

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

Penulis	(Falih Hibatullah, 2024)
Metode	Penelitian ini berpijak pada teori koordinasi isolasi dan sistem proteksi tenaga listrik. Fokus utamanya adalah penggunaan Lightning Arrester (LA) jenis Metal Oxide (ZnO) untuk melindungi transformator daya.
Hasil	Parameter evaluasi yang digunakan meliputi: Koordinasi Proteksi, Perhitungan jarak maksimal penempatan LA terhadap transformator berdasarkan Basic Insulation Level (BIL). Standar Kelayakan, Merujuk pada standar PLN (Buku Pedoman Pemeliharaan LA) dan standar internasional (IEC 60099-4), yang menetapkan batas arus bocor resistif (LCM) < 90% dan perbedaan suhu (thermovisi) < 10°C.
Gap	Celah penelitian yang diisi oleh studi ini adalah Digitalisasi Analisis Terintegrasi. Perbedaan mendasar penelitian ini dengan penelitian terdahulu terletak pada pengembangan aplikasi "Analyzer Lightning Arrester" berbasis MATLAB.

Penulis	(Agung Suardi, 2023)
Metode	Penelitian ini didasarkan pada teori mengenai sistem proteksi tenaga listrik, khususnya penggunaan <i>Lightning Arrester</i> (LA) sebagai pengaman utama gardu induk terhadap surja petir. Secara teoretis, LA berfungsi sebagai isolator pada tegangan normal dan berubah menjadi konduktor berhambatan rendah saat terjadi lonjakan tegangan untuk mengalirkan arus petir ke tanah.
Hasil	Pemeliharaan LA dalam studi ini merujuk pada Keputusan Direksi PT PLN (Persero) Nomor 0520-2.K/DIR/2014 yang membagi inspeksi menjadi tiga level. Berdasarkan tinjauan pustaka yang ada, penelitian-penelitian sebelumnya telah berhasil memetakan kondisi teknis peralatan berdasarkan standar operasional PLN. Namun, mayoritas studi tersebut masih bersifat deskriptif-evaluatif yang hanya memberikan status kondisi alat (baik atau buruk) pada waktu tertentu. Terdapat keterbatasan dalam menganalisis variabel eksternal secara mendalam, seperti pengaruh material klem (kaca borosilikat vs aluminium) terhadap akurasi pembacaan suhu saat pengukuran termovisi, yang sebenarnya dapat memicu perbedaan interpretasi data di lapangan.
Gap	Meskipun pemeliharaan rutin telah dilakukan, terdapat celah yang belum dieksplorasi secara maksimal dalam penelitian ini dibandingkan studi sebelumnya, Analisis Jarak Optimal, Penelitian ini mengidentifikasi kebutuhan untuk memperbarui informasi mengenai jarak optimal antara <i>Lightning Arrester</i> dengan peralatan yang dilindungi agar proteksi tetap maksimal terhadap perkembangan teknologi terbaru.

Penulis	(Dwi cahyono, 2022)
Metode	berfokus pada pemeliharaan <i>Lightning Arrester</i> (LA) di Gardu Induk Saketi 150kV untuk menjaga keandalan sistem dari surja petir. Dasar teori yang digunakan mencakup prinsip kerja LA sebagai isolator pada kondisi normal dan konduktor saat terjadi surja , serta klasifikasi pemeliharaan menjadi <i>proactive maintenance</i> yang terdiri dari <i>preventive</i> (berbasis waktu) dan <i>predictive</i> (berbasis kondisi). Analisis Penggunaan metode Leakage Current Measurement (LCM) terbukti akurat dalam mendeteksi degradasi varistor ZnO melalui parameter arus bocor resistif (IrCorr).
Hasil	Penelitian ini menunjukkan transisi kondisi dari "Monitor/Damage" (86,69%) pada LA lama berusia 10 tahun menjadi kondisi "Good" (25,69%) setelah dilakukan penggantian dengan unit baru. Meskipun penelitian ini sangat detail dalam aspek teknis operasional dan kepatuhan terhadap SOP/K3, terdapat celah untuk pengembangan pada sistem pemantauan otomatis.
Gap	Penelitian tersebut masih bersifat manual melalui observasi lapangan berkala, sehingga terdapat peluang untuk meneliti implementasi monitoring berbasis <i>real-time</i> atau penggunaan teknologi cerdas untuk memprediksi sisa umur teknis peralatan secara lebih presisi.

Penulis	(prasetyo, 2021)
Metode	Penelitian ini mengevaluasi keandalan <i>lightning arrester</i> (LA) di GI 150 kV Gondangrejo menggunakan tiga level inspeksi. Dasar teori utama mencakup: Fungsi Alat, LA berfungsi sebagai isolator pada tegangan normal dan menjadi konduktor saat terjadi surja petir untuk mengalirkan arus ke tanah. Standar Evaluasi, Mengacu pada PLN SK DIR 520 2014 untuk suhu, VDE untuk tahanan isolasi ($1 \text{ kV} = 1 \text{ M}\Omega$), dan IEEE STD 80-2000 untuk pentanahan (kurang dari 1Ω). Wilayah Gondangrejo memiliki kerapatan petir tinggi karena berada di dataran tinggi, sehingga risiko kerusakan peralatan transmisi sangat besar.
Hasil	Analisis Berdasarkan data tahun 2018–2019, ditemukan beberapa poin kritis yaitu pertama terdapat peningkatan detail pemeriksaan fisis, seperti pengecekan <i>isolator support</i> yang baru dilakukan secara konsisten pada tahun 2019. Kedua hasil termovisi menunjukkan kondisi "Baik" karena selisih suhu klem terhadap konduktor hanya $1\text{-}2^\circ\text{C}$ (di bawah batas maksimal 10°C). Ketiga terjadi penurunan nilai tahanan isolasi yang signifikan pada Fasa S (dari $346.000 \text{ M}\Omega$ menjadi $58.000 \text{ M}\Omega$). Meskipun masih memenuhi standar, tren penurunan ini mengindikasikan adanya pengaruh polusi atau kelembapan pada permukaan isolator.
Gap	Meskipun hasil menunjukkan sistem dalam kondisi baik, terdapat celah yang belum dibahas yaitu: Penelitian masih bersifat deskriptif (lulus/gagal standar) dan belum menggunakan analisis tren atau pemodelan untuk memprediksi sisa umur teknis peralatan (<i>Remaining Life Assessment</i>). Analisis terbatas pada tahanan isolasi dan suhu, namun belum menyentuh pengukuran arus bocor resistif (<i>resistive leakage current</i>) secara spesifik yang lebih akurat dalam mendeteksi penuaan blok ZnO di dalam arrester.

Penulis	(Andari et al., 2022)
Metode	Pelaksanaan penelitian ini adalah di Gardu Induk GIS Simpang Haru yang difokuskan pada pemeliharaan Lightning Arrester pada Gardu Induk. Kegiatan pemeliharaan ini bertujuan untuk mencegah agar tidak terjadinya suatu kegagalan atau failure pada sebuah peralatan. Kegiatan proactive mainrenance terdiri dari dua yakni preventive maintenance dan predictive maintenance. Time Base Maintenance (TBM) juga dikenal sebagai preventive maintenance, yang bertujuan untuk mengetahui bagaimana keadaan pada peralatan. Kegiatan predictive maintenance pada lightning arrester berdasarkan tingkat kesulitan pelaksanaan dan jenjang diagonasa dapat dikelompokkan ke dalam 3 level inspeksi.
Hasil	Berdasarkan hasil pengujian tahanan isolasi yang dilaksanakan di Gardu Induk GIS Simpang Haru, dapat disimpulkan bahwa tahanan isolasi <i>lightning arrester</i> pada penghantar Pauh Limo I dan Pauh Limo II masih berada dalam kondisi baik. Hal tersebut dibuktikan dengan nilai tahanan yang diperoleh menunjukkan hasil jauh di atas batas standar minimum, yaitu lebih dari 1 Ω . Selain itu, hasil pengukuran tahanan pentanahan pada <i>arrester</i> di lokasi yang sama menunjukkan nilai kurang dari 1 Ω , yang sesuai dengan standar maksimum yang telah ditetapkan, sehingga dapat dinyatakan bahwa kinerja sistem pentanahan <i>arrester</i> masih optimal.
Gap	Namun, hingga saat ini Gardu Induk GIS Simpang Haru Padang belum pernah melaksanakan pengujian counter, yang disebabkan oleh beberapa faktor teknis dan operasional tertentu. Meskipun secara teknis tahanan pentanahan baik, terdapat inkonsistensi narasi pada data isolasi yang menyebutkan nilai "jauh lebih rendah" dari standar, padahal kualitas isolasi seharusnya semakin tinggi nilainya semakin baik, namun terdapat celah yang belum dibahas yaitu: Belum adanya implementasi pengujian <i>surge counter</i> mengakibatkan riwayat sambaran petir pada LA tidak terukur secara akurat. Penelitian masih sangat bergantung pada Inspeksi Level-3 (<i>offline</i>), sehingga terdapat peluang untuk meneliti efektivitas Inspeksi Level-2 (<i>online/thermal</i>) untuk pencegahan tanpa pemadaman.

(Sumber: Jurnal-jurnal Penelitian Terdahulu)

B. Landasan Teori

a. *Lightning Arrester*

Lightning Arrester adalah salah satu komponen proteksi dalam sistem listrik yang bertugas mencegah kerusakan peralatan akibat adanya kenaikan tegangan tiba-tiba yang terjadi karena sambaran petir. Perangkat ini bekerja dengan cara membatasi kenaikan tegangan berlebih pada jaringan listrik, kemudian menyalurkan energi listrik berlebih tersebut ke tanah, sehingga peralatan yang terhubung dalam sistem tetap aman dari kerusakan (Manihuruk & Sitanggang, 2021). Untuk mengetahui alat *lightning arrester* dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 *Lightning Arrester*
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Mekanisme kerjanya bergantung pada perubahan karakteristik listrik yang menyesuaikan dengan besarnya tegangan yang terjadi. Pada kondisi operasi normal, *Lightning Arrester* bersifat sebagai isolator sehingga tidak terjadi aliran arus listrik melaluinya. Namun, ketika terjadi peningkatan tegangan secara tiba-tiba akibat sambaran petir atau gangguan lain, sifat alat ini berubah menjadi konduktor, memungkinkan arus berlebih dialirkan langsung menuju tanah. Dengan cara tersebut, energi lebih dapat disalurkan ke bumi tanpa menjalar ke peralatan lainnya, sehingga mencegah terjadinya kerusakan pada komponen-komponen listrik di gardu induk (Irfansyah & Oetomo, 2023a).

b. Prinsip Kerja *Lightning Arrester*

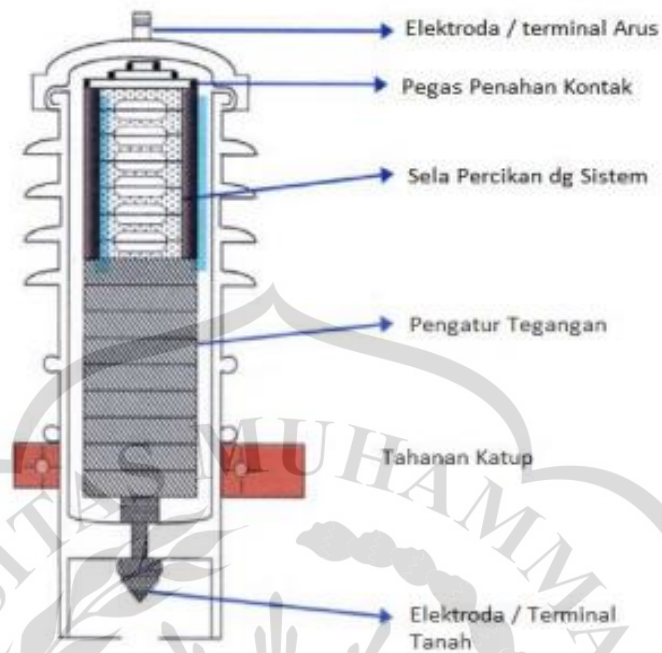
arrester berfungsi sebagai komponen isolatif yang mencegah aliran arus ke tanah. Namun, ketika terjadi lonjakan tegangan akibat sambaran petir, *arrester* akan berubah karakter menjadi elemen konduktif yang berfungsi menyalurkan arus bertegangan tinggi ke sistem pentanahan. Setelah gelombang surja tersebut mereda, *arrester* harus segera kembali ke fungsi awalnya sebagai isolator, sehingga Pemutus Tenaga (PMT) tidak sempat melakukan operasi pemutusan rangkaian (Manihuruk & Sitanggang, 2021). Komponen elektronik yang sifatnya seperti *lightning arrester* yaitu *metal oxide varistor*. Fungsi utama *Metal Oxide Varistor* (MOV) adalah sebagai pelindung lonjakan tegangan (*surge suppressor*), yang melindungi perangkat elektronik sensitif dari lonjakan atau tegangan berlebih yang tiba-tiba dengan cara mengurangi resistansinya secara drastis saat tegangan melebihi batas

aman, mengalihkan energi berlebih ke *ground*, lalu kembali ke resistansi tinggi saat kondisi normal.

Batas maksimum dan minimum dari tegangan percikan ditetapkan berdasarkan besarnya tegangan sistem tertinggi serta kemampuan isolasi peralatan yang mendapat perlindungan. Jika *arrester* difungsikan hanya untuk menjaga integritas isolasi dari kemungkinan kerusakan akibat gangguan, tanpa memperhitungkan keberlanjutan operasi sistem, maka dapat digunakan sela batang yang dirancang untuk memunculkan percikan ketika tegangan mencapai ambang batas berisiko. Pada sistem arus bolak-balik, tegangan tersebut akan mempertahankan terjadinya busur listrik hingga pemutus beban bekerja untuk memutuskan rangkaian. Dengan menambahkan tahanan pada sela api tersebut, busur api dapat dipadamkan. Namun, apabila tahanan yang digunakan memiliki nilai tetap, maka penurunan tegangan menjadi sangat besar sehingga tujuan perlindungan terhadap isolasi tidak tercapai. Oleh karena itu, digunakan tahanan jenis kran yang memiliki karakteristik khusus, yaitu nilai tahanannya akan menjadi sangat kecil ketika tegangan dan arus meningkat, sehingga mampu menjaga efektivitas perlindungan sistem. (Manihuruk & Sitanggang, 2021).

c. **Bagian-Bagian *Lightning Arrester***

Lightning Arrester memiliki bagian-bagian tertentu sehingga dapat berfungsi dengan baik sebagai proteksi terhadap gangguan lonjakan tegangan. Berikut ini bagian-bagian *lightning arrester*, dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Bagian-Bagian *Lightning Arrester*

(Sumber : *Manihuruk & Sitanggang, 2021*)

a. Elektroda

Arrester memiliki dua buah elektroda, yaitu elektroda bagian atas yang terhubung dengan komponen atau konduktor bertegangan, serta elektroda bagian bawah yang dihubungkan langsung ke sistem pentanahan (*grounding*). (Hajar & Rahman, 2017).

b. Sela Percik (*Spark Gap*)

Jika terjadi kondisi tegangan yang terlalu tinggi karena lonjakan tegangan akibat petir atau koneksi pada *arrester* yang sudah terpasang, celah api akan menghasilkan busur api sebagai reaksi terhadap peningkatan tegangan yang tiba-tiba. (Hajar & Rahman, 2017).

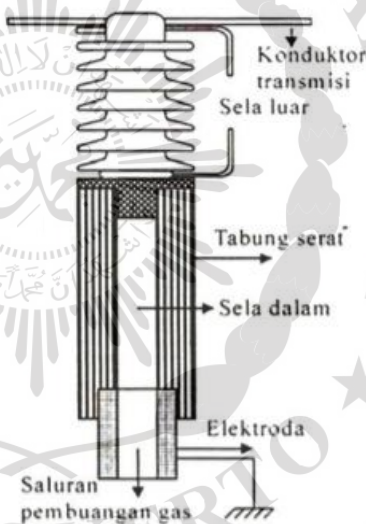
c. Tahanan Katup

Tahanan yang digunakan pada *arrester* merupakan jenis material yang memiliki karakteristik resistansi variabel, yaitu nilai tahanannya akan berubah sesuai dengan variasi atau perubahan tegangan yang diterimanya. (Hajar & Rahman, 2017).

d. Jenis-Jenis *Arrester*

Arrester pada gardu induk memiliki jenis-jenisnya yaitu sebagai berikut:

a. *Arrester* Jenis Ekspulsi



Gambar 2. 3 *Arrester* Ekspulsi
(Sumber: Hajar & Rahman, 2017)

Arrester jenis ini digunakan dalam sistem pengoperasian tenaga listrik dengan tegangan hingga 33 kV. Bentuk dan struktur dari perangkat ini dapat dilihat pada Gambar 2.3. Alat ini terdiri dari dua celah yang dihubungkan secara seri, yaitu celah luar dan celah dalam. Bagian celah dalam disusun di dalam tabung berbahan serat,

dilengkapi dengan elektroda berbentuk tabung dan langsung terhubung ke tanah. Adanya dua pasang elektroda ini bertujuan untuk menahan tegangan tinggi pada frekuensi daya tanpa menyebabkan efek korona maupun aliran arus bocor ke tanah. Selain itu, nilai tegangan yang diperlukan untuk melewati celah luar dirancang lebih kecil dibandingkan dengan tegangan lonjakan pada isolator penyangganya, sehingga sistem perlindungan dapat berjalan secara optimal (Hajar & Rahman, 2017).

b. *Arrester* Jenis Katup

Arrester katup terbagi menjadi tiga jenis berdasarkan penempatannya, yaitu sebagai berikut:

- *Arrester* Katup Jenis Gardu

Arrester katup tipe gardu merupakan varian *arrester* dengan tingkat efisiensi tertinggi, meskipun harganya tergolong cukup tinggi. Istilah “gardu” menunjukkan bahwa peralatan ini umumnya diaplikasikan pada sistem kelistrikan di gardu induk dengan kapasitas besar. Jenis *arrester* ini berfungsi memberikan perlindungan terhadap peralatan bernilai tinggi yang bekerja pada sistem tegangan mulai dari 2.400 volt hingga lebih dari 287 kV (Hajar & Rahman, 2017).

- *Arrester* Katup Jenis Saluran

Arrester dengan tipe saluran umumnya memiliki harga yang lebih ekonomis dibandingkan dengan jenis *arrester* yang

dipasang di gardu. Dalam konteks ini, istilah “saluran” tidak menunjukkan fungsi perlindungan terhadap saluran transmisi, melainkan menekankan pada karakteristik serta tujuan penggunaannya. Meskipun *arrester* tipe saluran dapat pula diaplikasikan di gardu induk seperti halnya *arrester* tipe gardu, penggunaannya lebih difokuskan untuk melindungi peralatan yang memiliki tingkat kepentingan lebih rendah. Secara umum, jenis *arrester* ini diaplikasikan pada sistem tenaga listrik dengan rentang tegangan antara 15 kV hingga 69 kV (Hajar & Rahman, 2017).

- *Arrester* Jenis Gardu Untuk Mesin- mesin

Arrester tipe gardu ini dirancang secara khusus untuk memberikan perlindungan terhadap mesin-mesin berputar. Penggunaannya diperuntukkan bagi sistem tenaga listrik dengan rentang tegangan antara 2,4 kV hingga 15 kV (Hajar & Rahman, 2017).

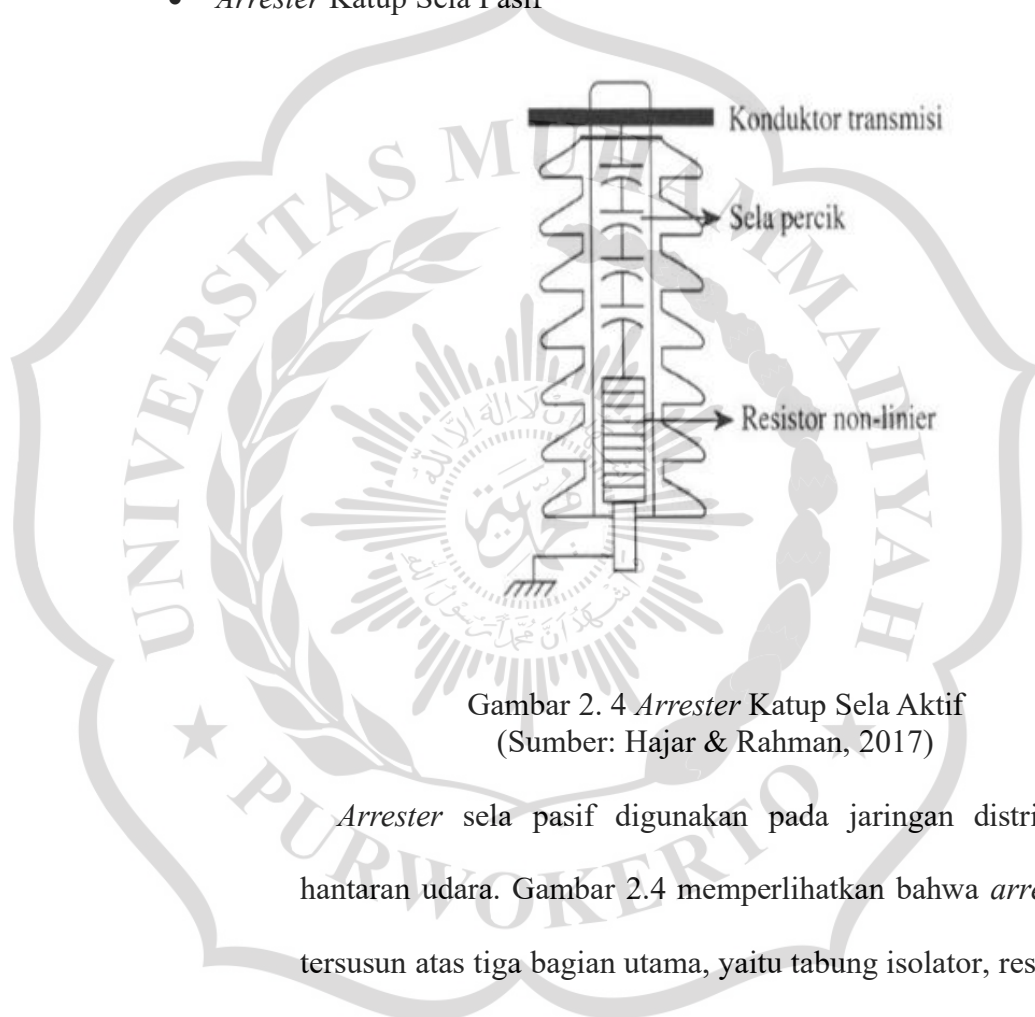
- *Arrester* Katup Jenis Distribusi untuk Mesin-mesin

Arrester tipe distribusi dirancang khusus untuk memberikan perlindungan terhadap peralatan listrik yang memiliki komponen berputar dan *transformator* yang menggunakan sistem pendinginan udara tanpa minyak. Perangkat ini umumnya diterapkan pada instalasi listrik

dengan tegangan operasi antara 120 volt hingga 750 volt (Hajar & Rahman, 2017).

Berdasarkan sela perciknya, *arrester* katup terbagi dalam tiga jenis yaitu sebagai berikut:

- *Arrester* Katup Sela Pasif



Gambar 2. 4 *Arrester* Katup Sela Aktif (Sumber: Hajar & Rahman, 2017)

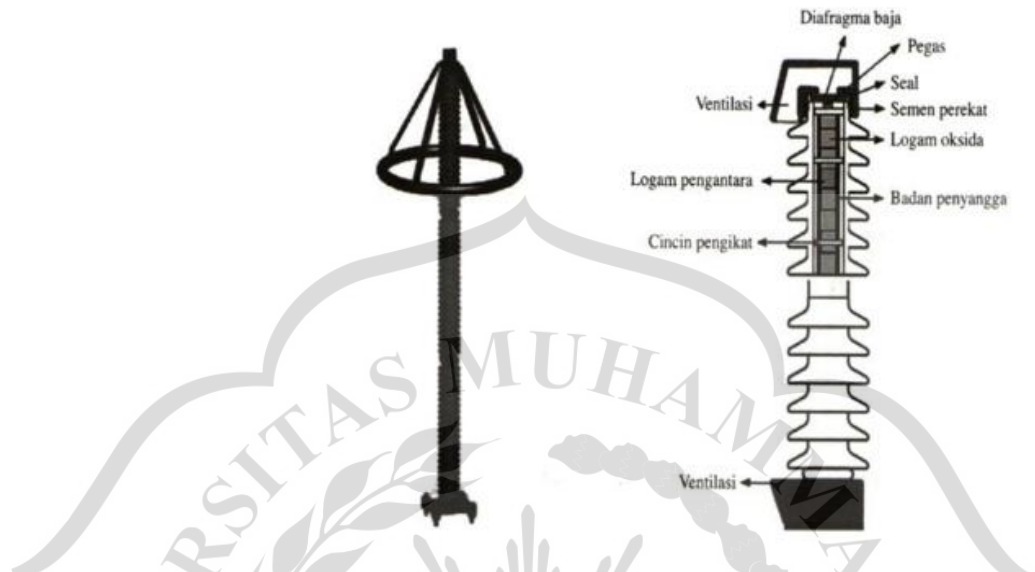
Arrester sela pasif digunakan pada jaringan distribusi hantaran udara. Gambar 2.4 memperlihatkan bahwa *arrester* tersusun atas tiga bagian utama, yaitu tabung isolator, resistor nonlinier, dan sela percik. Komponen sela percik terdiri dari sejumlah elektroda berbentuk pelat yang dirangkai secara seri. Untuk menjaga agar performa *arrester* tidak dipengaruhi oleh kondisi udara di sekitarnya, seluruh komponen tersebut ditempatkan di dalam tabung isolator tertutup.

Resistor nonlinier pada *arrester* dibuat dari beberapa elemen silikon karbida yang disusun secara seri. Setiap pelat resistor memiliki diameter sekitar 90 milimeter dengan ketebalan kurang lebih 25 milimeter. Karakteristik resistor ini menunjukkan bahwa saat dialiri arus kecil, nilai resistansinya sangat tinggi, namun ketika arus yang mengalir meningkat besar, resistansinya akan turun secara signifikan. (Hajar & Rahman, 2017).

- *Arrester* Katup Sela Aktif

Jaringan listrik bertegangan tinggi serta pusat distribusinya memanfaatkan *arrester* dengan sela aktif. Dari segi konstruksi, *arrester* jenis katup sela aktif memiliki kesamaan dengan *arrester* katup sela pasif. Namun, perbedaannya terletak pada kemampuannya dalam memperpanjang serta menurunkan suhu busur listrik dengan memanfaatkan medan magnet yang terbentuk pada sela percikan (sumber yang sama) (Hajar & Rahman, 2017).

- *Arrester* Katup Tanpa Sela Percik



Gambar 2. 5 *Arrester* Katup Tanpa Sela Percik
(Sumber: Hajar & Rahman, 2017)

Arrester jenis tanpa sela dapat diaplikasikan pada berbagai tingkat tegangan. Seperti yang tampak pada Gambar 2.5, diperlihatkan proses pembuatan *arrester* tipe non-katup. Jenis *arrester* ini memiliki perbedaan mendasar dibandingkan dua tipe *arrester* katup sebelumnya, karena komponennya hanya terdiri dari resistor nonlinier yang berbahan dasar logam oksida (MO). Oleh sebab bahan utamanya berupa logam oksida, perangkat ini umumnya dikenal dengan sebutan *arrester* MO (*Metal Oxide*) (Hajar & Rahman, 2017).

e. Karakteristik *Lightning Arrester*

Lightning Arrester digunakan untuk melindungi peralatan dalam sistem tenaga listrik, jadi penting untuk memahami beberapa karakteristiknya agar dapat berfungsi dengan baik. Ini adalah tiga karakteristik utama *Lightning Arrester*:

- a. Tidak boleh melebihi tegangan dasar dan frekuensi 50 Hz.
- b. Memiliki karakteristik yang dipengaruhi oleh tegangan saat dilalui oleh aliran listrik petir.
- c. *Lightning Arrester* bersifat sebagai isolator.

f. Syarat-Syarat *Lightning Arrester* yang Layak Digunakan

Agar *lightning arrester* dapat berfungsi secara optimal melalui koordinasi yang tepat, maka penerapan standar perlu dilakukan dengan memperhatikan ketentuan dan persyaratan tertentu.

- a. *Lightning arrester* dirancang dengan tegangan nominal pada frekuensi 50 siklus per detik (c/s). Besaran ini ditentukan agar tidak melebihi batas yang diizinkan selama proses operasi berlangsung, baik dalam keadaan sistem berfungsi normal maupun ketika terjadi gangguan berupa hubung singkat.
- b. Area proteksi harus memiliki jangkauan yang memadai untuk melindungi seluruh peralatan di (GI) yang memiliki *Basic Insulation Level* (BIL) sama atau lebih tinggi dari wilayah proteksi tersebut. *Lightning arrester* dapat berfungsi secara efektif apabila terdapat

perbedaan atau selisih yang memadai antara tingkat perlindungan arrester dan level isolasi peralatan yang dilindungi.

- c. Nilai resistansi tanah harus tetap terjaga rendah, dan *lightning arrester* sebaiknya dipasang dekat dengan peralatan utama yang akan dilindungi agar sistem perlindungan bekerja dengan efektif.
- d. Kapasitas termal pada *lightning arrester* harus memiliki kemampuan yang memadai untuk menyalurkan arus besar yang berasal dari energi tersimpan pada saluran transmisi yang panjang.
- e. Tingkat perlindungan pada *lightning arrester* ditentukan berdasarkan besarnya penurunan tegangan maksimum yang dapat dicapai oleh perangkat tersebut.
- f. Penentuan besar arus sambaran petir dilakukan untuk memastikan tingkat perlindungan *lightning arrester* terhadap *Basic Insulation Level* (BIL) pada peralatan yang dijaga.
- g. Penerapan *lightning arrester* perlu dilakukan dengan memperhatikan pengaruh adanya saluran ganda (*multiple line*), karena kondisi tersebut dapat memengaruhi efektivitas sistem proteksi petir pada gardu induk.
- h. Dalam kondisi terdapat ketidakpastian terkait kinerja *lightning arrester* pada frekuensi 50 c/s, maka dilakukan penyesuaian berupa penambahan nilai tertentu terhadap rating *lightning arrester*.

g. Faktor-Faktor Penyebab Kegagalan *Lightning Arrester*

- a. Sambungan antara konduktor pada sistem *Lightning Arrester* dengan terminal *arrester* tidak terpasang dengan cukup kuat atau mengalami kekenduran.
- b. Sambungan antara konduktor *Lightning Arrester* dengan konduktor fasa pada jaringan tidak terpasang dengan baik atau memiliki tingkat kekencangan yang kurang memadai.
- c. Sambungan konduktor *Lightning Arrester* pada terminal pentanahan tidak terpasang dengan benar atau mengalami kekenduran, sehingga dapat memengaruhi efektivitas sistem proteksi terhadap arus lebih.
- d. Sambungan antara penghantar tanah pada *Lightning Arrester* dengan batang pentanahan tidak dilakukan dengan sempurna atau memiliki tingkat kekencangan yang kurang optimal, sehingga dapat mengurangi kinerja sistem pembumian.
- e. Nilai resistansi sistem pentanahan pada *Lightning Arrester* melebihi batas yang diizinkan, yaitu lebih dari 1 ohm.

h. Counter *Lightning Arrester*

Counter *lightning arrester*, yang juga disebut sebagai *lightning counter*, merupakan perangkat yang berfungsi untuk mencatat atau menghitung jumlah sambaran petir yang mengenai sistem penangkal petir.



Gambar 2. 6 Counter
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Alat yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 dipasang pada konduktor penyalur arus petir (*down conductor*) dan bekerja dengan memanfaatkan energi induksi dari sambaran petir untuk menggerakkan penunjuk angka. Dengan demikian, alat ini dapat merekam frekuensi serta lokasi terjadinya sambaran petir yang berguna untuk keperluan analisis.

i. Spesifikasi Dan Karakteristik *Lightning Arrester* Gardu Induk 150 Kv Kalibakal Bay Trafo 4

Untuk penjelasan lebih lengkap tentang spesifikasi dan karakteristik *lightning arrester* gardu induk 150 kv kalibakal bay trafo 4 dapat dilihat pada tabel 2.2 dan 2.3.

Tabel 2. 2 Spesifikasi *Lightning Arrester* Gardu Induk 150 Kv Kalibakal

No.	GI	Bay	Fasa	Merk	Tipe	Tahun Buat
1	Kalibakal	Trafo 4	R	TRIDELTA	SB 150/10.3-0-A	2011
2	Kalibakal	Trafo 4	S	TRIDELTA	SB 150/10.3-0-A	2011
3	Kalibakal	Trafo 4	T	TRIDELTA	SB 150/10.3-0-A	2011

(Sumber : Dokumen Gardu Induk 150 Kv Kalibakal)

Tabel 2. 3 Karakteristik *Lightning Arrester*

<i>Arrester Rating</i>	F.O.W	<i>10 kA Light and Heavyduty and 5 kA Series A</i>	
		Std kV. peak	F.W.O kV. Peak
kV rms	kV/ μ s		
1	2	3	4
0.175	10	-	-
0.280	10	-	-
0.500	10	-	-
0.660	10	-	-
3	25	13	15
4.5	37	17.5	20
6	50	22.6	26
7.5	62	27	31
9	75	32.5	38
10.5	87	38	44
12	100	43	50
15	125	54	62
18	150	65	75
21	175	76	88
24	200	87	100
27	225	97	112
30	250	108	125
33	275	119	137
36	300	130	150
39	325	141	162
42	350	151	174
51	425	184	212
54	450	195	224
60	500	216	250
75	625	270	310
84	700	302	347
96	790	324	271
102	830	343	394
108	870	363	418
120	940	400	463
126	980	420	485
138	1030	460	530
150	1080	500	577
174	1160	570	660
186	1180	610	702
198	1200	649	746

(Sumber : Mahendra, 2021)

j. Spesifikasi *Transformer* 4 Pada Gardu Induk 150 Kv Kalibakal

Berikut dibawah ini adalah spesifikasi *transformator* 4 pada gardu induk 150 kv kalibakal yaitu:

Merk : Unindo

Tipe : -

Tahun : 2006

Tegangan sistem: 150 kV

Daya transformator : 60 MVA

BIL transformator : 650 kV

Short circuit withstand current (2s) : -

- *Primary* : 40 kA

- *Secondary* : 25 kA

k. Inspeksi Level 1 *Lightning Arrester*

Inspeksi level 1, yang dikenal sebagai *In Service Inspection*, merupakan kegiatan pemeriksaan visual terhadap komponen-komponen *Lightning Arrester* (LA) saat peralatan tersebut masih beroperasi. Proses ini tidak memerlukan penggunaan peralatan khusus, melainkan hanya membutuhkan formulir untuk mencatat kondisi setiap komponen LA yang diamati, apakah masih berfungsi dengan baik atau telah mengalami penurunan kinerja. Selain itu, dilakukan pula pencatatan atau *checklist* terhadap data yang ditunjukkan oleh *counter* pada *Lightning Arrester*. (Agung Suardi, 2023). Untuk Rekomendasi *Surge Counter* LA dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2. 4 Rekomendasi Counter LA

Hasil Pengujian Counter	Analisis	Saran
Nilai counter meningkat setelah dilakukan penyuntikan impuls arus searah (DC) yang berasal dari kapasitor.	Kondisi BAIK	
Nilai counter tidak mengalami peningkatan setelah dilakukan penyuntikan impuls arus searah (DC) yang berasal dari kapasitor.	Counter RUSAK	Lakukan penggantian counter LA

(Sumber : Rusdjaja, 2010)

1. Inspeksi Level 2 *Lightning Arrester*

Inspeksi level 2 merupakan kegiatan pemeriksaan yang dilakukan dengan bantuan alat ukur berupa termovisi pada periode tertentu, dalam kondisi peralatan masih bertegangan. Pemeriksaan ini dilakukan menggunakan metode *thermovision* atau *thermal imager*. Penerapan *thermovision* pada *lightning arrester* bertujuan untuk memantau kondisi peralatan saat beroperasi dengan beban. Melalui pengukuran ini, pola distribusi temperatur pada setiap komponen *lightning arrester* dapat diamati. Berdasarkan pola suhu yang diperoleh, potensi ketidaknormalan pada komponen dapat diidentifikasi dari hasil pengukuran tersebut. Selanjutnya, apabila ditemukan indikasi abnormalitas atau perbedaan suhu yang tidak sesuai dengan kondisi normal, dilakukan evaluasi lebih lanjut agar potensi kesalahan maupun kerusakan pada *lightning arrester* dapat dicegah sejak dini (Agung Suardi, 2023).

a. Perhitungan Selisih Suhu

Suhu termovisi dapat dihitung dengan menghitung selisih (ΔT) suhu T konduktor dan T klem. Ini dapat ditunjukkan pada persamaan (Falih Hibatullah, 2024):

$$\Delta T = \left(\frac{I_{Maks}}{I_{saat\ thermovisi}} \right)^2 \cdot (T_{klem} - T_{konduktor}) \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

ΔT = Selisih suhu klem dan konduktor

I_{maks} = Arus maksimal yang pernah dicapai

$I_{Thermovisi}$ = Arus saat Thermovisi

T_{klem} = Suhu pada klem

$T_{konduktor}$ = Suhu pada konduktor

Untuk melihat/megetahui standar pengukuran suhu thermovisi lightning arrester dapat dilihat pada tabel 2.4.

Tabel 2. 5 Standar Pengukuran Suhu Thermovisi *Lightning Arrester*

suhu klem pada konduktor		Batasan pada perbedaan suhu antarfase		Suhu klem yang diizinkan saat shooting	
0°C – 10°C	Kondisi baik	0°C – 15°C	Kondisi baik	0°C – 39°C	Kondisi baik
>10°C – 25°C	Ukur 1 bulan lagi	>15°C	Perbaikan segera	≥40°C – 69°C	Perbaikan segera
>40°C – 70°C	Perbaikan segera			≥70°C	Kondisi emergency
>70°C	Kondisi emergency				

(Sumber : Dokumen Perusahaan Gardu Induk 150 Kv Kalibakal)

b. Perhitungan Nilai Emisivitas Thermovisi

Emisivitas adalah suatu bahan perbandingan antara energi total yang dipancarkan permukaan bahan dengan energi yang dipancarkan benda hitam pada suhu dan panjang gelombang yang sama. Emisivitas menunjukkan kemampuan suatu material dalam menyerap dan memancarkan energi infra merah, untuk menghitung emisivitas dalam thermovisi didasarkan pada Hukum Stefan-Boltzmann yang dapat ditunjukkan pada persamaan :

$$e = \frac{P}{\sigma \cdot T^4} \dots \dots \dots (2.2)$$

p = Energy Thermal Conduction = (237 W2/m.K)

σ = Konstanta Stefan Boltzman = (5,672 x 10-8 W/W-2)

T = Suhu Mutlak (K)

e = emisivitas

Berikut tabel standar nilai emisivitas material *lightning arrester* sebagai berikut :

Tabel 2. 6 Standar Nilai Evimisivitas Material

Bahan	Nilai Emisivitas
Alumunium <i>oxidized</i>	0,20-0,40
<i>Glazed porcelain</i>	0,90-0,95

(Sumber : Thermoworks, 2025)

m. Inspeksi Level 3 *Lightning Arrester*

Inspeksi level 3 merupakan kegiatan pengujian dan pengukuran yang dilaksanakan setiap dua tahun sekali dalam kondisi peralatan tidak bertegangan (*off-line*). Tujuan dari pemeriksaan ini adalah untuk menilai kondisi aktual peralatan dengan menggunakan peralatan ukur, baik yang bersifat sederhana maupun canggih. Kegiatan ini dilaksanakan oleh petugas pemeliharaan dan meliputi pengisian data pada formulir *checklist*, pengukuran nilai tahanan isolasi, pengujian *watt loss*, serta pengukuran nilai tahanan sistem pentanahan.

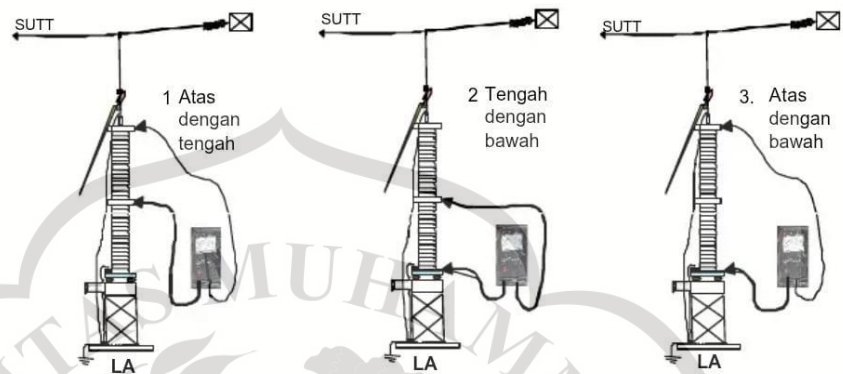
1. Data *Checklist Lightning Arrester*

Kegiatan ini meliputi pengamatan terhadap komponen *Lightning Arrester* yang dilakukan secara visual maupun dengan bantuan alat optik seperti teropong (*binocular*). Hasil pengamatan tersebut kemudian dicatat oleh petugas ke dalam formulir *checklist* sebagai dokumentasi kondisi aktual peralatan.

2. Pengujian Tahanan Isolasi

Uji tahanan isolasi pada *lightning arrester* merupakan proses pemeriksaan yang dilakukan menggunakan alat ukur khusus untuk menentukan besarnya nilai tahanan antara bagian utama tiap fasa dengan bodi atau *base plate* yang terhubung ke sistem pentanahan. Pengujian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sejak dini adanya perubahan pada nilai tahanan isolasi sekaligus menilai tingkat kesehatan atau kondisi isolator dari *lightning arrester* tersebut. Dalam pelaksanaannya, pengukuran dilakukan

menggunakan alat ukur megger dengan tegangan uji sebesar 5 kilo volt (prasetyo, 2021).



Gambar 2. 7 Skema Pengukuran Tahanan Isolasi
(Sumber :Mahendra, 2021)

Pada Gambar 2.7 ditampilkan skema pengukuran tahanan isolasi pada *lightning arrester*, di mana proses pengukuran dilakukan dalam kondisi peralatan tidak bertegangan (padam). Pengujian ini menggunakan alat *insulation tester*, dengan tahapan pengukuran meliputi tiga bagian, yaitu antara terminal atas dengan terminal tengah, terminal tengah dengan *grounding*, serta terminal atas dengan *grounding*.

a. Perhitungan Tahanan Isolasi (Arus bocor)

Pengukuran arus bocor (*leakage current measurement/LCM*) pada lightning arrester (LA) adalah metode vital untuk memantau kesehatan LA dengan mengukur arus kecil yang mengalir saat beroperasi normal, khususnya komponen resistifnya, untuk mendeteksi degradasi dini, di mana nilai yang lebih tinggi dari ambang batas (misalnya 100 μA atau 500 μA tergantung standar) menandakan LA

perlu perhatian atau penggantian untuk menjaga proteksi sistem listrik dari tegangan lebih. Alat khusus seperti Leakage Current Monitor (LCM) digunakan untuk mengukur arus ini secara real-time atau berkala, mengidentifikasi anomali sebelum terjadi kegagalan total.

Rumus ini menghitung kebocoran arus, di mana nilai tahanan isolasi minimal adalah $1 \text{ kV} = 1 \text{ M}\Omega$ atau $1 \text{ kV} = 1 \text{ mA}$. Seperti pada persamaan (Aldi Prakoso et al., 2024) :

$$I = \frac{V}{R} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

I = Arus Bocor (A)

V = Tegangan (V)

R = Resistansi (Ω)

Untuk melihat/ mengetahui standar pengukuran tahanan isolasi *lightning arrester* dapat dilihat pada tabel 2.5.

Tabel 2. 7 Rekomendasi Pengukuran Tahanan Isolasi

Nilai tahanan isolasi	Analisis	Saran
>1 GΩ	Kondisi BAIK	
<1 GΩ	Terjadi kegagalan isolasi	Lakukan proses pembersihan pada komponen yang diuji, kemudian lakukan pengukuran ulang. Apabila hasil pengukuran masih menunjukkan nilai kurang dari 1 GΩ, maka perlu dilakukan perencanaan untuk penggantian komponen tersebut.

(Sumber :Rusdjaja, 2010)

3. Rugi Daya (*Watt Loss*)

Pengujian *watt loss* dilakukan untuk mengetahui besarnya kehilangan daya yang terjadi pada *Lightning Arrester* (LA) ketika beroperasi pada kondisi tegangan normal. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk menilai kondisi serta kualitas isolasi internal LA, sekaligus mendeteksi adanya indikasi kerusakan atau penurunan kinerja pada blok *Zinc Oxide* (ZnO) yang berperan sebagai komponen utama dalam menahan lonjakan tegangan.

mekanisme kerja ZnO *arrester* berfungsi sebagai isolator pada tegangan operasi normal (hanya mengalirkan arus bocor mikro). Namun, saat

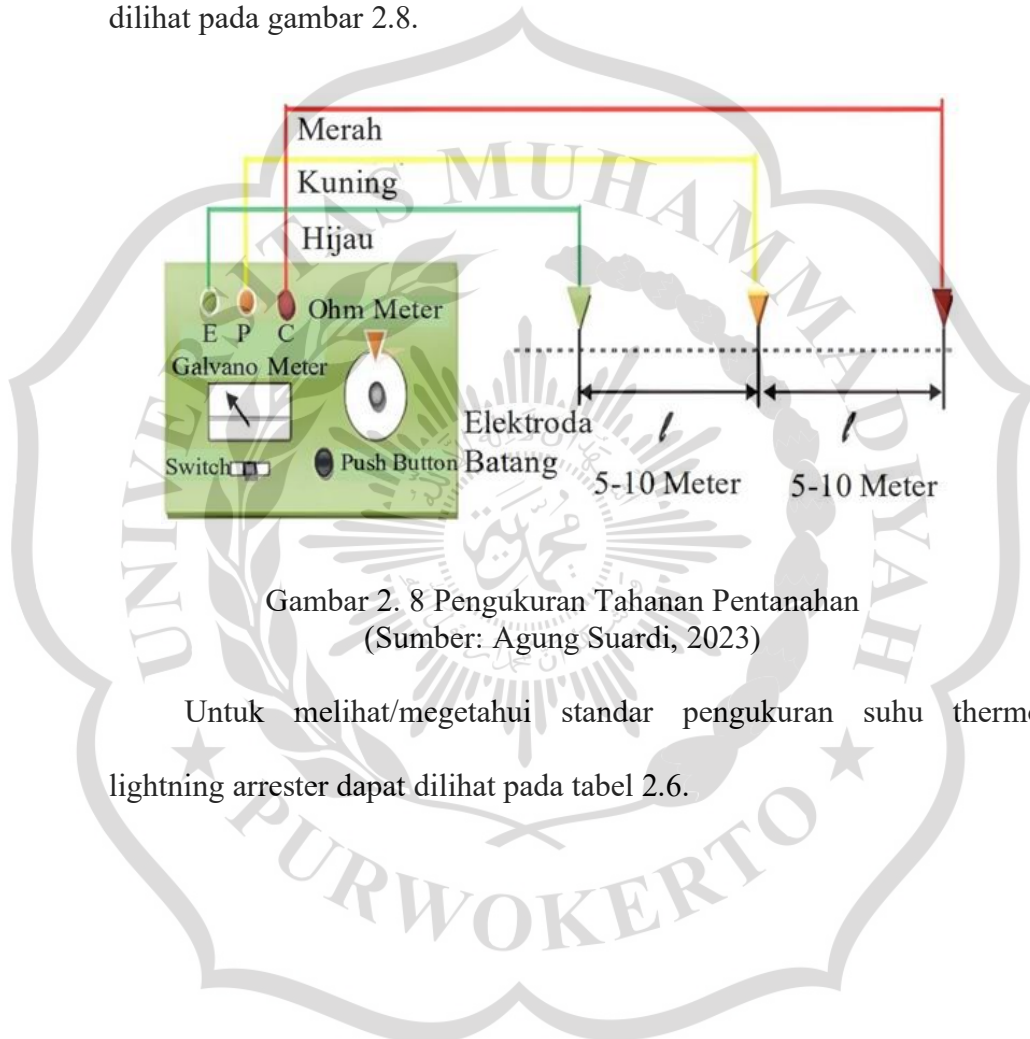
terjadi tegangan lebih (surja petir atau surja hubung), resistansinya turun drastis sehingga berubah menjadi konduktor yang membuang arus surja ke bumi. Berbeda dengan teknologi lama, ZnO arrester tidak memerlukan sela udara (gap). Hal ini memungkinkannya memutus arus susulan secara mandiri dan memberikan respon perlindungan yang lebih cepat. Di dalam keping blok ZnO, partikel-partikel mikroskopis bergerak membuka jalan bagi arus surja dan akan merapat kembali setelah tegangan stabil. Penggunaan yang berulang akan menyebabkan degradasi bertahap pada kemampuan partikel ini. *Arrester* bekerja dengan membatasi tegangan agar tidak melebihi nilai tegangan sisa (*residual voltage*), sehingga peralatan listrik tetap aman dari kegagalan isolasi (PT PLN (Persero), 2014).

Secara prinsip, pengujian *watt loss* dilaksanakan dengan memberikan tegangan kerja nominal pada terminal LA, kemudian dilakukan pengukuran terhadap arus bocor dan daya aktif yang terserap oleh arrester. Besarnya daya yang hilang tersebut disebut sebagai *watt loss*, yang merepresentasikan jumlah energi listrik yang berubah menjadi panas di dalam *arrester* selama proses kerja berlangsung.

4. Pengujian Tahanan Pentanahan

Tujuan utama dari pengukuran tahanan pentanahan adalah untuk memastikan bahwa sistem *grounding* yang terdiri dari pelat tembaga, besi, atau bahan konduktor lainnya yang ditanam di dalam tanah dapat bekerja secara efektif sebagai perlindungan bagi peralatan listrik terhadap sambaran petir maupun arus gangguan singkat. Oleh karena itu, agar diperoleh nilai

tahanan tanah yang ideal, pelat konduktor perlu dipasang dengan metode yang tepat sehingga dapat menghasilkan nilai tahanan serendah mungkin. Proses pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat bernama *earth resistance tester* (Agung Suardi, 2023). Untuk cara pengukurannya dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Pengukuran Tahanan Pentanahan
(Sumber: Agung Suardi, 2023)

Untuk melihat/megetahui standar pengukuran suhu thermovisi lightning arrester dapat dilihat pada tabel 2.6.

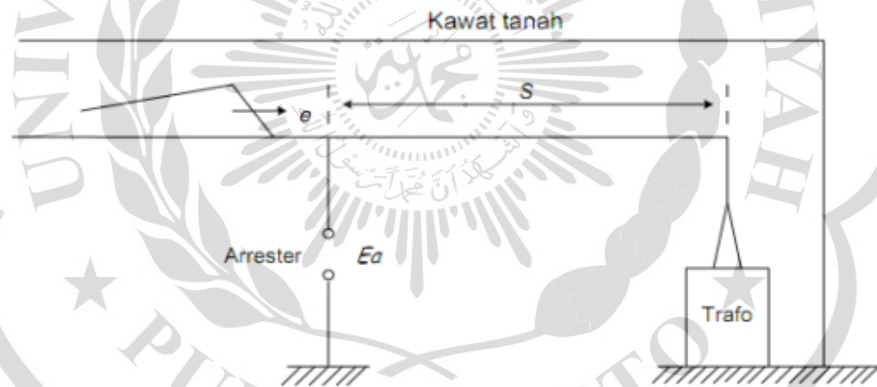
Tabel 2. 8 Rekomendasi Pengukuran Tahanan Pentanahan

Nilai Tahanan Pentanahan	Analisis	Saran
<1 Ω	Kondidi BAIK	
>1 Ω	Terjadi degradasi fungsi tahanan pentanahan LA	Laksanakan kegiatan pembersihan pada kawat pentanahan beserta komponen pendukungnya, seperti mur dan baut pada sambungan kawat tersebut. Setelah proses pembersihan selesai, lakukan pengukuran ulang nilai tahanan pentanahan. Apabila hasil pengukuran menunjukkan nilai lebih dari 1 Ω , maka perlu dilakukan perencanaan perbaikan terhadap sistem pentanahan untuk memastikan kinerjanya sesuai standar yang berlaku.

(Sumber :Rusdjaja, 2010)

n. Jarak Penempatan Atau Letak *Arrester* Terhadap *Transformer*

Penempatan atau posisi *lightning arrester* yang ideal adalah sedekat mungkin dengan peralatan utama, seperti *transformator*. Namun, dalam praktiknya, *arrester* terkadang harus dipasang pada jarak tertentu (*S*) dari *transformator* yang dilindungi. Apabila jarak antara *lightning arrester* dan peralatan terlalu jauh, maka dapat timbul tegangan lebih pada peralatan yang melebihi tegangan pelepasan *arrester*. Oleh karena itu, penentuan jarak pemasangan harus diperhitungkan secara tepat agar sistem proteksi dapat berfungsi secara optimal. (Mahendra, 2021). Untuk mengetahui jarak *arrester* yang dihubungkan oleh udara dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Jarak *Arrester* Yang Dihubungkan Oleh Saluran Udara (Sumber :Mahendra, 2021)

Untuk menentukan letak *arrester* di perlukan perhitungan menggunakan persamaan yaitu antara lain (Falih Hibatullah, 2024):

a. Perhitungan Jarak Maksimum Penempatan LA

$$S = \frac{V (Ep - Ea)}{2A} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana:

S = Jarak *lightning arrester* dengan *transformator* (m)

E_p = BIL *transformator* (KV)

E_a = Tegangan percik *arrester* (KV)

A = ketajaman gelombang tegangan Impuls (KV/ μ s)

V = Kecepatan merambat gelombang Impuls (m/ μ s)

Perhitungan BIL (Basic Insulation Level) transformator dan jarak arrester bertujuan memastikan proteksi dari surja petir dengan mencocokkan spesifikasi arrester (tegangan nominal, tegangan sisa) dan jaraknya dengan karakteristik isolasi transformator (BIL) serta sistem, menggunakan prinsip gelombang berjalan; arrester harus dipasang sedekat mungkin, namun jarak yang tepat dihitung berdasarkan impedansi gelombang dan waktu tempuh untuk memastikan tegangan sisa pada trafo < BIL trafo.

b. Perhitungan Tegangan Sistem Maksimum

Tegangan ini merupakan tegangan maksimum *lightning arrester* dengan kondisi non konduktif dan kembali dari keadaan konduktif, dapat ditunjukkan pada persamaan (Mahmudah, 2023):

$$V_{max} = V_{nominal} * 110\% \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana :

$V_{nominal}$ = tegangan nominal

V_{max} = tegangan sistem maksimal

c. Perhitungan Tegangan Pengenal *Arrester* (Mahendra, 2021) :

$$V_p = V_{max} \times 1,0 \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana :

V_p = tegangan pengenal

V_{max} = tegangan sistem maksimal

d. Tegangan terminal *arrester*

Tabel karakteristik *arrester* dapat digunakan untuk mengetahui tegangan terminal *arrester* atau tegangan kerja *arrester* (Irfansyah & Oetomo, 2023b).

e. Tegangan percikan impuls maksimal

Tabel karakteristik *arrester* dapat digunakan untuk mengetahui besarnya tegangan percikan impuls maksimum (Mahendra, 2021).

f. Tegangan kerja *arrester*

Tabel karakteristik *arrester* dapat digunakan untuk menghitung besar tegangan kerja *arrester* (Irfansyah & Oetomo, 2023b).

g. Menentukan tingkat perlindungan dan faktor perlindungan *arrester*

Untuk perhitungan tingkat perlindungan yaitu (Irfansyah & Oetomo, 2023b) :

$$T_p = E_a \times 1,1 \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana :

T_p = Tingkat perlindungan

E_a = Tegangan terminal

Untuk perhitungan faktor perlindungan yaitu (Irfansyah & Oetomo, 2023b):

$$Fp = \frac{TID \text{ trafo} - TP}{TID \text{ trafo}} \times 100 \% \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana :

Fp = Faktor perlindungan *arrester* (%)

TID trafo = Tegangan Impuls Dasar trafo (Basic Insulation Level / BIL)

TP = Tegangan Perlindungan (*Protective Level / Residual Voltage*)

o. Standar Teknis *Lightning Arrester*

peraturan dan standar teknis yang berlaku di Indonesia untuk menjamin keabsahan dan ketepatan hasil penelitian ini. Standar ini digunakan untuk mengevaluasi apakah parameter kelistrikan yang diamati sesuai dengan standar kinerja sistem distribusi tenaga listrik yang telah ditetapkan secara resmi yaitu :

- 1) PLN Pedoman Pemeliharaan 0520-2.K/DIR/2014

Buku Pedoman Pemeliharaan *Lightning Arrester* (LA) No. 05202.K/DIR/2014 dalam poin-poin yang lebih padat Empat Kategori Pemeliharaan yaitu *In-Service Inspection*: Pemeriksaan visual rutin saat alat beroperasi. *In-Service Measurement*: Pengukuran suhu (thermovisi) dan arus bocor saat beroperasi. *Shutdown Measurement*: Pengujian saat padam (tahanan isolasi). Standar Kelayakan Visual & Operasional berupa Isolator: Bersih,

tidak retak, dan tidak ada bekas loncatan listrik (*flashover*).
Pentanahan (*Grounding*): Koneksi kawat harus kencang dan bebas korosi. *Arrester* Counter: Alat penghitung surja harus berfungsi normal untuk mencatat jumlah gangguan. Parameter Teknis Utama Buku pedoman ini menetapkan batasan nilai untuk menentukan kondisi LA yaitu *Corrective Maintenance*: Perbaikan atau penggantian jika ditemukan kerusakan. Arus Bocor Resistif (Ir) Tidak boleh naik signifikan (biasanya $< 3x$ nilai awal). Tahanan Isolasi Minimal $1 \text{ M}\Omega/1 \text{ kV}$ tegangan kerja (Giga Ohm pada sistem transmisi). Thermovision (Delta T) Perbedaan suhu antar fasa atau lingkungan harus $< 15^\circ\text{C}$ (Rusdjaja, 2010).

- 2) Standar Nasional Indonesia *Arrester* surja Bagian 1: *Arrester* surja resistor non linier dengan sela untuk sistem a.b Badan Standardisasi Nasional (IEC 60099-1 (1999), IDT).

Standar ini mengatur *arrester* surja resistor non-linier dengan sela untuk sistem arus bolak-balik (a.b). Fungsinya adalah melindungi peralatan listrik dengan cara membatasi lonjakan tegangan (transien) dan memutus arus ikutan setelah lonjakan berakhir. *Arrester* ini bekerja menggunakan dua elemen utama yang dihubungkan secara seri: Sela Api (*Spark Gap*): Berfungsi sebagai sakelar otomatis yang akan terpercik (tembus) saat terjadi tegangan tinggi. Resistor Non-Linier: Memiliki hambatan rendah saat tegangan tinggi (untuk membuang arus surja) dan hambatan sangat

tinggi saat tegangan normal (untuk menghentikan aliran arus). *Arrester* dikelompokkan berdasarkan kemampuan mengalirkan arus puncak yaitu Kelas Standar: 10.000 A (10 kA), 5.000 A (5 kA), 2.500 A (2,5 kA), dan 1.500 A (1,5 kA). Pilihan kapasitas ini disesuaikan dengan tingkat ancaman petir dan pentingnya peralatan yang dilindungi. Kondisi Operasi Normal *Arrester* dirancang untuk bekerja optimal pada kondisi: Suhu: Antara -40°C hingga $+40^{\circ}\text{C}$. Ketinggian: Maksimal 1.000 meter di atas permukaan laut (mdpl) dan Frekuensi: Sistem 50 Hz atau 60 Hz(IEC 600099-4, 2009).

3) IEEE Std C62.11 (*Metal Oxide Surge Arresters*)

Sebuah *arrester* dinyatakan masih layak pakai jika memenuhi syarat berikut setelah terkena sambaran petir: Tegangan Referensi 1 mA (AC): Perubahan nilai tegangan referensi tidak boleh melebihi $\pm 5\%$. Tegangan Sisa (*Residual Voltage*): Perubahan tegangan sisa pada arus impuls 8/20 μs tidak boleh lebih dari $+5\%$. Integritas Fisik: Tidak menunjukkan kerusakan fisik yang kasat mata. Evaluasi kondisi MOSA dilakukan melalui dua pendekatan utama yaitu Teknik Non-Destruktif (Pemantauan Rutin) Teknik ini dilakukan tanpa merusak unit *arrester* untuk menilai degradasi. Pengukuran Tegangan Referensi: Menentukan titik awal konduksi pada arus 1 mA. Pengukuran Tegangan Sisa: Menilai perlindungan tegangan maksimum saat terjadi pelepasan arus (IEC 60099-1, 2005).