BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh beberapa peneliti, kajian penelitian sebelumnya disusun untuk menunjukkan perkembangan penerapan *silicone rubber* pada sistem isolasi luar, sekaligus menempatkan penelitian ini di antara kajian yang telah dilakukan. Dua belas publikasi periode 2022–2026 dipilih karena membahas pelapis RTV, *hidrofobisitas*, penuaan material, mekanisme kegagalan, metode evaluasi, dan estimasi umur layanan. Ringkasan hasil utama serta keterbatasan setiap penelitian disajikan pada Tabel 2.1. Penelitian Sebelumnya. Kolom kesenjangan penelitian digunakan untuk memperjelas aspek yang belum terjawab dan menjadi dasar penyusunan metode penelitian pada SUTT 150 kV Sanur–Gianyar.

Mahendra, Rachmawati, Suwarno, Permatasari, dan Suendo mengembangkan *coating* RTV *silicone rubber* dengan penambahan nano-boron nitride dan nano-alumina. Formulasi nanokomposit yang dipilih menunjukkan peningkatan sifat *hidrofobik*, dielektrik, dan termal. Pada pengujian isolator tegangan tinggi, *coating* juga menghasilkan arus bocor yang lebih rendah dan tegangan *flashover* yang lebih tinggi. Temuan tersebut memperkuat potensi modifikasi RTV untuk lingkungan berat, tetapi penelitian masih berada pada skala laboratorium dan belum mengevaluasi kinerja lapisan yang telah lama terpasang pada jaringan transmisi [5].

Wang dan rekan-rekan meninjau perkembangan *silicone rubber superhidrofobik* untuk isolasi luar. Berdasarkan perbandingan metode etsa, pencetakan, dan pelapisan, metode *coating* dinilai paling realistis untuk diaplikasikan pada isolator berukuran penuh karena prosesnya lebih sederhana dan dapat dirancang dengan biaya yang relatif rendah. Kajian ini juga menegaskan pentingnya struktur *mikro-nano*, energi permukaan rendah, dan ketahanan terhadap berbagai tekanan lingkungan. Meskipun demikian, pembahasan belum menguji manfaat pemeliharaan *coating* pada aset transmisi yang telah beroperasi [6].

Goudarzi, Sohrabi-Kashani, Zolriasatein, dan Rezaei mengevaluasi isolator *silicone rubber* yang telah beroperasi selama 2 sampai 12 tahun pada jaringan distribusi di kawasan tercemar. Umur layanan diperkirakan melalui gabungan analisis FTIR, TGA, SEM, sudut kontak, kelas *hidrofobisitas*, kekerasan, dan kuat tarik. Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa penilaian umur tidak cukup menggunakan satu parameter saja. Namun, objeknya berupa isolator polimer tegangan menengah, sehingga hasilnya belum secara langsung menjawab kelayakan pelapisan RTV pada *longrod* keramik 150 kV [7].

Qiu dan rekan-rekan memperkenalkan efek transfer *superhidrofobisitas* pada *coating superwetting* yang mengandung molekul bermigrasi seperti PDMS. Setelah permukaan dilapisi polutan buatan, molekul berenergi permukaan rendah berpindah menuju lapisan kontaminan dan secara bertahap mengubahnya menjadi *hidrofobik*. Mekanisme ini meningkatkan ketahanan terhadap *flashover* polusi. Penelitian tersebut penting untuk menjelaskan proses transfer *hidrofobisitas*, tetapi belum membahas ketahanan *coating* yang telah menua di lapangan, variasi kondisi antartower, ataupun biaya pemeliharaan [8].

Lei, Li, Gan, Zhou, dan Li menyiapkan lapisan komposit berbasis PRTV, PTFE, dan TiO_2 pada HTV *silicone rubber*. Hasil penuaan menunjukkan bahwa lapisan komposit mampu memberikan perlindungan terhadap radiasi *ultraviolet*, mempertahankan sifat *hidrofobik*, dan mengurangi retak serta penyerapan air. Temuan ini memperlihatkan bahwa perlindungan UV perlu dipertimbangkan dalam menilai umur *coating*. Kesenjangannya adalah material yang diuji bukan isolator keramik berlapis RTV yang telah digunakan pada lingkungan pesisir, sehingga kondisi adhesi dan pemeliharaan aktual belum terwakili [9].

Deng, Wang, Liu, Liu, Zuo, dan Liang meneliti mekanisme kegagalan isolator anorganik yang dilapisi RTV ketika menerima tegangan impuls muka curam. Rekaman proses pelepasan menunjukkan bahwa karakteristik kerusakan dan jalur *flashover* dipengaruhi oleh keberadaan serta kondisi *coating*. Studi ini memberikan dasar untuk memahami batas perlindungan RTV pada tekanan listrik ekstrem. Namun, pengujian impuls belum menggambarkan kondisi pemeliharaan harian yang lebih banyak dipengaruhi polusi, kelembapan, arus bocor, korona, dan penuaan permukaan [10].

Chen dan rekan-rekan menilai pengaruh penuaan dipercepat terhadap *coating* RTV antipolusi melalui perubahan warna, struktur kimia, morfologi permukaan, kekerasan, serta sudut kontak. Hasilnya menunjukkan bahwa penuaan memicu perubahan fisik dan kimia yang dapat digunakan sebagai tanda penurunan kondisi lapisan. Penelitian ini mendukung penggunaan inspeksi *visual* dan *hidrofobisitas* sebagai bagian dari evaluasi *coating*. Akan tetapi, hubungan antara indikator laboratorium tersebut dan keputusan pemeliharaan isolator yang telah terpasang di jaringan belum dihitung secara teknis-ekonomis [11].

Liu dan rekan-rekan mengembangkan *nano-coating* multifungsi SiO_2/PDMS/epoksi pada *silicone rubber*. Lapisan menghasilkan sudut kontak di atas 160°, kemampuan membersihkan diri, waktu pembentukan es yang lebih lama, pelepasan muatan permukaan yang lebih cepat, dan peningkatan tegangan *flashover* basah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rekayasa permukaan dapat meningkatkan beberapa fungsi sekaligus. Namun, kajiannya berfokus pada material isolator komposit dan belum membandingkan biaya teknologi *coating* dengan pembersihan rutin, *re-coating,* atau penggantian isolator [12].

Liang, Zhang, Zheng, Jiang, dan Pang mengusulkan rasio luas kehilangan *hidrofobisitas* sebagai indikator kegagalan *silicone rubber* pada lingkungan korosif. Nilai rasio k sebesar 0,35 ditetapkan sebagai kondisi kritis yang berkaitan dengan penurunan kekuatan isolasi. Pendekatan berbasis luas permukaan ini dapat memperjelas interpretasi inspeksi *visual*. Meskipun demikian, nilai ambang diperoleh dari pengujian terkontrol dan masih memerlukan validasi pada *coating* RTV lapangan dengan mempertimbangkan arus bocor, korona, suhu permukaan, serta ketidakseragaman kondisi antar lokasi [13].

Zeng dan rekan-rekan merangkum metode evaluasi penuaan isolator *silicone rubber*, meliputi pemeriksaan makroskopis, karakterisasi fisik dan kimia, pengujian kelistrikan, serta teknik resonansi magnetik. Kajian tersebut menekankan bahwa setiap metode memiliki kelebihan dan keterbatasan sehingga penilaian kondisi sebaiknya menggunakan beberapa indikator yang saling melengkapi. Kesenjangan yang masih terbuka adalah belum adanya kerangka keputusan yang secara bersamaan menghubungkan hasil diagnosis

teknis dengan kebutuhan pemeliharaan dan konsekuensi ekonomi pada satu aset transmisi [14].

Meng, Peng, Niu, Wang, Mei, dan Wang membahas migrasi komponen siloksana bermassa molekul rendah dari bagian dalam *silicone rubber* menuju permukaan dan lapisan polutan. Migrasi tersebut merupakan mekanisme utama pemulihan serta transfer *hidrofobisitas*. Penelitian juga menunjukkan bahwa jenis polutan memengaruhi waktu migrasi dan tingkat sudut kontak yang terbentuk. Temuan ini menjelaskan alasan *hidrofobisitas* dapat pulih setelah tekanan lingkungan berkurang, tetapi belum menilai apakah kemampuan pemulihan tersebut masih memadai pada *coating* RTV yang telah menua dalam pelayanan [15].

Qiao, Ming, Xu, Yi, dan Sundararajan meninjau penuaan isolator polimer akibat gabungan polusi, radiasi *ultraviolet*, pelepasan listrik, temperatur, kelembapan, dan faktor lingkungan lainnya. Penuaan terlihat melalui perubahan kelistrikan, fisik, dan kimia, sehingga pemantauan multi-parameter dinilai lebih representatif daripada pengujian tunggal. Kajian ini menjadi dasar pemilihan parameter penelitian, tetapi belum menyediakan perbandingan langsung antara keramik berlapis RTV, keramik tanpa lapis, dan polimer serta belum mengaitkannya dengan *Life Cycle Cost* [16].

Zhao dan rekan-rekan mengevaluasi karakteristik operasi dan penuaan isolator porselen berlapis RTV pada lingkungan dataran tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa paparan temperatur, kelembapan, dan radiasi matahari mempercepat peningkatan kekerasan, *degradasi* permukaan, penurunan *hidrofobisitas*, perubahan struktur kimia, dan penurunan sifat dielektrik lapisan. Kajian ini penting sebagai bukti bahwa kondisi lingkungan selama operasi harus dipertimbangkan dalam menilai umur dan kelayakan RTV. Namun, objek penelitian berada pada lingkungan dataran tinggi dan belum menghubungkan *degradasi* RTV dengan keputusan pemeliharaan berbasis biaya pada SUTT pesisir[17].

Ullah dan Akbar menguji penuaan *coating* RTV-SiR dengan kombinasi tegangan DC, tekanan lingkungan, serta variasi *filler* selama 10.000 jam. Formulasi dengan *filler mikro-nano* menunjukkan kemampuan mempertahankan *hidrofobisitas*, menekan arus bocor, dan mempertahankan sifat mekanis lebih

baik dibandingkan sampel tanpa penguat, sedangkan polaritas positif memberikan tingkat *deteriorasi* yang lebih besar. Penelitian tersebut memperkuat bahwa penuaan RTV merupakan proses *multi-stres*, tetapi pengujiannya masih berupa penuaan dipercepat di laboratorium dan belum mewakili kondisi lapangan AC pada isolator *longrod* keramik yang telah lama beroperasi[18].

Wu dan rekan-rekan merangkum mekanisme penuaan serta metode evaluasi *silicone rubber* pada isolator luar ruang. Penuaan dikaitkan dengan perubahan struktur permukaan, komposisi kimia, sifat optik, *hidrofobisitas*, dan karakteristik kelistrikan akibat tekanan termal, kelembapan, radiasi ultraviolet, polusi, dan pelepasan listrik. Kajian tersebut menekankan perlunya penilaian multi-parameter dan metode *non-destruktif* untuk menentukan kondisi material. Kesenjangannya, pembahasan berfokus pada *silicone rubber* sebagai *housing* isolator komposit dan belum secara khusus menilai retrofit RTV pada keramik beserta konsekuensi ekonominya[19].

Berdasarkan lima belas penelitian tersebut, celah utama bukan terletak pada pembuktian bahwa *silicone rubber* memiliki sifat *hidrofobik*, melainkan pada evaluasi lapangan yang menyatukan perbandingan teknis, kondisi penuaan, kebutuhan pemeliharaan, dan konsekuensi biaya. Penelitian ini menempatkan tiga kelompok isolator pada lokasi tower yang sama sebagai pembanding, kemudian mengintegrasikan tahanan isolasi, arus bocor, korona, suhu, kondisi *visual*, *Health Index*, serta analisis *Life Cycle Cost*. Dengan demikian, hasil penelitian diarahkan untuk mendukung keputusan pemeliharaan, bukan hanya penilaian material. Tabel 2.1 merangkum beberapa penelitian sebelumnya.

Tabel 2.1 Rangkuman Penelitian Sebelumnya

No.	Judul penelitian	Penulis	Penerbit	Tahun	Hasil penelitian	Kesenjangan/gap penelitian
1	Performance Improvement of RTV *Silicone Rubber* as High Voltage Outdoor Insulator *Coating* Material Using Nano BN and Al_2O_3 Additives	R. P. Mahendra et al.	e-Prime	2026	Penambahan nano-BN dan nano-Al_2O_3 meningkatkan *hidrofobisitas*, karakteristik dielektrik dan termal, menurunkan arus bocor, serta menaikkan tegangan *flashover*.	Pengujian berfokus pada formulasi material dan kondisi laboratorium; belum mengevaluasi pelapis pada isolator *longrod* 150 kV yang telah beroperasi maupun biaya siklus hidupnya.
2	Super-hydrophobic *Silicone Rubber* for Outdoor Electrical Insulation	Q. Wang et al.	Nano Today	2024	Kajian menunjukkan bahwa metode *coating* merupakan pendekatan yang paling memungkinkan untuk membuat permukaan *silicone rubber* super*hidrofobik* pada isolator berukuran penuh.	Penelitian bersifat tinjauan material dan teknologi; belum memberikan pembuktian komparatif lapangan antara isolator berlapis, tanpa lapis, dan polimer.
3	Ageing Evaluation and Lifespan Estimation of *Silicone Rubber* Insulators in MV Power Distribution Networks	M. Goudarzi et al.	Engineering Failure Analysis	2024	Umur layanan isolator polimer lapangan diperkirakan dari hasil FTIR, TGA, SEM, sudut kontak, *hidrofobisitas*, kekerasan, dan kuat tarik pada sampel berumur 2–12 tahun.	Objek penelitian berupa isolator polimer jaringan tegangan menengah; belum menilai retrofit RTV pada isolator keramik 150 kV dan implikasi biaya pemeliharaan.
4	Superhydrophobicity Transfer Effect in Superwetting *Coating*s for Strengthening Anti-pollution *Flashover* Performance	C. Qiu et al.	Progress in Organic *Coating*s	2024	Migrasi molekul berenergi permukaan rendah ke lapisan polutan menghasilkan efek transfer *superhidrofobisitas* dan memperkuat ketahanan *flashover* pada isolator berlapis.	Validasi dilakukan pada *coating* superwetting dan polutan buatan; ketahanan jangka panjang pada isolator lapangan serta kebutuhan pemeliharaannya belum dibahas.
5	Preparation of HTV *Silicone Rubber* with Hydrophobic–UV-Resistant Composite Coating and the Aging Research	M. Lei et al.	e-*Polymer*s	2024	Lapisan komposit PRTV, PTFE, dan TiO_2 meningkatkan perlindungan terhadap UV, mempertahankan *hidrofobisitas*, serta menekan retak dan penyerapan air setelah proses penuaan.	Material yang diuji berupa HTV *silicone rubber* dengan lapisan komposit baru, bukan pelapis RTV *eksisting* pada isolator keramik yang telah mengalami paparan pesisir.
6	Breakdown Mechanism of RTV *Silicone Rubber* Coated Insulators under Steep-front Impulse Voltage	T. Deng et al.	Electric Power Systems Research	2023	Penelitian menjelaskan proses *flashover* dan mekanisme kegagalan isolator berlapis RTV saat menerima tegangan impuls muka curam serta menawarkan arah optimasi *coating*.	Tekanan uji berupa impuls di laboratorium; belum menghubungkan kondisi lapisan dengan parameter pemeliharaan rutin, polusi pesisir, dan kelayakan ekonomi.
7	Study on the Influence of Accelerated Aging on the Properties of an RTV Anti-pollution *Flashover Coating*	J. Chen et al.	*Polymer*s	2023	Penuaan dipercepat menyebabkan perubahan warna, morfologi, struktur kimia, kekerasan, dan sudut kontak pada *coating* RTV sehingga dapat digunakan sebagai indikator *degradasi*.	Hubungan hasil penuaan dipercepat dengan performa isolator yang telah beroperasi di jaringan nyata dan keputusan pemeliharaan belum dihitung secara langsung.
8	Improving Surface Performance of *Silicone Rubber* for Composite Insulators by Multifunctional Nano-*coating*	S. Liu et al.	Chemical Engineering Journal	2023	Nano-*coating* SiO_2/PDMS/epoksi menghasilkan sudut kontak lebih dari 160°, sifat membersihkan diri, pelepasan muatan lebih cepat, dan peningkatan tegangan *flashover* basah.	Kajian menekankan rekayasa permukaan isolator komposit; belum membandingkan manfaatnya dengan pembersihan rutin atau penggantian isolator secara ekonomis.
9	AC Failure Evaluation Method of *Silicone Rubber* Based on the	T. Liang et al.	Electric Power Systems Research	2023	Rasio luas permukaan yang kehilangan *hidrofobisitas* diusulkan sebagai indikator kondisi; nilai k = 0,35	Batas kritis diperoleh dari sampel dan lingkungan terkontrol; penerapannya pada *coating* RTV lapangan

No.	Judul penelitian	Penulis	Penerbit	Tahun	Hasil penelitian	Kesenjangan/gap penelitian
	Proportion of Hydrophobicity Loss Area in Corrosive Environment				ditetapkan sebagai batas kritis kegagalan pada pengujian korosif.	perlu divalidasi bersama arus bocor, korona, suhu, dan kondisi *visual*.
10	Review of Aging Evaluation Methods for *Silicone Rubber* Composite Insulators	Z. Zeng et al.	*Polymer*s	2023	Berbagai metode evaluasi penuaan dibahas, mulai dari inspeksi makroskopis, pengujian kimia dan listrik, hingga teknik resonansi magnetik untuk diagnosis kuantitatif.	Kajian belum menyusun model keputusan yang mengintegrasikan kondisi teknis, biaya pemeliharaan, dan alternatif tindakan untuk satu jalur transmisi tertentu.
11	Characteristics of Small-Molecule Migration of *Silicone Rubber* Insulator in Electrical Power Systems	X. Meng et al.	*Polymer*s	2022	Migrasi komponen siloksana bermassa molekul rendah terbukti berperan dalam pemulihan *hidrofobisitas* dan transfer sifat *hidrofobik* ke lapisan polutan.	Penelitian menggunakan material HTV dan polutan terkontrol; belum menilai kapasitas pemulihan pada *coating* RTV yang telah menua serta pengaruhnya terhadap interval pemeliharaan.
12	Aging of *Polymer*ic Insulators under Various Conditions and Environments: Another Look	X. Qiao et al.	Energies	2022	Polusi, UV, pelepasan listrik, suhu, kelembapan, dan ketinggian diidentifikasi sebagai pemicu penuaan yang menurunkan *hidrofobisitas* dan karakteristik isolasi.	Kajian bersifat umum pada isolator polimer dan merekomendasikan pemantauan multi-parameter; belum menyajikan perbandingan tiga alternatif isolator beserta *Life Cycle Cost*.
13	Study on the Operating and Aging Characteristics of RTV (Room Temperature Vulcanizing) Insulator Strings in High-Altitude Areas	Y. Zhao et al. [55]	Electronics	2025	Kondisi operasi memperlihatkan bahwa temperatur, kelembapan, dan radiasi matahari mempercepat penuaan RTV yang ditandai peningkatan kekerasan, *degradasi* permukaan, penurunan *hidrofobisitas*, perubahan kimia, dan penurunan sifat dielektrik.	Objek berada pada lingkungan dataran tinggi; belum mengevaluasi RTV pada SUTT pesisir dan belum menghubungkan *degradasi* lapisan dengan keputusan pemeliharaan berbasis LCC.
14	Anti-aging Characteristics of RTV-SiR Aided HV Insulator *Coating*s: Impact of DC Polarity and Fillers	I. Ullah and M. Akbar [56]	Materials Chemistry and Physics	2022	Penuaan multi-stres selama 10.000 jam menunjukkan filler mikro-nano membantu mempertahankan *hidrofobisitas*, menurunkan arus bocor, dan mengurangi perubahan sifat mekanis; polaritas positif menghasilkan deteriorasi lebih besar.	Pengujian dilakukan secara dipercepat pada tegangan DC dan material RTV termodifikasi; belum merepresentasikan *coating* RTV eksisting pada isolator *longrod* keramik sistem AC di lapangan.
15	Aging Mechanisms and Evaluation Methods of *Silicone Rubber* Insulator Sheds: A Review	G. Wu et al. [57]	IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation	2024	Kajian merangkum mekanisme penuaan akibat panas, kelembapan, UV, polusi, dan tekanan listrik serta metode evaluasi berbasis sifat permukaan, kimia, optik, dan kelistrikan.	Berfokus pada housing *silicone rubber* isolator komposit; belum membahas secara khusus retrofit RTV pada keramik dan integrasinya dengan analisis ekonomi pemeliharaan.

2.2 Landasan Teori

Penelitian mengenai isolator porselen yang dilapisi karet silikon RTV dengan *filler* sebelumnya dilakukan oleh Ilhan dkk (2018) pada IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation yang berjudul "*Comparative tests on RTV Silicone Rubber Coated Porcelain Suspension Insulators in a Salt-Fog Chamber*". Pada Makalah ini membahas penggunaan pelapis silikon vulkanisir suhu ruang (*RTV Silicone Rubber*) pada isolator kaca dan porselen, yang telah terbukti memberikan perlindungan optimal di lingkungan dengan tingkat polusi tinggi. Pengujian ketahanan pelapis terhadap *flashover* dan erosi dilakukan menggunakan uji kabut garam selama 1000 jam, dengan kriteria tidak ada *flashover* dan tidak ada erosi signifikan. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa tingkat erosi antara pelapis ATH dan silika hampir sama jika pengisi mencapai 50% berat (wt%). Namun, waktu hingga hilangnya sifat *hidrofobisitas* sementara belum diselidiki secara rinci. Dalam kondisi ekstrem seperti pembasahan terus-menerus dan polusi berat, hilangnya *hidrofobisitas* sementara menjadi faktor penting karena memengaruhi perkembangan arus bocor, pembentukan *dry band arching*, erosi, dan kemungkinan *flashover*[20].

Penelitian mengenai isolator porselen yang dilapisi karet silikon RTV oleh Suwarno dkk (2012) Pada penelitiannya yang berjudul "*Improving outdoor Insulator performances installed at coastal area using Silicone Rubber Coating*". Penelitian ini membahas tentang isolator luar ruangan terpapar pada iklim lingkungan seperti suhu dan kelembaban tinggi serta polusi dari pantai dan industri. Khususnya di Indonesia, terdapat sejumlah besar isolator luar ruangan yang terletak di daerah pesisir dengan polusi garam tinggi. Akibatnya, arus bocor dapat mengalir pada permukaan isolator dan dapat merusak permukaan isolator yang menyebabkan kegagalan isolator. Ada tiga solusi yang diperkenalkan untuk mengatasi masalah lingkungan pada permukaan isolator[21], [22] Yaitu pencucian isolator secara berkala, perbaikan desain isolator dan pelapisan dengan bahan anti air. Makalah ini melaporkan hasil eksperimen tentang peningkatan karakteristik isolator keramik tipe pin-post dan tipe batang kelas 20 kV dengan menggunakan lapisan silikon. Terdapat 2 jenis isolator yang

digunakan dalam percobaan. Isolator pertama adalah isolator keramik tipe pin-post kelas 20 kV. Isolator tersebut diproduksi oleh PT Twink Bandung, Indonesia dengan jarak rambat 500 mm. Isolator tersebut banyak digunakan pada jaringan PT. PLN. Isolator tersebut diuji di laboratorium dan dipasang di Gardu Induk Pantai Pangandaran. Gardu Induk Pangandaran terletak sekitar 500 m dari laut Indonesia di Pulau Jawa Barat bagian Selatan. Isolator kedua adalah isolator tipe batang yang digunakan pada transmisi 150 kV. Isolator tipe batang dipasang pada saluran transmisi 150 kV di daerah pesisir Ketewel di Pulau Bali, sekitar 400m dari Laut Indonesia. Kedua daerah pesisir tersebut sangat tercemar dan banyak terjadi *flashover* isolator di daerah tersebut. Sampel dilapisi dengan karet silikon vulkanisasi suhu kamar (RTV) dengan menggunakan nosel bertekanan tinggi dengan ketebalan 0,3 ± 0,05 mm.[1]

2.3 Isolator

Isolator pada sistem penyaluran merupakan salah satu komponen utama pada jaringan transmisi maupun jaringan distribusi. Fungsi utama isolator adalah mengamankan dan memisahkan konduktor kondisi bertegangan dari tiang atau menara penyangga, sehingga mencegah adanya koneksi antara fasa ke tanah yang dapat mengganggu kontinuitas aliran daya listrik.[23] Dalam aplikasi praktis, isolator yang terletak di dekat lingkungan pesisir menunjukkan risiko yang sangat tinggi. Hal ini disebabkan oleh kontaminasi isolator tersebut oleh polutan. Kontaminan ini biasanya menempel pada permukaan isolator dan sebagian besar terdiri dari partikel garam beserta tetesan air yang dihasilkan dari penguapan air laut. Karakteristik isolator yang digunakan dalam saluran transmisi udara tegangan tinggi berbeda dengan yang digunakan dalam jaringan distribusi tegangan menengah. Ketimpangan ini muncul dari perlunya isolator tegangan tinggi tidak hanya untuk menahan tegangan operasional sistem kelistrikan dan potensi kondisi tegangan lebih, tetapi juga untuk mengakomodasi tekanan mekanis yang diberikan oleh kabel konduktor dan isolator itu sendiri[24]
Berdasarkan dari bahannya, isolator terbagi menjadi beberapa jenis, yaitu:

1. Bahan Kaca menunjukkan kekuatan dielektrik yang tinggi, yang memungkinkannya menahan tegangan listrik yang besar. Jika terjadi gangguan struktural, isolator kaca cenderung retak, sehingga menjadi lebih mudah dikenali, yang meningkatkan efektivitas pemeriksaan *visual*[25]

2. Bahan Porselen dibuat dari campuran bahan keramik yang dipanaskan pada suhu tinggi, memiliki kekuatan mekanis yang tinggi, sehingga mampu menahan beban berat[26]
3. Bahan Polimer adalah jenis isolator modern yang terbuat dari bahan komposit, seperti karet silikon, epoksi, atau resin. Lebih tahan terhadap penuaan akibat radiasi UV dibanding isolator kaca dan porselen[27]

2.4 Jenis-jenis Isolator

Isolator pada sistem saluran transmisi pada tipe tiang *Concrete Pole* & *Steel Pole* menurut konstruksi dan kegunaanya terdiri dari[28], [29]:

1. Isolator Gantung (*Suspension*)
2. Isolator Tarikan (*Tension*)
3. Isolator Batang Panjang (*Long Rod*)
4. Isolator Polimer

Pada penelitian ini menggunakan isolator *longrod* yang terpasang pada saluran transmisi dengan tengangan 150 kV yang berada di Bali.

2.4.1 Isolator Gantung (*Suspension*)

Isolator gantung dipergunakan untuk isolator penegak jaringan kabel. Jumlah piringan isolator dikalibrasi sesuai dengan tegangan sistem yang ada di Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT). Dalam kategori isolator gantung, terdapat dua jenis yang berbeda: jenis clevis (*clevis type*) dan jenis bola dan soket (*ball and socked type*), keduanya terbuat dari porselen yang memiliki tutup (*cap*) besi cor di satu ujung dan pasak baja di ujung yang berlawanan, dengan kedua komponen terpasang erat pada porselen menggunakan semen berkualitas tinggi. Dimensi standar adalah piringan yang memiliki diameter 250 mm. Pada Gambar 2.1 menunjukkan isolator gantung (*suspension*)



Gambar 2.1 Isolator Gantung (*Suspension*)[30]

2.4.2 Isolator Tarikan (*Tension*)

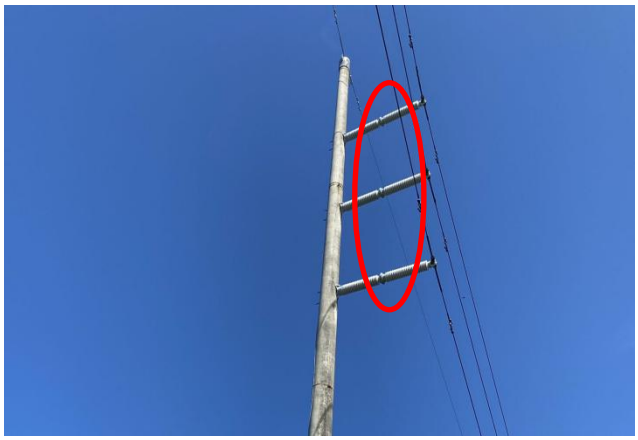
Isolator jenis tarikan atau *type tension*, berfungsi sebagai penahan gaya mekanis dari konduktor dan menjaga isolasi listrik antara konduktor dan menara transmisi. Pada tower tension dibutuhkan kawat penghubung antara kedua ujung kawat penghantar di kedua sisi cross arm, kawat ini disebut jumper. Bagian bawah tension clamp terdapat plat berbentuk lidah untuk menghubungkan kawat jumper tersebut. Sambungan ini harus kuat dan kencang.[31], [32] Pada Gambar 2.2 menunjukkan isolator tarikan (*Tension*)



Gambar 2.2 Isolator Tarikan (*Tension*)[33], [34]

2.4.3 Isolator Batang Panjang (*Longrod*)

Isolator *Longrod* adalah jenis isolator yang digunakan untuk sistem tegangan tinggi. Isolator ini memiliki bentuk memanjang seperti batang dan terbuat dari bahan yang sangat kuat, seperti porselen atau material komposit. Keunggulan isolator ini memiliki kemampuan yang baik dalam menahan beban mekanis, listrik serta lebih tahan terhadap kontaminasi lingkungan.[35] Gambar 2.3 menunjukkan isolator *longrod*



Gambar 2.3 Isolator *Longrod[36], [37]*

2.4.4 Isolator Polimer

Isolator Polimer adalah isolator listrik berbahan komposit yang dirancang untuk aplikasi jaringan transmisi dan distribusi tegangan menengah (MV) hingga tegangan tinggi (HV). Dibuat dari kombinasi *fiberglass reinforced epoxy core* dan pelindung luar berbahan *silicone rubber* / EPDM, isolator ini berfungsi untuk menopang konduktor sekaligus memberikan isolasi listrik yang andal terhadap struktur tower atau tiang. Dibandingkan isolator porselen atau keramik konvensional, *polymer insulator* memiliki keunggulan dalam hal berat yang lebih ringan, ketahanan terhadap polusi dan kelembapan, sifat *hydrophobic* tinggi, serta risiko pecah yang lebih rendah.[38] Gambar 2.4 menunjukkan isolator polimer



Gambar 2.4 Isolator Polimer

2.5 Karakteristik Isolator

Secara umum karakteristik isolator terbagi menjadi 2 yaitu elektrik dan mekanik[39]

1. Elektrik

Ditinjau dari segi ketenagalistrikan, antara isolator dan udara membentuk suatu sistem isolasi yang berfungsi untuk mengisolir suatu konduktor bertegangan dengan kerangka penyangga yang di tanahkan sehingga tidak ada arus listrik yang mengalir dari konduktor tersebut ke tanah. Terdapat dua kejadian yang menyebabkan sistem isolasi tersebut gagal dalam melaksanakan fungsinya. Kegagalan suatu isolator dapat terjadi karena bahan dielektrik pada isolator tembus listrik (*breakdown*) atau karena terjadinya lewat denyar udara yang di sepanjang permukaan isolator (*Creapage Distance*). Dalam kasus yang pertama, karakteristik listrik tidak dapat pulih seperti semula dan sebagian dari isolator mengalami kerusakan mekanis sehingga tidak dapat digunakan lagi dan harus diganti dengan yang baru. Pada peristiwa lewat denyar, kerusakan pada isolator hanya karena panas yang ditimbulkan busur api pada permukaan isolator. Jika rele proteksi bekerja, tegangan pada isolator tidak ada lagi, akibatnya busur api pun padam, dengan demikian isolator tidak akan sempat mengalami kerusakan. Semua isolator dirancang sedemikian hingga tegangan tembusnya jauh lebih tinggi dari tegangan lewat denyarnya. Dengan demikian, kekuatan dielektrik suatu isolator ditentukan oleh tegangan lewat denyarnya. Kekuatan dielektrik dan nilai tegangan yang dapat di pikul isolator tanpa terjadi lewat denyar dapat diperkirakan dari tiga karakteristik dasar isolator, yaitu tegangan lewat denyar bolak-balik pada keadaan kering,

tegangan lewat denyar bolak-balik pada keadaan basah, dan karakteristik tegangan yang diperoleh dari standar tegangan surja[40]. Gambar 2.5 menunjukkan efek *partial discharge* secara terus menerus



Gambar 2.5 Efek *partial discharge* secara terus menerus

2. Mekanik

Karakteristik mekanis suatu isolator ditandai dengan kekuatan mekanisnya, yaitu beban mekanis terendah yang mengakibatkan isolator tersebut rusak. Kekuatan mekanis ini ditentukan dengan membebani isolator dengan beban yang bertambah secara bertahap hingga isolator terlihat rusak. Kekuatan mekanis suatu isolator dinyatakan dalam tiga keadaan beban, yaitu kekuatan mekanis tarik, kekuatan mekanis tekan dan kekuatan mekanis tekuk[41]

2.6 Pelapisan dengan Room Temperature Vulcanizing (RTV) *Silicone Rubber*

RTV (*Room Temperature Vulcanizing*) *Silicone Rubber* adalah material elastomer berbasis silikon yang divulkanisasi pada suhu ruang. Material ini biasanya diaplikasikan dalam bentuk cair dan mengeras menjadi lapisan pelindung elastis setelah terpapar kelembapan di udara. RTV silikon sering digunakan sebagai pelapis isolator listrik karena kemampuannya dalam memberikan sifat *hidrofobik*, yaitu menolak air dari permukaan isolator. Hal ini membantu mencegah pembentukan jalur arus bocor yang dapat menyebabkan *flashover* pada isolator listrik di lingkungan luar yang terkontaminasi[42]. Gambar 2.6 menunjukkan sifat *hidrofibik* pada RTV *silicone rubber* isolator keramik *longrod*

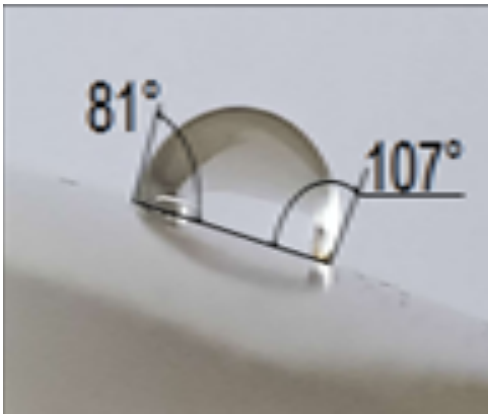


Gambar 2.6 Sifat *hidrofibik* pada RTV *silicone rubber* isolator keramik *longrod*

2.6.1 Karakteristik RTV

RTV memiliki sifat *hidrofobik* yang tinggi, yang memungkinkan air membentuk tetesan di permukaan isolator. Hal ini mencegah pembentukan film air yang *konduktif*. Jika *hidrofobisitas* sementara hilang karena paparan kelembapan atau polusi, sifat ini dapat pulih melalui migrasi molekul berat rendah (*low molecular weight*, LMW) dari lapisan dalam ke permukaan. Lapisan RTV *silicone rubber* efektif mengurangi dampak kontaminasi dari partikel garam, debu, atau bahan kimia lainnya, yang sering ditemukan di lingkungan pantai atau industri[43] RTV *silicone rubber* memiliki ketahanan yang baik terhadap erosi akibat arus bocor dan lengkungan listrik kering (*dry band arcing*). Sifat elastis RTV *silicone rubber* membuatnya tahan terhadap deformasi mekanis dan tetap melekat dengan baik pada substrat isolator. Material ini stabil dalam rentang suhu tinggi hingga rendah, sehingga cocok untuk lingkungan luar yang ekstrem. RTV *silicone*

rubber tahan terhadap paparan sinar UV, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi luar ruangan yang terpapar sinar matahari secara langsung[44] Gambar 2.7 menunjukkan sifat *hidrofobik* pada lapisan *silicone rubber*



Gambar 2.7 Sifat *Hidrofobik* Pada Lapisan *Silicon Rubber*

2.6.2 Klasifikasi Material Pelapis dan Ketahanan RTV *Silicone Rubber*

Material yang digunakan untuk meningkatkan kinerja permukaan isolator dapat dibedakan berdasarkan mekanisme perlindungan dan tingkat kematangan aplikasinya. Klasifikasi diperlukan agar RTV *silicone rubber* yang menjadi objek penelitian tidak disamakan dengan *grease silikon*, material polimer utuh, maupun *coating nanokomposit* yang masih berkembang. CIGRE TB 837 menempatkan RTV *silicone rubber* sebagai solusi yang telah digunakan lebih dari tiga dekade untuk meningkatkan kinerja isolator pada lingkungan berpolusi, sedangkan IEEE Std 1523-2018 secara khusus membahas aplikasi, pemeliharaan, penuaan, erosi, kehilangan *hidrofobisitas* sementara, dan evaluasi lapangan RTV pada isolator keramik[4],[45]. Tabel 2.2 menunjukkan klasifikasi material RTV *silicone rubber*

Tabel 2.2 Klasifikasi material RTV *silicone rubber*

Klasifikasi material	Karakteristik utama	Ketahanan dan keterbatasan	Relevansi penelitian	Rujukan
Silicone grease	Lapisan *hidrofobik* semi-padat pada permukaan keramik.	Dapat meningkatkan ketahanan polusi, tetapi memerlukan pembersihan/penggantian berkala karena dapat menangkap kontaminan.	Pembanding konsep perlindungan permukaan; bukan objek uji.	[45]
RTV *silicone rubber*	Elastomer silikon yang membentuk lapisan tipis permanen setelah vulkanisasi pada suhu ruang.	Tahan cuaca dan polusi serta memiliki transfer *hidrofobisitas*; dapat mengalami penuaan, erosi, tracking, retak, chalking, atau kehilangan *hidrofobisitas* sementara.	Objek utama penelitian sebagai retrofit keramik eksisting.	[4], [45]
RTV/PRTV termodifikasi	RTV dengan filler/penguat seperti ATH, silika, PTFE atau aditif nano.	Dapat meningkatkan tracking-erosi, *hidrofobisitas*, UV, atau karakter termal; performa tergantung formulasi dan kualitas aplikasi.	Menunjukkan perkembangan material, tetapi tidak disamakan dengan RTV eksisting pada objek penelitian.	[43], [9]
Coating superhidrofobik/nanokomposit	Permukaan berenergi rendah dengan mikro/nanostruktur atau partikel fungsional.	Menawarkan sudut kontak tinggi dan self-cleaning, tetapi ketahanan jangka panjang serta kesiapan implementasi lapangan masih perlu validasi.	Referensi perkembangan teknologi, bukan dasar klaim hasil lapangan penelitian.	[6], [12]

Ketahanan RTV tidak dinilai hanya dari kemampuan menolak air. Dalam pelayanan jangka panjang, kondisi *coating* dipengaruhi oleh kualitas persiapan permukaan, ketebalan dan adhesi lapisan, radiasi UV, kelembapan, garam, polutan, korona, *dry-band arcing*, serta siklus termal. Karena itu, RTV yang masih *hidrofobik* belum tentu bebas dari *degradasi* mekanis, dan sebaliknya kehilangan *hidrofobisitas* sementara tidak selalu berarti lapisan harus langsung diganti. IEEE Std

1523-2018 dan CIGRE TB 837 menekankan evaluasi kondisi lapangan, termasuk inspeksi erosi/*tracking*, perubahan permukaan, adhesi dan pemulihan *hidrofobisitas* sebelum menentukan pembersihan, perbaikan lokal, *re-coating* atau penggantian [4],[46].

2.6.3 Proses Penuaan, *Degradasi* Permukaan, dan Erosi RTV *Silicone Rubber* Selama Operasi

Penuaan pada RTV *silicone rubber* merupakan perubahan secara bertahap pada sifat fisik, kimia, dan kelistrikan lapisan selama masa operasi. Proses ini tidak dipengaruhi oleh satu faktor saja, tetapi merupakan akumulasi tekanan lingkungan dan listrik, seperti radiasi ultraviolet, temperatur, kelembapan, kontaminasi garam, korona, arus bocor, serta *dry-band arcing*. CIGRE TB 837 dan IEEE Std 1523-2018 menegaskan bahwa umur lapisan sangat dipengaruhi formulasi material, kualitas aplikasi, geometri isolator, dan tingkat tekanan lingkungan sehingga umur layanan RTV tidak dapat ditetapkan dengan satu angka yang berlaku untuk seluruh lokasi[4],[45]. Gambar 2.8 menunjukkan Lapisan RTV *Silicon Rubber* mengalami *degradasi*



Gambar 2.8 Lapisan RTV *Silicon Rubber* mengalami *degradasi*

Pada tingkat permukaan, proses penuaan dapat memicu oksidasi dan perubahan jaringan polimer, berkurangnya komponen siloksana bermassa molekul rendah, peningkatan kekerasan, kekasaran permukaan, serta munculnya *chalking*, retak *mikro*, lubang, atau pengelupasan. Perubahan tersebut dapat menurunkan kemampuan transfer dan pemulihan *hidrofobisitas*. Pada penelitian di lapangan

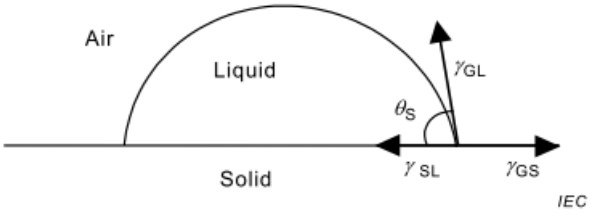
penuaan dapat dipercepat dengan menunjukkan bahwa penurunan *hidrofobisitas* bersama perubahan struktur kimia dan sifat *dielektrik*, sehingga kondisi lapisan tidak cukup dinilai hanya dari tampilan visual[11], [17],[19].

Hasil pengujian yang menunjukkan perbaikan arus bocor, korona, dan kenaikan suhu, tetapi tidak diikuti peningkatan tahanan isolasi, perlu diinterpretasikan bersama kemungkinan perubahan kondisi lapisan akibat umur dan paparan lingkungan. Oleh sebab itu, keputusan penerapan RTV sebaiknya disertai inspeksi visual terhadap retak, *chalking*, erosi, *tracking* dan pengelupasan, verifikasi hidrofobisitas, pemeriksaan adhesi atau ketebalan lapisan bila memungkinkan, serta pengukuran ulang parameter listrik secara berkala. Temuan *degradasi* yang masih lokal dapat menjadi dasar perbaikan atau *re-coating*, sedangkan kerusakan luas atau penurunan performa yang konsisten menjadi pertimbangan untuk penggantian isolator[4],[45].

2.6.4 Pembentukan Sudut Kontak

Pengukuran sudut kontak pada substrat isolasi dilakukan untuk memastikan karakteristik permukaan material, khususnya sifat *hidrofobik* atau *hidrofilik*nya. Karakteristik *hidrofobik* merupakan sifat bawaan material isolasi, yang memungkinkannya untuk secara efektif menolak air bahkan dalam kondisi terkontaminasi. Sifat *hidrofobik* paling berguna untuk isolasi *outdoor* karena dalam keadaan basah atau lembab tidak akan terbentuk lapisan air yang terus-menerus antara ujung-ujung isolator, sehingga permukaan isolator tetap memiliki konduktivitas yang rendah, akibatnya arus bocor sangat kecil. Sudut kontak merupakan sudut yang dibentuk antara permukaan bahan uji dengan air destilasi yang diteteskan ke permukaan bahan uji[47]. Untuk metode sudut kontak, ada dua jenis pengukuran menurut standar IEC 62073:2016 dilakukan [48]

- Sudut kontak statis (θ_s): Mengukur sudut yang terbentuk pada tetesan cairan yang diletakkan pada permukaan horizontal. Gambar 2.9 menunjukkan Sudut Kontak Statis *Cigre*



Gambar 2.9 Definisi Sudut Kontak Statis *Cigre*

$$\gamma_{GL} \cos \theta_s = \gamma_{GS} - \gamma_{SL} \quad \text{.....(1)}$$

Keterangan:

θ_s : Sudut Kontak statik dari tepi tetesan cairan dengan permukaan padat.

γ_{GL} **:** Tegangan permukaan antara gas dan cair

γ_{GS} **:** Tegangan permukaan antara gas dan padat

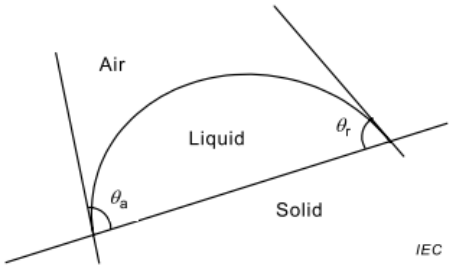
γ_{SL} **:** Tegangan permukaan antara padat dan cair

- Sudut kontak dinamis (*dynamic contact angle*): mengukur sudut tetesan pada permukaan miring yang menunjukkan dua sudut berbeda.

a) Sudut maju (θ_a): Sudut yang terbentuk saat tetesan mulai maju.

b) Sudut mundur (θ_r): Sudut yang terbentuk saat tetesan mulai surut.

Gambar 2.10 menunjukkan definisi sudut kontak dinamis



Gambar 2.10 Definisi Sudut Kontak Dinamis[49]

Sudut kontak sangat penting untuk menilai hidrofobisitas permukaan, di mana sudut kontak yang lebih tinggi menunjukkan sifat *hidrofobik* (menolak air), sedangkan sudut kontak rendah menunjukkan

sifat hidrofilik (menyerap air). Dalam pengukuran pada permukaan isolator, sudut kontak dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi permukaan akibat polusi, erosi, atau *degradasi* lainnya. Pada Tabel 2.3 menunjukkan Kriteria Penentuan Kelas *Hidrofobisitas* menurut standar IEC 62073:2016

Tabel 2.3 Kriteria Penentuan Kelas *Hidrofobisitas* (HC) IEC 62073:2016

No.	Deskripsi	Sudut Kontak Surut $\boldsymbol{\theta_r}$
1	Hanya terbentuk tetesan air diskrit. Bentuknya saat dilihat tegak lurus permukaan hampir seluruhnya bulat	>60°
2	Hanya terbentuk tetesan air diskrit. Sebagian besar permukaan ditutupi tetesan dengan bentuk yang tetap teratur tetapi sedikit menyimpang dari bentuk bulat sempurna.	40° Hingga 60°
3	Hanya terbentuk tetesan air diskret. Sebagian besar permukaan ditutupi tetesan dengan bentuk yang tidak teratur.	10° hingga 40°
4	Terdapat tetesan air diskret dan jejak basah dari aliran atau lapisan air yang teramati. Kurang dari 10% dari area yang diamati tertutup oleh aliran atau lapisan air.	0° hingga 10°
5	Terdapat tetesan air diskret dan jejak basah dari aliran atau lapisan air yang teramati. Lebih dari 10% tetapi kurang dari 90% dari area yang diamati tertutup oleh aliran atau lapisan air.	0°hingga 10°
6	Lebih dari 90% tetapi kurang dari 100% dari area yang diamati tertutup oleh aliran atau lapisan air (masih terdapat area kecil yang tidak basah).	0° hingga 5°
7	Lapisan air kontinu terbentuk di seluruh area yang diamati.	0°

2.7 Pemeliharaan Isolator pada SUTT 150 kV

Pemeliharaan peralatan transmisi merupakan bagian dari pengelolaan aset untuk menjaga agar peralatan tetap bekerja sesuai karakteristik desain dan mendukung keandalan penyaluran tenaga listrik. Buku Pedoman Pemeliharaan *Saluran Udara Tegangan Tinggi dan Ekstra Tinggi* (SUTT/SUTET) PDM/STT/10:2014, sebagai lampiran Keputusan Direksi PT PLN (Persero) No. 0520-1.K/DIR/2014, menempatkan hasil pemeriksaan dan asesmen kondisi sebagai dasar penyusunan tindak lanjut pemeliharaan. Pedoman tersebut juga mengarahkan pola pemeliharaan PLN agar tidak hanya bergantung pada interval waktu, tetapi memberi porsi lebih besar pada pemeliharaan berbasis kondisi sehingga keputusan dapat disesuaikan dengan kondisi aktual peralatan[50].

Pada SUTT/SUTET, pedoman PLN mencakup pemeliharaan *preventif*, *prediktif*, *pascagangguan*, dan *korektif*. Pemeliharaan rutin dilakukan melalui *in-service visual inspection*, *ground patrol*, dan *climb-up inspection*, sedangkan pemeliharaan prediktif memanfaatkan hasil pengukuran kondisi, antara lain termovisi dan pengujian lain sesuai kebutuhan. Hasil pemeliharaan selanjutnya dievaluasi untuk menghasilkan rekomendasi tindak lanjut[50]. Keterkaitan bentuk pemeliharaan tersebut dengan indikator yang digunakan pada penelitian ini dirangkum pada Tabel 2.4. menunjukkan pemeliharaan SUTT/SUTET dan keterkaitannya dengan penelitian

Tabel 2.4 Pendekatan pemeliharaan SUTT/SUTET dan keterkaitannya dengan penelitian

Pendekatan pemeliharaan	Bentuk kegiatan pada pedoman PLN	Tujuan umum	Keterkaitan dengan penelitian
Preventif / rutin	*In-service visual inspection*, *ground patrol*, dan *climb-up inspection*.	Mendeteksi perubahan kondisi fisik dan anomali yang dapat diamati.	Mendukung pemeriksaan kondisi visual isolator dan lapisan RTV.
Prediktif / berbasis kondisi	*In-service measurement*, *thermovisi*, *puncture insulator*, dan pengujian sesuai kebutuhan.	Menilai kondisi aktual sebagai dasar penentuan tindakan pemeliharaan.	Sejalan dengan penggunaan parameter teknis sebagai indikator kondisi.
Pascagangguan	Pemeriksaan setelah terjadi gangguan pada saluran atau komponen.	Mengidentifikasi kondisi dan	Data gangguan digunakan untuk menghitung biaya

Pendekatan pemeliharaan	Bentuk kegiatan pada pedoman PLN	Tujuan umum	Keterkaitan dengan penelitian
		penyebab setelah kejadian gangguan.	gangguan dan manfaat keandalan.
Korektif	Perbaikan atau penggantian yang dilakukan secara terencana maupun tidak terencana.	Memulihkan fungsi peralatan yang memerlukan tindakan.	Menjadi konteks keputusan: dipertahankan, *retrofit* RTV, dipantau, atau diganti.

Dalam penelitian ini, pendekatan berbasis kondisi digunakan untuk membaca tahanan isolasi, arus bocor, intensitas korona, dan kenaikan suhu sebagai indikator kondisi teknis. pelapisan RTV sebagai satu-satunya tindakan pemeliharaan; karena itu, RTV ditempatkan sebagai alternatif *retrofit* yang kelayakannya diuji menggunakan data lapangan, sedangkan aplikasi dan evaluasi lapisan merujuk pada pedoman IEEE std 1523-2018 terkait RTV dan pengelolaan isolator terkontaminasi[4],[26]. Tabel 2.5 menunjukkan kriteria evaluasi lapangan berdasarkan IEE std 1523-2018

Tabel 2.5 Kriteria Evaluasi Lapangan IEEE std 1523-2018

No.	Aspek evaluasi	Kegunaan
1	Inspeksi visual	Melihat retak, pengelupasan, erosi, tracking, perubahan permukaan
2	*Hidrofobisitas*	Menilai kemampuan *coating* menolak pembasahan air
3	*Corona / electrical discharge*	*Corona* merupakan faktor parameter yang memengaruhi umur *coating*
4	Erosi dan *tracking*	Menilai *degradasi* akibat aktivitas listrik permukaan
5	*Aging*/*degradasi*	Mengevaluasi penurunan kondisi *coating* selama operasi
6	Kontaminasi lingkungan	RTV *Silicone Rubber* digunakan untuk meningkatkan performa isolator pada lingkungan tercemar
7	Arus bocor	Menunjukkan aktivitas konduksi pada permukaan isolator
8	Temperatur	Mendeteksi peningkatan aktivitas

No.	Aspek evaluasi	Kegunaan
	permukaan	suhu listrik/pemanasan abnormal pada permukaan isolator
9	Tahanan isolasi	Menilai kemampuan isolasi terhadap dielektrik, tegangan tembus, dan arus berlebih.

Hasil asesmen teknis kemudian dihubungkan dengan biaya pemeliharaan, potensi biaya gangguan, dan *Life Cycle Cost* melalui *Overall Health Index*, *Economic Index*, dan *Feasibility Index*. Dengan demikian, pembahasan pemeliharaan menjadi landasan langsung bagi model evaluasi kelayakan berbasis indikator pemeliharaan yang digunakan dalam penelitian.

2.8 Kesenjangan dan Posisi Penelitian

Hasil telaah terhadap penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kajian mengenai pelapis RTV masih banyak diarahkan pada sifat material, mekanisme *hidrofobisitas*, penuaan, ketahanan terhadap polusi, serta pengujian performa kelistrikan dalam kondisi laboratorium[9], [51], [52]. Penelitian lapangan yang mempertemukan isolator keramik berlapis RTV, isolator keramik tanpa pelapisan, dan isolator polimer pada lokasi transmisi yang sama masih terbatas. Di sisi lain, informasi teknis tersebut belum banyak diterjemahkan menjadi dasar keputusan pemeliharaan yang mempertimbangkan biaya siklus hidup dan potensi konsekuensi ekonomi apabila *degradasi* berkembang menjadi gangguan. Kesenjangan ini menjadi titik awal penelitian pada SUTT 150 kV Sanur–Gianyar line 2.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, kebaruan penelitian dirumuskan pada tiga unsur yang saling berkaitan. Pertama, penelitian menyusun kerangka evaluasi kelayakan berbasis indikator pemeliharaan dengan membandingkan tiga kelompok isolator pada lima lokasi tower yang sama sehingga hasil teknis dapat dibaca dalam konteks kondisi lingkungan yang relatif setara. Kedua, empat indikator teknis berupa tahanan isolasi, arus bocor, intensitas korona, dan kenaikan suhu diintegrasikan melalui *Overall Health Index* (OHI), sedangkan konsekuensi ekonomi pemeliharaan diringkas melalui *Economic Index (*EI) yang bersumber dari *Life Cycle Cost* dan biaya gangguan. Ketiga, kedua indeks

tersebut digabungkan menjadi *Feasibility Index* (FI) untuk menghasilkan prioritas tindakan pemeliharaan yang dapat ditelusuri, yaitu pelapisan RTV secara bersyarat pada isolator keramik yang masih memadai atau penggantian dengan isolator polimer ketika kebutuhan keandalan lebih tinggi. Dengan demikian, penelitian ini fokus pada kerangka pengambilan keputusan teknis-ekonomis yang menghubungkan kondisi lapangan dengan konsekuensi biaya pemeliharaan.

2.9 Metode Analisis Data

Data analisis dilakukan dengan cara mengkomparasi tipe isolator yang terpasang pada Transmisi SUTT 150 kV Sanur - Gianyar Line 2 yaitu isolator *longrod* 150 kV. Analisis data dilakukan dalam dua bagian, yaitu analisis teknis komparatif dan analisis ekonomi. Analisis teknis membandingkan nilai setiap parameter pada kelompok isolator berlapis RTV, tanpa pelapisan, dan polimer. Pasangan data ditentukan berdasarkan nomor tower yang sama. Analisis ekonomi membandingkan skenario pembersihan rutin isolator keramik, pelapisan RTV, dan penggantian menggunakan isolator polimer pada horizon 15 tahun[53].

2.9.1 Analisis Komparatif Teknis

Besarnya pengaruh pelapisan dihitung dengan mempertimbangkan arah indikator. Untuk parameter yang semakin kecil semakin baik, seperti arus bocor, intensitas korona, dan kenaikan suhu, persentase perbaikan dihitung sebagai :

$$Perbaikan\ (\%) = ((X\ tanpa\ pelapisan - X\ berlapis) / X\ tanpa\ pelapisan) \times 100\% \quad (2)$$

Untuk parameter yang semakin besar semakin baik, seperti tahanan isolasi, persentase perubahan dihitung sebagai :

$$Perubahan\ (\%) = ((X\ berlapis - X\ tanpa\ pelapisan) / X\ tanpa\ pelapisan) \times 100\% \quad (3)$$

Kenaikan suhu dihitung menggunakan $\Delta T = T$ permukaan $- T$ lingkungan agar hasil antar lokasi dapat dibandingkan secara adil. Nilai negatif dipertahankan sebagai data observasi dan dibahas sebagai kemungkinan variasi sudut pengukuran, emisivitas, angin, atau ketidakpastian instrumen.

2.9.2 Uji Statistik Komparatif dan Analisis Faktor Eksploratif

Karena jumlah pasangan data hanya lima tower, analisis inferensial dilakukan secara eksploratif menggunakan uji Wilcoxon *signed-rank* berpasangan. Hipotesis satu arah digunakan untuk menguji apakah arus bocor, korona, dan ΔT kelompok berlapis lebih rendah daripada kelompok tanpa pelapisan. Untuk tahanan isolasi, arah pengujian disesuaikan dengan prinsip semakin tinggi semakin baik. Taraf signifikansi ditetapkan $\alpha = 0{,}05$, namun interpretasi tetap menekankan besar efek dan konsistensi antartower karena ukuran sampel kecil. Selain uji Wilcoxon, dilakukan analisis faktor eksploratif secara terpisah untuk setiap jenis isolator dengan empat variabel: rata-rata tahanan isolasi, rata-rata arus bocor, intensitas korona, dan ΔT pada lima tower. Data distandarkan menjadi z-score, kemudian diekstraksi menggunakan pendekatan *principal component* sebagai bentuk eksplorasi struktur korelasi dan dirotasi dengan *varimax.* Faktor dengan *eigenvalue* di atas 1 dipertahankan sebagai ringkasan dimensi dominan. KMO dan *Bartlett's* test tetap dihitung sebagai diagnosis kelayakan matriks korelasi. Karena setiap kelompok hanya memiliki lima observasi untuk empat variabel, hasil analisis faktor per jenis isolator diperlakukan sebagai analisis eksploratif/deskriptif dan tidak digunakan untuk menetapkan bobot OHI. Interpretasi utama tetap didasarkan pada data pengukuran, uji berpasangan, dan konsistensi kondisi lapangan[18].

2.9.3 Analisis *Life Cycle Cost*

Life Cycle Cost menghitung seluruh biaya relevan selama horizon analisis dalam nilai kini. Persamaan umum yang digunakan adalah :

Dalam penelitian ini komponen LCC dibedakan menjadi: (1) investasi awal, yaitu biaya *coating* RTV *silicone rubber* atau pengadaan/pemasangan polimer; (2) biaya pemeliharaan, yaitu biaya pembersihan atau tindakan khusus yang berbeda antar alternatif; (3) potensi biaya gangguan, yang secara konseptual dapat terdiri atas nilai energi tidak tersalurkan dan biaya pemulihan/material; serta (4) nilai sisa pada akhir horizon. Pada *base case* penelitian, potensi biaya gangguan tidak dimonetisasi karena tidak terdapat kejadian aktual yang dapat digunakan sebagai arus kas. Biaya inspeksi yang sama untuk semua alternatif diperlakukan sebagai *common cost*, sedangkan biaya pengadaan isolator keramik yang telah terjadi sebelum keputusan investasi diperlakukan sebagai *sunk cost*.

$$LCC = C_0 + \Sigma[(C\ pemeliharaan,t + C\ gangguan,t + C\ penggantian,t) / (1 + r)^t] - RV_n / (1 + r)^n \quad \text{.....(4)}$$

C_0 adalah biaya awal, r adalah tingkat diskonto, t adalah tahun terjadinya biaya, n adalah horizon analisis, dan RV_n adalah nilai sisa pada akhir horizon. Analisis dasar menggunakan horizon 15 tahun dan tingkat diskonto 8%, kemudian diuji pada 6% dan 10%.

2.9.4 Indikator Kelayakan Ekonomi

Kelayakan ekonomi dinilai menggunakan NPV penghematan = LCC skenario dasar − LCC alternatif; BCR = nilai kini biaya yang dapat dihindari / nilai kini biaya alternatif; IRR sebagai tingkat diskonto yang membuat NPV penghematan sama dengan nol; simple payback period; discounted payback period;

Equivalent Annual Cost (EAC) = LCC / present value annuity factor. ...(5)

Alternatif dinilai ekonomis apabila NPV penghematan positif, BCR lebih besar dari satu, dan IRR lebih besar daripada tingkat diskonto yang digunakan. Perhitungan NPV, IRR, dan PBP dilakukan secara *incremental* antara kondisi *before* dan *after.* Kondisi *before* adalah dimana mempertahankan isolator keramik *longrod* tanpa pelapisan dengan biaya pembersihan rutin yang akan terus dijalankan selama isolator *longrod* dioperasikan. Kondisi *after* adalah investasi pelapisan RTV *silicone rubber* atau penggantian dengan isolator polimer. Arus kas manfaat utama berasal dari biaya pemeliharaan langsung yang dapat dihindari. Karena tidak terdapat gangguan isolator yang tercatat pada objek penelitian, potensi biaya gangguan dianalisis secara terpisah sebagai skenario sensitivitas dan tidak digunakan untuk membentuk IRR, NPV, atau PBP utama.

2.9.5 Analisis Potensi Biaya Gangguan

Biaya potensi gangguan dihitung berdasarkan energi tidak tersalurkan dan biaya pemulihan. Format perhitungan yang digunakan adalah :

$$C\ potensi = N\ sskenario \times [(P\ referensi \times t\ skrenario \times VOLL\ skenario) + C\ pemulihan + C\ kerusakan\ peralatan + penalti] \quad \text{.....(6)}$$

Nilai N skenario ditetapkan sebesar 1, 3, 5, dan 6 kejadian per tahun untuk mewakili tingkat sensitivitas rendah, sedang, tinggi, dan ekstrem. Angka tersebut bukan riwayat gangguan aktual. Hasil simulasi hanya digunakan untuk melihat rentang potensi biaya dan tidak dimasukkan ke dalam NPV, IRR, PBP, EI, maupun FI utama. Manfaat pengurangan gangguan baru dapat dimonetisasi apabila tersedia data operasi *before-after* yang dapat memverifikasi perubahan frekuensi dan penyebab gangguan setelah tindakan pemeliharaan.

2.9.6 Integrasi Indeks Teknis, Ekonomi, dan penuaan Lapangan (OHI)

Health Index (HI) setiap parameter dihitung melalui normalisasi min–maks pada seluruh observasi. Untuk indikator yang semakin besar semakin baik, digunakan HI = 100 × (x − x_min)/(x_max − x_min). Untuk indikator yang semakin kecil semakin baik, digunakan

HI = 100 × (x_max − x)/(x_max − x_mi .....(7)

Overall Health Index (OHI) dihitung dari bobot 25% HI tahanan isolasi, 25% HI intensitas korona, 30% HI arus bocor, dan 20% HI kenaikan suhu.

Economic Index (EI) disusun dari normalisasi *Life Cycle Cost base case* yang menggunakan biaya langsung, dengan nilai tertinggi diberikan kepada alternatif yang memiliki LCC terendah. Skenario potensi biaya gangguan tidak dimasukkan ke EI utama karena tidak merepresentasikan kejadian aktual. Komponen tersebut baru dapat digunakan setelah tersedia data *before-after* yang dapat mengaitkan perubahan frekuensi gangguan dengan tindakan pemeliharaan *Feasibility Index* dihitung menggunakan FI = 0,70 OHI + 0,30 EI. Kategori keputusan ditetapkan sebagai tidak layak untuk FI < 40, kurang layak untuk 40 ≤ FI < 60, cukup layak untuk 60 ≤ FI < 80, dan layak untuk FI ≥ 80. EI dalam penelitian ini merupakan skor biaya relatif untuk integrasi indeks dan tidak menggantikan kriteria absolut NPV, BCR, IRR, dan PBP.

Verifikasi lapangan OHI dilakukan dengan empat tahap. Pertama, kategori OHI dibandingkan dengan inspeksi visual terhadap retak, erosi, tracking, chalking, pengelupasan, dan kondisi fitting. Kedua, *hidrofobisitas* diperiksa sesuai IEC TS 62073:2016 sebagai validasi kondisi permukaan[5]. Ketiga, parameter yang

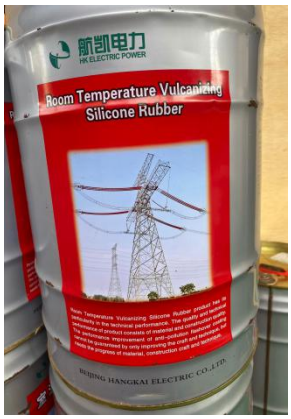
menghasilkan HI ekstrem atau tidak konsisten dilakukan pengukuran ulang pada tower yang sama dengan kondisi operasi dan lingkungan dicatat. Keempat, hasil OHI dinyatakan terverifikasi apabila arah kategorinya konsisten dengan sekurang-kurangnya dua bukti lapangan independen; jika tidak konsisten, OHI tidak langsung digunakan untuk keputusan akhir dan dilakukan pemeriksaan ulang. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip evaluasi lapangan RTV pada IEEE Std 1523-2018[4].

2.10 Material Penelitian

Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian dari isolator *longrod* untuk mengukur kemampuan isolator dalam menahan tegangan tinggi tanpa terjadi kerusakan atau gangguan listrik (seperti *arcing* atau *flashover*). Sementara pengujian non-dielektrik mengevaluasi ketahanan pelapisan karet silikon terhadap *hidrofobisitas* dan suhu pada permukaan isolator. Hasil pengujian ini penting untuk memastikan keandalan isolator dalam sistem transmisi tegangan tinggi, terutama di lingkungan dengan tingkat polusi tinggi. Berikut bahan material yang digunakan dalam pelapisan isolator *longrod* :

2.10.1 RTV *Silicone Rubber*

RTV *Silicone Rubber* adalah jenis elastomer berbasis silikon yang dapat mengeras (*vulkanisasi*) pada suhu ruangan tanpa memerlukan pemanasan tambahan. RTV *silicone rubber* merupakan bahan yang fleksibel, tahan lama, dan memiliki sifat isolasi yang sangat baik, sehingga sering digunakan untuk pelapisan isolator listrik pada sistem transmisi tegangan tinggi. Jenis karet silikon yang digunakan dalam penelitian ini adalah RTV *silicone rubber* tipe 107 sebagai material dasar. Material tersebut di dapatkan dari *Beijing Hangkai Electric Co., LTD, China.* Berikut pada Gambar 2.11 menunjukkan RTV *silicone rubber* tipe 107.



Gambar 2.11 RTV Silicone Rubber tipe 107

Berikut adalah komposisi dari RTV *silicone rubber* yang digunakan dalam penelitian ini. Tabel 2.6 menunjukkan komposisi material *silicone rubber*

Tabel 2.6 Komposisi material RTV *silicone rubber*

Chemical Name	***CAS Number***	***Molecular Formula***	***% by weight***
Silicone rubber, methyl RTV 107	63148-60-7	HO-Si $(CH_3)_2O$ (Si $(CH_3)_2O$) nSi $(CH_3)_2$-OH	10-50
Aluminum hydroxide	21645-51-2	$Al(OH)_3$	15-40
Tetrachloroethylene	127-18-4	C_2Cl_4	15-24
Silicon dioxide	14464-46-1	SiO_2	1-3
Iron oxide	1332-37-2	Fe_2O_3	1-2
Titanium dioxide	1317-80-2	TiO_2	1-2
Methyltris (methylethylketoxime)silane	22984-54-9	$C13H_{27}N_3O_3Si$	1-2
3-Aminopropyltriethoxysilane	919-30-2	$C_9H_{23}NO_3Si$	0.1-0.2
3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane	2530-83-8	$C_9H_{20}O_5Si$	0.1-0.2
Dibutlyn dilaurate	77-58-7	$C_{32}H_{64}O_4Sn$	0.001-0.002

Berdasarkan Tabel 2.6 Komposisi material RTV *silicone rubber*, komposisi kimia pada RTV *Silicone Rubber* menunjukkan sinergi antara berbagai komponen untuk menghasilkan material dengan sifat mekanik, termal, dan kimia yang optimal. *Silicone rubber*, sebagai komponen utama, memberikan fleksibilitas dan *hidrofobisitas* tinggi, yang penting untuk menjaga kinerja isolator dalam lingkungan dengan tingkat polusi tinggi. Penambahan *aluminum hydroxide* dan *silicon dioxide* sebagai pengisi meningkatkan ketahanan terhadap erosi, tracking, dan stabilitas termal, sehingga memperpanjang umur pelapis. Pelarut seperti *tetrachloroethylene* digunakan untuk memastikan homogenitas formulasi, sementara pengikat silang seperti *methyltris (methylethylketoxime) silane* memperkuat struktur material selama vulkanisasi. *Titanium dioxide* dan *iron oxide* memberikan perlindungan terhadap sinar UV, meningkatkan daya tahan pelapis dalam aplikasi luar ruangan. Selain itu, adhesi seperti 3-*aminopropyltriethoxysilane* dan 3-*glycidoxypropyltrimethoxysilane* memastikan daya lekat yang kuat pada substrat, mencegah delaminasi pelapis di lingkungan ekstrem. Secara keseluruhan, formulasi RTV *Silicone Rubber* ini dirancang untuk aplikasi pada isolator tegangan tinggi, memberikan perlindungan yang luar biasa terhadap polusi, kelembapan, dan sinar UV, sekaligus memastikan keandalan sistem transmisi listrik. Kombinasi bahan kimia yang tepat menjadikan pelapis ini ideal untuk operasi jangka panjang dalam berbagai kondisi lingkungan.