

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem terintegrasi yang terdiri dari pembangkitan, transmisi, dan distribusi yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari sumber pembangkit ke konsumen akhir secara kontinu, aman, dan ekonomis. Secara teoritis, sistem tenaga listrik dirancang untuk memenuhi tiga kriteria utama, yaitu:

1. **Keandalan (reliability)**
2. **Kualitas daya (power quality)**
3. **Efisiensi operasional (efficiency)**

Sistem pembangkitan menghasilkan energi listrik dalam bentuk tegangan menengah (6–20 kV) yang kemudian dinaikkan melalui transformator step-up ke tegangan tinggi atau ekstra tinggi untuk transmisi jarak jauh. Setelah mencapai pusat beban, tegangan diturunkan kembali melalui transformator distribusi menjadi tegangan menengah (20 kV) dan selanjutnya menjadi tegangan rendah (380/220 V) untuk pelanggan. Secara struktural, sistem tenaga listrik dapat direpresentasikan sebagai:

Pembangkit → Transmisi → Gardu Induk → Distribusi → Pelanggan

Dalam konteks penelitian ini, fokus kajian berada pada subsistem distribusi tegangan menengah 20 kV.

2.1.2 Sistem Distribusi Tegangan Menengah 20 kV

Sistem distribusi tegangan menengah adalah bagian sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan daya dari gardu induk ke gardu distribusi atau langsung ke pelanggan besar. Di Indonesia, standar tegangan distribusi menengah adalah 20 kV

dengan frekuensi sistem 50 Hz.

Secara umum, sistem distribusi memiliki karakteristik:

- Panjang jaringan relatif luas
- Terpapar langsung kondisi lingkungan
- Memiliki rasio gangguan lebih tinggi dibanding transmisi
- Berinteraksi langsung dengan pelanggan

Komponen utama sistem distribusi meliputi:

1. Konduktor penghantar
2. Isolator
3. Tiang penyangga
4. Peralatan proteksi (OCR, recloser, LBS)
5. Transformator distribusi
6. Sistem pembumian

Sistem distribusi memiliki tingkat kerentanan gangguan lebih tinggi dibanding sistem transmisi karena berada pada ruang terbuka (overhead line) dan berdekatan dengan aktivitas manusia serta vegetasi.

2.1.3 Konfigurasi Jaringan Distribusi

Secara teoritis, terdapat tiga konfigurasi utama jaringan distribusi:

1. Sistem Radial

Sistem radial merupakan konfigurasi paling sederhana, dimana satu penyulang melayani pelanggan dalam satu arah tanpa jalur cadangan.

Karakteristik:

- Struktur sederhana
- Biaya investasi rendah
- Koordinasi proteksi mudah

Kelemahan utama sistem radial adalah rendahnya fleksibilitas saat terjadi gangguan, karena gangguan pada satu titik dapat menyebabkan pemadaman seluruh pelanggan di sisi downstream.

2. Sistem Ring (Loop System)

Sistem ring memiliki dua sumber suplai yang membentuk jalur melingkar. Apabila terjadi gangguan pada satu sisi, suplai dapat dialihkan dari sisi lain.

Keunggulan:

- Keandalan lebih tinggi
- Fleksibilitas manuver beban

Kelemahan:

- Biaya instalasi lebih mahal
- Sistem proteksi lebih kompleks

3. Sistem Interconnected / Grid

Digunakan pada sistem distribusi perkotaan dengan beban tinggi. Keandalan sangat tinggi karena banyak jalur alternatif.

Namun, kompleksitas proteksi dan biaya investasi jauh lebih besar.

2.1.4 Parameter Operasi Sistem Distribusi

Kinerja sistem distribusi ditentukan oleh parameter listrik berikut:

1. Tegangan (Voltage Regulation)

Tegangan nominal sistem distribusi adalah 20 kV dengan toleransi $\pm 5\%$. Penurunan tegangan sepanjang konduktor dapat dihitung dengan:

$$\Delta V = I(R \cos \phi + X \sin \phi)$$

Dimana:

ΔV = penurunan tegangan

I = arus

R = resistansi konduktor

X = reaktansi konduktor

Penurunan tegangan yang berlebihan dapat menyebabkan gangguan kualitas daya.

2. Arus Beban

Arus sistem distribusi bergantung pada besar beban pelanggan. Pada sistem tiga fasa, daya aktif dirumuskan sebagai:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi$$

Dimana:

P = daya aktif (Watt)

V = tegangan antar fasa (Volt)

I = arus (Ampere)

$\cos \phi$ = faktor daya

3. Rugi-Rugi Daya

Rugi-rugi daya pada sistem distribusi terjadi akibat resistansi konduktor dan dinyatakan sebagai:

$$P_{loss} = I^2 R$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa rugi-rugi daya meningkat secara kuadrat terhadap arus, sehingga pengendalian beban dan faktor daya menjadi penting dalam operasi sistem distribusi.

2.1.5 Teori Keandalan Sistem Distribusi

Keandalan sistem tenaga listrik merupakan probabilitas suatu sistem untuk beroperasi tanpa gangguan dalam periode waktu tertentu dan kondisi operasi tertentu. Dalam teori reliability engineering, keandalan dinyatakan sebagai fungsi waktu:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Dimana:

R(t) = probabilitas sistem beroperasi tanpa gagal

λ = laju kegagalan (failure rate)

t = waktu operasi

Semakin besar nilai λ , maka probabilitas kegagalan sistem semakin tinggi.

1. Laju Kegagalan (Failure Rate, λ)

Failure rate didefinisikan sebagai jumlah kegagalan per satuan waktu. Pada sistem distribusi, nilai λ dipengaruhi oleh:

- Panjang jaringan
- Kualitas material
- Kondisi lingkungan
- Frekuensi pemeliharaan

Secara umum:

$$\lambda = \text{Jumlah Gangguan} / \text{Total Waktu Operasi}$$

2. Mean Time Between Failure (MTBF)

MTBF adalah rata-rata waktu antara dua kegagalan berturut-turut.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

Nilai MTBF yang besar menunjukkan sistem lebih andal.

3. Mean Time To Repair (MTTR)

MTTR adalah rata-rata waktu yang diperlukan untuk memperbaiki gangguan.

$$MTTR = \text{Total Waktu Perbaikan} / \text{Jumlah Gangguan}$$

Dalam sistem distribusi, MTTR sangat dipengaruhi oleh metode pemeliharaan yang digunakan. Pelaksanaan PDKB secara teoritis dapat menurunkan MTTR efektif karena tidak memerlukan waktu manuver pemadaman dan penormalan sistem.

2.1.6 Model Keandalan pada Sistem Radial

Pada sistem radial, jika satu komponen mengalami kegagalan, maka seluruh pelanggan setelah titik gangguan akan mengalami pemadaman. Secara teoritis, keandalan sistem radial merupakan hasil perkalian keandalan setiap komponen secara seri:

$$R_{system} = R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots \times R_n$$

Jika salah satu komponen memiliki reliability rendah, maka reliability sistem secara keseluruhan akan turun secara signifikan.

Isolator sebagai komponen distribusi memiliki kontribusi penting terhadap total failure rate sistem.

2.1.7 Teori Gangguan pada Sistem Distribusi

Gangguan pada sistem distribusi dapat diklasifikasikan menjadi:

1. Gangguan Hubung Singkat

Gangguan akibat terhubungnya dua penghantar berbeda potensial. Gangguan ini dapat berupa:

- Single line to ground fault
- Line to line fault
- Three phase fault

Arus gangguan hubung singkat dihitung dengan:

$$I_{sc} = \frac{V}{Z_{total}}$$

Dimana:

I_{sc} = arus hubung singkat

Z_{total} = impedansi total sistem

Arus gangguan yang tinggi dapat menyebabkan kerusakan isolator dan komponen lainnya.

2. Gangguan Akibat Flashover

Flashover terjadi ketika medan listrik pada permukaan isolator melebihi kekuatan dielektrik udara atau material isolator. Fenomena ini sering terjadi akibat:

- Kontaminasi permukaan
- Kelembaban tinggi
- Polusi industri

Medan listrik dinyatakan sebagai:

$$E = \frac{V}{d}$$

Jika E melebihi batas kritis, maka terjadi loncatan bunga api (arc).

2.1.8 Teori Proteksi Sistem Distribusi

Sistem proteksi bertujuan untuk:

1. Mengisolasi gangguan secepat mungkin
2. Membatasi kerusakan peralatan
3. Menjaga stabilitas sistem

Peralatan proteksi utama pada sistem distribusi meliputi:

1. Over Current Relay (OCR)

Relay arus lebih bekerja ketika arus melebihi nilai setting tertentu.

Karakteristik waktu kerja relay dapat dinyatakan sebagai:

$$t = \frac{k}{(I/I_{set})^n - 1}$$

Dimana:

t = waktu operasi

I = arus gangguan

Iset = arus setting

k dan n = konstanta karakteristik relay

2. Recloser

Recloser adalah alat proteksi otomatis yang dapat membuka dan menutup kembali secara otomatis saat terjadi gangguan sementara.

Keuntungan recloser:

- Mengurangi durasi padam
- Mengatasi gangguan sementara tanpa intervensi manual

3. Koordinasi Proteksi

Koordinasi proteksi bertujuan agar peralatan proteksi yang paling dekat dengan titik gangguan bekerja terlebih dahulu.

Prinsip koordinasi:

- Time grading
- Current grading

2.1.9 Stabilitas Tegangan pada Sistem Distribusi

Stabilitas tegangan adalah kemampuan sistem mempertahankan profil tegangan dalam batas yang diizinkan.

Penurunan tegangan yang signifikan dapat menyebabkan:

- Overheating motor
- Penurunan efisiensi peralatan
- Gangguan operasional pelanggan

Penurunan tegangan dipengaruhi oleh panjang penyulang dan besarnya arus beban.

2.1.10 Hubungan Teori Sistem Distribusi dengan Pemeliharaan

Secara teoritis, peningkatan failure rate (λ) akan meningkatkan nilai SAIDI dan SAIFI.

Untuk menurunkan indeks tersebut diperlukan:

1. Peningkatan kualitas material
2. Perbaikan sistem proteksi
3. Pemeliharaan preventif
4. Metode kerja tanpa pemadaman

Dalam konteks ini, metode PDKB dapat dipahami sebagai strategi teknis untuk mengurangi MTTR dan menekan ENS tanpa menambah frekuensi gangguan.

2.2 Pengertian Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB)

Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) adalah kegiatan pemeliharaan, perbaikan, atau penggantian peralatan listrik yang dilakukan pada sistem tenaga listrik tanpa memutuskan aliran tegangan. Tujuan utama penerapan metode ini adalah untuk menjaga kontinuitas penyaluran tenaga listrik agar pelanggan tidak mengalami padam selama pekerjaan berlangsung.

Menurut SPLN 1:2007, PDKB merupakan serangkaian tindakan pemeliharaan dan perbaikan pada peralatan listrik bertegangan yang dilakukan dengan memenuhi standar

keselamatan kerja tinggi, menggunakan peralatan isolasi khusus dan personel yang memiliki kompetensi serta sertifikasi PDKB.

Pelaksanaan pekerjaan PDKB didasarkan pada prinsip pengendalian jarak dan potensial listrik, sehingga pekerja dapat melakukan aktivitas di dekat atau bahkan pada konduktor bertegangan dengan aman. Dalam praktiknya, PLN menerapkan tiga metode utama dalam pelaksanaan PDKB, yaitu:

1. Metode Berjarak (*Hot Stick Method*): pekerja menggunakan tongkat isolasi untuk menjaga jarak aman dari konduktor.
2. Metode Sentuh Langsung (*Direct Contact / Bare-Hand Method*): pekerja menyamakan potensial tubuh dengan konduktor dan menggunakan APD berisolasi penuh.
3. Metode Potensial Sama (*Equipotential Method*): pekerja berada pada potensial yang sama dengan konduktor melalui platform konduktif berisolasi dari tanah.

Melalui penerapan PDKB, PLN dapat melakukan kegiatan pemeliharaan tanpa padam (*zero outage maintenance*) sehingga keandalan sistem meningkat, nilai SAIDI dan SAIFI menurun, serta kualitas layanan kepada pelanggan tetap terjaga.

2.2.1 Tujuan dan Manfaat Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan

1. Tujuan PDKB

Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) dilaksanakan dengan tujuan utama untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik tanpa mengganggu kontinuitas penyaluran daya kepada pelanggan. Pelaksanaan pemeliharaan secara bertegangan memungkinkan PLN melakukan perbaikan, penggantian, maupun inspeksi peralatan listrik tanpa melakukan pemadaman.

Secara lebih spesifik, tujuan penerapan metode PDKB adalah sebagai berikut:

- a. Menjaga kontinuitas pasokan listrik agar pelanggan tidak mengalami gangguan selama kegiatan pemeliharaan.
- b. Menurunkan nilai SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) dan SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) yang merupakan indikator utama keandalan distribusi.
- c. Meningkatkan efisiensi operasional melalui pengurangan energi listrik yang hilang

akibat pemadaman.

- d. Meningkatkan keselamatan kerja melalui penerapan prosedur berstandar tinggi dan penggunaan peralatan berisolasi.
- e. Memperpanjang umur peralatan dengan melakukan perawatan preventif secara terjadwal tanpa harus menunggu kondisi padam.
- f. Mendukung pelayanan prima (customer satisfaction) dengan memastikan suplai listrik tetap tersedia selama pekerjaan berlangsung.

2. Manfaat PDKB

Selain bertujuan menjaga kontinuitas pasokan, penerapan PDKB juga memberikan sejumlah manfaat teknis, operasional, dan ekonomis bagi PLN, antara lain:

1. Meningkatkan Keandalan Sistem Distribusi

PDKB memastikan kegiatan pemeliharaan dilakukan tanpa pemadaman, sehingga gangguan terhadap sistem penyaluran tenaga listrik dapat diminimalkan.

2. Mengurangi Kerugian Energi dan Finansial

Dengan tidak adanya padam pelanggan, PLN dapat menghindari kehilangan energi listrik (kWh) dan menjaga stabilitas pendapatan perusahaan.

3. Menurunkan Gangguan Pelanggan (SAIDI/SAIFI)

Setiap pekerjaan yang dilakukan tanpa padam secara langsung berkontribusi terhadap penurunan nilai indeks gangguan sistem distribusi.

4. Efisiensi Waktu dan Sumber Daya

PDKB memungkinkan jadwal pemeliharaan yang lebih fleksibel karena tidak perlu menunggu waktu pemadaman, sehingga waktu kerja dan personel dapat digunakan lebih optimal.

5. Meningkatkan Kompetensi dan Profesionalisme Pegawai

Petugas PDKB dilatih dengan sertifikasi khusus yang meningkatkan keterampilan teknis, kesadaran keselamatan, dan kedisiplinan kerja.

6. Citra Positif PLN di Masyarakat

Kemampuan PLN menjaga kontinuitas pasokan listrik meskipun melakukan pekerjaan berisiko tinggi meningkatkan kepercayaan publik terhadap profesionalisme perusahaan.

2.3 Metode PDKB pada Jaringan Tegangan Menengah 20 kV

Dalam sistem distribusi tenaga listrik tegangan menengah (20 kV), pekerjaan pemeliharaan dalam keadaan bertegangan dilakukan dengan menggunakan metode tertentu yang telah distandarkan oleh PT PLN (Persero) melalui dokumen SPLN 1:2007 dan SOP PDKB-TM.

Tujuan utama penerapan metode-metode ini adalah untuk memungkinkan petugas melakukan perbaikan atau penggantian komponen tanpa memutus aliran listrik kepada pelanggan, dengan tetap mengutamakan aspek keselamatan kerja. identitas visual resmi satuan kerja diperlihatkan pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1 – Logo PDKB

2.3.1 Metode Berjarak

Metode berjarak dilakukan dengan menggunakan peralatan tongkat isolasi (hot stick) sebagai alat perantara antara petugas dengan konduktor yang bertegangan. Petugas berada pada jarak aman dari sumber tegangan dan seluruh peralatan yang digunakan memiliki tingkat isolasi yang sesuai dengan tegangan kerja jaringan.

Karakteristik metode berjarak:

1. Pekerja menjaga jarak aman dari konduktor sesuai standar jarak minimum (clearance distance).
2. Peralatan utama yang digunakan adalah tongkat isolasi, clamp stick, dan tang isolasi.
3. Sangat bergantung pada kualitas isolasi alat dan teknik pengoperasian yang benar.

Kelebihan:

1. Risiko sengatan listrik relatif rendah karena pekerja tidak bersentuhan langsung.
2. Cocok digunakan pada pekerjaan di tiang beton, daerah sempit, atau cuaca lembap.
3. Tidak memerlukan penyamaan potensial tubuh.

Kekurangan:

1. Membutuhkan tenaga fisik tinggi karena penggunaan tongkat panjang dan berat.
2. Mobilitas dan presisi kerja terbatas, terutama untuk peralatan di posisi sulit.
3. Efisiensi waktu kerja lebih rendah dibanding metode sentuh langsung.

Contoh penerapan: penggantian isolator, pembersihan konduktor, atau pemasangan arrester pada jaringan 20 kV tanpa padam. Metode berjarak mengandalkan penggunaan tongkat isolasi untuk menjaga jarak aman antara petugas dan konduktor. Karakteristik utama metode ini, termasuk peralatan yang digunakan, divisualisasikan pada **Gambar 2.2** yang memperlihatkan aktivitas PDKB di lapangan.



Gambar 2.2 – PDKB Berjarak

2.3.2 Metode Sentuh Langsung (Direct Contact / Bare Hand Method)

Metode sentuh langsung dilakukan dengan menyamakan potensial tubuh pekerja dengan konduktor bertegangan, sehingga tidak terjadi beda potensial antara tubuh dan penghantar listrik.

Dalam pelaksanaannya, pekerja menggunakan Alat Pelindung Diri (APD) isolasi penuh, meliputi pakaian konduktif, sarung tangan isolasi, sepatu isolasi, helm pelindung, dan peralatan grounding pribadi.

Karakteristik metode sentuh langsung:

1. Pekerja menyentuh langsung konduktor setelah penyamaan potensial tubuh dilakukan.
2. Seluruh tubuh pekerja berada pada potensial yang sama dengan penghantar.
3. Diperlukan alat pbumian pribadi (personal grounding device) untuk menghindari kejutan potensial sisa.

Kelebihan:

1. Efisiensi kerja tinggi — waktu pekerjaan lebih singkat karena fleksibilitas gerak.
2. Dapat digunakan untuk pekerjaan dengan akses terbatas atau posisi kompleks.

3. Hasil kerja lebih presisi dan cepat pada pekerjaan penggantian komponen.

Kekurangan:

1. Risiko kecelakaan fatal tinggi bila terjadi kegagalan APD atau kesalahan prosedur.
2. Tidak boleh dilakukan saat cuaca lembap atau hujan.
3. Memerlukan sertifikasi khusus dan pengawasan ketat dari pengawas K3 PDKB.

Contoh penerapan: penggantian isolator, pemasangan jumper, dan perbaikan sambungan penghantar pada sistem SUTM 20 kV. Metode sentuh langsung menggunakan *bucket truck* ditunjukkan pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3 – PDKB Sentuh Langsung

2.4 Isolator pada Sistem Distribusi 20 kV

2.4.1 Pengertian Isolator

Isolator merupakan komponen utama pada sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi untuk menopang konduktor dan mengisolasi aliran arus listrik dari tiang atau struktur penyangga agar tidak terjadi kebocoran arus ke tanah.

Dalam sistem Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) 20 kV, isolator berperan penting menjaga jarak aman listrik antara konduktor dan struktur mekanik.

Menurut SPLN 64-1:1985 tentang standar peralatan distribusi, isolator didefinisikan sebagai komponen listrik yang dirancang untuk menahan tegangan listrik dan beban mekanik tanpa kehilangan fungsi isolasinya dalam berbagai kondisi cuaca dan lingkungan.

Isolator harus mampu:

Menahan tegangan kerja 20 kV secara kontinu.

Menahan beban mekanik akibat tarikan konduktor dan gaya angin.

Tahan terhadap panas, kelembaban, sinar ultraviolet (UV), dan kontaminasi udara.

Memiliki nilai tegangan tembus (flashover voltage) sesuai standar SPLN.

2.4.2 Fungsi Isolator

Fungsi utama isolator dalam sistem distribusi tenaga listrik antara lain:

- Menopang konduktor agar posisi penghantar tetap stabil dan aman.
- Memisahkan konduktor dari tiang penyangga untuk mencegah arus bocor ke tanah.
- Menahan beban mekanik seperti tarikan kabel, angin, atau getaran.
- Menjaga jarak isolasi listrik antara penghantar dan struktur mekanik.
- Mencegah flashover akibat loncatan listrik pada kondisi tegangan lebih.

2.4.3 Jenis-Jenis Isolator pada SUTM 20 kV

Berdasarkan bentuk dan fungsinya, isolator pada jaringan SUTM 20 kV dibedakan menjadi beberapa jenis utama:

- **Isolator Pin (Pin Type Insulator)**

Isolator jenis ini digunakan pada tiang lurus atau saluran tegak untuk menyangga konduktor yang terpasang di bagian atas kepala tiang.

- Terbuat dari bahan porselen atau polimer komposit.
- Digunakan untuk tegangan kerja 6, 12, dan 20 kV.
- Dipasang dengan baut dan pin pada lengan penyangga (cross arm). konstruksi isolator tumpu untuk jaringan lurus terlihat pada **Gambar 2.4**



Gambar 2.4 – Isolator Pin pada Jaringan 20 kV

- **Isolator Post (Post Type Insulator)**

Isolator post digunakan untuk menopang konduktor pada arah belokan atau sambungan (terminal atau tap-off point). isolator jenis *post* untuk beban lentur tinggi ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.

1. Memiliki kekuatan mekanik tinggi.
2. Dapat menahan beban lentur akibat perubahan arah konduktor.
3. Biasanya dipasang pada kepala tiang atau gardu portal.



Gambar 2.5 – Isolator Post / Stack Type

c. Isolator Dead-End (Strain Insulator)

Isolator jenis ini digunakan pada ujung bentangan konduktor (anchor point) atau pada posisi belokan besar di jaringan SUTM. penggunaan isolator tarik pada tiang awal/akhir dilihat pada **Gambar 2.6**.

- a. Berfungsi untuk menahan tarikan konduktor akibat beban mekanik.
- b. Dipasang dengan clamp dan tali pengikat logam.
- c. Umumnya berbahan komposit silikon rubber karena lebih ringan dan tahan polusi.



Gambar 2.6 – Isolator Dead-End Komposit

2.4.4 Karakteristik Material Isolator

Isolator pada sistem distribusi 20 kV umumnya terbuat dari tiga jenis material utama, yaitu porselen, kaca (glass), dan polimer komposit (silicone rubber). Setiap material memiliki karakteristik dielektrik, mekanik, serta ketahanan lingkungan yang berbeda.

1. Isolator Porselen

Porselen merupakan material keramik berbasis alumina silikat yang memiliki:

- Kekuatan mekanik tinggi
- Tahanan terhadap panas
- Stabilitas kimia baik

Namun porselen memiliki kelemahan pada:

- Berat relatif besar
- Rentan retak akibat benturan mekanik
- Permukaan mudah terkontaminasi polusi

2. Isolator Kaca

Kaca memiliki transparansi visual yang memudahkan inspeksi retak internal.

Kelebihannya:

- Mudah mendeteksi kerusakan
- Permukaan lebih halus dibanding porselen

Kekurangannya:

- Rapuh terhadap benturan
- Risiko pecah akibat perubahan suhu ekstrem

3. Isolator Polimer (Silicone Rubber)

Isolator komposit modern menggunakan inti fiberglass dengan lapisan silikon rubber.

Kelebihannya:

- Lebih ringan
- Tahan polusi
- Memiliki sifat hidrofobik (menolak air)

Namun memiliki potensi:

- Degradasi UV
- Aging material akibat paparan lingkungan jangka panjang

2.4.5 Mekanisme Kegagalan Isolator

Kegagalan isolator dapat terjadi akibat kombinasi faktor listrik, mekanik, dan lingkungan. Secara umum mekanisme kegagalan dapat diklasifikasikan menjadi:

1. Kegagalan Elektris
2. Kegagalan Mekanis
3. Kegagalan Lingkungan

2.4.5.1 Tracking dan Surface Discharge

Tracking adalah pembentukan jalur karbon konduktif permanen pada permukaan isolator akibat arus bocor berulang.

Prosesnya terjadi sebagai berikut:

1. Permukaan isolator terkontaminasi debu, garam, atau polusi industri.
2. Kelembaban membentuk lapisan elektrolit tipis.
3. Terjadi arus bocor kecil (leakage current).
4. Pemanasan lokal menyebabkan degradasi material.
5. Terbentuk jalur karbon konduktif permanen.

Tracking sangat berbahaya karena:

- Menurunkan tahanan isolasi
- Memicu flashover
- Sulit dideteksi pada tahap awal

Fenomena ini lebih sering terjadi di daerah tropis lembap seperti wilayah distribusi UP3 Lahat.

2.4.5.2 Aging (Penuaan Material)

Aging adalah proses degradasi sifat fisik dan elektrik material akibat paparan jangka panjang terhadap:

- Radiasi ultraviolet (UV)
- Siklus panas–dingin
- Tegangan listrik kontinu
- Polusi kimia

Pada isolator polimer, aging menyebabkan:

- Retak mikro (microcracking)
- Penurunan sifat hidrofobik
- Penurunan kekuatan tarik inti fiberglass

Pada isolator porselen:

- Retak rambut (hairline crack)
- Penurunan kekuatan mekanik akibat kelelahan material

Aging memperpendek umur teknis isolator dan meningkatkan risiko gangguan sistem.

2.4.5.3 Pollution Flashover

Pollution flashover adalah loncatan listrik pada permukaan isolator akibat kontaminasi polusi dan kelembaban.

Prosesnya:

1. Polutan (debu, asap, partikel industri) menempel pada permukaan isolator.
2. Air hujan atau embun melarutkan polutan menjadi lapisan konduktif.
3. Arus bocor meningkat.
4. Terjadi pemanasan tidak merata.
5. Terbentuk dry band (bagian kering lokal).
6. Tegangan terakumulasi pada dry band.
7. Terjadi flashover permukaan.

Fenomena ini sangat umum pada sistem distribusi di daerah:

- Pesisir (polusi garam)
- Industri (asap kimia)
- Daerah lembap

Pollution flashover merupakan salah satu penyebab utama gangguan pada jaringan SUTM 20 kV.

2.4.5.4 Degradasi Termal

Arus bocor kecil yang terus-menerus dapat menyebabkan pemanasan lokal pada permukaan isolator.

Efeknya:

- Pelemahan struktur molekul polimer
- Perubahan warna (discoloration)
- Penurunan kekuatan dielektrik

Jika berlanjut, degradasi termal dapat menyebabkan breakdown total isolator.

2.4.5.5 Kegagalan Mekanis

Selain faktor listrik, isolator juga menahan beban mekanik akibat:

- Tarikan konduktor
- Beban angin
- Getaran akibat lalu lintas
- Perubahan suhu

Kegagalan mekanik dapat berupa:

- Patah pada isolator pin
- Lepasnya clamp
- Retak struktural pada isolator post

Kegagalan mekanik sering menjadi pemicu awal gangguan listrik.

2.4.6 Faktor Lingkungan Tropis terhadap Kinerja Isolator

Wilayah dengan kelembaban tinggi seperti Sumatera Selatan memiliki karakteristik:

- Relative humidity tinggi (>80%)
- Curah hujan tinggi
- Polusi vegetasi dan debu tanah

Kondisi ini mempercepat:

- Proses tracking
- Korosi fitting logam
- Penurunan resistansi permukaan

Oleh karena itu, pemilihan material isolator komposit silikon lebih direkomendasikan pada wilayah dengan tingkat polusi tinggi.

2.4.7 Metode Pengujian Kinerja Isolator

Untuk memastikan kelaikan isolator, dilakukan beberapa pengujian:

1. Uji Tegangan Tembus AC
2. Uji Impuls Petir (Lightning Impulse Test)
3. Uji Mekanik Tarik
4. Uji Hidrofobisitas (untuk isolator polimer)
5. Pengujian Partial Discharge

Pengujian ini bertujuan memastikan isolator mampu bertahan pada tegangan kerja nominal 20 kV serta kondisi gangguan sementara.

2.5 Konsep Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) pada PDKB

Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) termasuk dalam kategori pekerjaan berisiko tinggi (high risk work) karena dilakukan pada sistem tenaga listrik yang masih aktif mengalirkan arus listrik. Oleh sebab itu, penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) menjadi aspek utama yang wajib diterapkan secara ketat untuk melindungi pekerja, peralatan, dan sistem jaringan listrik itu sendiri. standar APD isolasi penuh untuk metode SL dirinci pada **Gambar 2.7**.



Gambar 2.7 – APD Lengkap PDKB Sentuh Langsung

Menurut Permenaker RI No. 12 Tahun 2015 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja pada Pekerjaan Listrik, setiap kegiatan yang melibatkan tegangan listrik harus memperhatikan empat prinsip utama, yaitu:

1. Pencegahan kecelakaan kerja melalui perencanaan dan inspeksi rutin.
2. Penggunaan alat pelindung diri (APD) yang sesuai dengan level tegangan kerja.
3. Pengawasan dan pengendalian risiko oleh personel bersertifikat K3.
4. Pelatihan dan kompetensi petugas, termasuk simulasi keadaan darurat (emergency drill).

2.5.1 Tujuan Penerapan K3 pada PDKB

Penerapan K3 dalam pekerjaan PDKB bertujuan untuk:

- Mencegah terjadinya kecelakaan akibat listrik (electrical accident), seperti sengatan, percikan listrik, atau flashover.
- Melindungi integritas peralatan dan jaringan distribusi agar tetap berfungsi normal.
- Menjamin pekerja PDKB bekerja dalam kondisi aman secara fisik dan psikis.
- Memastikan semua pekerjaan dilakukan sesuai dengan prosedur standar PLN (SOP PDKB-TM).
- Menciptakan budaya kerja aman di lingkungan tenaga listrik.

2.5.2 Prinsip K3 dalam Pekerjaan PDKB

Agar pekerjaan bertegangan dapat dilakukan dengan aman, terdapat beberapa prinsip dasar yang diterapkan oleh PLN dalam kegiatan PDKB, yaitu:

- Jarak Aman Kerja (Working Distance)

Setiap pekerjaan pada sistem 20 kV harus memperhatikan jarak minimum aman antara pekerja dan konduktor.

Berdasarkan SPLN 1:2007, jarak aman untuk tegangan 20 kV adalah 30–60 cm, tergantung jenis alat isolasi dan kondisi lingkungan.

- Isolasi dan Pembumian (Insulation and Grounding)
- Semua peralatan kerja seperti tongkat isolasi, tang isolasi, dan clamp harus melalui uji tegangan (dielectric test) sebelum digunakan.
- Pekerja yang menggunakan metode sentuh langsung harus terhubung dengan personal grounding cable untuk mencegah beda potensial tubuh.
- APD dan Perlengkapan Kerja

Pekerja wajib menggunakan APD sesuai standar IEC 61482 dan ASTM D120, meliputi:

- Sarung tangan isolasi kelas 2 (17 kV tested)
- Sepatu isolasi
- Helm dan faceshield pelindung percikan listrik
- Pakaian pelindung berbahan anti-statis dan tahan api
- Pemeriksaan dan Pengujian Pra-Kerja (Pre-Job Inspection)

Sebelum pekerjaan dimulai, dilakukan toolbox meeting dan pemeriksaan alat secara menyeluruh, termasuk pengukuran tahanan isolasi serta pengecekan kondisi lingkungan.

- Pengawasan dan Sertifikasi Pekerja PDKB

Setiap petugas wajib memiliki sertifikat kompetensi PDKB-TM yang dikeluarkan oleh PLN Training Center. Pengawas kerja harus memiliki sertifikat Ahli K3 Listrik dan Ahli Teknik Tenaga Listrik.

2.5.3 Hirarki Pengendalian Risiko pada PDKB

Dalam penerapan sistem K3, PLN menggunakan pendekatan hierarchy of control untuk mengendalikan risiko di lapangan. Tahapan pengendalian risiko secara sistematis ada pada **Gambar 2.8**.

Tingkatan Pengendalian	Contoh pada PDKB	Keterangan
1. Eliminasi	Hindari pekerjaan saat cuaca ekstrem	Menghapus bahaya dari sumbernya
2. Substitusi	Gunakan metode berjarak jika lingkungan lembap	Mengganti metode kerja yang lebih aman
3. Rekayasa Teknik (Engineering Control)	Gunakan tongkat isolasi & alat bertegangan tinggi	Mencegah kontak langsung dengan sumber listrik
4. Administratif (Administrative Control)	SOP, jadwal kerja, briefing	Mengatur prosedur dan waktu kerja
5. APD (Personal Protective Equipment)	Sarung tangan, sepatu, helm isolasi	Lapisan perlindungan terakhir bagi pekerja

2.5.4 Mekanisme Sengatan Listrik dan Dampaknya terhadap Tubuh Manusia

Paparan arus listrik terhadap tubuh manusia dapat menimbulkan efek fisiologis yang sangat berbahaya, terutama pada sistem saraf dan jantung. Tingkat keparahan cedera akibat sengatan listrik ditentukan oleh beberapa faktor utama, yaitu:

1. Besar arus yang mengalir melalui tubuh (Ampere)
2. Lama waktu paparan (detik)
3. Jalur arus dalam tubuh

4. Kondisi kulit (kering atau basah)
5. Frekuensi arus (Hz)

Menurut standar keselamatan listrik internasional, efek arus listrik terhadap tubuh manusia dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

Arus (mA) Dampak terhadap Tubuh

1 mA	Sensasi ringan
5 mA	Kejut ringan
10–20 mA	Kehilangan kontrol otot
30 mA	Ambang fibrilasi jantung
>75 mA	Fibrilasi ventrikel (fatal)
>1 A	Henti jantung

Pada sistem distribusi 20 kV, arus gangguan yang tersedia dapat mencapai ribuan ampere. Oleh karena itu, kegagalan isolasi sekecil apa pun berpotensi menyebabkan cedera fatal dalam waktu sangat singkat.

Durasi paparan juga sangat menentukan. Arus sebesar 30 mA selama lebih dari 0,3 detik dapat menyebabkan gangguan irama jantung permanen.

Fenomena ini menjelaskan mengapa metode sentuh langsung memiliki tingkat severity yang sangat tinggi dalam analisis risiko.



Gambar 2.8 – Diagram Hirarki Pengendalian Risiko

2.6 Metode Analisis Risiko K3

2.6.1 Pengertian Analisis Risiko

Analisis risiko merupakan suatu proses sistematis untuk mengidentifikasi potensi bahaya, menilai tingkat risiko, serta menentukan langkah pengendalian yang tepat agar kegiatan kerja dapat berjalan dengan aman.

Dalam konteks pekerjaan PDKB, analisis risiko sangat penting karena seluruh pekerjaan dilakukan dalam keadaan sistem masih bertegangan, sehingga kesalahan kecil dapat menyebabkan kecelakaan serius seperti sengatan listrik, luka bakar, atau bahkan fatalitas.

Menurut OHSAS 18001:2007, risiko didefinisikan sebagai *kombinasi antara kemungkinan terjadinya bahaya (probability) dengan tingkat keparahan dampak yang ditimbulkan (severity)*.

Dengan demikian, analisis risiko bertujuan untuk memetakan bahaya, menentukan prioritas pengendalian, serta meminimalkan potensi kecelakaan kerja pada pekerjaan bertegangan.

2.6.2 Konsep HIRARC (Hazard Identification, Risk Assessment, and Risk Control)

Metode HIRARC adalah pendekatan standar yang digunakan oleh PT PLN (Persero) untuk menilai dan mengendalikan risiko pada setiap jenis pekerjaan, termasuk PDKB-TM.

Metode ini mencakup tiga langkah utama:

- **Hazard Identification (Identifikasi Bahaya)**
 - a. Mengidentifikasi semua potensi bahaya yang mungkin muncul selama pekerjaan berlangsung, baik dari faktor listrik, mekanik, lingkungan, maupun ergonomi.
 - b. Contoh bahaya pada PDKB: kegagalan isolasi alat, arus bocor, cuaca lembap, atau kelelahan operator.
- **Risk Assessment (Penilaian Risiko)**
 - Menentukan tingkat risiko berdasarkan dua parameter utama, yaitu:
 - Probabilitas (P): seberapa sering bahaya tersebut mungkin terjadi.
 - Dampak (D): seberapa parah akibat yang mungkin ditimbulkan.
 - Nilai risiko dihitung menggunakan rumus: $R=P \times D$
 - Hasil penilaian digunakan untuk mengelompokkan risiko ke dalam kategori: rendah, sedang, tinggi, atau sangat tinggi.
- **Risk Control (Pengendalian Risiko)**
 - Menentukan tindakan pengendalian berdasarkan hierarchy of control, yaitu:

Eliminasi → Substitusi → Rekayasa Teknik → Administratif → APD.
 - Tujuannya adalah mengurangi probabilitas dan menekan dampak bahaya hingga berada pada tingkat risiko yang dapat diterima (acceptable risk).

2.6.3 Matriks Risiko

Penilaian risiko umumnya menggunakan Risk Matrix, dengan skala: Probabilitas (P): kemungkinan kejadian (1–5).

Dampak (D): tingkat keparahan akibat (1–5). Nilai Risiko = $P \times D$.

Klasifikasi risiko:

Nilai Risiko	Kategori	Tindakan
1-5	Rendah	Dapat Diterima
6-10	Sedang	Perlu Pengendalian Tambahan
11-15	Tinggi	Perlu Pengawasan Ketat
16-25	Sangat Tinggi	Tidak boleh dilakukan tanpa mitigasi

2.7 Efisiensi Kerja pada Pekerjaan PDKB

2.7.1 Pengertian Efisiensi Kerja

Efisiensi kerja adalah ukuran perbandingan antara output (hasil kerja) dengan input (sumber daya dan waktu) yang digunakan untuk menyelesaikan suatu pekerjaan.

Dalam konteks Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB), efisiensi mencakup kemampuan tim dalam menyelesaikan pekerjaan dengan waktu, tenaga, dan biaya minimal, tanpa mengurangi tingkat keselamatan dan kualitas hasil kerja.

Menurut Heizer & Render (2016), efisiensi dapat dirumuskan sebagai: $\text{Efisiensi} = \frac{\text{Output Aktual}}{\text{Output Masimum}} \times 100\%$

Pada pekerjaan PDKB, efisiensi dapat diukur dari:

- Durasi penyelesaian pekerjaan (time efficiency).
- Jumlah personel dan alat yang digunakan (resource efficiency).
- Biaya operasi dibandingkan pekerjaan padam (cost efficiency).
- Frekuensi kesalahan atau rework (quality efficiency).

2.7.2 Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi PDKB

Efisiensi pelaksanaan pekerjaan PDKB dipengaruhi oleh beberapa faktor teknis dan non-teknis, antara lain:

1. Metode yang Digunakan

- Metode berjarak (hot stick)* cenderung membutuhkan waktu lebih lama karena keterbatasan gerak alat.

- b. *Metode sentuh langsung* lebih efisien dalam waktu dan hasil kerja, namun berisiko tinggi dan perlu pengawasan ketat.

2. Kompetensi dan Koordinasi Tim

- a. Personel yang telah bersertifikat PDKB-TM bekerja lebih cepat dan efisien karena memahami urutan kerja dan risiko.
- b. Koordinasi antaranggota tim, seperti operator crane, pengawas K3, dan petugas grounding, sangat memengaruhi kelancaran pekerjaan.

3. Kondisi Cuaca dan Lingkungan Kerja

- a. Cuaca lembap atau hujan menurunkan efisiensi karena dapat
- b. menunda pekerjaan metode sentuh langsung.
- c. Lokasi yang sempit atau dekat vegetasi tinggi memerlukan waktu persiapan tambahan.

4. Kualitas Peralatan dan Material

- a. Alat yang terkalibrasi baik (tongkat isolasi, clamp stick, APD) meningkatkan kecepatan dan keamanan.
- b. Isolator baru dengan desain *quick-fit* lebih mudah dipasang, mempercepat proses penghentian.

5. Perencanaan dan Persiapan Pekerjaan

- a. Pekerjaan dengan JSA (Job Safety Analysis) yang jelas dan perencanaan alat matang akan berjalan lebih efisien.
- b. Penundaan karena kesalahan logistik (alat tertinggal, APD tidak sesuai) menurunkan efisiensi secara signifikan.

2.7.3 Indikator Efisiensi pada PDKB

PLN menggunakan beberapa indikator kuantitatif untuk mengukur tingkat efisiensi kegiatan PDKB, antara lain:

No	Indikator	Keterangan
1	Durasi kerja efektif	Waktu kerja aktual dibanding waktu standar (menit)
2	Jumlah personel per pekerjaan	Semakin sedikit personel untuk hasil sama → efisiensi naik
3	Biaya per pekerjaan (Rp/unit)	Bandingkan dengan pekerjaan padam (non- PDKB)
4	Gangguan nol (zero fault)	Pekerjaan selesai tanpa gangguan pada pelanggan
5	Produktivitas tim (job/day)	Jumlah titik pekerjaan diselesaikan per hari

2.7.4 Perbandingan Efisiensi Metode Berjarak dan Sentuh Langsung

Aspek	Metode Berjarak	Metode Sentuh Langsung
Efektivitas dicuaca lembap	Aman digunakan	Tidak direkomendasikan
Presisi kerja	Terbatas (via tongkat)	Tinggi (langsung pada konduktor)
Waktu pekerjaan	Lebih lama (alat terbatas)	Lebih cepat (gerak bebas)
Jumlah personel	4–5 orang	3–4 orang
Risiko K3	Rendah–sedang	Tinggi
Biaya operasional	Sedang	Lebih rendah

2.7.5 Upaya Peningkatan Efisiensi pada PDKB

Beberapa langkah yang dilakukan PLN untuk meningkatkan efisiensi pekerjaan PDKB antara lain:

1. Digitalisasi perencanaan kerja menggunakan *mobile job order system*.
2. Penerapan smart monitoring terhadap durasi dan hasil kerja tiap tim PDKB.
3. Standarisasi peralatan ringan dan modular, seperti tongkat fiber komposit.
4. Pelatihan dan sertifikasi berkala untuk menjaga keterampilan tim.
5. Integrasi evaluasi risiko dan waktu kerja pada sistem *post job review*.

2.8 Penelitian Terdahulu

No	Judul Penelitian	Penulis	Tahun	Hasil Utama
1	Analisis Energi Terselamatkan pada PDKB Tegangan Menengah	Juliasandi, A.	2020	PDKB menurunkan durasi padam dan meningkatkan efisiensi energi.
2	Kajian Risiko pada Pelaksanaan PDKB TM 20 kV	Widodo, D.	2021	Risiko tertinggi pada faktor APD dan kondisi lingkungan kerja.
3	Studi Efisiensi Metode Sentuh Langsung dalam Penggantian Isolator	Handoyo, R.	2022	Metode sentuh langsung lebih cepat 30% dibanding berjarak, tetapi butuh mitigasi risiko K3 lebih ketat.

2.9 Kerangka Pemikiran

Penelitian ini dilakukan dengan membandingkan dua metode PDKB (berjarak dan sentuh langsung) dalam pekerjaan penggantian isolator di SUTM 20 kV. Analisis dilakukan terhadap dua aspek utama, yaitu:

1. Risiko K3, diukur menggunakan metode HIRARC dan Risk Matrix.
2. Efisiensi kerja, dilihat dari waktu pelaksanaan, biaya, dan sumber daya yang digunakan.

Hasil analisis komparatif diharapkan dapat menghasilkan rekomendasi metode paling aman dan efisien untuk diterapkan di lingkungan kerja UP3 Lahat.

2.10 Teori Arc Flash dan Energi Insiden pada Sistem Distribusi

2.10.1 Pengertian Arc Flash

Arc flash adalah fenomena pelepasan energi listrik dalam bentuk busur api akibat

gangguan hubung singkat pada sistem tenaga listrik. Busur listrik ini menghasilkan:

- Temperatur sangat tinggi (dapat mencapai $>19.000^{\circ}\text{C}$)
- Tekanan ledakan (arc blast)
- Radiasi panas tinggi
- Percikan logam cair

Pada sistem distribusi 20 kV, arc flash dapat terjadi akibat:

1. Kegagalan isolasi
2. Peralatan jatuh menyentuh dua fasa
3. Kontaminasi konduktor
4. Kesalahan prosedur saat PDKB

Arc flash sangat relevan dalam pekerjaan PDKB karena pekerja berada dalam jarak kerja langsung dengan konduktor bertegangan.

2.10.2 Perhitungan Energi Insiden (Incident Energy)

Energi insiden adalah energi panas yang diterima permukaan tubuh pekerja akibat arc flash pada jarak tertentu.

Secara umum dapat dinyatakan:

$$E \propto (I^2 \times t) / d^2$$

Dimana:

E = energi insiden (cal/cm^2)

I = arus gangguan (kA)

t = waktu kerja proteksi(detik)

d = jarak kerja (cm)

Semakin besar arus gangguan dan semakin lama waktu clearing proteksi, maka energi yang diterima pekerja semakin besar.

Sebaliknya, semakin jauh jarak kerja, maka energi insiden menurun secara kuadrat.

Hal ini menjelaskan mengapa metode Berjarak memiliki keuntungan dari sisi reduksi energi insiden.

2.10.3 Kategori Bahaya Arc Flash

Berdasarkan standar keselamatan listrik:

- 1,2 cal/cm² → ambang luka bakar tingkat dua
- 8 cal/cm² → kategori bahaya tinggi
- 25 cal/cm² → risiko fatal
- 40 cal/cm² → sangat berbahaya

Pada sistem 20 kV dengan arus gangguan tinggi, energi insiden berpotensi berada pada kategori sedang hingga tinggi.

Oleh karena itu, pemilihan APD dengan rating Arc Thermal Performance Value (ATPV) sangat penting dalam metode Sentuh Langsung.

2.11 Teori Human Reliability dalam Pekerjaan Bertegangan

2.11.1 Konsep Human Error

Dalam sistem teknik modern, kecelakaan kerja sering kali bukan hanya akibat kegagalan alat, tetapi akibat interaksi antara manusia dan sistem.

Human error dapat diklasifikasikan menjadi:

1. Slip (kesalahan tidak disengaja)
2. Lapse (kelalaian)
3. Mistake (kesalahan keputusan)
4. Violation (pelanggaran prosedur)

Dalam pekerjaan PDKB, kesalahan kecil seperti:

- Salah urutan kerja
- Tidak melakukan uji APD
- Komunikasi tidak jelas

dapat menyebabkan konsekuensi fatal.

2.11.2 Model Swiss Cheese

Model Swiss Cheese menjelaskan bahwa kecelakaan terjadi ketika beberapa lapisan pengaman gagal secara bersamaan.

Lapisan pengaman pada PDKB meliputi:

1. SOP dan prosedur kerja
2. Toolbox meeting
3. Sertifikasi personel
4. APD isolasi
5. Pengawasan K3

Jika satu lapisan gagal, sistem masih aman.

Namun jika beberapa lapisan gagal bersamaan, kecelakaan dapat terjadi.

Teori ini memperkuat pentingnya sistem pengendalian berlapis dalam PDKB.

2.12 Teori Keandalan (Reliability Engineering) pada Sistem Distribusi

2.12.1 Konsep Dasar Reliability

Reliability adalah probabilitas sistem berfungsi tanpa kegagalan dalam periode waktu tertentu.

Secara matematis:

$$R(t) = e^{(-\lambda t)}$$

Dimana:

$R(t)$ = reliability

λ = failure rate

t = waktu operasi

Semakin kecil nilai λ , semakin andal sistem.

2.12.2 Hubungan Failure Rate dan Isolator

Isolator merupakan salah satu komponen dengan paparan lingkungan paling tinggi pada sistem distribusi.

Failure rate isolator dipengaruhi oleh:

- Polusi

- Kelembaban
- Penuaan material
- Beban mekanik

Dengan adanya PDKB, penggantian isolator dapat dilakukan sebelum terjadi kegagalan total.

Artinya, PDKB berfungsi sebagai strategi preventive reliability improvement.

2.13 Teori Energi Tidak Tersalurkan (Energy Not Supplied – ENS)

Energy Not Supplied (ENS) adalah energi listrik yang tidak dapat disalurkan kepada pelanggan akibat gangguan atau pemadaman.

Secara matematis:

$$ENS = P \times t$$

Dimana:

P = daya beban (kW)

t = durasi padam (jam)

Jika pekerjaan dilakukan dengan metode konvensional (padam), maka $ENS > 0$.

Namun dengan PDKB:

$$ENS \approx 0$$

Konsep ini menjelaskan bahwa PDKB bukan hanya metode teknis, tetapi strategi ekonomi untuk menjaga revenue perusahaan.

2.14 Teori Ergonomi pada Pekerjaan Ketinggian

Pekerjaan di tiang listrik termasuk kategori kerja statis dengan risiko musculoskeletal disorder (MSD).

Faktor risiko ergonomi meliputi:

1. Postur tidak natural
2. Beban statis pada bahu
3. Durasi kerja panjang
4. Getaran alat

Pada metode Berjarak, beban otot lengan meningkat karena penggunaan hot stick panjang.

Secara teori ergonomi:

Beban statis >30 menit tanpa rotasi

→ meningkatkan risiko kelelahan

→ menurunkan konsentrasi

→ meningkatkan probabilitas kecelakaan

Oleh karena itu, rotasi personel menjadi bagian dari risk control engineering.