

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Dalam memenuhi kebutuhan konsumen akan tenaga listrik secara terus menerus, keandalan penyaluran tenaga listrik merupakan hal yang perlu diperhatikan. Salah satu parameter keandalan adalah kemampuan jaringan dalam penyaluran daya dari pembangkit secara kontinu, dengan kualitas tegangan dan frekuensi yang diizinkan, sehingga keberadaan isolator pada sistem penyaluran tenaga listrik sangat penting, mengingat fungsinya untuk memisahkan konduktor yang bertegangan dengan penyangganya. Apabila sifat isolasi tersebut tidak berfungsi, maka akan terjadi kegagalan tegangan sehingga penyaluran tenaga listrik akan terhenti yang berakibat keandalan sistem menjadi rendah (Ruwahjoto *et al.*, 2023).

2.1.1 Isolator

Isolator merupakan komponen penyaluran listrik yang berhubungan dengan udara luar. Isolator banyak terpasang pada sistem tenaga listrik, baik pada sisi saluran pembangkit, saluran transmisi, maupun pada saluran distribusi tenaga listrik. Secara konstruksi, isolator banyak ditemui pada sisi saluran transmisi udara (*overhead lines*), gardu induk, dan pada panel pembagi daya listrik 3 fasa (Ambabunga and Masiku, 2021). Secara umum, isolator memiliki dua fungsi, yaitu fungsi mekanik sebagai penopang konduktor pada tiang penyangga dan fungsi elektrik sebagai pembatas antara konduktor dan tiang penyangga agar arus tidak mengalir dari konduktor ke tiang penyangga (Irfangi, 2016).

Bahan dielektrik untuk isolator umumnya adalah porselen. Porselen adalah keramik polikristalin yang dibuat dengan menggabungkan dan membakar lempung, mineral feldspatik, dan silika atau alumina yang dapat dicirikan sebagai keramik konvensional yang dibentuk dengan memanaskan bahan mentah berdasarkan lempung (Muangpratoom *et al.*, 2023). Porselen memiliki karakteristik seperti berwarna putih, tembus cahaya, tidak porous, halus bila dibakar pada suhu tinggi, dan bersifat isolator listrik (Doloksaribu and Simatupang, 2016). Isolator porselen memiliki kekuatan dielektrik tinggi dan memiliki kekuatan yang stabil karena ikatan ion antar atomnya yang kuat sehingga tidak mudah rusak oleh pengaruh lingkungan (Darmadi *et al.*, 2022).

Isolator yang digunakan dalam waktu yang cukup lama, akan mengalami penurunan daya isolasi yang dapat disebabkan karena retakan pada material porselen isolator. Proses ini dikenal sebagai pemburukan (*deterioration*) isolator. Penyebab utama pemburukan meliputi pengembangan panas yang berbeda di berbagai isolator, perkembangan panas akibat arus bocor, dan korosi pada bagian logam isolator. Isolator tipe pasak (*pin type*) lebih rentan terhadap proses pemburukan, yang menyebabkan gangguan pada saluran distribusi. Sedangkan, isolator gantung, isolator batang panjang, dan isolator pos saluran, jarang menyebabkan gangguan karena pemburukan (Ruwahjoto *et al.*, 2023).

2.1.2 Bahan Dielektrik Isolator

Bahan isolasi yang biasa digunakan pada isolator saluran udara yang dioperasikan pada tegangan tinggi (di atas 1 kV) adalah bahan porselen, bahan gelas, serta bahan polimer (*composite*) (Subhan., no date).

1. Bahan Porselen

Porselen (Gambar 2. 1) terbuat dari tanah liat china (*china clay*) yang terdapat di alam dalam bentuk aluminium silikat. Bahan tersebut dicampur kaolin, felspar, dan quartz. Kemudian campuran ini dipanaskan dalam tungku yang suhunya dapat diatur. Bahan porselen dibakar sampai keras, halus mengkilat, dan bebas dari lubang-lubang. Untuk mendapatkan sifat listrik dan sifat mekanis yang baik, suhu pemrosesan bahan isolasi harus sesuai, karena jika bahan isolasi diproses pada suhu yang agak rendah, sifat mekanisnya baik, tetapi bahan tetap berlubang-lubang. Sedangkan jika diproses pada suhu yang tinggi, lubang-lubangnya berkurang, tetapi bahan menjadi rapuh. Isolator porselen yang baik secara mekanis mempunyai kuat dielektrik kira-kira 60 kV/cm, kuat tekan 70.000 kg/cm², dan kuat tarik 500 kg/cm². Beberapa kelebihan isolator porselen yaitu stabil, mempunyai kekuatan mekanik yang baik, harganya relatif murah, dan tahan lama. Namun, isolator porselen mempunyai kekurangan yaitu mudah pecah, berat, berlubang akibat pembuatan kurang sempurna, bentuk geometri kompleks, dan mudah terpolusi (Subhan., no date).



Gambar 2. 1 (a) Post, (b) Pin-Post, dan (c) Pin

Tabel 2. 1 Karakteristik Isolator Porselen

No	Karakteristik	Jenis Isolator				
		Isolator Tumpu			Isolator Regang	
		Pin	Post	Pin-Post	Payung	Long Rod
1	Tegangan Kerja Maksimal (kV)	22	24	24	24	24

2	<i>Withstand Voltage</i> (kV)	75	65	65	65	67
3	<i>Impulse Withstand Voltage</i> (kV)	125	125	125	110	170
4	<i>Mechanical Strength</i> (daN)	850	1250	1250	295	546
5	<i>Creepage Distance</i> (mm)	583	559	534	7000	7500
6	Berat (kg)	10	9,2	10	4,7	7

Tabel 2. 1 (Nurjanah and Firdaus, 2016) merupakan data karakteristik isolator porselen.

2. Bahan Gelas

Kaca (Gambar 2. 2) adalah substansi yang dibuat dengan pendingin bahan-bahan yang dilelehkan, tidak berbentuk kristal tetapi tetap pada kondisi berongga. Kaca pada umumnya terdiri dari campuran silikat dan beberapa senyawa seperti borat serta fosfat. Kaca dibuat dengan cara melelehkan beberapa senyawa silikat (pasir), alkali (Na dan K) dengan bahan lain seperti kapur dan oksida timah hitam. Oleh karena itu, sifat dari kaca tergantung dari komposisi bahan-bahan pembentuknya. Massa jenis kaca berkisar antara 2 g/cm^3 hingga $8,1 \text{ g/cm}^3$, kekuatan tekanannya 6000 kg/cm^2 hingga 21000 kg/cm^2 , dan kekuatan tariknya 100 kg/cm^3 hingga 300 kg/cm^3 . Karena kekuatan tariknya relatif kecil, maka kaca adalah bahan yang regas. Oksida logam alkali ditambahkan pada pembuatan kaca sebagai pemurnian bahan-bahan mentah dengan maksud agar sifat kaca menjadi lebih baik (Istiqobudi and Dr. Abdul Syakur, S.T., 2021). Bahan gelas banyak digunakan sebagai isolator pasangan luar (*outdoor insulator*) atau isolator saluran udara karena sifatnya yang tembus pandang, jika ada keretakan, ketidakmurnian bahan, adanya gelembung udara, dan pecahnya isolator, maka dapat dengan mudah diketahui (Subhan., no date). Beberapa kelebihan isolator bahan gelas yaitu isolator

glas lebih murah daripada porselen, sedangkan karakteristik elektrik dan mekaniknya tidak jauh berbeda dari isolator porselen. Karakteristik elektrik dan mekanik dari isolator gelas bergantung pada kandungan alkali pada isolator gelas tersebut. Adanya larutan alkali dalam komposisi gelas akan menambah sifat higroskopis permukaan isolator sehingga konduktivitas permukaan isolator semakin besar. Semakin tinggi kandungan alkali, maka kemampuan dielektrik isolator akan semakin menurun, hal ini dikarenakan isolator memiliki konduktivitas lebih tinggi. Kekuatan dielektrik gelas alkali tinggi adalah $17,9 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$, sedangkan kemampuan dielektrik gelas alkali rendah adalah $48 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ (Tobing, 2012). Namun, isolator gelas mempunyai kekurangan yaitu memiliki tegangan tembus yang rendah dan kekuatan dielektriknya berubah dengan cepat sesuai dengan perubahan temperatur. Isolator gelas mudah dipengaruhi oleh perubahan temperatur disekelilingnya sehingga dapat menyebabkan pemuaian pada gelas. Pemuaian ini dapat menyebabkan isolator gelas rentan pecah. Isolator gelas memiliki sifat kondensasi (mengembun) sehingga debu dan kotoran mudah melekat di permukaan isolator. Kotoran basah ini dapat membuat permukaan isolator menjadi semakin konduktif sehingga arus bocor yang mengalir melalui permukaan isolator semakin besar. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya lewat denyar pada isolator (Santosa, 2017).



Gambar 2. 2 Isolator Gelas

Tabel 2. 2 Standar IEC 60383 dan IEC 60305 Isolator Kaca Tipe Piring

Type IEC 60305	Dimensions			Creepage Distance	Mechanical Failing Load	Puncture Voltage	Withstand Voltage			Mass
	Diameter	Spacing	Standard Coupling According to IEC 60120				Dry	Wet	Impulse	
	mm	mm	mm				kV	kV	kV	
U 40B	175	110	11	185	40	90	55	30	70	1,7
U70BS/BL	255	127/146	16	320	70	130	70	40	100	3,7
U 100BL	255	146	16	320	100	130	70	40	100	4,1
U 120B/BL	255	146/170	16	320	120	130	70	40	100	4,2
U 125B/BL	255	146/170	20	320	125	130	70	40	100	4,5
U 160BS/BL	280	146/170	20	380	160	130	75	45	110	6,2
U 210BS/BL	280	155/170	20	380	210	130	75	45	110	6,7
U 300B	320	195	24	485	300	130	75	45	110	10
U 70BP	255	146	16	400	70	130	80	43	120	4,8
U 70BLP	280	146	16	450	70	130	80	43	120	5,3
U100BLP	280	146	16	450	100	130	80	45	120	5,4
U 120BP	280	146/170	16	450	120	130	80	45	120	6,2
U 160BP	280	146/155/170	20	450	160	130	80	45	120	7
U160BLP	320	170/195	20/24	540	160	130	90	55	135	8,8
U210BLP	320	170/195	20/24	550	210	130	90	55	135	9,2
U240BLP	320	170/195	20/24	550	240	130	90	55	135	9,4
U 300B	340	170/195	24	550	300	130	90	55	135	12,2
U300BLP	380	170/195	24	635	300	130	90	55	135	14,3

Tabel 2. 2 (AIZ, no date) merupakan data karakteristik isolator kaca tipe piring sesuai standar IEC 60383 dan IEC 60305.

3. Bahan Polimer

Isolator komposit (Gambar 2. 3) adalah isolator yang dikembangkan untuk mengatasi kekurangan-kekurangan dari isolator porselen dan gelas. Bahan komposit tertua yang dikembangkan adalah isolator kertas. Namun, akhir-akhir ini bahan isolator yang paling banyak diminati adalah karet silikon (*silicone rubber*). Isolator komposit memiliki beberapa bagian utama yaitu inti berbentuk batang (*rod*) yang terbuat dari bahan komposit, sarung yang terbuat dari bahan komposit, serta fitting yang terbuat dari bahan logam dan bahan antar muka (*interface*) (Tobing, 2012). Kelebihan isolator polimer dibandingkan dengan bahan porselen dan gelas yaitu memiliki sifat dielektrik dan termal yang lebih tinggi, ringan, memiliki sifat hidrofobik (menolak air) yang sangat tinggi, sehingga mempunyai kemampuan isolasi lebih baik dalam kondisi terpolusi dan basah, serta proses pembuatannya lebih singkat. Namun, isolator polimer mempunyai kekurangan yaitu kekuatan

mekanismenya kecil, degradasi pada permukaan lebih cepat akibat sinar UV matahari maupun zat kimia yang membentuk reaksi pada permukaan isolator, sehingga rentan terhadap perubahan cuaca, kegagalan isolator sulit terdeteksi, serta harganya jauh lebih mahal dibandingkan dengan isolator keramik atau gelas (Santosa, 2017).



Gambar 2. 3 Isolator Polimer

Tabel 2. 3 Spesifikasi Isolator Komposit

No	Parameter	Satuan	Besaran
1	Tegangan Nominal	kV_{rms}	126
2	Panjang Keseluruhan	mm	1300
3	Panjang Efektif (Jarak Busur)	mm	1100
4	Jumlah Sirip	-	23
5	Diameter Sirip Besar	mm	192
6	Diameter Sirip Kecil	mm	140
7	Jarak Antar Sirip Berdiameter Sama	mm	51
8	Jarak Rambut Permukaan	mm	3100
9	Bobot	Kg	16
10	Tegangan Lewat Denyar Frekuensi Daya (Kondisi Basah)	kV_{rms}	185
11	Tegangan Lewat Denyar Impuls Petir	kV_{Puncak}	550
12	Kekuatan Lentur Beban Mekanis	kN	10

Tabel 2. 3 (Tobing, 2012) merupakan spesifikasi isolator komposit.

2.1.3 Jenis Isolator Jaringan

Isolator yang digunakan untuk saluran distribusi tenaga listrik berdasarkan fungsi dan konstruksinya, terdiri dari empat jenis isolator. Beberapa jenis isolator

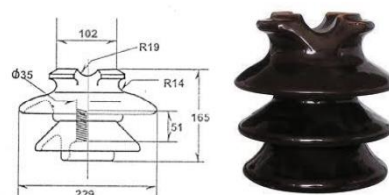
yang digunakan untuk jaringan distribusi primer maupun sekunder, diantaranya sebagai berikut:

1. Isolator Jenis Pasak (*Pin Type Insulator*)

Isolator jenis pasak (Gambar 2. 4) digunakan pada tiang-tiang lurus (*tangent pole*) dan tiang sudut (*angle pole*) untuk sudut 5° sampai 30° . Isolator jenis pasak banyak terbuat dari bahan porselen maupun bahan gelas yang dibentuk dalam bentuk kepingan dan bagian bawahnya diberi suatu pasak (*pin*) yang terbuat dari bahan besi atau baja tempaan. Tiap kepingan diikatkan oleh suatu bahan semen. Bentuk kepingan dibuat mengembang ke bawah seperti payung, untuk menghindari air hujan yang menimpa permukaan kepingan. Banyaknya kepingan tergantung pada kekuatan elektrik bahan kepingan. Biasanya jumlah maksimum kepingan yaitu lima buah. Isolator pasak yang mempunyai satu keping, biasanya digunakan untuk jaringan distribusi sekunder pada tegangan 6 kV ke bawah yang terbuat dari bahan gelas atau porselen. Sedangkan untuk jaringan distribusi primer, biasanya terdiri dari dua keping yang terbuat dari bahan porselen (Istiqobudi and Dr. Abdul Syakur, S.T., 2021).

Isolator jenis pasak yang digunakan pada tiang-tiang lurus (*tangent pole*) memiliki kekuatan tarikan sudut (*angle tensile strenght*) hingga 10° . Kawat penghantar jaringan diletakkan di bagian atas untuk posisi jaringan lurus, sedangkan untuk jaringan dengan sudut di bawah 10° , kawat penghantar diikatkan pada bagian samping agar dapat memikul tarikan kawat. Kekuatan tarik isolator jenis pasak lebih rendah bila dibandingkan dengan isolator jenis gantung, karena kekuatan isolator jenis pasak ini ditentukan oleh kekuatan pasaknya terhadap gaya tarikan kawat penghantar. Pemasangan isolator jenis pasak direncanakan pada

puncak tiang maupun pada palang kayu (*cross-arm*) yang disekrupkan pada isolator tersebut. Pemasangan isolator jenis pasak pada tiang kayu saluran satu fasa yang memiliki sudut 0° sampai 5° dan sudut 5° sampai 30° , serta untuk saluran tiga fasa dengan sudut 0° sampai 5° dan untuk sudut 5° sampai 30° . Isolator jenis pasak banyak digunakan karena sudut saluran dibuat kurang dari 15° , digunakan pada saluran yang lurus, isolator jenis pasak lebih murah dari isolator jenis gantung, dan konstruksi tiang dibuat dengan *cross-arm* (*travers*) yang lebih menonjolkan ke luar sudut (Istiqobudi and Dr. Abdul Syakur, S.T., 2021).

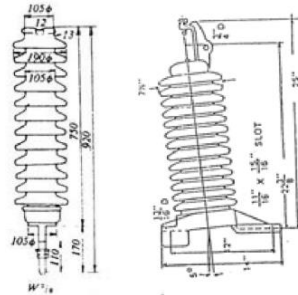


Gambar 2. 4 Isolator Jenis Pasak

2. Isolator Jenis Pos Saluran (*Line Post Type Insulator*)

Isolator jenis pos saluran (Gambar 2. 5) digunakan pada tiang-tiang lurus (*tangent pole*) dan tiang sudut (*angle pole*) untuk sudut 5° sampai 15° . Isolator jenis pos lebih sederhana perencanaannya, dibandingkan dengan isolator jenis pasak. Diameternya lebih kecil dan tidak menggunakan kepingan-kepingan seperti isolator jenis pasak. Isolator jenis pos, terdapat lekukan-lekukan pada permukaan untuk mengurangi hantaran yang terjadi pada isolator, semakin tinggi tegangan isolasi, maka semakin banyak lekukan-lekukan tersebut. Isolator jenis pos, pada bagian atasnya diberi tutup (*cap*) dan bagian bawah diberi pasak yang terbuat dari bahan besi atau baja tempaan. Bahan yang digunakan untuk isolator jenis pos terbuat dari bahan porselen basah yang harganya murah. Kekuatan mekanis isolator jenis pos saluran lebih tinggi dibandingkan isolator jenis pasak dan penggunaannya hanya

pada jaringan distribusi primer untuk tiang lurus (*tangent pole*) pada sudut 5° sampai 15°. Isolator jenis pos yang digunakan untuk jaringan distribusi 20 kV, memiliki tegangan tembus sebesar 35 kV dengan kekuatan tarik (*tensile strenght*) sebesar 5000 pon (Istiqobudi and Dr. Abdul Syakur, S.T., 2021).



Gambar 2. 5 Isolator Jenis Pos Saluran

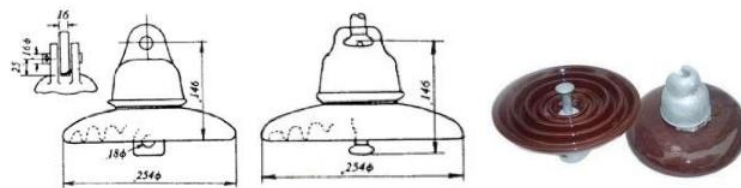
3. Isolator Jenis Gantung (*Suspension Type Insulator*)

Isolator jenis gantung (Gambar 2. 6) digunakan pada tiang-tiang sudut (*angle pole*) untuk sudut 30° sampai 90°, tiang belokan tajam, dan tiang ujung (*deadend pole*). Isolator gantung terdiri dari sebuah piringan yang terbuat dari bahan porselen dengan tutup (*cap*) dari bahan besi tempaan (*melleable iron*) dan pasaknya terbuat dari bahan baja yang diikatkan dengan semen, sehingga membentuk satu unit isolator yang berkualitas tinggi. Isolator gantung hanya mempunyai satu piringan yang terbuat dari bahan porselen atau bahan gelas biru kelabu (*blue gray glaze*). Umumnya isolator gantung dengan bahan gelas digunakan untuk jaringan distribusi primer, dengan menggunakan bahan gelas biru kelabu, harga isolator dapat ditekan lebih murah dan dapat digunakan untuk beberapa gandengan, sedangkan isolator gantung dari bahan porselen banyak digunakan untuk gandengan-gandengan pada jaringan transmisi tegangan tinggi (Istiqobudi and Dr. Abdul Syakur, S.T., 2021).

Dilihat dari konstruksinya, isolator gantung terdiri dua jenis, yaitu jenis *clevis* dan jenis *ball and socket*. Isolator jenis *clevis* memiliki bentuk tutup (*cap*) dan pasak

(*pin*) berbentuk pipih dengan lubang ditengahnya, yang digunakan untuk keperluan penggandengan dari beberapa isolator gantung dengan mengikatnya dengan mur baut sehingga bisa lebih kuat penggandengannya sehingga isolator jenis *clevis* lebih banyak digunakan karena lebih kokoh dan kuat dalam penggandengannya, serta tidak ada kemungkinan lepas dari gandengannya, karena pada ujungnya digunakan mur baut untuk mengikatnya. Sedangkan isolator jenis *ball and socket* memiliki bentuk tutup (*cap*) berlubang (*socket*) untuk menyangkutkan pasak (*pin*) yang berbentuk bulat (*ball*), sehingga penggandengan dari beberapa isolator gantung tidak menggunakan baut (*bolt*) (Istiqobudi and Dr. Abdul Syakur, S.T., 2021).

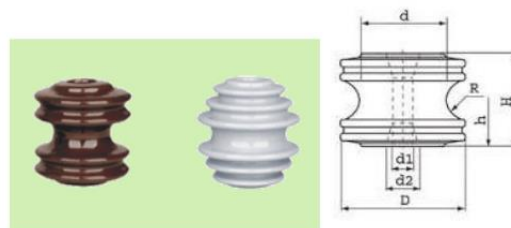
Isolator gantung mempunyai kualitas tegangan isolasi tidak begitu tinggi dibandingkan isolator jenis pasak, karena isolator gantung hanya memiliki satu piringan untuk setiap unit isolator. Oleh sebab itu, agar memenuhi kebutuhannya, maka isolator gantung ini digandeng-gandengkan satu unit dengan unit yang lain agar mendapatkan kualitas tegangan isolasi yang tinggi. Semakin banyak gandengan, maka semakin tinggi kualitas tegangan isolasi. Saluran transmisi banyak menggunakan isolator gantung karena kekuatan mekanis isolator gantung ini lebih tinggi apabila digandengkan, sehingga banyak digunakan untuk menahan besarnya tarikan atau ketegangan kawat pada tiang-tiang sudut (*angle pole*), tiang belokan tajam, dan tiang ujung (*deadend pole*) (Istiqobudi and Dr. Abdul Syakur, S.T., 2021).



Gambar 2. 6 Isolator Jenis Gantung

4. Isolator Jenis Cincin (*Spool Type Insulator*)

Isolator jenis cincin (Gambar 2. 7) digunakan pada tiang-tiang lurus (*tangent pole*) dengan sudut 0° sampai 10° yang dipasang secara horizontal maupun vertikal. Isolator cincin terbuat dari bahan porselen dengan bentuk bulat berlubang ditengahnya seperti cincin dan hanya terdapat satu atau dua lekukan. Isolator cincin ini tidak menggunakan pasak (*pin*) sehingga isolator cincin memiliki kualitas tegangan lebih rendah yaitu tidak lebih dari 3 kV. Tinggi maupun diameter isolator cincin ini, besarnya tidak lebih dari 7,5 cm, yang dipasangkan pada jaringan distribusi sekunder serta saluran pelayanan ke rumah-rumah. Isolator cincin dipasang pada sebuah *clamp* (pengapit) dengan sebuah pasak yang dimasukkan ke dalam lubang ditengahnya. Pemasangan secara horizontal digunakan untuk jaringan lurus (*tangent line*) dengan sudut antara 0° sampai 10° . Pada jaringan lurus (*angle line*) untuk sudut lebih dari 10° dipasang pada kedudukan vertikal, dimana semuanya dipasang pada tiang penyangga dengan jarak satu meter dari tiang atau 60 cm dari palang kayu (*cross arm*) (Istiqobudi and Dr. Abdul Syakur, S.T., 2021).



Gambar 2. 7 Isolator Jenis Cincin

2.1.4 Karakteristik Isolator

1. Karakteristik Mekanik

Karakteristik mekanik merupakan kemampuan untuk menahan beban mekanis penghantar yang diisolasikan. Bahan porselen merupakan bagian utama isolator

yang memiliki karakteristik besi cor dengan kuat tarik antara $400 \text{ kg/cm}^2 - 900 \text{ kg/cm}^2$ dan kuat tekanan 10 kali lebih besar (Irfangi, 2016).

2. Karakteristik Elektrik

Karakteristik elektrik isolator adalah kemampuan menahan *flashover* dan arus bocor. Isolator terdiri dari bahan isolasi yang diapit oleh elektroda-elektroda. Dengan demikian, isolator terdiri dari sejumlah kapasitansi, sehingga distribusi tegangan pada sebuah rentengan isolator menjadi tidak seragam. Potensial pada ujung yang terkena tegangan (ujung yang memegang kawat penghantar) adalah yang paling besar (Irfangi, 2016). Karakteristik elektrik suatu material dapat ditentukan dengan memperhatikan besaran listrik seperti kekuatan hancur dielektrik atau bahan isolasi (ketahanan terhadap medan listrik), tahanan isolasi, serta konstanta dielektrik dan faktor kerugian dielektrik (Amiruddin *et al.*, 2022).

a. Kekuatan Bahan Isolasi

Tegangan listrik maksimum yang dapat ditahan suatu isolator tanpa merusak sifat isolasinya dapat dinyatakan dengan persamaan:

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

Dimana, E = kekuatan hancur dielektrik; V = tegangan tembus dielektrik atau material isolasi; dan h = ketebalan dielektrik.

b. Tahanan Isolasi

Tahanan isolasi terdiri dari tahanan jenis dan tahanan volume, baik untuk saluran panjang maupun untuk permukaan. Tahanan jenis dan tahanan volume dapat diperoleh melalui persamaan:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{h} \quad (2.2)$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (2.3)$$

Dimana, ρ = tahanan jenis; γ = tahanan volume; R = tahanan; A = luas permukaan; dan h adalah panjang.

c. Konstanta Dielektrik dan Faktor Kerugian Dielektrik

Konstanta dielektrik menyatakan besarnya polarisasi yang terjadi pada dielektrik, sedangkan rugi dielektrik adalah energi yang diserap oleh bahan dielektrik dalam satu satuan waktu jika bahan tersebut dalam medan listrik, sehingga bahan dielektrik tersebut menjadi panas. Hal ini terjadi pada tegangan DC maupun tegangan AC.

2.1.5 Isolator Berpolutan

Polusi merupakan masalah umum terutama untuk isolator tegangan tinggi *outdoor* yang dioperasikan di dekat kawasan industri serta kawasan pesisir, dimana kekuatan isolator menjadi menurun dan dapat menyebabkan *flashover* di bawah tegangan yang sedang beroperasi (Warmi and Febrian, 2021). Polutan yang dapat mempengaruhi tahanan permukaan isolator dibagi menjadi dua jenis, yaitu polutan yang bersifat konduktif dan polutan yang bersifat *inert* (Irfangi, 2016).

1. Polutan Bersifat Konduktif

Polutan yang bersifat konduktif yaitu polutan yang dapat menghantarkan arus listrik. Terdiri dari garam-garam yang dapat terurai menjadi ion-ion, seperti NaCl, MgCl₂, dan Na₂SO₄ yang dapat mempengaruhi tahanan permukaan pada isolator dikarenakan garam tersebut akan membentuk suatu lapisan konduktif pada permukaan isolator. Sedangkan komponen konduktif pada daerah industri yang

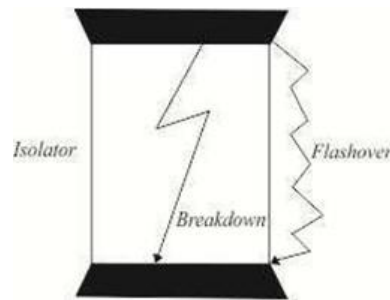
dapat larut membentuk larutan asam yaitu gas SO_2 yang membentuk H_2SO_4 (Irfangi, 2016).

2. Polutan Bersifat *Inert*

Polutan bersifat lembap merupakan bagian dari zat padat yang tidak terurai menjadi ion-ion dalam larutan, seperti SiO_2 dan tanah liat (kaolin) dapat membentuk suatu ikatan mekanis untuk mengikat komponen-komponen konduktif yang akan mempersulit proses pencucian isolator. Polutan lembap terbagi menjadi dua sifat yaitu *hydrophilic* dan *hydrophobic*. Komponen *hydrophilic* dapat meningkatkan tingkat kebasahan permukaan isolator karena kemampuannya menyerap air, contohnya tanah liat dan semen. Sedangkan komponen *hydrophobic*, dapat menurunkan tingkat kebasahan isolator karena sifat kedap air, contohnya lemak dan oli (minyak) yang menyebabkan air tidak dapat menempel pada permukaan isolator sehingga lapisan konduktif yang terbentuk tidak kontinu (Irfangi, 2016).

2.1.6 *Flashover*

Kegagalan suatu isolator (Gambar 2. 8) dapat terjadi karena bahan dielektrik isolator tembus listrik (*breakdown*) karena terjadinya lewat denyar udara pada permukaan isolator. Ada dua hal yang dapat menyebabkan sistem isolasi gagal melaksanakan fungsinya yaitu terjadinya tembus listrik pada udara di sekitar permukaan isolator yang disebut peristiwa lewat denyar (*flashover*) dan tembus listrik pada isolator yang menyebabkan isolator pecah (Taryo *et al.*, 2023).



Gambar 2. 8 Kegagalan Isolator

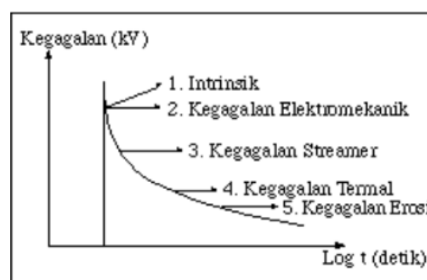
Flashover adalah gangguan eksternal yang terjadi pada permukaan isolator yang disebabkan oleh berbagai faktor, seperti suhu, kelembapan, dan lingkungan sekitar (debu, asap pabrik, dan polutan garam). *Flashover* yang terjadi pada permukaan isolator padat disebabkan oleh tegangan yang harus ditahan oleh permukaan isolator melebihi kemampuannya (Amiruddin *et al.*, 2022). Kemampuan permukaan isolator menahan tegangan ditentukan oleh besarnya resistansi permukaan bahan, jenis bahan, dan dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti adanya kontaminasi pada permukaan isolator, kelembapan udara, suhu udara, serta tekanan udara.

Setiap daerah di Indonesia memiliki dua musim yaitu musim hujan dan musim panas. Letak isolator luar ruangan memungkinkan isolator mengalami penurunan daya hantar listrik karena pengaruh polutan udara, seperti debu, asap, garam laut, serta polusi yang dapat terjadi pada saat cuaca berubah dari basah ke kering (Pratiwi *et al.*, 2015). Penumpukan kontaminasi pada mulanya terjadi pada musim panas, kemudian pada saat terjadinya hujan, polutan yang menempel pada permukaan isolator akan larut sehingga membentuk jalur konduktif yang akan menyebabkan arus bocor yang mengakibatkan permukaan isolator menjadi panas dan polutan yang terdapat pada permukaan isolator menjadi kering (Ruwahjoto *et al.*, 2023). Jika berlangsung dalam jangka panjang, jalur yang terbentuk akan

semakin bersifat konduktif sehingga pada kondisi basah, bahan kimia atau partikel-partikel kontaminan pada permukaan isolator akan larut dalam air yang akan membentuk jalur konduktif kontinu baru antara elektroda dan tanah yang mengakibatkan terjadinya tembus permukaan, yaitu kegagalan isolator yang tidak dapat dibendung (Aulia *et al.*, 2020).

2.1.7 Mekanisme Kegagalan Bahan Isolator Padat

Mekanisme kegagalan bahan isolasi padat terdiri dari beberapa jenis sesuai fungsi waktu penerapan tegangannya (Pebakirang, 2021).



Gambar 2. 9 Grafik Penyebab Tegangan Tembus

Dari Gambar 2. 9 dapat dilihat bahwa semakin tinggi tegangan kegagalannya, maka semakin singkat waktu terjadinya kegagalan tersebut. Hal ini sesuai dengan asas pokok yang berlaku dalam bidang tegangan tinggi. Seperti diketahui setiap zat padat terdiri dari molekul-molekul. Setiap molekul terdiri dari atom-atom, yang juga terdiri dari elektron-elektron. Jika pada zat padat tersebut diterapkan suatu medan listrik E , maka zat padat tersebut akan mengalami tekanan listrik (*electric stress*). Adapun faktor-faktor penyebab tegangan tembus, diantaranya sebagai berikut:

1. Kegagalan Intrinsik (Asasi)

Kegagalan intrinsik adalah kegagalan yang disebabkan oleh jenis dan suhu bahan dengan menghilangkan pengaruh luar seperti tekanan, bahan elektroda,

ketidakmurnian, dan kantong-kantong udara. Kegagalan ini terjadi jika tegangan yang dikenakan pada bahan dinaikkan sehingga tekanan listriknya mencapai nilai tertentu yaitu 106 V/cm dalam waktu yang sangat singkat yaitu 8 detik – 10 detik (Pebakirang, 2021).

2. Kegagalan Elektromekanik

Kegagalan elektromekanik adalah kegagalan yang disebabkan oleh adanya perbedaan polaritas antara elektroda yang mengapit zat isolasi padat sehingga timbul tekanan listrik pada bahan tersebut. Tekanan listrik yang terjadi menimbulkan tekanan mekanik yang menyebabkan timbulnya tarik menarik antara kedua elektroda tersebut. Pada tegangan 106 V/cm akan menimbulkan tekanan mekanik $2 \text{ kg/cm}^2 - 6 \text{ kg/cm}^2$ (Pebakirang, 2021).

3. Kegagalan *Streamer*

Kegagalan *streamer* adalah kegagalan yang terjadi sesudah banjir (avalanche). Sebuah elektron yang memasuki ban hantaran (*band conduction*) di katoda akan bergerak menuju anoda dibawah pengaruh medan listrik memperoleh energi antara benturan dan kehilangan energi pada waktu membentur. Jika lintasan bebas cukup panjang, maka tambahan energi yang diperoleh melebihi pengionisasi latis (*latice*). Akibatnya dihasilkan tambahan elektron pada saat terjadi benturan. Jika suatu tegangan V dikenakan terhadap elektroda bola, maka pada media yang berdekatan (gas atau udara) timbul tegangan. Karena gas mempunyai permitivitas lebih rendah dari zat padat, maka gas akan mengalami tekanan listrik yang besar. Akibatnya gas tersebut akan mengalami kegagalan sebelum zat padat mencapai kekuatan asasinya. Karena kegagalan tersebut, maka akan jatuh sebuah muatan pada permukaan zat padat sehingga medan yang tadinya seragam akan terganggu.

Bentuk muatan pada ujung pelepasan ini dalam keadaan tertentu dapat menimbulkan medan lokal yang cukup tinggi (sekitar 10 MV/cm). Karena medan ini melebihi kekuatan intrinsik, maka akan terjadi kegagalan pada zat padat. Proses kegagalan ini terjadi sedikit demi sedikit yang dapat menyebabkan kegagalan total (Pebakirang, 2021).

4. Kegagalan Termal

Kegagalan termal adalah kegagalan yang terjadi jika kecepatan pembangkitan panas di suatu titik dalam bahan melebihi laju kecepatan pembuangan panas keluar. Akibatnya terjadi keadaan tidak stabil sehingga pada suatu saat bahan mengalami kegagalan termal (Pebakirang, 2021).

5. Kegagalan Erosi

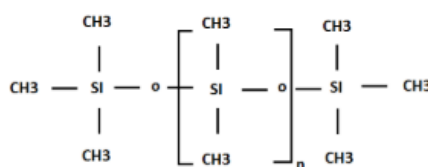
Kegagalan erosi adalah kegagalan yang disebabkan oleh zat isolasi padat yang tidak sempurna, karena adanya lubang-lubang atau rongga-rongga dalam bahan isolasi tersebut, sehingga akan terisi oleh gas atau cairan yang kekuatan galangnya lebih rendah daripada di dalam zat padat. Di samping itu, konstanta dielektrik di dalam rongga sering lebih rendah daripada dalam zat padat, sehingga intensitas medan dalam rongga lebih besar daripada intensitas dalam zat padat. Oleh karena itu, akan terjadi tegangan kegagalan di dalam rongga tersebut, meskipun pada waktu itu diterapkan tegangan kerja normal pada zat padat (Pebakirang, 2021).

2.1.8 RTV *Silicone Rubber*

Pada umumnya, jaringan distribusi udara 20 kV menggunakan isolator porselen yang memiliki struktur atom penyusun yang stabil sehingga memiliki kekuatan mekanis yang baik. Namun, permukaan isolator porselen memiliki sifat mudah dibasahi oleh air yang menyebabkan permukaan isolator dapat dengan

mudah terlapisi kontaminan yang menyebabkan sifat konduktif isolator meningkat. Hal ini dapat menyebabkan ketahanan terhadap kebocoran arus dan tegangan *flashover* pada isolator porselen menurun (Santosa, 2017), sehingga diperlukan bahan isolasi tambahan yang digunakan untuk melapisi (*coating*) permukaan isolator sebagai pelindung dari kontaminan.

RTV *Silicone Rubber* atau karet silikon RTV adalah jenis polimer sintetik yang memiliki hidrofobisitas dan transfer hidrofobisitas yang tinggi, yang secara signifikan dapat meningkatkan ketahanan isolator terhadap *flashover* (Simatupang, 2018). Pelapis RTV *Silicone Rubber* terbuat dari polimer Polydimethylsioxane (PDMS). PDMS (Gambar 2. 10) adalah polimer dasar silikon yang terdiri dari gugus metil, silikon, dan oksigen. Gugus metil hidrofobik adalah silikon hidrofobik yang bertanggung jawab atas daya tahan air untuk membentuk tetesan yang menutupi area minimum. Oleh karena itu, permukaan yang dilapisi mampu menahan perkembangan arus bocor (Ibrahim *et al.*, 2014), dimana karet silikon $[(CH_3)_2 SiO]_n$, memiliki derajat polimerisasi (n) dari 4.000 sampai 10.000 dan memiliki berat molekul yang tinggi. Kelebihan RTV SiR yaitu tahan terhadap suhu panas hingga 250°C, tahan terhadap suhu dingin, sifat tahan api yang baik, serta merupakan isolasi listrik yang baik (Simatupang, 2018).

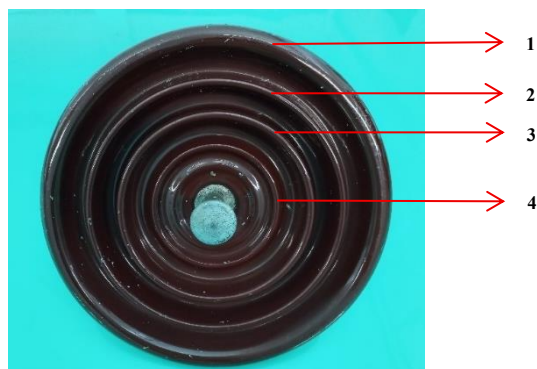


Gambar 2. 10 Rumus Kimia PDMS

Visual pelapisan RTV SiR pada permukaan isolator harus halus serta bebas dari gelembung dan gumpalan untuk meminimalkan pengumpulan kontaminasi dan mencegah penyaluran arus bocor. Ketebalan pelapisan RTV SiR pada permukaan

isolator dapat mempengaruhi kinerja isolator. Oleh karena itu, kisaran ketebalan nominal yang ditentukan yaitu 0,3 mm hingga 0,5 mm. Metode aplikasi pelapisan isolasi RTV SiR pada permukaan isolator diantaranya yaitu menyikat, menyemprot, dan mencelupkan. Menyikat adalah metode yang paling ekonomis tetapi sulit untuk diaplikasikan secara seragam dan cepat. Metode penyemprotan adalah metode terbaik karena dapat membentuk permukaan silikon yang halus. Pada metode menyikat dan mencelupkan, satu lapisan sudah cukup untuk mendapatkan cakupan yang lengkap, sementara untuk metode penyemprotan diperlukan dua atau tiga lapisan tergantung pada peralatan yang digunakan. Setiap lapisan dapat diaplikasikan setelah permukaan lapisan sebelumnya sudah lengket (Hamadi *et al.*, 2020).

Pada aplikasinya, pelapisan RTV SiR pada permukaan isolator akan menghasilkan ketebalan isolasi yang beragam. Oleh karena itu, dilakukan pengukuran ketebalan isolasi pada tiap lekukan isolator, dimana pada tiap lekukan, dilakukan pengukuran pada enam titik yang dapat dilihat pada Gambar 2. 11.



Gambar 2. 11 Pengukuran Ketebalan Isolasi RTV *Silicone Rubber*

Data pengukuran ketebalan isolasi RTV SiR yang beragam, mengharuskan dilakukan perhitungan data mean untuk menentukan tingkat kedekatan sebaran data dalam suatu sampel menggunakan rumus (Glagah Eskacakra Setyowisnu, 2024):

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (2.4)$$

Dimana, $\bar{x}$ = rata-rata data sampel; x_i = data ke- i ; n = banyaknya data sampel.

2.1.9 *Equivalent Salt Deposit Density*

Tingkat polusi pada permukaan isolator dinyatakan dalam dua besaran, yaitu ESDD (*Equivalent Salt Deposit Density*) dan NSDD (*Nonsoluble Deposit Density*). ESDD merupakan tingkat kepadatan garam ekuivalen dari larutan pengotor yang menempel pada permukaan isolator. Meningkatnya ESDD pada permukaan isolator, menyebabkan nilai arus bocor semakin besar dan mengakibatkan tegangan lewat denyar semakin menurun. Penentuan tingkat pengujian intensitas polusi buatan berdasarkan tingkat polusi, menurut standar IEC 815 Tahun 1994 dan IEC 507 dapat dilihat pada Tabel 2. 4 (Santosa, 2017).

Tabel 2. 4 Klasifikasi Tingkat Polusi

Tingkat Polusi	Uji Polusi Buatan Metode Kabut Garam (kg/m ³) Berdasarkan IEC 507	ESDD (mg/cm ²) Berdasarkan IEC 815
Ringan	5 – 14	0,03 – 0,06
Sedang	14 – 40	0,10 – 0,20
Berat	40 – 112	0,30 – 0,60
Sangat Berat	> 160	> 0,60

Pengukuran ESDD dilakukan dengan mengukur konduktivitas air sebelum dan sesudah pencucian isolator yang mengandung polutan menggunakan air akuades. Air akuades yang digunakan untuk membilas isolator ini kemudian diukur nilai konduktivitasnya menggunakan *Electrical Conductivity Meter*. Pengukuran konduktivitas air, baik yang mengandung polutan (σ_2), maupun yang tidak (σ_1) pada suhu tertentu, dihitung dalam persamaan (Irfangi, 2016):

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - 0,02277 (\theta - 20)] \quad (2. 5)$$

Dimana, σ_{20} = konduktivitas pada suhu 20°C ($\mu\text{S/cm}$); σ_{θ} = konduktivitas pada suhu ruangan; θ = suhu ruangan.

Sesudah didapat konduktivitas pada suhu 20°C, selanjutnya dihitung konduktivitas garam dalam persen, menggunakan persamaan:

$$D = \frac{(5,7 \times 10^{-4} \times \sigma_{20})^{1,03}}{10} \quad (2. 6)$$

Dimana, D = konsentrasi garam (%); σ_{20} = konduktivitas garam pada suhu 20°C ($\mu\text{S/cm}$).

Setelah diperoleh konduktivitas pada suhu 20°C dan konsentrasi garam, kemudian dihitung nilai ESDD menggunakan persamaan:

$$\text{ESDD} = 10 \times V \times \frac{(D_2 - D_1)}{S} \quad (2. 7)$$

Dimana, ESDD = *Equivalent Salt Deposit Density* (mg/cm^2); V = volume air pencuci (ml); D_1 = ekuivalen konsentrasi garam dan air sebelum ada polutan (%); D_2 = ekuivalen konsentrasi garam dan air sesudah ada polutan (%); S = luas permukaan isolator (cm^2).

2.1.10 *American Standard Test Method*

Standar pengujian ASTM-D149 terdiri dari tiga metode, yaitu metode *Short Time Test*, *Step by Step Test*, dan *Slow Rate of Rise Test*. Metode *Short Time Test* adalah pengujian yang paling umum digunakan untuk kontrol kualitas. Sedangkan metode *Step by Step Test* dan *Slow Rate of Rise Test* biasanya akan menghasilkan pengujian yang kurang baik, namun akan memberikan hasil yang lebih baik jika menggunakan perbedaan bahan uji dan dibandingkan satu sama lain (Mawardi, 2018).

1. Metode *Short Time Test*

Pengujian waktu singkat diawali dengan menaikkan tegangan spesimen secara bertahap dengan laju tegangan konstan, misalnya 100 V/s sampai spesimen mengalami tembus listrik (t_{bd}) dalam interval waktu 10 detik – 20 detik. Pengujian dilakukan terhadap lima spesimen. Nilai tegangan tembus spesimen sama dengan nilai rata-rata tegangan tembus yang diperoleh dari lima spesimen yang telah diuji. Jika nilai tegangan tembus spesimen menyimpang hingga 15% dari nilai rata-rata tegangan tembus, maka pengujian harus dilakukan terhadap lima spesimen lagi (Mawardi, 2018).

2. Metode *Step by Step Test*

Pengujian diawali dengan menetapkan tegangan tembus spesimen menurut pengujian waktu singkat (V_{bd}) atau 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 ditetapkan, misalnya V_{as} , maka pilih tegangan uji awal (V_a) yang nilainya dibawah V_{as} . Pertambahan tegangan dibuat sama dengan 10% dari tegangan uji awal yang dipilih. Waktu pengujian yang dibutuhkan untuk menaikkan tegangan dari suatu tingkat tegangan pengujian ke tingkat pengujian berikutnya adalah ($t_{n+1} - t_n$) serta lama pengujian adalah (60 ± 5) detik dan jika dibutuhkan, diperbolehkan 20 detik atau 300 detik (Mawardi, 2018).

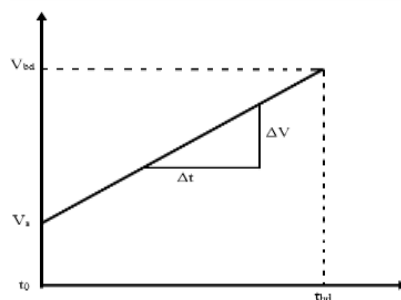
Pengujian dimulai dengan menaikkan tegangan spesimen tanpa menimbulkan tegangan transien, mulai dari nol hingga mencapai tegangan *start* (V_s). Setelah tegangan *start* berlangsung 60 detik dan dalam interval waktu ini tidak terjadi

tembus listrik pada spesimen, maka tegangan pengujian dinaikkan. Setelah tegangan pengujian tingkat kedua berlangsung 60 detik dan dalam interval waktu ini tidak terjadi tembus listrik pada spesimen, maka tegangan pengujian dinaikkan lagi. Demikian seterusnya, tegangan pengujian dinaikkan 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 $V_{kt} = V_{bd} = V_{n+1}$. Jika diinginkan tembus listrik terjadi pada langkah keempat hingga langkah kesepuluh, tetapi waktu terjadinya tembus listrik tidak kurang dari 120 detik ($t_{bd} \geq 120$ detik). Jika pada saat 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), maka pengujian harus 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 (Mawardi, 2018).

3. Metode *Slow Rate of Rise Test*

Pengujian diawali dengan menetapkan tegangan tembus spesimen menurut pengujian waktu singkat (V_{bd}) atau 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 (Gambar 2. 12), mulai dari tegangan *start* V_s hingga spesimen terjadi tegangan tembus listrik. Terjadinya tembus listrik harus pada $t_{bd} > 120$ detik sejak tegangan pengujian dikenakan pada spesimen. Apabila dalam

pengujian sekelompok spesimen, lebih dari satu spesimen mengalami tembus listrik pada waktu kurang dari 120 detik, maka perlu dilakukan tindakan seperti tegangan uji *start* V_s dikurangi, 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, maka nilai tegangan *start* V_s dikurangi. Jika tembus listrik terjadi pada tegangan 2,5 V dan waktu terjadinya tembus listrik lebih dari 120 detik, maka V_s dinaikkan (Mawardi, 2018).



Gambar 2. 12 Pengujian dengan Kenaikan Tegangan Perlahan

2.2 Penelitian Terkait dan Kebaruan Penelitian

Ada beberapa penelitian yang mengkaji tentang pelapisan RTV SiR pada permukaan isolator sebagai material alternatif yang dapat meningkatkan tegangan *flashover* isolator. Namun, pada penelitian ini, variasi pelapisan isolasi RTV SiR pada permukaan isolator dilakukan berbeda. Berikut 10 judul dari penelitian 10 tahun terakhir yang terkait dengan penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 2. 5.

Tabel 2. 5 Penelitian Terkait

No	Judul Jurnal	Penulis, Tahun	Pembahasan
1	Improvement of the Electrical Performance of Outdoor	(Muangpratoom <i>et al.</i> , 2023)	Pada penelitian ini, dilakukan pengembangan performa isolator luar ruangan yang digunakan dalam sistem elektrifikasi saluran udara

	Porcelain Insulators by Utilization of a Novel Nano-TiO ₂ Coating for Application in Railway Electrification Systems		kereta api. Penelitian ini menyajikan lapisan komposisi porselen berstruktur nano baru untuk meningkatkan kinerja listrik isolator porselen luar ruangan dengan menggunakan aplikasi baru pelapis nano-TiO ₂ , termasuk mengevaluasi efek nano-TiO ₂ pada sifat-sifat porselen listrik silika konvensional untuk digunakan dalam sistem elektrifikasi kereta api. Semua bahan nano yang belum diproses yang digunakan dalam investigasi ini memiliki ukuran partikel rata-rata ~40 nm, memiliki bentuk bulat, dan kualitas reagen analitiknya diukur dengan TESCAN, Model: MIRA3.
2	Review on RTV Silicone Rubber Coatings Insulator for Transmission Lines	(Hamadi <i>et al.</i> , 2020)	Artikel ini membahas keunggulan pelapis karet silikon RTV pada isolator, seperti daya rekat yang baik, kisaran ketebalan nominal, dan hidrofobisitas yang baik. Ada tiga metode aplikasi pelapisan, seperti menyikat, menyemprot, dan mencelupkan. Artikel ini juga menjelaskan tentang pemasangan isolator berlapis di lapangan.
3	Pollution Flashover Characteristics of Coated Insulators under	(Salem <i>et al.</i> , 2021)	Pada penelitian ini, dilakukan investigasi eksperimental dan analisis numerik untuk mengevaluasi pengaruh profil kerusakan lapisan RTV terhadap kinerja <i>flashover</i>

	Different Profiles of Coating Damage		string isolator terkontaminasi 33 kV. Profil kerusakan lapisan RTV dibentuk menjadi empat jenis kerusakan, dengan isolator yang tidak rusak sebagai referensi. Serangkaian uji laboratorium dilakukan pada sampel string isolator porselen tipe cap and pin di bawah tegangan AC. Empat kriteria digunakan untuk mengukur efek distribusi lapisan pada kinerja <i>flashover</i> polusi isolator yaitu tegangan <i>flashover</i>, arus bocor, dimensi lapisan, dan ketahanan lapisan polusi. Dalam menentukan kriteria ini, berbagai tingkat polusi dan nilai kelembapan dipertimbangkan. Selain itu, metode elemen hingga (FEM) digunakan untuk mengevaluasi perbandingan karakteristik listrik dari isolator yang dilapisi dengan isolator yang tidak dilapisi.
4	Improvement of Electrical Performance for Porcelain Insulators Using Silicone Rubber Coating	(Ibrahim <i>et al.</i> , 2014)	Pada penelitian ini, dilakukan evaluasi efek penuaan dan lingkungan yang berbeda terhadap performa listrik isolator suspensi porselen tegangan tinggi 33 kV yang dilepas setelah 28 tahun masa pakai dari gardu induk EL SRAGE ke stasiun irigasi, Aswan, Mesir. Pada penelitian ini, dilakukan survei

			terkait bahan polimer RTV lapisan karet silikon isolator porselen untuk menahan tegangan <i>flashover</i> AC 50 Hz. Empat jenis bahan yang terkontaminasi lingkungan seperti pasir, asap silika, semen, dan fosfat dikontaminasikan pada permukaan isolator porselen berlapis pada kondisi kering dan basah
5	Analysis of Ceramic and Non-Ceramic Insulator Under Different Levels of Salt Contamination	(Dhagat and Pachori, 2015)	Pada penelitian ini, dilakukan percobaan tingkat polusi wilayah pesisir lapisan padat untuk memprediksi tingkat keparahan polusi pada isolator. Eksperimen pada isolator porselen dan karet silikon dilakukan dengan mengamati variasi tegangan <i>flashover</i> dengan tingkat kontaminasi garam yang berbeda untuk mengetahui nilai <i>flashover</i> kontaminasi pada permukaan isolator yang tercemar.
6	Analisis Karakteristik Arus Bocor dan <i>Flashover</i> pada Isolator Piring dengan Pelapisan RTV Silikon dan Epoxy Resin Kondisi Terkontaminasi	(Simatupang, 2018)	Pada penelitian ini, dilakukan perbandingan kekuatan isolasi antara isolator yang tidak dilapisi bahan isolasi tambahan, isolator yang dilapisi RTV Silikon, dan isolator yang dilapisi Epoxy Resin pada kondisi tidak terkontaminasi dan kondisi terkontaminasi air hujan untuk menganalisis karakteristik arus bocor dan tegangan <i>flashover</i> pada isolator.

7	Pengaruh Polutan Garam Terhadap Tegangan <i>Flashover</i> Pada Isolator Berbahan Keramik dan Polimer Menggunakan Metode <i>Slow Rate of Rise Test</i>	(Irfangi, 2016)	Pada penelitian ini, dilakukan perbandingan berupa besarnya tegangan <i>flashover</i> antara isolator keramik dan polimer dalam kondisi kering dan kondisi basah, serta kondisi tanpa polutan dan berpolutan menggunakan metode yang sesuai standar <i>American Standard Test Method</i> , ASTM-D149, yaitu metode <i>Slow Rate of Rise Test</i> , dimana metode ini dijalankan dengan menaikkan tegangan spesimen secara bertahap dengan laju tegangan konstan, mulai dari tegangan uji awal hingga spesimen mengalami tegangan tembus listrik.
8	Analisis Pengaruh Polutan NaCl Pada Isolator Keramik Tipe <i>Post-Pin</i>	(Baso, 2021)	Pada penelitian ini, dilakukan analisis pengaruh tingkat kepadatan garam (NaCl) <i>Equivalent Salt Deposit Density</i> (ESDD) pada permukaan isolator yang dapat mengakibatkan terjadinya <i>flashover</i> dan pengaruhnya terhadap nilai sudut kontak permukaan isolator.
9	Analisis Pengaruh <i>Coating</i> Terhadap Sudut Kontak, Arus Bocor, dan THD Pada Isolator Polimer 20 kV	(Pratiwi <i>et al.</i> , 2015)	Pada penelitian ini, dilakukan analisa perbandingan sifat hidrofobik isolator polimer epoksi resin pengisi silika dengan melakukan pengujian sudut kontak, melakukan pengukuran untuk memperoleh karakteristik arus bocor pada kondisi terkontaminasi, dan menganalisis

	Kondisi Terkontaminasi		karakteristik harmonik arus bocor yang meliputi bentuk gelombang, magnitude arus bocor, spektrum frekuensi (FFT), dan <i>Total Harmonic Distortion</i> (THD) sebelum dan sesudah dilakukan <i>coating</i> menggunakan <i>silicone rubber</i> RTV 585.
10	Analisis Unjuk Kerja Isolator Polimer 20 kV Resin Epoksi Bahan Pengisi SiO ₂ (<i>Silicone Dioxide</i>) Dengan Sirip Seragam Pada Kondisi Konduktivitas Yang Bervariasi	(Priambada and Hermawan, 2021)	Pada penelitian ini, dilakukan pembuatan dan analisis isolator resin epoksi dengan bahan pengisi SiO ₂ (Silikon Dioksida). Material uji yang digunakan adalah resin epoksi yang dibentuk dari <i>Diglycidyl Ether of Bisphenol-A</i> (DGEBA) dan <i>Polyaminoamide</i> yang dicampur dengan silane dan SiO ₂ . Komposisi sampel uji yaitu 35% DGEBA, 35% <i>Polyaminoamide</i> , 15% Silane, dan 7,5% SiO ₂ , dengan tipe sirip isolator yaitu tipe sirip seragam dengan jumlah sirip lima buah. Pengujian yang dilakukan adalah arus bocor, tahanan isolasi dan sudut kontak dengan pengaruh variasi tegangan uji dalam kondisi kering dan basah.

Penelitian terkait bertujuan sebagai bahan referensi dan pertimbangan bagi penulis untuk melakukan penelitian yang akan dilakukan dalam upaya mengoptimalkan kinerja isolator dengan mengaplikasikan RTV SiR pada permukaan isolator porselen jenis piring pada kondisi bersih dan terkontaminasi

garam. Pada Tabel 2. 5 penulis mencantumkan secara tertulis 5 jurnal internasional dan 5 jurnal nasional yang berhubungan dengan penelitian, diantaranya sebagai berikut:

1. (Muangpratoom *et al.*, 2023) mengembangkan kinerja listrik isolator luar ruangan menggunakan lapisan nano-TiO₂ untuk sistem elektrifikasi kereta api. Desain prototipe isolator porselen dengan lapisan normal dan menggunakan lapisan nano-TiO₂ didasarkan pada IEC 60815-1. Pengujian pertama dilakukan untuk mengukur tegangan AC *flashover* frekuensi rendah dalam kondisi kering dan basah. Selain itu, pengujian lainnya dilakukan untuk mengukur tegangan *flashover* kritis impuls petir pada polaritas positif dan negatif pada kondisi kering normal dan basah terkontaminasi. Difraksi sinar-X (X-RD) dan mikroskop elektron pemindaian (SEM) digunakan untuk memeriksa permukaan mikro dan menunjukkan bahwa lapisan nano-TiO₂ melekat pada permukaan isolator porselen luar ruangan dan berada dalam keadaan amorf. Selain itu, diamati dan ditemukan bahwa nano-TiO₂ yang tersebar memperkuat matriks kaca dan menciptakan penghalang yang kokoh yang menyebabkan tegangan loncatan berkurang dalam kondisi kekuatan dielektrik yang tinggi. Formulasi keramik berstruktur nano mengungguli porselen biasa dalam hal kekuatan tegangan tembus, terutama untuk kinerja *flashover* frekuensi rendah isolator dalam kondisi pengujian kering dan basah. Namun, perubahan signifikan dalam karakteristik tegangan *flashover* kritis impuls petir diamati dan tidak jauh lebih baik ketika menambahkan lapisan nanoTiO₂ ke isolator porselen.

2. (Hamadi *et al.*, 2020) membahas tentang pelapis karet silikon RTV untuk isolator saluran transmisi. Penggunaan karet silikon RTV sebagai pelapis isolator dapat meningkatkan efisiensi isolator dalam transmisi dan mengurangi biaya perawatan. Keuntungan dari penggunaan pelapis RTV adalah hidrofobisitas baik yang dapat membantu mengurangi pembentukan kontaminan di sekitar isolator dan meningkatkan masa pakai isolator. Selain itu, komposisi lapisan karet silikon RTV yang sesuai diperlukan untuk menghasilkan lapisan yang baik. Artikel ini membahas terkait spesifikasi lapisan RTV untuk isolator, seperti adhesi lapisan, ketebalan, dan hidrofobisitas. Metode aplikasi dan pemasangan isolator sangat penting dalam pengembangan isolator pelapis RTV untuk meningkatkan efektivitas isolator.
3. (Salem *et al.*, 2021) melakukan penelitian mengenai pengaruh empat profil kerusakan lapisan yang berbeda pada kinerja string isolator porselen 33 kV yang dilapisi dalam kondisi permukaan yang tercemar dan bersih. Kinerja isolator yang dilapisi dengan vulkanisasi suhu kamar (RTV) di bawah kerusakan lapisan parsial dan lapisan yang tidak rusak dievaluasi. Pengaruh kelembaban pada *flashover* polusi juga dipertimbangkan. Pelapisan berbentuk cincin, berbentuk kipas, dan berbentuk acak diterapkan setelah kerusakan lapisan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik *flashover* dari isolator berlapis RTV memiliki perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan isolator normal. Karakteristik listrik seperti tegangan *flashover*, arus kritis, dan resistansi permukaan secara signifikan dipengaruhi oleh distribusi kerusakan lapisan dan tingkat kelembaban pada permukaan isolator. Medan listrik dan beda potensial juga dianalisis menggunakan metode elemen hingga

(FEM). Inisiasi busur api diamati muncul di area isolator di mana medan listriknya paling tinggi. Juga diamati bahwa distribusi lapisan polusi dan tingkat kelembapan yang berbeda mengakibatkan perubahan resistensi lapisan polusi permukaan dan distribusi medan listrik yang tidak merata. Hal ini mengindikasikan bahwa parameter isolator yang dilapisi berhubungan langsung dengan distribusi kerusakan lapisan pada permukaan isolator, terutama dengan adanya kelembapan.

4. (Ibrahim *et al.*, 2014) melakukan penelitian mengenai efek lapisan karet silikon vulkanisir suhu kamar (RTV) pada isolator porselen tipe *cap and pin* di bawah tegangan *flashover* AC 50 Hz. Menjelaskan hasil eksperimen yang diperoleh untuk perbaikan isolator porselen yang dilepas dari saluran transmisi overhead 33kV di Aswan, Mesir setelah 28 tahun beroperasi. Selain itu, penelitian ini juga secara singkat mensurvei permukaan isolator porselen yang terkontaminasi lingkungan. Tegangan flashover telah diukur untuk isolator di bawah berbagai bahan yang terkontaminasi seperti semen, pasir, asap silika, dan fosfat, dimana lapisan karet silikon RTV mencatat kinerja listrik yang baik di bawah kondisi kering, basah, dan basah dengan kondisi 5%, 10% NaCl.
5. (Dhagat and Pachori, 2015) melakukan percobaan tingkat polusi wilayah pesisir lapisan padat untuk memprediksi tingkat keparahan polusi pada isolator. Faktor cuaca berpengaruh pada pertumbuhan tingkat polusi di suatu wilayah. Biasanya isolator menunjukkan perubahan yang signifikan dalam operasi alami, yaitu ketika isolator terpapar pada kondisi lingkungan yang parah. Eksperimen pada isolator porselen dan karet silikon dilakukan untuk memahami efek tingkat keparahan polusi pada kondisi tercemar garam yang

berbeda pada isolator. Hal ini diamati di laboratorium pengujian impuls dengan variasi tingkat kontaminasi garam pada isolator yang berbeda untuk memprediksi tegangan *flashover* kontaminasi pada permukaan isolator yang tercemar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik isolator bergantung pada tegangan *flashover* di bawah tingkat kontaminasi garam yang berbeda.

6. (Simatupang, 2018) melakukan penelitian mengenai penambahan bahan isolasi *Room Temperature Vulcanizing* silikon yang terbuat dari karet silikon $[(CH_3)_2SiO]_n$ dan epoxy resin yang terbuat dari *Diglycidyl Ether of Bisphenol-A* (DGEBA) sebagai bahan dasar, dan *Metaphenylene Diamine* (MPDA) sebagai bahan pengeras untuk melapisi (*coating*) permukaan isolator yang bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh pemberian bahan pelapis tersebut terhadap nilai arus bocor dan nilai tegangan *flashover* pada isolator.
7. (Irfangi, 2016) melakukan penelitian mengenai pengaruh bahan polutan garam terhadap tegangan *flashover* pada isolator keramik dan polimer menggunakan metode *Slow Rate of Rise Test* untuk mengetahui hasil perbandingan antara isolator berbahan keramik dan polimer pada hasil pengujian dalam kondisi kering dan basah, serta dalam kondisi isolator tanpa polutan garam dan dalam kondisi isolator berpolutan garam dengan variasi sudut penyemprotan 45° , 90° , dan 135° serta dengan tiga buah sudut langsung tersebut secara langsung.
8. (Baso, 2021) melakukan pengujian isolator tipe *post-pin* yang diberikan larutan polutan NaCl (garam). Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana pengaruh konsentrasi *Equivalent Salt Deposit Density* (ESDD) yang terkandung dalam larutan polutan NaCl (garam) terhadap *flashover* dan sudut

kontak permukaan pada isolator *post-pin*. Berdasarkan hasil penelitian, dilakukan dengan menyemprotkan larutan NaCl dengan konsentrasi sebanyak 10 gr, 20 gr, 30 gr, 40 gr, dan 50 gr untuk setiap isolator. Pada setiap konsentrasi NaCl, penyemprotan diberikan sebanyak 6 kali dengan selang waktu ± 15 menit. Setelah dilapisi polutan, isolator didiamkan selama 24 jam, kemudian diuji untuk mendapatkan nilai tegangan *flashover*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi ESDD, maka tegangan *flashover* yang terjadi pada isolator semakin menurun, dimana jika konsentrasi ESDD semakin besar, maka nilai sudut kontak pada permukaan isolator keramik tipe *post-pin* semakin kecil.

9. (Pratiwi *et al.*, 2015) melakukan penelitian mengenai pengaruh *coating* karet silikon RTV pada isolator polimer resin epoksi 20 kV untuk meningkatkan performa dan umur isolator, dengan dua variasi tipe sirip isolator yaitu tipe sirip besar besar besar (BBB) dan tipe sirip besar kecil besar (BKB). Parameter yang dianalisis adalah sudut kontak, arus bocor, spektrum frekuensi (FFT), dan *Total Harmonic Distortion* (THD). Pengolahan THD dilakukan dengan menggunakan fungsi *Fast Fourier Transform* (FFT) menggunakan Matlab 2008. Pengujian dilakukan berdasarkan beberapa variasi kondisi permukaan, yaitu kondisi kering dan basah. Namun, pada penelitian ini analisa isolator uji resin epoksi silika berdasarkan kondisi basah, dikondisikan dengan polutan berupa air hujan yang tergolong dalam tingkat kontaminasi dengan polusi ringan.
10. (Priambada and Hermawan, 2021) membahas mengenai isolator dengan bahan resin epoksi yang memiliki kelebihan dibandingkan dengan isolator porselen

dan gelas, salah satunya yaitu memiliki bobot yang lebih ringan dibandingkan bahan porselen dan gelas. Namun isolator jenis ini masih tergolong baru, sehingga untuk meningkatkan performa dari isolator ini, salah satu caranya adalah dengan menambahkan bahan pengisi. Pada penelitian ini, dipaparkan pengaruh variasi tegangan pada kondisi kering dan basah serta penambahan SiO_2 (*Silikon Dioksida*). Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan tegangan dan konduktivitas mempengaruhi nilai arus bocor dan tahanan isolasi. Pada variasi konduktivitas, nilai arus bocor dan tahanan isolasi meningkat seiring dengan kenaikan nilai konduktivitas.