

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Landasan Teori

Isolator merupakan suatu peralatan listrik yang berfungsi sebagai pemisah antar dua atau lebih penghantar yang berdekatan serta memisahkan bagian bertegangan dan tidak bertegangan listrik sehingga tidak terjadi kebocoran arus atau *flashover* dari penghantar yang satu ke penghantar yang lain sehingga tidak terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik. Isolator harus mempunyai kekuatan dielektrik dan mekanik yang baik agar mampu menahan beban potensial atau medan listrik serta beban mekanis penghantar tanpa mengurangi kemampuan kerja isolator, (Santosa 2017).

Penggunaan isolator pada saluran tegangan tinggi berbeda dengan yang digunakan pada jaringan tegangan menengah. Saluran tegangan tinggi, selain harus menahan tegangan kerja sistem dan kemungkinan tegangan lebih, juga harus tahan terhadap beban mekanis penghantar dan lapisan insulasi itu sendiri. Kaca dan porselen tergolong bahan mineral tetapi tidak dapat dimanfaatkan dalam bentuk atau keadaan alaminya melainkan harus diolah terlebih dahulu dengan cara dipanaskan (dibakar), dikeraskan, dan dicairkan. Inilah sebabnya mengapa pembasahan dipisahkan dari pembasahan bahan mineral. Sifat listrik dan mekanik isolator bergantung pada konstruksi dan bahan yang digunakan. Kekuatan dielektrik suatu bahan insulasi penting dalam menentukan mutu bahan insulasi yang nantinya akan menunjang keseluruhan sistem kelistrikan. Semakin tinggi kekuatan dielektrik

bahan isolasi, semakin cocok digunakan pada peralatan listrik tegangan tinggi, (Armansyah 2021).

Isolator luar ruangan memiliki peran sangat penting dalam memelihara akurasi sistem tenaga dalam jangka waktu yang lebih lama, isolator bekerja secara maksimal pada jalur transmisi dan distribusi listrik. Namun lapisan polusi terbentuk pada permukaan isolator ketika partikel-partikel udara dan faktor lingkungan lainnya mengendap pada permukaan isolator yang dipasang di berbagai daerah dan kondisi seperti pesisir, industri dan pertanian. Oleh karena itu besar kemungkinan terjadinya arus bocor, (Ali et al. 2022).

2.1.1 Isolator

Isolator yang biasa digunakan pada saluran udara yang dioperasikan pada tegangan tinggi (di atas 1 kV) adalah bahan porselin (keramik), bahan gelas, serta bahan polimer (composite).

a. Isolator Porselen

Porselen terbuat dari tanah liat cina yang terbentuk secara alami dalam bentuk aluminium silikat. Bahan ini dicampur dengan kaolin, feldspar dan quart. Campuran tersebut kemudian dipanaskan dalam oven yang suhunya dapat diatur. Porselen dibakar hingga keras, halus, mengkilat dan tidak ada lubang tersisa. Porselen memiliki Tingkat peleburan yang tinggi saat pembakaran atau dengan kata lain memiliki karakteristik vitreous. Selain itu isolator porselen juga memiliki Porositas lebih rendah dari 0,5%, dengan kandungan kaca lebih besar dari 40%. Disamping itu juga sifat bahan porselen sangat keras dengan konduktivitas listrik dan termal

yang rendah, dan patah yang rapuh, (Aripin et al. 2019). Porselen paling sering digunakan dalam isolator listrik karena memiliki sifat non-konduktif yang tinggi, kekuatan dielektrik dan mekanik yang tinggi, serta ekonomis. Kekuatan mekanik porselen bergantung pada cara pembuatannya, kekuatan mekanik porselen standar dengan diameter 2-3 cm adalah 45.000 kg/cm²; beban tekan 700 kg/cm²; Beban lentur sebesar 300 kg/cm² dan beban tarik sebesar 300 kg/cm².

Dapat disimpulkan bahwa porselen merupakan material dengan sifat mekanik yang sangat baik pada beban tekan. Dibalik kelebihan itu isolator porselin juga mempunyai beberapa kekurangan, diantaranya mudah pecah, berat, berlubang akibat pembuatan kurang sempurna, bentuk geometri kompleks, dan mudah terpapar polusi terlebih pada kondisi lingkungan yang tinggi tingkat polusinya, hal ini dapat menyebabkan kegagalan isolasi yaitu *flashover*, (Puguh Kurniawan Arif 2017).



Gambar 2.1 Isolator Porselen

Sumber: (Wahyu Baskoro 2018)

Isolator porselen setebal 1,5 mm memiliki kekuatan dielektrik 22 hingga 28 kVrms/mm. Namun jika ketebalan dielektrik bertambah maka kemampuan isolasi material akan menurun. Hal ini terjadi karena medan listrik tidak seragam. Ketika ketebalan bertambah dari 10 mm menjadi 30 mm, kekuatan dielektrik menurun dari 80 kVrms/mm menjadi 55 kVrms/mm. Kekuatan dielektrik porselen pada tegangan berdenyut 50-70% lebih tinggi dibandingkan kekuatan dielektrik pada frekuensi daya, (Wahyu Baskoro 2018).

b. Jenis Isolator Porselen

Isolator pada saluran transmisi dan distribusi menurut konstruksi dan penggunaannya terdiri dari :

1. Isolator Gantung (Suspension)
2. Isolator Jenis Pasak (Pin)
3. Isolator Batang Panjang (Long Rod)
4. Isolator Jenis Post Saluran (Line Post)

c. Isolator Pasak (Pin)

Isolator pasak atau Post Pin isolator jenis ini banyak dipakai pada tiang lurus (*tangent pole*) dan tiang sudut (*angle pole*) dengan sudut 5° sampai 30° . Biasanya terbuat dari bahan porselin atau bahan gelas yang dibentuk kepingan lalu pada bagian bawahnya diberi pasak bahan besi atau baja tempaan. Kekurangan jenis pasak ini pada kekuatan tarik yang lebih rendah jika dibandingkan dengan isolator jenis gantung. Isolator Post Pin atau pasak biasa terdapat pada saluran distribusi dan biasa dipasang di lingkungan pantai, daerah industri, dan juga daerah dengan

kelembaban tinggi dengan penghasil polutan pada permukaan isolator yang tinggi, (BASO 2021).



Gambar 2. 2 Isolator Porselen jenis Pasak

2.1.2 Karakteristik Isolator

a. Karakteristik Elektrik Isolator

Sifat kelistrikan isolator yang penting adalah kemampuannya menahan *flashover* dan arus bocor. Isolator yang dipasang di jaringan udara mudah terpengaruh oleh perubahan kondisi udara sekitar. Perubahan tersebut dapat mempengaruhi kinerja isolator terutama kemampuan menahan tegangan isolator. Terbentuknya lapisan kontaminan pada permukaan isolator mempengaruhi kinerja isolator. Kinerja isolator berbeda ketika permukaan isolator basah atau kering. Isolator terdiri dari bahan isolasi yang ditempatkan di antara elektroda.

Maka dari itu isolator terdiri dari sejumlah kapasitansi. Karena kapasitansi tersebut maka jaringan distribusi tegangan pada sebuah rentengan isolator menjadi tidak seragam. Potensial pada ujung yang terkena tegangan (ujung yang memegang

kawat penghantar) adalah paling besar. Karakteristik elektrik suatu isolator dinilai dari tegangan *flashover* yang terdiri dari tegangan-tegangan *flashover* frekuensi rendah, impuls, dan tembus merusak (*puncture*), (Irfangi 2017).

1. Tegangan *flashover* frekuensi rendah kering (*dry power frequency flashover voltage*) adalah tegangan *flashover* yang terjadi bila tegangan diterapkan di antara kedua elektroda isolator yang bersih dan kering permukaannya, nilainya konstan serta merupakan nilai dasar dari karakteristik isolator.
2. Tegangan *flashover* frekuensi rendah basah (*wet power frequency flashover voltage*) adalah tegangan *flashover* yang terjadi bila tegangan diterapkan di antara dua elektroda isolator yang basah karena hujan atau sengaja dibasahi.
3. Tegangan *flashover* impuls (*impuls flashover voltage*) adalah tegangan *flashover* yang terjadi bila tegangan impuls dengan gelombang standar diterapkan. Menurut standar IEC besarnya gelombang impuls standar adalah $1,2 \times 50$ ms. Karakteristik impuls terbagi atas polaritas positif dan negatif. Biasanya, tegangan dengan polaritas positif yang dipakai (memberikan nilai *flashover* lebih rendah). Untuk polaritas positif, tegangan *flashover* basah dan kering sama.
4. Tegangan tembus (*puncture*) merupakan tegangan tembus yang menyebabkan perusakan bahan isolasinya. Sedangkan perusakan bagian isolator yang disebabkan oleh pemanasan lebih tidak dikategorikan sebagai *puncture*.

b. Karakteristik Mekanik Isolator

Sifat mekanik suatu isolator ditandai dengan kekuatan mekaniknya, yaitu nilai minimum beban mekanis yang mengakibatkan kerusakan pada isolator. Kekuatan mekanik ini ditentukan dengan memberikan beban yang semakin meningkat secara bertahap hingga muncul kerusakan pada isolator. Kekuatan mekanik suatu isolator dinyatakan dalam tiga kondisi pembebanan: kekuatan tarik mekanik, kekuatan tekan mekanik, dan kekuatan lentur mekanik

Sebelum menentukan kekuatan mekanik suatu isolator dalam suatu desain, terlebih dahulu perlu diketahui tegangan mekanis yang akan dikenakan pada isolator tersebut di lapangan. Isolator harus mampu menahan beban berat dan tarik konduktor. Berat konduktor tergantung pada luas penampang konduktor, jenis bahan, jarak antar gerbang, dan ada tidaknya timbunan es pada konduktor. Tegangan mekanis akibat pembebanan tarik bergantung pada luas penampang konduktor, jarak gawang, suhu, dan kecepatan angin. Ketika isolator pin digunakan pada jaringan saluran udara, semua beban di atas umumnya mengakibatkan beban tekuk pada isolator.

Pada saat pengujian kekuatan mekanik isolator, terutama pada pengujian isolator gantung, kerusakan mungkin tidak selalu terlihat karena kerusakan dapat terjadi pada penjepit logam. Sehingga kerusakannya tidak akan terlihat. Oleh karena itu, dalam kasus isolator gantung, uji kekuatan mekanik dilakukan dengan memberikan tegangan 70 hingga 80% tegangan ke isolator menggunakan pulsa AC kering. Tegangan mekanis minimum yang menyebabkan kerusakan isolator

ditunjukkan dengan putusya sambungan listrik transformator uji yang digunakan untuk mensuplai tegangan pada isolator.

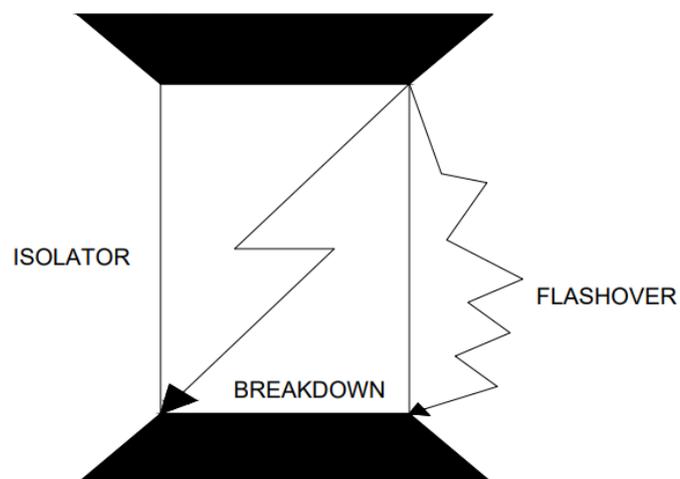
Ciri utama isolator gantung adalah kekuatan mekanik 1 jam. Ciri-ciri ini biasanya tertulis pada permukaan setiap isolator gantung. Kurva karakteristik ini ditentukan dengan menerapkan beban mekanis sebesar 75 hingga 80% tegangan ke isolator secara bersamaan melalui pulsa arus bolak-balik kering. Isolator harus mampu menahan beban ini selama satu jam tanpa merusak Isolator. Dalam prakteknya, beban maksimum yang dapat ditahan oleh suatu isolator diperkirakan ditetapkan sama dengan satu setengah kali kekuatan mekanis satu jam. Tegangan lebih merupakan faktor penting ketika merencanakan isolasi saluran udara. Di lokasi di mana polusi udara tidak menjadi masalah, lonjakan tegangan pada rangkaian merupakan faktor penting dalam menentukan jumlah isolator dan jarak isolasi. Ditempat-tempat dimana pengotoran udara tidak mengkhawatirkan, surja hubung merupakan faktor penting dalam penentuan jumlah isolator dan jarak isolasi. Karakteristik lompatan api dari surja hubung lain dari karakteristik frekuensi rendah dan impuls. Contoh karakteristik lompatan api untuk isolator gantung 250 mm, (Armansyah 2021).

2.1.3 *Flashover* dan Arus Bocor

Flashover adalah nilai atau ukuran tegangan yang dapat ditahan isolator sampai terjadinya lompatan api / *flashover*. Tegangan *flashover* disebabkan akibat isolator terkontaminasi fenomena ini merupakan hal umum di antara semua jenis kejadian pencemaran di industri ketenagalistrikan. Polutan yang menempel pada permukaan isolasi yang larut dalam air (polutan terlarut) biasanya merupakan

senyawa garam alkali dan polutan tidak larut (polutan tidak larut) adalah senyawa kimia kompleks yang sering dihasilkan oleh polusi industri, debu vulkanik, asap mobil, (Jaya et al. 2019).

Flashover mengacu pada fenomena *breakdown* yang terjadi diatas permukaan dielektrik dalam isolasi gas atau cair. *Breakdown* adalah kegagalan isolasi di bawah tekanan listrik dimana discharge menjembatani sepenuhnya isolasi yang diuji dan mengurangi tegangan antara elektrode menjadi hampir nol. *Flashover* yang terjadi pada isolator berpolutan biasanya merupakan proses yang lambat yang terjadi pada nilai medan listrik rata-rata yang cukup rendah. *flashover* permukaan bergantung pada beberapa hal faktor termasuk bahan elektroda dan kondisi permukaan, pengatur jarak kondisi material dan permukaan, komposisi dan tekanan fluida, bentuk gelombang potensial yang diterapkan, dan geometri pengaturan elektroda/pengatur jarak, (Bean, Adams, and Weber 2020).



Gambar 2. 3 Kegagalan Isolator

Sumber: (Mawardi 2018)

Polutan yang menempel pada isolator, lama kelamaan akan menimbulkan suatu lapisan konduktif (*conducting film*). Lapisan konduktif ini biasanya terbentuk tidak merata dan tidak seragam. Ketika konduksi dimulai, arus listrik dalam orde beberapa mA dapat pemanasan larutan konduktif yang terbentuk pada permukaan isolator. Arus bocor mulai mengeringkan lapisan konduktif dan resistivitas lapisan tersebut bertambah di area-area tertentu. Hal ini menyebabkan pembentukan pita kering (*dry band*) yang biasanya terdapat di area dengan kerapatan arus tertinggi.

Terbentuknya lapisan konduktif di permukaan isolator diakibatkan oleh adanya polutan yang menempel. Lapisan ini yang menyebabkan mengalirnya arus bocor (*leakage current*). Dengan mengalirnya arus bocor, terjadi pemanasan di lapisan tersebut. Lapisan ini dapat membentuk pita kering akibat dialiri arus bocor secara terus menerus. Pada tegangan tertentu, kondisi ini dapat menyebabkan pelepasan muatan melintasi pita kering. Pelepasan muatan dapat memanjang sehingga terbentuk busur listrik (*arc*) dan terjadi flashover yang melalui seluruh permukaan isolator. Di Indonesia pada musim kemarau dan hujan terjadi penumpukan partikel-partikel kontaminan pada permukaan isolator dengan jenis dan tingkat kontaminan yang berbeda-beda. Sesuai dengan kondisi sekitar isolator itu dipasang, semakin jauh dari pantai semakin kecil *Equivalent Salt Deposit Density* (ESDD) nya., (Darmadi, Kholistianingsih, and Yulianto 2023).

Arus bocor dapat disebabkan karena adanya bagian konduktif pada permukaan isolator. Senyawa garam pada larutan pengotor isolator akan larut kedalam pelarut polar H₂O yang berasal dari kabut (*uap*) air dan membentuk larutan elektrolit. Konduktivitas larutan elektrolit ini akan semakin tinggi bersamaan dengan naiknya

ESDD larutan polutan. Arus bocor yang mengalir mengakibatkan panas dan penguapan pada bagian permukaan isolator sehingga terbentuk pita kering. Daerah pita kering mempunyai tahanan yang lebih besar jika dibandingkan daerah terkotori lainnya. Keadaan ini menyebabkan terjadinya peluahan muatan (discharge) melintasi pita kering. Bila busur api memanjang melintasi seluruh permukaan isolator maka akan terjadi flashover, (BASO 2021).

2.1.4 Polutan Air Laut

Air laut merupakan campuran dari 96,5% air murni dan 3,5% material lainnya seperti garam-garam, gas-gas terlarut, bahan-bahan organik dan partikel-partikel tak terlarut. Rata-rata air laut di lautan dunia memiliki salinitas sebesar 3,5%, hal ini berarti untuk setiap satu liter air laut terdapat 35 gr garam yang terlarut didalamnya. Sumber-sumber garam yang ada dilaut berasal dari tiga hal yaitu gas-gas vulkanik, pelapukan batuan didarat, dan sirkulasi lubanglubang hidrotermal pada air laut yang dalam. Kandungan garam di setiap laut berbeda kandungannya.

Air laut memiliki kadar garam karena bumi dipenuhi dengan garam mineral yang terdapat di dalam batu-batuan dan tanah. Air laut diperkirakan memiliki 48.000 triliun ton garam yang terlarut di dalam air. Garam-garam ini terdiri dari garam natrium klorida (NaCl), garam sulfat (MgSO₄, K₂SO₄, CaSO₄, Na₂SO₄, NaHSO₄), garam magnesium (MgCl), garam kalium (KCl), dan garam bromin (MgBr atau KBr). Natrium Clorida (NaCl) merupakan senyawa garam, dan garam laut awalnya terkandung dari natrium (31%), klorida (55%), magnesium (4%), sulfat (8%), potassium (1%), kalsium (1%) dan sisanya kurang dari 1% terdiri dari asam borak, bromida, strontiu, florida dan bikarbonat. Air laut termasuk dalam

larutan elektrolit sebab air laut bersifat garam yang memiliki ion-ion yang dapat menghasilkan listrik, (Oleh and Nim 2023). Kandungan garam pada air laut dan air hujan berbeda, pada air hujan secara umum kandungan garam sangat rendah yaitu 0,002% - 0,01%, kandungan garam ini jauh lebih sedikit dibandingkan dengan kandungan garam di air laut yang memiliki kandungan 3,5%. Polutan yang dapat mempengaruhi tahanan permukaan isolator dibagi menjadi dua jenis, polutan yang bersifat konduktif dan polutan yang bersifat inert.

Polutan yang bersifat konduktif yaitu polutan yang mampu menghantarkan arus listrik. Terdiri dari garam-garam yang mampu terurai menjadi ion-ion misalnya NaCl, MgCl dan lain sebagainya. NaCl dan MgCl adalah garam yang mudah larut dalam air, sehingga dapat dengan mudah terkontaminasi pada permukaan isolator porselen, NaCl adalah garam netral yang mana terbentuk dari asam kuat (HCl) dan basa kuat (NaOH). Oleh karena itu, NaCl tidak mengalami hidrolisis dan menghasilkan larutan netral dengan pH 7, sedangkan MgCl adalah garam asam yang mana terbentuk dari asam kuat (HCl) dan basa lemah (Mg(OH)₂). Oleh karena itu, MgCl₂ mengalami hidrolisis dan menghasilkan larutan asam dengan pH di bawah 7. Dalam larutan, garam-garam tersebut mudah terurai dan membentuk lapisan konduktif pada permukaan isolator, sehingga dapat mempengaruhi ketahanan permukaan isolator. Adanya kontaminasi garam mempengaruhi ketahanan permukaan insulasi.

Polutan yang bersifat inert merupakan bagian dari zat padat yang tidak terurai menjadi ion-ion dalam larutan, namun komponen ini dapat menyebabkan ketahanan permukaan isolator. Zat-zat seperti SiO₂, tanah liat (kaolin) dapat

membentuk suatu ikatan mekanis untuk mengikat komponen-komponen konduktif. Garam yang sedikit larut memiliki pengaruh yang lebih kecil terhadap ketahanan permukaan dibandingkan garam yang mudah larut, (Mawardi 2018).

2.1.5 Klasifikasi Tingkat Polusi

Tingkat polusi menurut SPLN 10-3B dibagi menjadi 4 antara lain: ringan, sedang, berat, dan sangat berat. Penentuan tingkat intensitas polusi berdasarkan ciri-ciri keadaan lingkungan di lapangan ditunjukkan pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Tingkat polusi ditinjau dari aspek lingkungan

Tingkat Polusi	Contoh Lingkungan
Ringan	<ol style="list-style-type: none"> 1) Kawasan tanpa industri dengan kepadatan rumah rendah yang dilengkapi sarana pembakaran. 2) Kawasan dengan kepadatan industri rendah atau kepadatan rumah rendah tetapi sering terkena angin atau hujan. 3) Kawasan pertanian. 4) Kawasan pegunungan Kawasan ini harus terletak paling sedikit 10 km sampai 20 km dari laut dan bukan Kawasan.
Sedang	<ol style="list-style-type: none"> 1) Kawasan dengan industri yang tidak secara khusus menghasilkan asap polusi atau kepadatan rumah sedang yang dilengkapi dengan pembakaran.

	<p>2) Kawasan dengan kepadatan rumah tinggi atau kepadatan industri tinggi tetapi sering terkena angin dan hujan.</p> <p>3) Kawasan terbuka bagi angin dari laut tetapi tidak terlalu dekat dengan pantai (paling sedikit berjarak beberapa kilometer dari pantai).</p>
Berat	1) Kawasan dengan kepadatan industri tinggi dan pinggiran kota besar dengan kepadatan sarana pembakaran tinggi yang menghasilkan polusi tinggi.
Tingkat Polusi	Contoh Lingkungan
	2) kawasan dekat laut atau dalam keadaan terbuka bagi hembusan angin yang relatif kencang dari laut.
Sangat berat	1) Kawasan yang umumnya terkena debu konduktif dan asap industri yang khususnya menghasilkan endapan konduktif yang tebal.

Menurut standar IEC 815 penggolongan tingkat pengotoran isolator pada suatu yang dipengaruhi kondisi geografis, pengujian polusi buatan pada isolator ditetapkan menjadi empat, yaitu ringan, sedang, berat dan sangat berat. Penentuan tingkat pengujian intensitas polusi buatan berdasarkan tingkat polusi ditunjukkan pada Tabel 2.2

Tabel 2. 2 Penggolongan Tingkat Pengotoran Berdasarkan Kondisi Geografis

Tingkatan	ESDD (mg/m ²)
Ringan	0,03 – 0,06
Sedang	0,1 – 0,2
Berat	0,2 – 0,6
Sangat Berat	> 0,6

2.1.6 ESDD dan Konduktivitas

Equivalent Salt Deposit Density (ESDD) merupakan tingkat kepadatan garam equivalent dari larutan pengotor yang menempel pada permukaan isolator, Pengukuran ini dilakukan untuk mengamati besarnya nilai ESDD, hubungannya dengan komposisi zat pencemar tertentu, daya hantar listrik dalam kaitannya dengan tegangan flashover, dan pengaruhnya terhadap ketebalan zat pencemar. Sebelum melakukan pengukuran konduktivitas, seluruh peralatan yang digunakan harus dibersihkan terlebih dahulu untuk menghindari kontaminan lainnya. Pengukuran daya hantar listrik air, baik mengandung kontaminan (σ_2) atau tidak (σ_1), pada suhu tertentu, kemudian dihitung dalam Persamaan.

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - 0,02277(\theta - 20)] \dots \dots \dots (2.1)$$

dimana: σ_{20} = konduktivitas pada suhu 20⁰ (μ S/cm)

σ_{θ} = konduktivitas pada suhu ruangan

θ = suhu ruangan

Sesudah didapat konduktivitas pada suhu 20⁰ C, selanjutnya dihitung konduktivitas garam dalam persen, menggunakan persamaan 2.2?

$$D = \frac{(5,7 \times 10^{-4} \times \sigma_{20})^{1.03}}{10} \dots \dots \dots (2.2)$$

dimana: σ_{20} = konduktifitas pada suhu 20⁰ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

D = konsentrasi garam NaCl (%)

Setelah diperoleh konduktivitas pada suhu 20⁰ C dan konsentrasi garam, kemudian dihitung nilai ESDD nya menggunakan persamaan 2.3

$$ESDD = 10 \times V \frac{(D_2 - D_1)}{s} \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana: ESDD = Equivalent Salt Deposit Density (mg/cm^2)

V = volume air pencuci (ml)

D1 = eqivalen konsentrasi garam dan air sebelum ada polutan (%)

D2 = eqivalen konsentrasi garam dan air sesudah ada polutan (%)

S = luas permukaan isolator (cm^2)

2.1.7 American Standard Test Method (ASTM)

Metode yang sesuai dengan standar *American Standard Test Method*, ASTM-D149. Standar pengujian ASTM-D149 terdiri dari tiga buah metode yaitu metode *Short Time*, *Step by Step Test*, dan *Slow Rate of Rise Test* (Tobing, 2012). Metode *Slow Rate of Rise Test* adalah metode pengujian tegangan isolasi dengan kenaikan tegangan yang lambat dan konstan. Metode ini cocok digunakan untuk menguji pengaruh polutan dan suhu pada isolator porselen karena dapat memberikan gambaran yang lebih realistis tentang kondisi operasi isolator di lapangan. Metode *Short Time Test* dan *Step by Step Test* juga dapat digunakan untuk penelitian ini, tetapi kedua metode tersebut memiliki beberapa keterbatasan. Metode *Short Time Test* menggunakan kenaikan tegangan yang cepat, sehingga kurang realistis untuk menggambarkan kondisi operasi isolator di lapangan. Metode *Step by Step Test* menggunakan kenaikan tegangan yang konstan, tetapi kenaikan

tegangan yang konstan dapat menyebabkan isolator mengalami degradasi lebih cepat.

a. Metode Short Time

Profil tegangan pada pengujian waktu singkat. Pengujian diawali dengan menaikkan tegangan spesimen secara bertahap dengan laju tegangan konstan, misalnya 100 V/detik, sampai spesimen mengalami tembus listrik. Jika tembus listrik terjadi di luar interval waktu 10 - 20 detik, terhitung sejak tegangan pengujian mulai dinaikkan, pengujian harus diulang dengan laju tegangan pengujian ditinggikan hingga tembus listrik terjadi dalam interval waktu 10 - 20 detik. Pengujian untuk menentukan laju tegangan yang cocok disebut uji preliminier (preliminary test).

Setelah didapat laju tegangan yang cocok, laju tegangan inilah yang digunakan untuk pengujian spesimen. Pada umumnya, beberapa bahan isolasi diuji dengan laju tegangan sekitar 500 V/detik. Nilai tegangan pada saat satu spesimen mengalami tembus listrik dicatat. Apabila pada uji preliminier tidak ditemukan laju tegangan yang menimbulkan tembus listrik dalam interval waktu 10 - 20 detik, pada laporan hasil pengujian harus dicantumkan interval waktu terjadinya tembus listrik (tbd) yang diperoleh pada pengujian. Jika pengujian harus dilakukan dengan laju tegangan tertentu, sedang dengan laju tegangan ini tembus listrik terjadi di luar interval 10 - 20 detik, maka pada laporan hasil pengujian harus dicantumkan interval waktu terjadinya tembus listrik (tbd).

Pengujian Pengujian dilakukan terhadap lima spesimen. Tegangan tembus specimen ini sama dengan nilai rata - rata tegangan tembus yang diperoleh dari lima spesimen yang telah diuji. Jika nilai tegangan tembus spesimen ada yang menyimpang hingga 15% daripada nilai rata - rata, pengujian harus diadakan terhadap lima spesimen lagi. Untuk kasus seperti ini hasil pengujian sama dengan nilai rata - rata tegangan tembus yang diperoleh dari sepuluh spesimen yang telah diuji. Kekuatan dielektrik bahan isolasi yang diuji adalah nilai tegangan tembus dibagi dengan tebal spesimen.

b. Metode Step by Step Test

Profil tegangan pengujian dibuat. Mula - mula ditetapkan tegangan tembus spesimen menurut pengujian waktu singkat (V_{bd}) atau menurut pengalaman dalam pengujian - pengujian yang sudah pernah dilakukan. Kemudian dihitung perkiraan tegangan uji awal $V_a = 0.5 V_{bd}$. Pada perkiraan tegangan uji awal yang dipilih, ditentukan tegangan start (V_s) dan pertambahan tegangan. Jika tegangan uji awal ditetapkan menyimpang dari nilai yang dianjurkan, misalnya V_{as} , maka dipilih tegangan uji awal (V_a) yang nilainya persis di bawah V_{as} . Pertambahan tegangan dibuat sama dengan 10% daripada tegangan uji awal yang dipilih ini. Waktu yang dibutuhkan untuk menaikkan tegangan dari suatu tingkat tegangan pengujian ke tingkat tegangan pengujian berikutnya ($t_{n+1} - t_n$) disebut waktu pengujian. Lama pengujian waktu pengujian adalah (60 + 5) detik dan jika dibutuhkan, juga diperbolehkan 20 detik atau 300 detik.

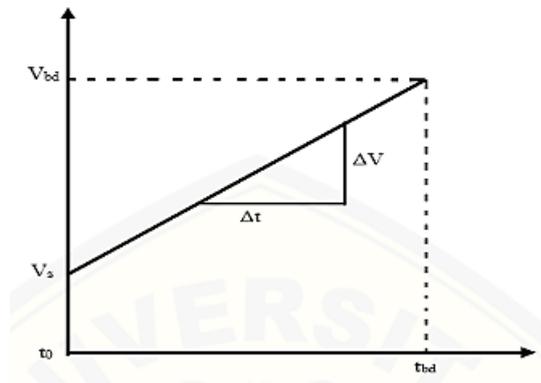
Pengujian dimulai dengan menaikkan tegangan spesimen tanpa menimbulkan tegangan transien, mulai dari nilai nol hingga mencapai tegangan start (V_s). Setelah tegangan start berlangsung 60 detik, dan dalam interval waktu ini tidak terjadi tembus listrik pada spesimen, tegangan pengujian dinaikkan atau tegangan pengujian tingkat kedua. Setelah tegangan pengujian tingkat kedua ini berlangsung 60 detik, dan dalam interval waktu ini juga tidak terjadi tembus listrik pada spesimen, tegangan pengujian dinaikkan lagi. Demikian seterusnya, tegangan, tegangan pengujian dinaikkan bertangga hingga spesimen mengalami tembus listrik. Misalkan tembus listrik terjadi pada saat $t = t_x$.

Pada kondisi pengujian seperti ini, spesimen dinyatakan memiliki ketahanan tegangan $V_{kt} = V_n$ dan tegangan tembus $V_{bd} = V_{n+1}$. Jika tembus listrik terjadi pada saat $t = t_5$, spesimen dinyatakan memiliki $V_{kt} = V_{bd} = V_{n+1}$. Diinginkan bahwa tembus listrik terjadi pada langkah keempat hingga langkah kesepuluh, tetapi waktu terjadinya tembus listrik ini tidak kurang dari 120 detik ($t_{bd} > 120$ detik). Jika ketika pengujian satu kelompok spesimen, lebih dari satu spesimen tembus listrik pada langkah ketiga atau waktu terjadinya tembus listrik kurang dari 120 detik ($t_{bd} < 120$ detik), pengujian diulang kembali dengan tegangan start yang lebih rendah. Sebaliknya, jika spesimen tidak tembus listrik sebelum langkah kedua belas atau $t_{bd} > 720$ detik, maka pengujian diulang dengan tegangan start lebih tinggi.

c. Metode *Slow Rate of Rise Test*

Slow Rate of Rise Test adalah metode pengujian tegangan isolasi dengan kenaikan tegangan yang lambat dan konstan. Profil tegangan pengujian ditunjukkan pada Gambar 2.3. Laju tegangan dipilih salah satu dari yang disarankan pada Gambar ini. Cara menentukan tegangan start V_s sama seperti metode pengujian bertangga yakni dengan menetapkan tegangan tembus specimen, menurut pengujian waktu singkat (V_{bd}) atau menurut penelitian sebelumnya, kemudian dihitung perkiraan tegangan uji awal $V_s = 0,5 V_{bd}$.

Pengujian dilakukan dengan menaikkan tegangan sampel secara bertahap pada laju tegangan konstan, dimulai dari tegangan awal V_s hingga sampel mencapai tegangan *flashover*. Kegagalan listrik ini harus diidentifikasi dalam waktu > 120 detik sejak tegangan uji diterapkan pada sampel. Jika, saat menguji sekelompok sampel, beberapa sampel mengalami kegagalan listrik kurang dari 120 detik, tindakan berikut diperlukan: tegangan uji awal V_s berkurang atau laju tegangan ($\Delta V/\Delta t$) berkurang, atau tegangan dan kecepatan awal dikurangi. Jika lebih dari satu spesimen mengalami tembus listrik pada tegangan yang kurang dari $1,5V_s$ maka nilai tegangan start V_s dikurangi. Jika tembus listrik terjadi pada tegangan $2,5V_s$ dan waktu terjadinya tembus listrik lebih dari 120 detik, nilai V_s dinaikkan, (Mahali 2018).



Gambar 2. 4 Profil Pengujian Kenaikan Tegangan Perlahan

Sumber: (Irfangi 2017)

2.2 Penelitian Terkait

Penelitian-penelitian terdahulu yang membahas mengenai tegangan *flashover* cukup lumayan banyak. Namun penelitian tersebut mempunyai karakteristik dan hasil yang berbeda-beda karena perbedaan tersebut penelitian ini dilakukan untuk mencari hasil yang lain. Adapun penelitian terkait sebagai berikut.

Tabel 2. 3 Penelitian Terkait

No	Judul	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
1.	Pengaruh polutan garam terhadap tegangan <i>flashover</i> pada isolator berbahan keramik dan polimer menggunakan metode <i>slow rate of rise test</i>	(Irfangi 2017)	Penelitian ini membahas mengenai pengaruh polutan garam terhadap tegangan <i>flashover</i> dengan perbandingan bahan keramik dan polimer, hasil dari penelitian ini Tegangan <i>flashover</i> isolator porselen dan polimer menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi garam dan waktu pengujian.
2.	Analisis pengaruh polutan menggunakan <i>slow rate of rise test</i> terhadap <i>flashover</i> isolator keramik jenis tarik dan post-pin di daerah puger	(Mahali 2018)	Penelitian ini membahas pengaruh polutan pada isolator jenis tarik dan post-pin menggunakan metode <i>slow rate of rise</i> di daerah puger, hasil dari penelitian ini adalah besarnya tegangan <i>flashover</i> antara isolator berbahan keramik Jenis Tarik dan post-pin dalam kondisi kering dan basah, serta kondisi tanpa

No	Judul	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
			<p>polutan dan berpolutan, telah memberikan hasil bahwa isolator berbahan Tarik lebih baik daripada isolator berbahan Post-pin dari segi besarnya nilai ketahanan tegangan <i>flashover</i>-nya. Hal ini menyebabkan isolator tarik lebih kuat dengan kondisi polutan yang terdapat di pantai puger daripada isolator post- pin.</p>
3.	<p>Analisis tahanan isolasi pada isolator porselin dan polimer terhadap polutan garam di gistet 500 kv adipala cilacap</p>	<p>(Darmadi, Kholistianingsih, and Yulianto 2023)</p>	<p>Jurnal ini membahas pengujian tahanan isolasi pada isolator porselin dan polimer terhadap polutan garam di GISTET 500 kV Adipala, Cilacap. Hasilnya menunjukkan bahwa isolator polimer lebih efektif dalam menghadapi polusi air garam dibandingkan isolator porselin. Penelitian ini dilakukan karena</p>

No	Judul	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
			tingginya tingkat polusi di lokasi penelitian, yang menyebabkan isolator terpapar polutan. Kesimpulannya, isolator polimer lebih efektif dalam lingkungan dengan tingkat polusi tinggi.
4.	Pengaruh polutan asap kendaraan terhadap Tegangan <i>flashover</i> pada isolator jenis epoksi resin metode slow rate of rise test	(Puguh Kurniawan Arif 2017)	Penelitian ini membahas mengenai pengaruh polutan asap kendaraan terhadap tegangan <i>flashover</i> pada isolator berbahan polimer. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa nilai tegangan <i>flashover</i> akan turun sesuai intensitas waktu penyemprotan asap kendaraan. Semakin lama intensitas waktu penyemprotan maka semakin kecil nilai tegangan <i>flashover</i> .

No	Judul	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
5.	<p>Analisis Karakteristik Flashover Dan Arus Bocor Pada Isolator Porselin Yang Dipengaruhi Polutan Lumut Bryum SP. Managam</p>	(Mawardi 2018)	<p>Penelitian ini membahas mengenai pengaruh bahan polutan yang terkontaminasi lumut pada isolator polimer. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh perbandingan antara bahan polutan lumut bryum sp dan polutan garam terhadap tegangan flashover pada isolator polimer jenis tarik menggunakan metode <i>Slow Rate of Rise Test</i>. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai tegangan flashover akan semakin turun, seiring dengan bertambah besarnya nilai ESDD.</p>
6.	<p>Analisa Pengaruh Endapan Polutan Garam Pada Isolator Terhadap Arus Bocor</p>	(Armansyah 2021)	<p>Jurnal ini membahas pengaruh endapan polutan garam pada isolator terhadap arus bocor dan kinerja isolator. Metode yang digunakan adalah pengujian</p>

No	Judul	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
			<p>terhadap isolator dengan endapan polutan garam untuk mengukur arus bocor yang dihasilkan. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin besar volume polutan garam, semakin besar arus bocornya. Kesimpulannya, isolator yang bersih memiliki tahanan yang besar, namun pengotoran akan mengurangi tahanan isolator. Saran yang diberikan termasuk peningkatan pemeliharaan peralatan laboratorium dan pengawasan selama pelaksanaan pengujian.</p>
7.	<p><i>Influence of Artificial Pollutants on Disc Insulators under Dry and</i></p>	<p>(Hardi et al. 2019)</p>	<p>Penelitian ini membahas mengenai pengaruh polutan buatan (KNO₃, ZnSo₄, Sulfur, CaCO₃, KCl) pada isolator cakram porselen dan gelas dalam kondisi</p>

No	Judul	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
	<p><i>Wet Conditions on Leakage Current and Flashover Voltage</i></p>		<p>kering dan basah dengan hasil pengujian pada tingkat polusi berbeda (ESDD) menunjukkan kinerja isolator bervariasi tergantung jenis polutan. KCl, KNO₃, dan ZnSO₄ menyebabkan arus bocor besar pada permukaan isolator. Polusi ZnSO₄ dan KCl menurunkan tegangan flashover isolator secara signifikan.</p>
8.	<p><i>Influence of pollution chemical components on AC flashover performance of various types of insulators</i></p>	(Yang et al. 2019)	<p>Penelitian ini mempelajari pengaruh pencemaran komponen kimia terhadap kinerja flashover isolator dengan berbagai bahan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kontribusi ESDD berubah seiring dengan perubahan komponen kimia. Karakteristik disolusi mempunyai pengaruh yang</p>

No	Judul	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
			signifikan terhadap pengukuran ESDD; kontaminan yang sedikit larut perlu dipertimbangkan secara terpisah. Gradien flashover isolator yang sesuai untuk ion dapat diringkas sebagai $Cl^- < NO_3^- < SO_4^{2-}$, $K^+ < Na^+$, $NH_4^+ < Ca^{2+}$.

Penelitian terkait berfungsi untuk analisa dan menambah pembahasan penelitian, serta membedakannya dengan penelitian yang sedang dilakukan. Dalam penelitian ini disertakan 2 jurnal internasional dan 5 jurnal nasional Tabel 2.3 yang berhubungan dengan konsep perbaikan isolasi dengan proses *re-purifikasi*, diantaranya sebagai berikut:

1. Penelitian pada Tabel 2.3 nomor 1 menjelaskan mengenai pengaruh polutan NaCl terhadap tegangan *flashover* dengan perbandingan bahan keramik dan polimer. dengan variasi sudut penyemprotan 45° , 90° , dan 135° serta dengan tiga buah sudut tersebut secara langsung. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian tersebut ialah pada jenis polutan bukan hanya NaCl melainkan MgCl, lalu untuk sudut penyemprotan supaya permukaan isolator pada penelitian ini menggunakan sudut penyemprotan 30° , 60° , 90° dan 120° dengan jarak semprot 30 cm.
2. Penelitian pada tabel 2.3 nomor 2 menjelaskan mengenai pengaruh polutan pada isolator jenis tarik dan post-pin menggunakan metode *slow rate of rise* di daerah puger dengan mencari tahu pengaruh polutan garam. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian tersebut ialah polutan yang digunakan NaCl dan MgCl.
3. Penelitian pada tabel 2.3 nomor 3 menjelaskan mengenai pengujian tahanan isolasi pada isolator porselin dan polimer terhadap polutan garam di GISTET 500 kV Adipala, Cilacap. Menggunakan metode analisis regresi, korelasi, kovarian dan PCA untuk mengetahui pengaruh garam terhadap tegangan flashover, baik secara langsung maupun tidak langsung dan yang divariasikan

garam yang terlarut dalam air 50 ml dan 500 ml. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian tersebut ialah metode yang digunakan *slow rate of rise test* yang mana metode ini untuk mengukur tegangan flashover isolator porselen secara langsung, dan yang di variasikan NaCl dan MgCl mulai dari 10 gram, 20 gram, 30 gram, 40 gram.

4. Penelitian pada tabel 2.3 nomor 4 menjelaskan mengenai pengaruh polutan asap kendaraan terhadap tegangan *flashover* pada isolator berbahan polimer. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian tersebut ialah jenis polutan dan jenis isolator yang digunakan, pada penelitian ini menggunakan polutan NaCl dan MgCl dengan jenis isolator porselen.
5. Penelitian pada tabel 2.3 nomor 5 menjelaskan mengenai mengenai pengaruh bahan polutan yang terkontaminasi lumut pada isolator polimer, perbedaan penelitian ini dengan penelitian tersebut ialah polutan yang digunakan dan jenis isolator, penelitian ini menggunakan polutan NaCl dan MgCl serta menggunakan isolator porselen pasak (pin) 20 kV.
6. Penelitian pada tabel 2.3 nomor 6 menjelaskan mengenai pengaruh endapan polutan garam pada isolator terhadap arus bocor dan kinerja isolator dengan variasi garam 1 gram, 2 gram, 3 gram, 4 gram, 5 gram metode perlakuan yang digunakan ialah perendaman selama 10 menit. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian tersebut ialah variasi garam mulai dari 0,5 g/ml, 1 g/ml, 1,5 g/ml, 2 g/ml, 5 g/ml, 10 g/ml, 15 g/ml, 2 g/ml. dan metode perlakuan pada isolator yaitu penyemprotan yang didiamkan selama 24 jam.

7. Penelitian pada tabel 2.3 nomor 7 menjelaskan mengenai pengaruh polutan buatan (KNO_3 , ZnSO_4 , Sulfur, CaCO_3 , KCl) pada isolator cakram porselen dan gelas dalam kondisi kering dan basah, perbedaan penelitian ini dengan penelitian tersebut ialah polutan yang digunakan penelitian ini menggunakan polutan NaCl dan MgCl karena memiliki persentase paling tinggi pada air laut serta jenis isolator yang digunakan ialah isolator porselen jenis pasak (pin).
8. Penelitian pada tabel 2.3 nomor 8 menjelaskan mengenai pengaruh pencemaran komponen kimia terhadap kinerja flashover isolator dengan berbagai bahan diantaranya Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} serta metode perlakuan pada isolator ialah pencelupan. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian tersebut ialah jenis polutan yang digunakan, pada penelitian ini menggunakan NaCl dan MgCl karena memiliki persentase paling tinggi pada air laut serta metode perlakuan pada isolator ialah penyemprotan.