

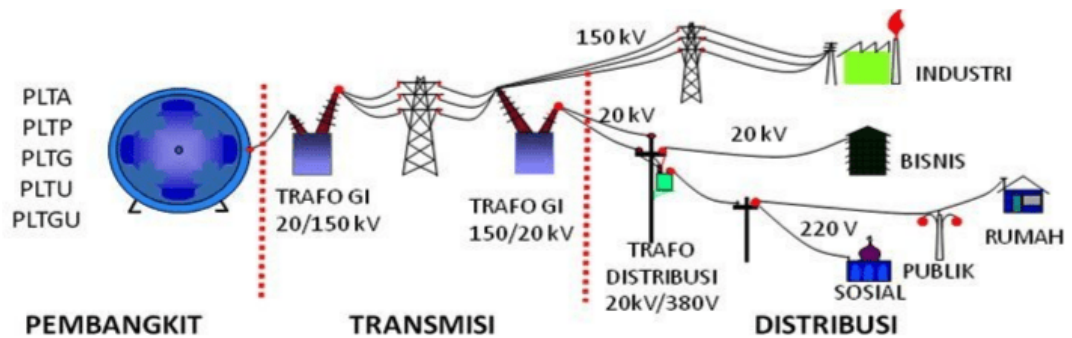
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian akhir dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk menuju konsumen dengan tingkat tegangan yang lebih rendah. Sistem ini menjadi penghubung antara sistem transmisi dan sistem pemanfaatan tenaga listrik, sehingga keandalan dan efisiensinya berpengaruh langsung terhadap mutu daya yang diterima pelanggan. Menurut Anastak (2023), sistem distribusi memegang peran penting dalam menjamin kontinuitas pasokan dan kestabilan tegangan karena beroperasi pada level tegangan menengah hingga rendah, yang menjadi titik interaksi langsung dengan konsumen akhir [5].



Gambar 2.1 Alur Distribusi Tenaga Listrik

Secara umum, sistem distribusi dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder. Jaringan distribusi primer menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk ke gardu distribusi menggunakan tegangan menengah, umumnya sebesar 20 kV di Indonesia, sedangkan jaringan distribusi sekunder menyalurkan listrik dari gardu distribusi ke pelanggan menggunakan tegangan rendah sebesar 220/380 V. Sistem distribusi ini dirancang agar mampu mengatasi berbagai kondisi beban, gangguan, dan variasi tegangan di lapangan melalui konfigurasi jaringan

seperti radial, loop, dan interconnected system, yang masing-masing memiliki keunggulan dalam hal kontinuitas pelayanan dan kemudahan pemeliharaan.[6]

Penerapan metode PDKB menjadi bagian strategis dalam manajemen sistem distribusi tenaga listrik, terutama pada jaringan tegangan menengah 20 kV. Dengan menggunakan peralatan pelindung berinsulasi seperti *insulating blanket*, *line hose*, dan *conductor cover*, pekerjaan pemeliharaan dapat dilakukan dengan aman meskipun konduktor masih bertegangan. Hal ini menjadikan sistem distribusi tidak hanya andal dalam penyaluran energi, tetapi juga efisien dari sisi waktu dan biaya operasional. Oleh karena itu, pemahaman tentang karakteristik sistem distribusi tenaga listrik sangat penting sebagai dasar untuk menganalisis peralatan pelindung isolasi yang digunakan dalam kegiatan PDKB di lapangan.

Dalam praktiknya, sistem distribusi dapat diklasifikasikan berdasarkan konfigurasi jaringannya, seperti sistem radial, loop, dan jaringan ring. Sistem radial merupakan konfigurasi yang paling sederhana dan banyak digunakan karena kemudahan pengoperasiannya, namun memiliki tingkat keandalan yang lebih rendah dibandingkan sistem ring. Sistem ring atau loop memungkinkan adanya suplai alternatif ketika terjadi gangguan, sehingga meningkatkan kontinuitas pelayanan kepada pelanggan.

Keandalan sistem distribusi sangat dipengaruhi oleh kondisi peralatan seperti konduktor, transformator distribusi, isolator, serta peralatan proteksi dan pengaman. Gangguan pada salah satu komponen tersebut dapat menyebabkan pemadaman pada wilayah tertentu. Oleh karena itu, pemeliharaan rutin dan pengujian peralatan menjadi aspek penting dalam menjaga kualitas layanan distribusi.

Selain faktor teknis, sistem distribusi juga menghadapi tantangan berupa pertumbuhan beban yang terus meningkat, integrasi sumber energi terbarukan, serta tuntutan kualitas daya yang semakin tinggi. Fluktuasi tegangan, harmonisa, dan gangguan sesaat dapat berdampak langsung pada peralatan pelanggan. Oleh karena itu, pengelolaan sistem distribusi memerlukan perencanaan yang matang serta pengawasan berkelanjutan untuk memastikan stabilitas sistem tetap terjaga.

Dalam konteks pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB), sistem distribusi memiliki karakteristik risiko yang tinggi karena pekerjaan dilakukan pada jaringan yang tetap beroperasi. Hal ini menuntut penggunaan peralatan pelindung berinsulasi yang

memenuhi standar keselamatan. Keandalan sistem distribusi tidak hanya bergantung pada desain jaringan, tetapi juga pada prosedur kerja dan kelayakan peralatan yang digunakan oleh petugas di lapangan.

Dengan demikian, sistem distribusi tenaga listrik tidak hanya berfungsi sebagai media penyaluran energi, tetapi juga sebagai elemen krusial dalam menjaga mutu pelayanan, keselamatan kerja, dan keberlanjutan operasional sistem tenaga listrik secara keseluruhan. Perencanaan, pengoperasian, dan pemeliharaan yang tepat akan memastikan bahwa energi listrik dapat diterima konsumen secara aman, andal, dan efisien.

2.1.2 Konsep Tegangan Tembus

Tegangan tembus (*breakdown voltage*) adalah nilai tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh suatu bahan isolator sebelum terjadi kegagalan dielektrik, yaitu kondisi ketika bahan kehilangan kemampuan isolasinya dan mulai menghantarkan arus listrik. Dalam kondisi normal, bahan isolator berfungsi menahan medan listrik antara dua konduktor agar arus tidak mengalir. Namun, ketika medan listrik yang bekerja melebihi batas kemampuan bahan, elektron bebas di dalam material akan terlepas dan menimbulkan arus loncatan listrik (*discharge*), yang dikenal sebagai peristiwa tembus listrik [7].

Fenomena tegangan tembus ini dapat dijelaskan secara fisika melalui mekanisme *ionisasi elektron* di dalam material. Ketika intensitas medan listrik meningkat, energi kinetik partikel bermuatan akan bertambah hingga mampu menumbuk molekul lain dan menghasilkan elektron bebas tambahan. Proses ini terjadi berulang-ulang secara eksponensial hingga membentuk arus besar yang menembus bahan isolasi. Besarnya tegangan tembus suatu bahan bergantung pada ketebalan, homogenitas struktur material, dan polaritas tegangan yang diterapkan. Menurut Pratiwi dkk. (2021), nilai tegangan tembus juga dipengaruhi oleh *mikrostruktur polimer* dan kualitas ikatan silang (*cross-linking*) pada material isolator.

Selain faktor internal bahan, lingkungan eksternal turut memengaruhi kemampuan dielektrik suatu isolator. Suhu tinggi dan kelembapan udara dapat menurunkan resistivitas permukaan dan mempercepat terjadinya pelepasan muatan (*surface discharge*). Di daerah dengan iklim tropis lembap seperti Papua, penurunan sifat hidrofobik material plastik

menyebabkan permukaan isolator lebih mudah menyerap air dan membentuk jalur konduktif yang mempercepat proses tembus listrik. Sebaliknya, bahan berbasis karet umumnya memiliki elastisitas dan stabilitas termal yang lebih baik, sehingga mampu mempertahankan ketahanan dielektriknya lebih lama terhadap pengaruh lingkungan.

Nilai tegangan tembus sering digunakan sebagai parameter utama dalam pengujian kelayakan peralatan berinsulasi, termasuk *insulating blanket* pada pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB). Dalam uji dielektrik sesuai SPLN D3.032:2020, bahan dianggap layak apabila mampu menahan tegangan uji tanpa terjadi tembus selama periode pengujian tertentu. Oleh karena itu, pemahaman konsep tegangan tembus sangat penting untuk menganalisis perbedaan performa material isolasi antara blanket karet dan plastik yang digunakan oleh tim PDKB di UP3 Jayapura. [1]

2.1.3 Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB)

Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) merupakan metode pemeliharaan jaringan distribusi tenaga listrik tanpa melakukan pemadaman, sehingga kontinuitas penyaluran energi listrik tetap terjaga. Metode ini dikembangkan oleh PLN untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi serta mengurangi nilai SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) dan SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) pada jaringan tegangan menengah. Berdasarkan SPLN D3.032:2020, pekerjaan PDKB mencakup berbagai kegiatan seperti penggantian peralatan, pembersihan isolator, serta pemasangan dan pelepasan konduktor yang dilakukan dengan kondisi konduktor tetap bertegangan. [1]

Dalam pelaksanaannya, PDKB dibedakan menjadi tiga metode utama, yaitu :

1. Metode Berjarak (Bare Hand/Hot Stick Method), yaitu pekerjaan yang dilakukan dengan menjaga jarak aman antara pekerja dan konduktor bertegangan menggunakan alat bantu isolasi.
2. Metode Bersentuhan Langsung (Bare Hand Method), yaitu pekerjaan dilakukan dengan pekerja menyentuh langsung bagian bertegangan menggunakan sarung tangan dan peralatan pelindung berinsulasi penuh.
3. Metode Tegangan Rendah (Direct Contact Method), yaitu metode yang diterapkan pada sistem distribusi tegangan rendah dengan prosedur pengamanan yang

disesuaikan.

Dari ketiga metode tersebut, metode berjarak merupakan yang paling umum digunakan dalam pekerjaan PDKB tegangan menengah di lingkungan PLN, karena memberikan perlindungan maksimum terhadap risiko kejut listrik melalui media isolasi.

Peralatan yang digunakan dalam PDKB dirancang khusus untuk menahan tegangan kerja nominal sistem distribusi (biasanya 20 kV). Salah satu peralatan penting yang wajib digunakan adalah insulating blanket, yaitu lembaran isolator fleksibel yang digunakan untuk menutupi bagian konduktor atau peralatan yang bertegangan agar tidak terjadi kontak langsung dengan pekerja. Blanket ini biasanya terbuat dari karet sintetis (rubber) atau plastik polimer (PVC) yang memiliki sifat dielektrik tinggi, ketahanan mekanis, dan fleksibilitas yang baik. Setiap peralatan pelindung berinsulasi harus diuji secara berkala sesuai dengan standar SPLN D3.032:2020, yang mengatur uji visual dan uji tegangan tembus untuk memastikan kemampuan isolasinya tetap memenuhi batas aman

Dalam praktiknya, faktor lingkungan seperti suhu tinggi, kelembapan udara, dan paparan sinar ultraviolet dapat memengaruhi kinerja peralatan isolasi yang digunakan dalam pekerjaan PDKB. Oleh sebab itu, pemilihan material pelindung yang memiliki karakteristik dielektrik dan ketahanan permukaan yang stabil menjadi sangat penting. Kegagalan material dalam menahan tegangan tembus dapat menyebabkan risiko kebocoran arus atau kejut listrik yang membahayakan keselamatan pekerja. Dengan demikian, analisis perbandingan antara blanket karet dan plastik dalam konteks ketahanan terhadap tegangan tembus menjadi sangat relevan untuk menjamin keandalan sistem distribusi serta keselamatan tim PDKB di lapangan.

2.1.4 Standar Tegangan Uji Dielektrik Insulating Blanket

Insulating blanket yang digunakan pada pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) wajib memenuhi ketentuan pengujian dielektrik sesuai dengan SPLN D3.032:2020 tentang *Peralatan PDKB Tegangan Menengah*. Pengujian dielektrik bertujuan untuk memastikan bahwa material isolasi masih memiliki kemampuan menahan tegangan operasi tanpa mengalami tembus listrik (*breakdown*).

Dalam SPLN D3.032:2020, insulating blanket diklasifikasikan berdasarkan kelas tegangan nominal, dan setiap kelas memiliki tegangan uji yang harus dipenuhi, baik untuk type test maupun uji berkala. Selain itu, standar ini juga menentukan jarak aman elektroda uji untuk memastikan konsistensi hasil pengujian.

Tabel 2.1 Standar Tegangan Uji Dielektrik Insulating Blanket

KELAS	TEGANGAN NOMINAL (V)	TEGANGAN UJI (V)		JARAK AMAN ELEKTRODA UJI (mm)
		TYPE TEST	BERKALA	
00	500	2500/3m	-	10
0	1000	5000/3m	-	20
1	7500	10000/3m	10000/1m	80
2	17000	20000/3m	20000/1m	150
3	26500	30000/3m	30000/1m	200
4	36000	40000/3m	40000/1m	300

1. **Type Test** adalah pengujian awal yang dilakukan terhadap produk baru untuk memastikan kesesuaian desain dan kualitas manufaktur.
2. **Uji Berkala** dilakukan untuk memverifikasi kelayakan insulating blanket yang sudah digunakan di lapangan.
3. **Jarak aman elektroda uji** bertujuan menghindari loncatan permukaan yang dapat mengganggu akurasi pengujian.

Standar ini menjadi acuan penting dalam penelitian karena hasil uji tegangan tembus blanket karet dan plastik akan dibandingkan dengan nilai ambang minimal yang

dipersyaratkan dalam SPLN D3.032:2020. Dengan demikian, analisis dapat menentukan apakah perlindungan isolasi masih layak digunakan pada pekerjaan PDKB 20 kV di UP3 Jayapura.

Tabel 2.1 menyajikan standar tegangan uji dielektrik insulating blanket berdasarkan klasifikasi kelas tegangan nominal. Tabel ini menunjukkan hubungan antara tegangan kerja nominal suatu sistem dengan parameter pengujian yang harus dipenuhi oleh peralatan berinsulasi, termasuk nilai tegangan uji tipe (*type test*), tegangan uji berkala, serta jarak aman elektroda uji. Standar ini menjadi acuan penting dalam menentukan kelayakan operasional insulating blanket pada sistem tenaga listrik dengan tingkat tegangan tertentu.

Berdasarkan tabel tersebut, terlihat bahwa semakin tinggi kelas tegangan nominal, maka semakin besar pula nilai tegangan uji yang harus diberikan pada saat pengujian dielektrik. Sebagai contoh, pada kelas 00 dengan tegangan nominal 500 V, tegangan uji tipe ditetapkan sebesar 2500 V selama 3 menit dengan jarak elektroda 10 mm. Sementara pada kelas 4 dengan tegangan nominal 36.000 V, tegangan uji tipe meningkat menjadi 40.000 V selama 3 menit dengan jarak elektroda 300 mm. Peningkatan ini menunjukkan bahwa standar pengujian dirancang proporsional terhadap tingkat risiko dan medan listrik yang akan dihadapi dalam aplikasi nyata.

Perbedaan antara *type test* dan uji berkala juga menjadi poin penting dalam tabel tersebut. *Type test* umumnya dilakukan pada awal produksi atau saat sertifikasi awal untuk memastikan bahwa produk memenuhi spesifikasi desain. Durasi pengujian tipe tercatat selama 3 menit untuk seluruh kelas. Sementara itu, uji berkala dilakukan secara rutin selama masa operasional dengan durasi pengujian lebih singkat, yaitu 1 menit pada kelas tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa uji berkala berfungsi sebagai verifikasi kondisi aktual material tanpa harus mengulang pengujian intensif seperti pada tahap sertifikasi awal.

Pada kelas 1 dengan tegangan nominal 7.500 V, standar mensyaratkan tegangan uji tipe sebesar 10.000 V selama 3 menit dan uji berkala sebesar 10.000 V selama 1 menit dengan jarak elektroda 80 mm. Jika dibandingkan dengan kelas 2 (17.000 V), nilai tegangan uji meningkat menjadi 20.000 V dan jarak elektroda menjadi 150 mm. Pola ini menunjukkan bahwa jarak elektroda berbanding lurus dengan peningkatan tegangan

nominal, yang bertujuan untuk mensimulasikan distribusi medan listrik yang lebih besar pada tegangan tinggi.

Khusus untuk sistem distribusi 20 kV, yang secara umum berada pada rentang kelas 2 (17 kV), standar pengujian tipe sebesar 20 kV selama 3 menit dan uji berkala 20 kV selama 1 menit sangat relevan. Artinya, insulating blanket yang digunakan pada jaringan 20 kV minimal harus mampu menahan tegangan uji 20 kV sesuai durasi yang ditetapkan. Nilai ini menjadi batas minimum kelayakan operasional dan menjadi acuan dalam evaluasi hasil pengujian di Bab IV penelitian.

Aspek jarak aman elektroda uji juga memiliki signifikansi teknis yang penting. Semakin tinggi tegangan nominal, semakin besar jarak elektroda yang digunakan dalam pengujian. Hal ini bertujuan untuk mencegah terjadinya loncatan listrik yang tidak merepresentasikan kegagalan internal material, melainkan akibat jarak uji yang terlalu dekat. Dengan demikian, parameter jarak elektroda memastikan bahwa hasil pengujian benar-benar mencerminkan kemampuan dielektrik material, bukan kesalahan prosedural.

Secara keseluruhan, Tabel 2.1 menunjukkan bahwa standar pengujian dielektrik dirancang dengan prinsip margin keamanan terhadap tegangan nominal. Tegangan uji yang diberikan umumnya lebih tinggi atau setara dengan tegangan kerja sistem, sehingga memberikan faktor pengaman terhadap kemungkinan tegangan lebih (*overvoltage*) dalam kondisi operasional. Standar ini menjadi landasan utama dalam menentukan apakah insulating blanket masih layak digunakan atau harus dikeluarkan dari layanan.

Dalam konteks penelitian ini, tabel standar tersebut berfungsi sebagai referensi pembandingan terhadap hasil pengujian blanket karet dan plastik pada sistem distribusi 20 kV. Analisis terhadap kesesuaian nilai uji aktual dengan standar pada Tabel 2.1 akan menunjukkan tingkat kelayakan dan margin keamanan material yang digunakan dalam pekerjaan PDKB. Dengan demikian, tabel ini memiliki peran krusial sebagai dasar evaluasi teknis dalam penelitian.

2.1.5 Karakteristik Material Insulating Blanket (Karet dan Plastik)

Insulating blanket merupakan salah satu peralatan pelindung berinsulasi yang digunakan pada pekerjaan PDKB tegangan menengah sebagai penutup lentur (*flexible cover*) untuk mencegah kontak langsung maupun tidak langsung dengan bagian bertegangan. Pada praktik PDKB, insulating blanket berfungsi sebagai penghalang isolasi sementara yang dipasang pada konduktor atau peralatan bertegangan untuk meningkatkan faktor keselamatan kerja. Berdasarkan SPLN D3.032:2020, pengujian penutup lentur/blanket dilakukan untuk memastikan bahwa kemampuan isolasi peralatan masih memenuhi kelayakan dielektrik sebelum digunakan di lapangan.



Gambar 2.2 *Insulating Blanket*

Secara umum, insulating blanket yang digunakan dalam pekerjaan PDKB dapat tersusun dari material karet maupun material berbasis plastik/polimer. Blanket berbahan karet pada umumnya memiliki sifat fleksibel, elastis, dan mampu mengikuti bentuk permukaan objek yang dilindungi. Salah satu material karet yang banyak digunakan sebagai bahan isolasi pada aplikasi kelistrikan adalah EPDM (*ethylene propylene diene monomer*). EPDM dikenal memiliki ketahanan yang baik terhadap panas, ozon, cuaca,

serta mempunyai sifat isolasi listrik yang baik sehingga sesuai digunakan sebagai material proteksi pada lingkungan kerja kelistrikan.

Sementara itu, blanket berbahan plastik pada dasarnya termasuk dalam kelompok material polimer yang memiliki karakteristik ringan dan cukup fleksibel, namun pada kondisi tertentu dapat mengalami penurunan kemampuan isolasi akibat kerusakan fisik di permukaan seperti goresan atau abrasi. Pada material isolasi polimer, kondisi permukaan merupakan faktor penting yang berpengaruh terhadap kualitas isolasi karena ketidakrataan permukaan (*surface roughness*) dapat memengaruhi distribusi medan listrik pada material dan menurunkan ketahanan dielektriknya. Dengan kata lain, cacat permukaan seperti goresan berpotensi menjadi titik awal terjadinya konsentrasi medan listrik yang dapat mempercepat terjadinya kegagalan isolasi saat diberikan tegangan uji.

Berdasarkan uraian tersebut, karakteristik material insulating blanket (karet dan plastik) memiliki perbedaan pada aspek ketahanan fisik permukaan dan kestabilan kemampuan isolasinya. Oleh karena itu, pemeriksaan visual dan pengujian dielektrik secara berkala menjadi tahapan yang penting untuk memastikan insulating blanket masih memenuhi persyaratan keselamatan kerja dan layak digunakan dalam pekerjaan PDKB tegangan menengah sesuai SPLN D3.032:2020.

A. Insulating Blanket Berbahan Karet

Insulating blanket berbahan karet merupakan peralatan penutup lentur yang memiliki karakteristik elastis, fleksibel, dan mampu mengikuti bentuk permukaan peralatan atau konduktor yang dilindungi. Dalam aplikasi kelistrikan, material karet banyak dimanfaatkan karena memiliki sifat isolasi listrik yang baik serta mampu memberikan perlindungan terhadap tegangan kerja dan kondisi lingkungan tertentu. Salah satu material karet yang umum digunakan sebagai bahan isolasi dalam aplikasi proteksi kelistrikan adalah EPDM (*ethylene propylene diene monomer*). EPDM dikenal memiliki ketahanan yang baik terhadap panas, ozon, serta penuaan akibat cuaca, sehingga dinilai sesuai sebagai material isolasi pada peralatan pelindung.

Beberapa karakteristik penting insulating blanket berbahan karet yang berkaitan dengan penggunaan PDKB antara lain :

1. Fleksibilitas dan elastisitas tinggi, sehingga blanket mudah dipasang pada bagian bertegangan dengan permukaan tidak rata serta mampu menutup celah perlindungan secara lebih merata.
2. Ketahanan lingkungan lebih baik, terutama terhadap kondisi luar ruangan seperti suhu, kelembapan, dan ozon, yang dapat mempercepat degradasi material isolasi apabila kualitas material tidak memadai.
3. Kestabilan isolasi lebih konsisten, karena material karet umumnya tidak mudah mengalami perubahan sifat dielektrik secara drastis apabila tidak terdapat kerusakan fisik yang signifikan.
4. Cenderung lebih toleran terhadap deformasi mekanis, sehingga tetap dapat digunakan dengan aman selama hasil pemeriksaan visual dan pengujian dielektrik menunjukkan kondisi layak.

Dengan karakteristik tersebut, blanket karet pada prinsipnya menjadi salah satu peralatan pelindung yang diandalkan pada pekerjaan PDKB, selama dilakukan pemeriksaan kondisi secara rutin dan pengujian berkala sesuai standar yang berlaku.

B. Insulating Blanket Berbahan Plastik

Insulating blanket berbahan plastik pada umumnya termasuk dalam kelompok material polimer yang memiliki struktur ringan, cukup fleksibel, dan mudah diaplikasikan sebagai pelindung isolasi sementara. Material plastik/polimer dapat memiliki kemampuan isolasi yang baik, namun dalam kondisi tertentu dapat mengalami penurunan performa dielektrik apabila terdapat cacat permukaan atau kerusakan mekanis akibat penggunaan. Pada material polimer, permukaan isolasi menjadi faktor penting karena ketidakrataan permukaan seperti goresan, abrasi, atau titik cacat dapat menyebabkan konsentrasi medan listrik dan meningkatkan peluang terjadinya kegagalan isolasi saat diberikan tegangan uji.

Beberapa karakteristik penting insulating blanket berbahan plastik yang berkaitan dengan penggunaan PDKB antara lain :

1. Bobot relatif ringan dan praktis, sehingga memudahkan mobilisasi dan pemasangan di lokasi kerja.
2. Lebih rentan terhadap kerusakan permukaan, seperti goresan atau abrasi akibat gesekan saat penggunaan maupun penyimpanan, yang dapat menurunkan kualitas isolasi.
3. Sensitif terhadap kondisi permukaan isolasi, karena cacat kecil pada permukaan dapat menjadi titik awal terjadinya tembus listrik pada saat pengujian dielektrik.
4. Memerlukan inspeksi visual lebih ketat, terutama untuk memastikan tidak ada cacat permukaan yang berpotensi membahayakan saat digunakan pada bagian bertegangan.

Berdasarkan karakteristik tersebut, blanket plastik tetap dapat digunakan sebagai peralatan pelindung pada pekerjaan PDKB apabila kondisinya memenuhi persyaratan kelayakan. Namun, pengendalian kualitas melalui pemeriksaan visual dan pengujian dielektrik berkala menjadi aspek penting untuk memastikan blanket plastik tidak mengalami penurunan kemampuan isolasi sebelum digunakan.

2.1.6 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Tegangan Tembus Insulating Blanket

Tegangan tembus (*breakdown voltage*) merupakan kondisi ketika material isolasi kehilangan kemampuan menahan tegangan listrik, sehingga arus listrik dapat melintas menembus material tersebut. Pada penggunaan insulating blanket sebagai peralatan pelindung dalam pekerjaan PDKB, kemampuan menahan tegangan uji sangat dipengaruhi oleh kondisi material, kondisi permukaan, serta faktor lingkungan dan perlakuan saat penggunaan. Oleh karena itu, pengujian dielektrik dilakukan untuk memastikan bahwa insulating blanket masih memenuhi persyaratan kelayakan sebelum digunakan pada bagian bertegangan. Pengujian berkala penutup lentur/blanket mengacu pada SPLN D3.032:2020 sebagai standar acuan kelayakan peralatan PDKB tegangan menengah.

Secara umum, terdapat beberapa faktor utama yang dapat memengaruhi kekuatan dielektrik dan tegangan tembus pada insulating blanket, yaitu sebagai berikut.

1. Kondisi Permukaan Isolasi (Goresan, Abrasi, dan Cacat Permukaan)

Kondisi permukaan insulating blanket merupakan salah satu faktor paling dominan yang memengaruhi kemampuan isolasinya. Cacat permukaan seperti goresan, abrasi, atau retakan kecil dapat menyebabkan ketidakrataan permukaan isolasi, sehingga meningkatkan konsentrasi medan listrik pada titik tertentu. Keadaan ini dapat memperbesar kemungkinan terjadinya kegagalan isolasi, terutama saat blanket diberikan tegangan uji pada pengujian dielektrik. Dengan demikian, walaupun secara umum material blanket masih baik, adanya cacat permukaan dapat mempercepat terjadinya tembus listrik saat pengujian.

2. Ketebalan dan Keseragaman Material Blanket

Ketebalan material isolasi memiliki kaitan langsung terhadap kemampuan blanket dalam menahan tegangan listrik. Pada prinsipnya, ketebalan yang lebih besar dapat meningkatkan kemampuan isolasi karena memperpanjang lintasan tembus arus listrik di dalam material. Namun demikian, ketebalan yang tidak seragam atau adanya bagian yang menipis akibat tekanan, lipatan tajam, atau proses pemakaian dapat menurunkan kekuatan dielektrik blanket. Oleh karena itu, kondisi fisik dan keseragaman ketebalan blanket perlu diperhatikan pada pemeriksaan visual dan pemeliharaan.

3. Penuaan Material (Aging) dan Umur Pemakaian

Material isolasi mengalami penuaan (*aging*) akibat penggunaan berulang, paparan suhu, serta paparan lingkungan seperti sinar ultraviolet (UV) dan kelembapan. Penuaan material dapat menurunkan sifat elastisitas, meningkatkan kekakuan, dan memicu perubahan mikrostruktur pada material isolasi, sehingga memengaruhi kemampuan dielektrik. Proses penuaan ini dapat terjadi baik pada blanket karet maupun blanket plastik, namun respons material terhadap penuaan dapat berbeda tergantung jenis bahan penyusun dan kualitas produksinya.

4. Kontaminasi Permukaan (Kelembapan, Debu, Minyak, dan Kotoran)

Kontaminasi pada permukaan blanket seperti debu, minyak, air, atau kotoran dapat memicu terbentuknya jalur konduktif pada permukaan isolasi. Kondisi ini berisiko memicu terjadinya loncatan permukaan (*flashover*) ataupun mempercepat terjadinya breakdown ketika dilakukan pengujian dielektrik. Oleh karena itu, kebersihan permukaan insulating blanket menjadi salah satu aspek penting yang harus dikendalikan sebelum penggunaan, termasuk proses pembersihan dan pengeringan sesuai prosedur yang ditetapkan.

5. Penyimpanan dan Penanganan (Handling)

Penyimpanan dan penanganan insulating blanket yang tidak sesuai dapat menimbulkan cacat fisik yang berdampak pada penurunan kekuatan dielektrik. Penumpukan yang tidak tepat, penyimpanan pada tempat yang terpapar panas, kelembapan tinggi, atau kontak dengan benda tajam dapat menyebabkan kerusakan permukaan seperti goresan dan deformasi. Selain itu, lipatan tajam yang terus-menerus dapat menyebabkan bagian tertentu menjadi lemah sehingga berpotensi menurunkan kemampuan isolasinya. Oleh karena itu, prosedur penyimpanan dan penanganan peralatan perlu dilakukan sesuai rekomendasi standar dan SOP pemeliharaan.

6. Kesesuaian Parameter Pengujian Dielektrik terhadap Standar

Parameter pengujian dielektrik seperti tegangan uji, lama pengujian, jarak elektroda, dan metode pengujian harus sesuai standar agar hasil evaluasi kelayakan bersifat valid. Berdasarkan SPLN D3.032:2020, pengujian penutup lentur/blanket dilakukan dengan ketentuan nilai tegangan uji dan durasi tertentu pada pengujian berkala.

2.1.7 Mekanisme Kegagalan Isolasi pada Insulating Blanket (Tembus dan Flashover/Sparkover)

Dalam pekerjaan PDKB tegangan menengah, insulating blanket berfungsi sebagai penghalang isolasi tambahan yang harus mampu menahan tegangan kerja maupun tegangan uji sesuai standar. Namun, pada kondisi tertentu insulating blanket dapat mengalami kegagalan isolasi sehingga tidak lagi mampu menjalankan fungsinya sebagai pelindung. Kegagalan isolasi pada peralatan berinsulasi umumnya dapat terjadi dalam bentuk **tembus listrik (breakdown)** pada material maupun **loncatan permukaan (flashover/sparkover)**. Pada SPLN D3.032:2020, hasil pengujian dielektrik pada peralatan pelindung berinsulasi dinyatakan lulus apabila tidak terjadi tembus listrik maupun loncatan permukaan selama proses pengujian berlangsung.

1. Tembus Listrik (Breakdown)

Tembus listrik atau *breakdown* merupakan kondisi ketika medan listrik yang bekerja pada material isolasi melebihi kekuatan dielektriknya, sehingga terjadi aliran arus yang menembus material isolasi. Pada insulating blanket, breakdown dapat terjadi akibat adanya kelemahan internal material, penurunan kualitas isolasi, atau adanya cacat permukaan yang memperkecil ketebalan efektif isolasi. Breakdown pada umumnya bersifat kritis karena menunjukkan bahwa material isolasi tidak lagi mampu menjadi penghalang arus listrik dalam kondisi tegangan tertentu. Oleh karena itu, apabila insulating blanket mengalami tembus pada pengujian dielektrik, maka peralatan tersebut harus dinyatakan tidak layak digunakan karena berpotensi menimbulkan bahaya keselamatan pada pekerjaan PDKB.

2. Loncatan Permukaan (Flashover/Sparkover)

Flashover atau sparkover merupakan loncatan listrik yang terjadi melalui lintasan permukaan isolator, biasanya dipengaruhi oleh kondisi permukaan material, jarak rambat (*creepage distance*), serta keberadaan kontaminan seperti air, debu, atau kotoran. Pada peralatan pelindung seperti insulating blanket, flashover dapat terjadi apabila permukaan blanket menjadi lembap atau kotor sehingga terbentuk jalur konduktif di permukaan. Walaupun flashover tidak selalu menandakan kerusakan internal pada material seperti breakdown, kejadian ini tetap berbahaya dan menjadi

indikasi bahwa kondisi permukaan isolasi tidak memenuhi persyaratan kelayakan untuk digunakan di dekat bagian bertegangan.

3. Peran Cacat Permukaan terhadap Kegagalan Isolasi

Cacat permukaan seperti goresan, abrasi, maupun retakan mikro dapat mempercepat terjadinya kegagalan isolasi. Hal ini dikarenakan cacat permukaan dapat menyebabkan distribusi medan listrik menjadi tidak merata sehingga memunculkan titik konsentrasi medan listrik pada area tertentu. Pada saat insulating blanket diberikan tegangan uji, titik lemah tersebut dapat menjadi lokasi awal terjadinya pelepasan muatan (*partial discharge*) yang berlanjut menjadi tembus listrik. Selain itu, cacat permukaan juga dapat mempermudah terbentuknya lintasan permukaan yang memicu flashover, terutama apabila disertai kontaminasi atau kelembapan.

4. Keterkaitan Mekanisme Kegagalan dengan Pengujian Dielektrik

Pengujian dielektrik pada insulating blanket bertujuan untuk mengevaluasi apakah peralatan masih mampu bertahan terhadap tegangan uji sesuai standar dalam durasi tertentu. Apabila selama pengujian terjadi breakdown atau flashover/sparkover, maka insulating blanket dinyatakan tidak memenuhi kelayakan dielektrik dan harus dipisahkan dari peralatan siap pakai. Pada SPLN D3.032:2020, pengujian berkala penutup lentur/blanket dilakukan untuk memastikan bahwa peralatan yang digunakan dalam pekerjaan PDKB tetap berada pada kondisi aman, sehingga risiko kegagalan isolasi saat pekerjaan berlangsung dapat diminimalkan.

2.2. Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurnal, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut :

1. Menurut Sofitri Rahayu dkk. (2019) dalam jurnal berjudul “Pengujian Analisis Tegangan Tembus Minyak Transformator 60 MVA di GIS Kebun Jeruk” menyatakan bahwa minyak transformator berfungsi sebagai isolasi sekaligus pendingin untuk menjaga keandalan transformator dalam sistem distribusi tenaga listrik. Penelitian ini dilakukan di Gardu Induk GIS Kebun Jeruk dengan tujuan untuk menganalisis karakteristik dielektrik minyak isolasi menggunakan standar SPLN 50-1982 dan IEC 56 (1991). Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai rata-rata tegangan tembus minyak transformator 2 sebesar 23,7 kV/2,5 mm berada di bawah standar yang ditetapkan, sedangkan minyak transformator 3 memiliki nilai rata-rata 32,7 kV/2,5 mm sehingga masih layak digunakan. Penurunan nilai tegangan tembus disebabkan oleh adanya kandungan uap air dan degradasi termal pada minyak akibat pernapasan trafo selama operasi. Hasil ini menegaskan pentingnya pemeriksaan berkala terhadap bahan isolasi cair untuk menjaga mutu dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik. [8]
2. Penelitian oleh Syrojul Qori dkk. (2024) dalam Jurnal Ilmiah SUTET berjudul “Perancangan Isolator Berbahan Dasar Cangkang Telur Sebagai Pengganti Kwarts dan Veld Spaat pada Isolator Padat” bertujuan mengembangkan bahan isolator alternatif yang ekonomis dan ramah lingkungan. Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan merancang dan menguji prototipe isolator berbasis campuran cangkang telur dan resin. Uji tegangan tembus dilakukan dengan variasi tegangan antara 5 kV hingga 80 kV dalam kondisi kering selama dua menit untuk setiap tahap pengujian. Hasil pengujian menunjukkan bahwa isolator dari bahan cangkang telur mampu menahan tegangan hingga 80 kV, melampaui batas minimum 25 kV yang ditetapkan SPLN No. 475.K/DIR/2010. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan isolator keramik konvensional yang mengalami tembus pada 50 kV. [9]

3. Penelitian yang dilakukan oleh Ervan Hasan Harun, Randani K. P. Ota, dan Jumiati Ilham (2024) dalam *International Journal of Renewable Energy Engineering* berjudul “Perbandingan Tegangan Tembus dan Kuat Tekan Isolator Resin Epoksi Menggunakan Pasir Sungai Bolango Gorontalo dan Pasir Silika Sebagai Filler” bertujuan untuk mengetahui pengaruh jenis bahan pengisi terhadap sifat dielektrik dan mekanik isolator padat. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pengujian tegangan tembus AC dan uji kuat tekan pada bahan resin epoksi yang dicampur pasir silika dan pasir sungai. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan pasir sungai menyebabkan penurunan nilai tegangan tembus karena kandungan mineral konduktif seperti magnetit, sedangkan penambahan pasir silika meningkatkan kemampuan dielektrik hingga mencapai 45,27 kV. Dari sisi kuat tekan, isolator dengan filler pasir sungai memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan dengan pasir silika. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pemilihan jenis filler sangat berpengaruh terhadap ketahanan isolasi listrik dan kekuatan mekanik bahan polimer resin epoksi. [10]
4. Penelitian oleh Muh. Rifai Damogalad dkk. (2024) dalam *Journal of Renewable Energy Engineering* berjudul “Pengujian Breakdown Voltage Bahan Isolasi PVC Kabel Instalasi Listrik” bertujuan untuk menentukan kemampuan bahan isolasi PVC pada kabel instalasi listrik dalam menahan tegangan hingga titik tembus. Pengujian dilakukan pada kabel NYM 2×2,5 mm² dari tiga merek (Eterna, Suprime, dan Zentrum) menggunakan transformator uji HV dengan kapasitas hingga 100 kV. Hasil penelitian menunjukkan nilai rata-rata tegangan tembus berturut-turut sebesar 1,02 kV, 0,94 kV, dan 0,90 kV, yang semuanya masih memenuhi standar SPLN dan IEC 60502-2. Analisis menunjukkan bahwa semua kabel standar mampu menahan tegangan uji di atas tegangan nominalnya, menunjukkan kualitas isolasi yang baik. Penelitian ini menegaskan pentingnya pengujian tegangan tembus dalam menjamin keandalan dan keselamatan instalasi listrik bertegangan rendah, serta memberikan referensi penting bagi pengujian bahan isolator berbasis PVC pada lingkungan tropis lembap seperti Jayapura. [11]

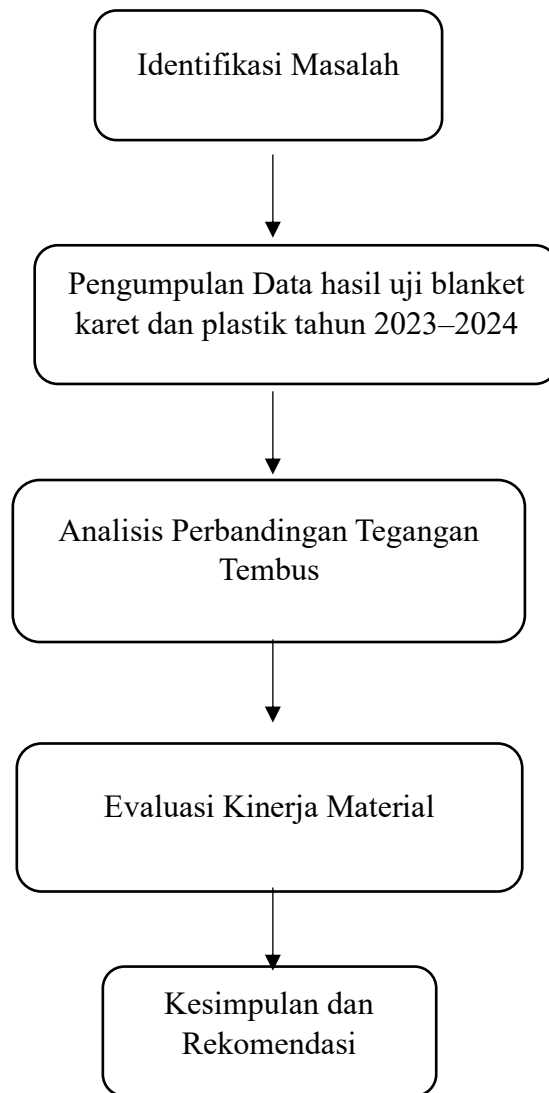
Tabel 2.2 Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1.	“Pengujian Analisis Tegangan Tembus Minyak Transformator 60 MVA di GIS Kebun Jeruk” (2019)	Masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah penurunan nilai tegangan tembus minyak isolasi transformator akibat degradasi termal dan kandungan air.	Penelitian menggunakan metode pengujian langsung berdasarkan standar SPLN 50-1982 dan IEC 56 (1991) untuk menentukan nilai tegangan tembus minyak transformator.	Hasil menunjukkan nilai rata-rata tegangan tembus 23,7 kV/2,5 mm pada trafo 2 dan 32,7 kV/2,5 mm pada trafo 3, dengan penurunan disebabkan oleh kelembapan dan penuaan minyak.	Penelitian ini berfokus pada isolasi cair, sehingga belum membahas karakteristik tegangan tembus pada bahan isolator padat seperti karet atau plastik yang digunakan pada peralatan PDKB.
2.	Perancangan Isolator Berbahan Dasar Cangkang Telur Sebagai Pengganti Kwarts dan Veld Spaat pada	Masalah yang diangkat adalah keterbatasan bahan isolator konvensional yang memiliki biaya tinggi dan dampak lingkungan.	Penelitian menggunakan metode eksperimental dengan pembuatan isolator padat berbasis campuran cangkang telur dan resin, diuji	Hasil menunjukkan isolator dari bahan cangkang telur mampu menahan tegangan hingga 80 kV, lebih tinggi dibanding isolator keramik	Penelitian ini berfokus pada isolator padat berbasis limbah organik, belum membahas perbandingan sifat dielektrik bahan fleksibel seperti karet

	Isolator Padat” (2024)		pada variasi tegangan 5–80 kV selama dua menit.	yang tembus pada 50 kV.	dan plastik yang digunakan pada peralatan PDKB.
3.	“Perbandingan Tegangan Tembus dan Kuat Tekan Isolator Resin Epoksi Menggunakan Pasir Sungai Bolango Gorontalo dan Pasir Silika Sebagai Filler” (2024)	Masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah pengaruh jenis bahan pengisi terhadap ketahanan dielektrik dan kekuatan mekanik isolator resin epoksi.	Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan uji tegangan tembus AC dan uji kuat tekan pada bahan resin epoksi yang dicampur pasir sungai dan pasir silika.	Hasil menunjukkan resin dengan pasir silika memiliki tegangan tembus 45,27 kV, sedangkan pasir sungai lebih rendah namun kuat tekan lebih tinggi.	Penelitian ini masih berfokus pada pengaruh bahan pengisi padat terhadap sifat isolator resin, belum membahas bahan fleksibel seperti karet dan plastik yang digunakan dalam sistem PDKB tegangan menengah.
4.	“Pengujian Breakdown Voltage Bahan Isolasi PVC Kabel Instalasi	Masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah perlunya mengetahui kemampuan bahan isolasi	Penelitian menggunakan metode eksperimental dengan pengujian tegangan	Hasil menunjukkan nilai rata-rata tegangan tembus 1,02 kV, 0,94 kV, dan 0,90 kV yang semuanya	Penelitian ini hanya meneliti isolasi PVC pada kabel bertegangan rendah, belum membahas

	Listrik” (2024)	PVC pada kabel instalasi listrik dalam menahan tegangan hingga titik tembus.	tembus pada kabel NYM 2×2,5 mm ² dari tiga merek berbeda menggunakan transformator uji HV berkapasitas 100 kV.	memenuhi standar SPLN dan IEC 60502-2.	bahan pelindung fleksibel pada peralatan PDKB tegangan menengah seperti blanket karet dan plastik.
--	--------------------	--	---	--	--

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.3 Kerangka Pemikiran

Penelitian ini berawal dari adanya perbedaan hasil pengujian antara blanket karet dan plastik yang digunakan dalam pekerjaan PDKB di UP3 Jayapura, di mana pada tahun 2024 ditemukan kebocoran pada blanket plastik. Kondisi tersebut menimbulkan pertanyaan mengenai pengaruh jenis bahan isolasi terhadap kemampuan menahan tegangan tembus. Oleh karena itu, langkah awal penelitian dilakukan dengan meninjau literatur dan standar SPLN D3.032:2020 sebagai acuan uji kelayakan peralatan berinsulasi. Selanjutnya, data hasil pengujian dari Pusertif dikumpulkan untuk memperoleh informasi nilai tegangan tembus masing-masing material. Data tersebut kemudian dianalisis secara teknis dengan membandingkan karakteristik dielektrik, ketebalan, serta pengaruh kondisi lingkungan terhadap performa isolasi. Dari hasil analisis diperoleh gambaran perbandingan kinerja antara blanket karet dan plastik terhadap kemampuan menahan tegangan kerja sistem 20 kV. Tahap akhir penelitian adalah melakukan evaluasi kelayakan dan menarik kesimpulan mengenai bahan isolasi yang paling sesuai digunakan untuk menjamin keselamatan kerja dalam kegiatan PDKB.