

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Isolator

Salah satu peralatan yang berperan penting dalam penyaluran ketenagalistrikan adalah isolator. Fungsi dasar isolator adalah memisahkan sisi peralatan yang bertegangan dan tidak bertegangan. Isolator terpasang pada sistem transmisi dan distribusi diharapkan mampu bekerja dengan optimal, untuk menjaga keandalan penyaluran ketenagalistrikan. Tidak menutup kemungkinan isolator yang terpasang mengalami gangguan yang disebabkan karena temperatur, kelembaban dan polutan (Alam et al., 2024)

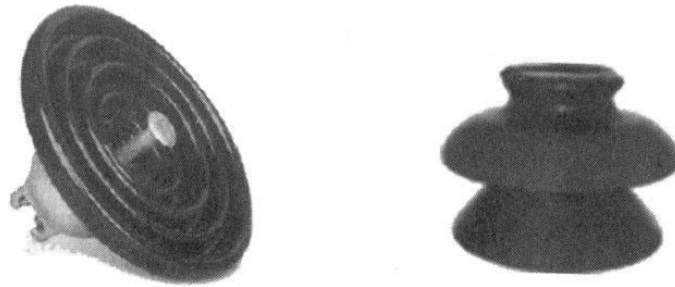
Penggunaan isolator pada saluran udara tegangan tinggi berbeda dengan isolator yang digunakan pada jaringan tegangan menengah. Hal ini disebabkan karena pada saluran tegangan tinggi di samping harus menahan tegangan kerja sistem dan kemungkinan tegangan lebih, juga harus dapat menahan beban mekanis kawat penghantar maupun isolator itu sendiri. Isolator yang biasa digunakan pada saluran listrik udara yang dioperasikan pada tegangan tinggi adalah isolator berbahan porselen (keramik), gelas dan polimer (composite). Gelas dan porselen adalah tergolong bahan mineral, tetapi penggunaannya tidak pada bentuk atau keadaan alaminya melainkan harus diproses terlebih dahulu dengan pemanasan (pembakaran), pengerasan dan pelumeran. Itulah sebabnya maka pembasahannya dipisahkan dengan pembasahan bahan mineral. Karakteristik elektrik dan mekanik dari suatu isolator tergantung pada konstruksi dan bahan yang digunakan (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 Porselen

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 sifat bahan porselen sangat keras dengan konduktivitas listrik dan termal yang rendah, dan patah yang rapuh (Aripin et al., 2019).

Porselen paling umum digunakan pada isolator, karena memiliki sifat tidak menghantar (*nonconducting*) listrik yang tinggi, kekuatan dielektriknya tinggi dan memiliki kekuatan mekanis yang besar serta harga yang ekonomis. Kekuatan mekanik porselen bergantung pada cara pembuatannya. Kemampuan mekanis suatu porselen standar dengan diameter 2-3 cm adalah 45.000 kg/cm² untuk beban tekan, 700kg/cm² untuk beban tekuk dan 300 kg/cm² untuk beban tarik. Sehingga dapat disimpulkan bahwa bahan porselen memiliki kemampuan mekanik yang sangat baik pada beban tekan. Kekuatan mekanik dari porselen akan berkurang jika dilakukan penambahan luas penampang porselen (Lestari, 2017).



Gambar 2.1 Isolator Porselen (Lestari, 2017)

Dibalik kelebihanannya, isolator porselen juga mempunyai beberapa kekurangan, diantaranya berat, mudah pecah, 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*.

a. Jenis Isolator Porselen

Menurut konstruksi dan penggunaannya, isolator yang digunakan pada saluran transmisi dan distribusi terdiri dari:

1. Isolator Pasak/Penopang (*Pin Insulator*)
2. Isolator Gantung (*Suspension Insulator*)
3. Isolator Batang Panjang (*Long Rod Insulator*)
4. Isolator Post Saluran (*Line Post Insulator*)

b. Isolator Pasak/Penopang (*Pin Insulator*)

Isolator pasak/penopang (*pin insulator*) banyak digunakan pada tiang-tiang lurus (*tangent pole*) dan tiang sudut (*angle pole*) dengan sudut 5° sampai 30° . Biasanya terbuat dari bahan porselen atau gelas yang dibentuk kepingan yang bagian bawahnya diberi pasak bahan besi atau baja tempaan. Kekuatan tarik

isolator jenis pasak ini lebih rendah bila dibandingkan dengan isolator jenis gantung, karena kekuatan isolator jenis pasak ini ditentukan oleh kekuatan pasaknya terhadap gaya tarikan kawat penghantar (Mahalli, 2018)



Gambar 2.2 Isolator Porselen Jenis Pasak (Mahalli, 2018)

c. Spesifikasi Isolator

Isolator yang digunakan dalam penelitian ini adalah isolator porselen jenis pasak dengan tegangan operasi 20 kV. Isolator ini umum digunakan pada jaringan distribusi listrik tegangan menengah 20kV untuk menopang dan mengisolasi konduktor listrik dari tiang atau struktur pendukung. Material porselen memiliki sifat dielektrik tinggi, ketahanan mekanik yang baik, serta tahan terhadap perubahan suhu dan lingkungan. Pada kondisi ideal, isolator ini memiliki tegangan flashover kering sebesar 80 kV dan tegangan flashover basah sekitar 60 kV. Namun, keberadaan polutan seperti karbon hitam dapat menurunkan tegangan *flashover* secara signifikan dan meningkatkan risiko terjadinya *flashover*.

2.1.2 Karakteristik Isolator

a. Karakteristik Mekanik

Karakteristik 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 (Armansyah, 2021)

b. Karakteristik Elektrik

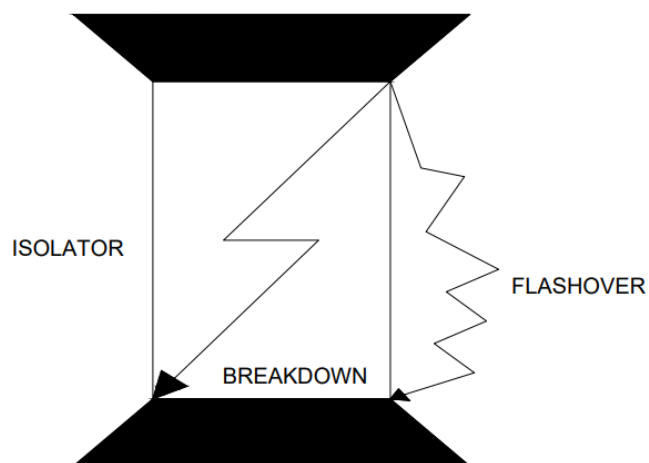
Karakteristik elektrik suatu isolator adalah kemampuannya untuk menahan *flashover* dan arus bocor. Isolator yang dipasang di jaringan udara mudah terpengaruh oleh perubahan kondisi udara sekitar yang dapat memengaruhi kinerja isolator terutama kemampuan menahan tegangan. Terbentuknya lapisan

polutan pada permukaan isolator memengaruhi kinerja isolator. Kinerja isolator berbeda ketika permukaan isolator basah atau kering. Isolator terdiri dari bahan isolasi yang ditempatkan di antara elektroda. Oleh karena itu isolator terdiri dari sejumlah kapasitansi. Karena kapasitansi tersebut maka distribusi tegangan pada sebuah rentengan isolator menjadi tidak sama. 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, 2016).

1. Tegangan *flashover* frekuensi rendah kering (*dry power frequency flashover voltage*), 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*), terjadi bila tegangan diterapkan di antara dua elektroda isolator yang basah karena hujan atau sengaja dibasahi.
3. Tegangan *flashover* impuls (*impuls flashover voltage*), 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), serta polaritas positif, tegangan *flashover* basah dan kering sama.

4. Tegangan tembus (*puncture*), tegangan tembus yang menyebabkan perusakan bahan isolasinya. Sedangkan perusakan bagian isolator yang disebabkan oleh pemanasan lebih tidak dikategorikan sebagai *puncture*.

2.1.3 Kegagalan Isolator



Gambar 2.3 Kegagalan Isolator (Mawardi, 2018)

Secara garis besar isolator tegangan tinggi mempunyai 2 fungsi, yaitu fungsi mekanik dan elektrik. Secara mekanik isolator berfungsi untuk mendukung atau menahan konduktor pada saluran tegangan tinggi, sedangkan secara elektrik isolator berfungsi sebagai pemisah untuk mencegah mengalirnya arus dari konduktor ke tanah atau ke menara penopang saluran udara. Kegagalan isolator dalam melaksanakan fungsinya dapat dibagi menjadi 2 jenis, yaitu:

1. Kegagalan tembus (*breakdown*), terjadi pada material isolator yang disebabkan karena tegangan listrik yang melebihi kekuatan dielektrik material isolator dan menyebabkan arus listrik mengalir melalui isolator bukan konduktor. Kegagalan ini ditandai dengan percikan api, suara

ledakan dan bau terbakar, serta dapat mengakibatkan kerusakan permanen pada isolator sehingga isolator tidak dapat digunakan kembali.

2. Kegagalan *flashover*, terjadi pada permukaan isolator yang disebabkan karena kontaminasi pada permukaan isolator oleh polutan terutama yang bersifat konduktif yang menyebabkan arus listrik mengalir di permukaan isolator. Kegagalan ini ditandai dengan percikan api, cahaya terang dan baru terbalak, serta dapat mengakibatkan pada isolator yang tidak permanen namun dapat mengganggu operasi sistem kelistrikan dan berpotensi menyebabkan kerusakan pada peralatan lainnya.

2.1.4 *Flashover*

Flashover adalah kegagalan isolasi pada isolator yang diakibatkan oleh peningkatan tegangan yang melebihi kekuatan dielektrik isolator sampai terjadinya lompatan api. Hal ini menyebabkan terjadinya aliran arus listrik pada permukaan isolator, bukan melalui konduktor yang seharusnya. *Flashover* terjadi akibat kontaminasi pada permukaan isolator, surja hubung dan surja petir yang dapat menyebabkan kerusakan isolator, peralatan listrik, serta membahayakan keselamatan manusia.

Fenomena tegangan *flashover* yang disebabkan oleh polutan isolator merupakan frekuensi terbesar diantara setiap jenis permasalahan polusi dibidang kelistrikan. Polutan yang menempel pada permukaan isolator dapat bersifat larut dalam air (*soluble contaminant*) yang umumnya merupakan senyawa-senyawa garam alkali dan polutan yang tidak dapat larut (*non-soluble contaminant*)

merupakan senyawa kimia kompleks yang banyak dihasilkan oleh polusi industri, debu gunung berapi, asap kendaraan bermotor, dan lain-lain (Jaya et al., 2019).

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 et al., 2020).

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. Di Indonesia pada musim kemarau 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. Tegangan *flashover* pada permukaan isolator kering lebih tinggi dari pada tegangan *flashover* pada udara lembab, sehingga dalam keadaan basah atau lembab isolator mudah terjadi *flashover* (Darmadi et al., 2022).

2.1.5 Polutan Asap Kendaraan

Gas buang (emisi) atau asap dari kendaraan bermotor merupakan produk sisa dari pembakaran mesin kendaraan yang tidak sempurna. Asap ini mengandung berbagai macam polutan yang dapat berdampak negatif pada kinerja isolator porselen yang digunakan pada jaringan transmisi dan distribusi energi listrik. Asap kendaraan bermotor terdiri dari berbagai macam polutan, seperti gas berbahaya berupa karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO₂), hidrokarbon (HC), dan partikel materi (PM) dengan diameter 2.5 mikrometer atau lebih kecil (PM 2.5) dan 10 mikrometer atau lebih kecil (PM 10). Beberapa polutan ini, terutama PM 2.5 dan PM 10, dapat menempel pada permukaan isolator dan menghantarkan listrik, berpotensi menyebabkan kerusakan pada sistem kelistrikan dan bahaya keselamatan (Al Katsiri, 2019).

Polutan utama yang dapat menghantarkan listrik pada isolator dari asap kendaraan bermotor yang dapat meningkatkan risiko *flashover* antara lain:

- a. Karbon hitam merupakan hasil pembakaran yang kaya akan karbon yang bersifat konduktif dan menempel pada permukaan isolator.
- b. Logam seperti besi, tembaga, dan seng, yang dapat teroksidasi dan membentuk garam konduktif pada permukaan isolator
- c. Partikel organik seperti hidrokarbon dan senyawa organik volatil yang dapat menyerap air dan membentuk lapisan konduktif pada permukaan isolator.

Polutan asap kendaraan termasuk polutan yang tidak dapat larut (*non-soluble contaminant*) yang memiliki dampak yang signifikan terhadap tegangan

flashover isolator. Dalam kondisi basah, kontaminasi permukaan isolator yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan arus bocor yang lebih signifikan, yang berkontribusi pada penurunan tegangan *flashover* (Lan et al., 2019).

2.1.6 Klasifikasi Tingkat Polusi

a. SPLN 10-3B

SPLN 10-3B membahas klasifikasi tingkat intensitas polusi sehubungan dengan pedoman pemilihan isolator pada sistem tenaga listrik. Tingkat polusi 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	1) Kawasan tanpa industri dengan kepadatan rumah rendah yang dilengkapi sarana pembakaran. 2) Kawasan dengan kepadatan industri 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 terbuka bagi hembusan angin langsung dari laut
Sedang	1) Kawasan dengan industri yang tidak secara khusus menghasilkan asap polusi atau kepadatan rumah sedang yang dilengkapi dengan pembakaran. 2) Kawasan dengan kepadatan rumah tinggi atau kepadatan industri tinggi tetapi sering terkena angin dan hujan. 3) Kawasan terbuka bagi angin dari laut tetapi tidak terlalu

Tingkat Polusi	Contoh Lingkungan
	dekat dengan pantai (paling sedikit berjarak beberapa kilometer dari pantai).
Berat	<ol style="list-style-type: none"> 1) Kawasan dengan kepadatan industri tinggi dan pinggiran kota besar dengan kepadatan sarana pembakaran tinggi yang menghasilkan polusi tinggi. 2) Kawasan dekat laut atau dalam keadaan terbuka bagi hembusan angin yang relatif kencang dari laut.
Sangat Berat	<ol style="list-style-type: none"> 1) Kawasan yang umumnya terkena debu konduktif dan asap industri yang khususnya menghasilkan endapan konduktif yang tebal. 2) Kawasan yang umumnya sangat dekat dengan pantai dan terbuka bagi hembusan angin terpolusi sangat kencang dari laut 3) Kawasan padang pasir yang ditandai dengan tidak ada hujan dalam jangka waktu lama, terbuka bagi angin kencang yang membawa pasir dan garam.

Kontaminasi pada isolator akibat polusi udara dapat menyebabkan penurunan kemampuan isolasi dan meningkatkan risiko terjadinya *flashover*, pemilihan isolator untuk kondisi lingkungan tertentu diperlukan untuk menjaga keandalan sistem tenaga listrik. Klasifikasi tingkat polusi udara dan rekomendasi pemilihan isolator ditunjukkan pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Tingkat Polusi dan Pilihan Isolator

Tingkat Polusi	Karakteristik	Risiko <i>Flashover</i>	Jenis Isolator yang Disarankan	Tindakan Pencegahan Tambahan
Ringan	Kontaminasi rendah	Kecil	Standar	-

Tingkat Polusi	Karakteristik	Risiko Flashover	Jenis Isolator yang Disarankan	Tindakan Pencegahan Tambahan
Sedang	Kontaminasi sedang	Meningkat	Hidrofobik, pelindung tambahan	-
Berat	Kontaminasi tinggi	Signifikan	Sangat hidrofobik, desain khusus	-
Sangat Berat	Kontaminasi sangat tinggi	Sangat tinggi	Desain khusus sangat tahan kontaminasi	Pembersihan berkala

b. Standar IEC 60815-1

Standar IEC 60815-1 membahas tingkat polusi pada permukaan isolator dinyatakan dalam dua besaran, yaitu ESDD (*Equivalent Salt Deposit Density*) yang menyatakan tingkat deposit polutan larut per satuan luas pada permukaan isolator, dan NSDD (*Non-Soluble Deposit Density*) yang menyatakan tingkat deposit polutan tak larut per satuan luas pada permukaan isolator (IEC/TS 60815-1, 2008). Klasifikasi tingkat polusi menurut standar IEC 60815-1 pada Tabel 2.3

Tabel 2.3 Klasifikasi Tingkat Polutan pada Isolator

Tingkat Polusi	ESDD ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	NSDD (mg/cm^2)
Sangat Rendah	< 5	< 1
Rendah	5 – 10	1 – 2
Sedang	10 – 20	2 – 5
Tinggi	20 – 40	5 – 10
Sangat Tinggi	> 40	> 10

Perbedaan satuan antara ESDD (*Equivalent Salt Deposit Density*) dan NSDD (*Non-Soluble Deposit Density*) disebabkan oleh sifat dan jenis deposit yang diukur. ESDD diukur dalam mikrogram per sentimeter persegi ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) karena mengacu pada konsentrasi deposit garam dan kontaminan lainnya yang biasanya sangat kecil. Satuan mikrogram memberikan pengukuran yang sensitif terhadap konsentrasi rendah yang dapat memengaruhi kinerja isolator. Sebaliknya, NSDD diukur dalam miligram per sentimeter persegi (mg/cm^2) untuk menggambarkan deposit non-larut seperti kotoran, debu, dan polutan lainnya yang biasanya lebih besar dan lebih berat, sehingga memberikan representasi yang lebih praktis. Dengan demikian, perbedaan unit ini mencerminkan sifat fisik dari deposit yang diukur dan membantu menilai dampak polusi terhadap isolator.

2.1.7 *Non-Soluble Deposit Density* (NSDD)

NSDD (*Non-Soluble Deposit Density*) merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur tingkat keparahan penumpukan polutan partikel padat yang tidak larut dalam air, seperti debu, jelaga, dan lainnya pada permukaan isolator (IEC/TS 60815-1, 2008). Berikut rumus untuk menghitung nilai NSDD:

$$\text{NSDD (mg/cm}^2\text{)} = \frac{m}{A} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

m = Berat polutan yang terdeposit pada permukaan isolator (mg)

A = Luas permukaan isolator (cm^2)

Untuk mengetahui luas permukaan isolator dapat menggunakan rumus:

$$A_{\text{isolator}} = A_{\text{silinder}} + (n_{\text{sirip}} \times A_{\text{sirip}}) \dots\dots\dots (2.2)$$

$$A_{silinder} = 2\pi r h_{silinder} + L_{silinder} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$A_{sirip} = 2\pi r h_{sirip} + (2\pi r^2_{sirip} - 2L_{silinder}) \dots\dots\dots (2.4)$$

$$L_{silinder} = \pi r^2_{silinder} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

$A_{silinder}$ = Luas permukaan tubuh utama silinder isolator (cm²)

A_{sirip} = Luas permukaan sirip isolator (cm²)

n_{sirip} = Jumlah sirip isolator

r_{sirip} = Jari-jari sirip (cm)

h_{sirip} = Tinggi sirip (cm)

$r_{silinder}$ = Jari-jari silinder (cm)

$h_{silinder}$ = Tinggi silinder (cm)

$L_{silinder}$ = Luas silinder (cm²)

Mengukur NSDD penting untuk memahami bagaimana deposit non-larut mempengaruhi performa dielektrik isolator dan mengevaluasi kinerja isolator terhadap pencemaran lingkungan dan risiko gangguan. NSDD mencerminkan lapisan deposit polutan di permukaan isolator, yang dapat menurunkan resistansi isolator, menciptakan jalur konduktif yang mempercepat terbentuknya arus bocor saat tegangan diterapkan. Sebagai hasilnya, isolator menjadi lebih rentan terhadap *flashover* pada tegangan yang lebih rendah. Dengan demikian, terdapat hubungan linier antara peningkatan nilai NSDD dan penurunan tegangan *flashover*, yang menunjukkan bahwa massa polutan yang lebih besar secara signifikan memperburuk kinerja dielektrik isolator.

2.1.8 American Standard Test Method (ASTM)

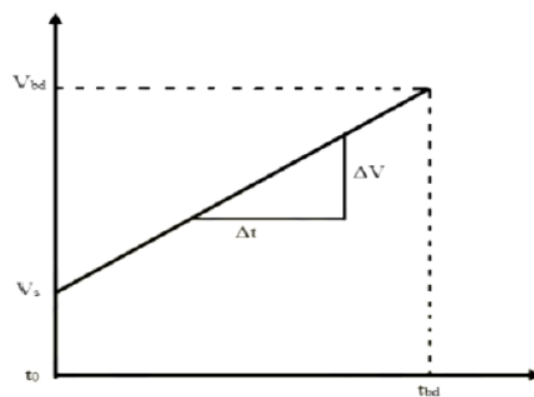
Metode yang sesuai dengan standar American Standard Test Method, ASTM-D149. Standar pengujian ASTM-D149 terdiri dari tiga buah metode yaitu metode *Short Time*, *Step by Step Test*, dan *Slow Rate of Rise Test* (American & Standard, 2013). Metode *Slow Rate of Rise Test* adalah metode pengujian tegangan 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 *Slow Rate of Rise Test*

Profil tegangan pengujian ditunjukkan pada Gambar 2.4 Laju tegangan dipilih salah satu dari yang disarankan pada Gambar 2.4 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 pengalaman dalam pengujian-pengujian yang sudah pernah dilakukan, kemudian dihitung perkiraan tegangan uji awal $V_s = 0,5 V_{bd}$. Pengujian dilakukan dengan menaikkan tegangan spesimen secara bertahap

dengan laju tegangan konstan, mulai dari tegangan start V_s hingga spesimen mengalami tegangan tembus listrik. Terjadinya tembus listrik ini harus pada $t_{bd} > 120$ detik sejak tegangan pengujian dikenakan pada spesimennya.

Apabila dalam pengujian sekelompok spesimen, lebih dari satu specimen yang mengalami tembus listrik pada waktu kurang dari 120 detik, perlu dilakukan tindakan sebagai berikut: tegangan uji start V_s dikurangi, atau laju tegangan ($\Delta V/\Delta t$) diturunkan, atau mengurangi tegangan start dan laju tegangan secara bersamaan. Jika lebih dari satu spesimen mengalami tembus listrik pada tegangan yang kurang dari $1,5 V_s$ maka nilai tegangan start V_s dikurangi. Jika tembus listrik terjadi pada tegangan $2,5 V_s$ dan waktu terjadinya tembus listrik lebih dari 120 detik, nilai V_s dinaikkan.



Laju Tegangan $\Delta V/\Delta t$ (V/s)	Pembatasan
1	$t_{bd} > 120$ detik
2	$V_{bd} \geq 1,5 V_s$
5	
10	
12,5	
20	
25	
50	
100	

Gambar 2.4 Profil Pengujian Kenaikan Tegangan Perlahan (Irfangi, 2016)

2.2. Penelitian Terkait

Penelitian-penelitian yang membahas mengenai tegangan *flashover* cukup 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 2.4 Penelitian Terkait

No	Judul	Penulis, Tahun	Pembahasan
1.	Pengaruh Polutan Asap Kendaraan Terhadap Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Jenis Epoksi Resin Metode <i>Slow Rate of Rise Test</i>	Al Katsiri, 2019	Penelitian ini membahas tentang pengaruh polutan asap kendaraan terhadap tegangan <i>flashover</i> pada isolator jenis epoksi resin dengan metode <i>slow rate of rise test</i> , hasilnya tegangan <i>flashover</i> isolator menurun seiring dengan variasi intensitas waktu penyemprotan polutan yang ditentukan, selain itu isolator tanpa polutan dan berpolutan dalam kondisi kering memiliki tegangan <i>flashover</i> yang lebih tinggi dibanding dengan kondisi basah.
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	Mahalli, 2018	Penelitian ini membahas pengaruh polutan pada isolator jenis tarik dan post-pin menggunakan metode <i>slow rate of rise</i> di daerah Puger, besarnya tegangan <i>flashover</i> antara isolator berbahan keramik jenis tarik dan post-pin dalam kondisi kering dan

No	Judul	Penulis, Tahun	Pembahasan
			basah, serta kondisi tanpa polutan dan berpolutan. Hasilnya isolator jenis tarik lebih baik daripada isolator jenis post-pin dari segi besarnya nilai ketahanan tegangan <i>flashover</i> . Hal ini menyebabkan isolator tarik lebih kuat dengan kondisi polutan di area pantai puger daripada isolator post- pin.
3.	Pengaruh Polutan Lumut <i>Bryum SP</i> Terhadap Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Polimer Jenis Tarik Menggunakan Metode <i>Slow Rate of Rise Test</i> .	Mawardi, 2018	Penelitian ini membahas mengenai pengaruh polutan lumut pada isolator polimer. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perbandingan antara bahan polutan lumut <i>bryum sp.</i> dan polutan garam terhadap tegangan <i>flashover</i> pada isolator polimer jenis tarik menggunakan metode <i>Slow Rate of Rise Test</i> . Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai tegangan <i>flashover</i> akan semakin turun, seiring dengan bertambahnya nilai ESDD.
4.	Pengaruh Polutan Garam Terhadap Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Keramik dan Polimer	Irfangi, 2016	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

No	Judul	Penulis, Tahun	Pembahasan
	Menggunakan Metode <i>Slow Rate of Rise Test</i>		dan polimer menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi garam dan waktu pengujian.
5.	<i>Influence of Pollution Chemical Components on AC Flashover Performance of Various Types of Insulators</i>	Yang et al., 2019	Penelitian ini mempelajari pengaruh pencemaran komponen kimia terhadap kinerja <i>flashover</i> isolator dengan berbagai bahan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kontribusi ESDD berubah seiring dengan perubahan komponen kimia. Karakteristik disolusi mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap pengukuran ESDD; kontaminan yang sedikit larut perlu dipertimbangkan secara terpisah. Gradien <i>flashover</i> isolator yang sesuai untuk ion dapat diringkas sebagai $Cl < NO_3 < SO_4^{2-}$, $K^+ < Na^+$, $NH_4^+ < Ca^{2+}$.
6.	<i>Influence of Artificial Pollutants on Disc Insulators under Dry and Wet Conditions on Leakage Current and Flashover Voltage</i>	Hardi et al., 2019	Penelitian ini membahas mengenai pengaruh polutan buatan (KNO_3 , $ZnSO_4$, Sulfur, $CaCO_3$, KCl) pada isolator cakram porselen dan gelas dalam kondisi kering dan basah dengan hasil pengujian pada tingkat polusi berbeda (ESDD) menunjukkan kinerja isolator bervariasi tergantung jenis polutan.

No	Judul	Penulis, Tahun	Pembahasan
			KCl, KNO ₃ , dan ZnSO ₄ menyebabkan arus bocor besar pada permukaan isolator. Polusi ZnSO ₄ dan KCl menurunkan tegangan <i>flashover</i> isolator secara signifikan.
7.	<i>The Influence of Natural Contamination on Pollution Flashover Voltage Waveform of Porcelain Insulators in Heavily Polluted Area</i>	Lan et al., 2019	Penelitian ini membahas pengaruh kontaminasi dari partikel polusi alami atau buatan terhadap pola gelombang tegangan <i>flashover</i> polusi pada isolator tegangan tinggi. Penelitian ini menganalisis kontaminasi polusi pada isolator dan dampaknya terhadap pola gelombang tegangan <i>flashover</i> . Penelitian ini menunjukkan adanya korelasi positif antara tingkat kontaminasi dan fluktuasi dalam pola gelombang tegangan sebelum terjadinya <i>flashover</i> . Selain itu, penelitian ini juga mengungkapkan bahwa rasio deposit non-larut (NSDD) dan larut (ESDD) pada isolator berpengaruh terhadap akumulasi fluktuasi tegangan sebelum <i>flashover</i> .

Penelitian terkait berfungsi untuk menganalisa dan menambah pembahasan penelitian, serta membedakannya dengan penelitian yang sedang dilakukan. Dalam penelitian ini disertakan 4 jurnal nasional dan 2 jurnal

internasional. Tabel 2.3 merupakan penelitian yang terkait dengan analisa tegangan *flashover* pada isolator saluran listrik dengan berberapa polutan dan kondisi lingkungan yang berbeda, diantaranya sebagai berikut:

1. Penelitian pada Tabel 2.4 nomor 1 menjelaskan pengaruh polutan asap kendaraan terhadap tegangan *flashover* pada isolator jenis epoksi resin dengan metode *slow rate of rise test*. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian tersebut adalah jenis isolator yang digunakan yaitu isolator jenis epoksi resin dengan variasi waktu penyemprotan 2 jam, 4 jam, 5 jam dan 6 jam, serta menggunakan asap kendaraan yang berasal dari motor vespa.
2. Penelitian pada Tabel 2.4 nomor 2 menjelaskan pengaruh polutan garam pada isolator berbahan keramik jenis tarik dan post-pin di daerah Puger menggunakan metode *slow rate of rise* dengan variasi sudut penyemprotan 0° , 30° , 60° , 90° , 120° , 150° dan 180° . Perbedaan penelitian ini lebih ke arah perbandingan antara dua isolator untuk mengetahui isolator mana yang lebih optimal untuk digunakan di daerah Puger.
3. Penelitian pada Tabel 2.4 nomor 3 menjelaskan mengenai pengaruh bahan polutan lumut yang mengontaminasi isolator polimer terhadap tegangan *flashover* menggunakan metode *slow rate of rise test*. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian tersebut adalah jenis isolator dan polutan yang digunakan, penelitian ini menggunakan isolator polimer jenis tarik yang dikontaminasi oleh polutan lumut *bryum sp* dan garam NaCl, dengan variasi sudut penyemprotan 30° , 60° , 90° , dan 120° serta dengan empat buah sudut tersebut secara langsung, serta jarak semprot 30 cm.

4. Penelitian pada Tabel 2.4 nomor 4 menjelaskan mengenai pengaruh bahan polutan garam terhadap tegangan *flashover* isolator jaringan distribusi SUTM 20kV berbahan keramik dan polimer dalam kondisi kering dan basah. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian tersebut ialah pada jenis polutan yang digunakan yaitu NaCl untuk mewakili polutan garam, dengan variasi sudut penyemprotan 45°, 90°, dan 135° serta dengan tiga buah sudut tersebut secara langsung.
5. Penelitian pada Tabel 2.4 nomor 5 menjelaskan mengenai pengaruh pencemaran komponen kimia terhadap kinerja *flashover* isolator dengan berbagai bahan diantaranya Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, K⁺, Na⁺, NH₄⁺, Ca²⁺ 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.
6. Penelitian pada Tabel 2.4 nomor 6 menjelaskan mengenai pengaruh polutan buatan (KNO₃, ZnSo₄, Sulfur, CaCO₃, 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 insulator*).

7. Penelitian pada Table 2.4 nomor 7 menjelaskan pengaruh kontaminasi dari partikel polusi alami atau buatan terhadap pola gelombang tegangan *flashover* polusi pada isolator tegangan tinggi. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian tersebut adalah, penelitian ini menganalisis kontaminasi polusi pada isolator dan dampaknya terhadap pola gelombang tegangan *flashover* serta pengaruh rasio deposit non-larut dan larut terhadap akumulasi fluktuasi tegangan sebelum *flashover*.