisasi permanen pada permukaan isolator juga menurun. Dengan demikian, penggunaan isolator 70 kV secara teoritis meningkatkan ketahanan terhadap degradasi jangka panjang akibat fenomena dry band arcing.

2.2.10.5 Implikasi terhadap Partial discharge dan Flashover

Partial discharge sering menjadi indikator awal degradasi isolasi. Aktivitas PD yang berulang dapat menyebabkan erosi material isolator dan menurunkan kekuatan dielektriknya. Pada isolator yang bekerja mendekati rating nominalnya, margin terhadap gangguan relatif kecil.

Ketika isolator 70 kV digunakan pada sistem 20 kV, isolator bekerja pada tingkat stres listrik yang jauh lebih rendah dari kapasitas desainnya. Hal ini menurunkan kemungkinan terbentuknya konsentrasi medan listrik yang cukup tinggi untuk memicu PD.

Selain itu, peningkatan *clearance distance* juga mengurangi risiko *flashover* melalui udara, terutama jika terjadi gangguan eksternal seperti hewan

kecil yang mendekat ke area bertegangan. Dengan margin yang lebih besar, jarak kritis untuk breakdown udara menjadi lebih sulit tercapai.

2.2.10.6 *Implikasi terhadap Keandalan Operasional*

Dari sudut pandang keandalan sistem, penggunaan isolator dengan rating lebih tinggi memberikan peningkatan margin keamanan terhadap berbagai jenis gangguan. Komponen yang bekerja jauh di bawah rating nominalnya cenderung memiliki laju degradasi yang lebih rendah dan umur pakai yang lebih panjang.

Dalam konteks gardu induk dengan tingkat polusi tinggi, pendekatan ini dapat dipandang sebagai *strategi* mitigasi berbasis peningkatan margin desain (*design margin enhancement*). Dengan margin isolasi yang lebih besar, probabilitas kegagalan akibat kontaminasi, arus bocor tinggi, atau aktivitas PD dapat ditekan.

Dengan demikian, secara konseptual dan teknis, penggunaan *post* isolator 70 kV pada sistem 20 kV memberikan peningkatan performa dielektrik yang signifikan serta berkontribusi terhadap peningkatan keandalan operasional dalam jangka menengah hingga panjang.

2.2.11 **Korelasi Teoretis antara Tahanan Isolasi, Arus Bocor, dan *Partial discharge***

Dalam sistem isolasi tegangan menengah, tahanan isolasi, arus bocor, dan *partial discharge* bukanlah parameter yang berdiri sendiri, melainkan saling berkaitan secara fisik dan elektris. Ketiga parameter tersebut mencerminkan kondisi dielektrik sistem dari sudut pandang yang berbeda, tetapi memiliki hubungan kausal yang dapat dijelaskan secara teoritis.

Tahanan isolasi menggambarkan kemampuan material dalam menahan aliran arus ketika diberikan tegangan uji tertentu. Nilai tahanan isolasi yang tinggi menunjukkan resistansi yang besar terhadap aliran arus bocor. Berdasarkan hukum Ohm, arus yang mengalir melalui suatu medium berbanding terbalik dengan resistansinya. Dengan demikian, penurunan tahanan isolasi akan berimplikasi langsung terhadap peningkatan arus bocor pada kondisi operasi.

Arus bocor yang meningkat akibat penurunan resistansi permukaan akan menyebabkan terjadinya pemanasan lokal pada jalur rambat. Pemanasan ini dapat memicu terbentuknya *dry band* dan menyebabkan distribusi medan listrik menjadi

tidak merata. Ketidakmerataan distribusi medan listrik ini meningkatkan kemungkinan terjadinya *partial discharge* pada titik-titik tertentu yang mengalami konsentrasi medan listrik tinggi.

Partial discharge sendiri merupakan indikator adanya stres listrik lokal yang melebihi kemampuan isolasi material. Aktivitas PD yang berlangsung terus-menerus dapat mempercepat degradasi material isolator dan pada akhirnya menyebabkan breakdown atau *flashover*.

Dengan demikian, hubungan antar parameter dapat diringkas sebagai berikut:

Penurunan tahanan isolasi → Peningkatan arus bocor → Konsentrasi medan listrik lokal → Aktivitas *partial discharge* → Potensi degradasi isolasi.

Korelasi ini menunjukkan bahwa peningkatan satu parameter secara positif (misalnya peningkatan tahanan isolasi) secara teoritis akan memberikan dampak positif terhadap parameter lainnya (penurunan arus bocor dan penurunan aktivitas PD).

Pendekatan korelatif ini menjadi dasar analisis terpadu dalam penelitian, di mana ketiga parameter dievaluasi secara simultan untuk menilai kondisi isolasi secara komprehensif.

2.2.12 Implikasi Teknis dan Operasional terhadap Sistem Gardu Induk

Kegagalan isolator pada sisi sekunder transformator tidak hanya berdampak pada peralatan itu sendiri, tetapi juga berpengaruh terhadap kontinuitas suplai tenaga listrik. *Trip* transformator akibat *flashover* atau kegagalan isolasi dapat menyebabkan:

- Gangguan pasokan daya ke pelanggan industri
- Potensi penalti keandalan
- Biaya perbaikan dan penggantian komponen
- Risiko kerusakan lanjutan pada peralatan lain

Pada gardu induk yang melayani beban industri, keandalan suplai menjadi sangat krusial karena gangguan dapat berdampak langsung pada proses produksi pelanggan.

Dengan meningkatkan margin isolasi melalui penggunaan *post* isolator 70 kV, potensi gangguan akibat degradasi isolasi dapat ditekan. Strategi ini secara

tidak langsung berkontribusi terhadap peningkatan indeks keandalan sistem, seperti penurunan frekuensi gangguan akibat kegagalan isolasi.

Pendekatan ini sejalan dengan prinsip manajemen aset berbasis risiko (*risk-based asset management*), di mana peningkatan margin desain pada komponen kritis dapat menurunkan probabilitas kegagalan dan meningkatkan stabilitas operasional dalam jangka panjang.