

BAB II

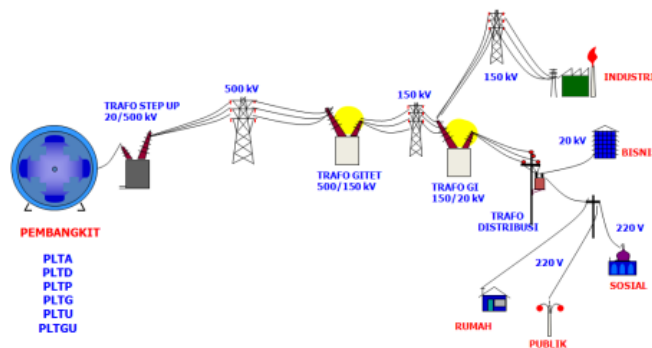
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Konsep Dasar Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik pada tingkat distribusi menengah seperti SUTM 20 kV berfungsi mendistribusikan energi dari gardu induk ke konsumen akhir melalui penyulang dan jaringan udara/kabel. Komponen utama pada tingkat ini meliputi saluran udara (conductor & isolator), tiang/pancang, pemutus beban/sekring pada gardu, trafo distribusi (step-down), penyearah/pengaman (surge arrester), dan peralatan proteksi dan pengukuran pada panel/gardu. Tujuan desain dan operasi jaringan distribusi adalah menjamin kontinuitas suplai, kualitas tegangan dalam batas standar, dan keselamatan operasi. [1]

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen, antara lain unit pembangkitan, saluran transmisi, gardu induk, dan jaringan distribusi yang terhubung sedemikian rupa dan bekerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan. Secara garis besar sistem tenaga listrik dapat digambarkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 1. Skema Sistem Tenaga Listrik

2.1.2 Stuktur Umum Sistem Tenaga Listrik

Secara garis besar, struktur umum sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut :

1. Sistem Pembangkit

Merupakan bagian awal dari sistem tenaga listrik yang bertugas menghasilkan energi listrik dari berbagai sumber energi primer.

2. Saluran Transmisi

Menyalurkan energi listrik dalam jumlah besar dari pusat pembangkit ke pusat beban (Gardu Induk) dengan tegangan tinggi

3. Jaringan Distribusi

Menyalurkan energi listrik dari Gardu Induk ke pelanggan akhir

2.1.3 Jaringan Distribusi 20 kV

Jaringan distribusi 20 kV adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk ke gardu distribusi atau langsung ke pelanggan menengah (industri, perkantoran, dan fasilitas publik). Sistem ini dikenal juga sebagai SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah) dengan tegangan nominal 20.000 V.



Gambar 2. Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

2.1.4 Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB)

Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) merupakan suatu metode pemeliharaan atau perbaikan jaringan listrik yang dilakukan tanpa memutus aliran listrik dari sistem distribusi. PDKB memungkinkan petugas untuk bekerja secara langsung pada jaringan bertegangan, dengan memperhatikan prosedur keselamatan dan menggunakan peralatan berisolasi khusus yang telah memenuhi standar internasional (IEC dan IEEE).

2.2 Komponen Utama Jaringan SUTM 20 kV

Jaringan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) 20 kV adalah sebuah sistem kompleks yang terdiri dari berbagai elemen fisik yang bekerja secara sinergis untuk menyalurkan energi listrik dari gardu induk menuju gardu distribusi. Keandalan operasional jaringan ini sangat bergantung pada integritas setiap komponennya. Berikut diantaranya komponen utama jaringan SUTM 20 kV :

1. Tiang



Gambar 3. Tiang Beton

Tiang adalah struktur penopang utama yang digunakan untuk menahan dan menyangga konduktor, peralatan, serta aksesoris jaringan listrik pada sistem distribusi udara 20 kV (SUTM).

2. Isolator



Gambar 4. Isolator Tumpu



Gambar 5. Isolator Penegang

Isolator adalah komponen non-konduktor yang berfungsi memisahkan konduktor dari tiang sehingga arus listrik tidak mengalir ke tanah.

3. Travers (Cross Arm)



Gambar 6. Travers (Cross Arm)

Travers adalah batang baja atau besi kanal yang dipasang melintang pada tiang listrik sebagai tempat dudukan isolator dan konduktor.

4. Penghantar (Konduktor)



Gambar 7. Penghantar (Konduktor)

Konduktor adalah penghantar listrik utama yang membawa arus dari gardu induk ke gardu distribusi atau beban.

5. Fuse Cut Out



Gambar 8. Fuse Cut Out

Fuse Cut Out adalah alat pengaman utama pada jaringan distribusi 20 kV yang berfungsi memutuskan arus saat terjadi gangguan seperti hubung singkat atau beban lebih.

6. Lightning Arrester



Gambar 9. Lightning Arrester

Lightning Arrester adalah alat pelindung jaringan yang berfungsi untuk menyalurkan lonjakan tegangan akibat sambaran petir atau switching surge ke tanah.

7. Recloser (Pemutus Balik Otomatis)



Gambar 10. Recloser (Pemutus Balik Otomatis)

Recloser adalah pemutus otomatis pada jaringan 20 kV yang dapat menutup kembali secara otomatis setelah memutus akibat gangguan sementara.

8. Sectionalizer (Saklar Seksi Otomatis)



Gambar 11. Sectionalizer (Saklar Seksi Otomatis)

Sectionalizer adalah perangkat pemisah otomatis yang bekerja bersama recloser untuk mengisolasi bagian jaringan yang mengalami gangguan permanen.

9. Transformator



Gambar 12. Transformator Distribusi 20 kV

Transformator distribusi adalah alat untuk menurunkan tegangan 20 kV menjadi 220/380 V agar energi listrik bisa digunakan oleh pelanggan.

10. Pentanahan (Grounding)



Gambar 13. Grounding

Grounding adalah sistem penghubung bagian konduktif peralatan listrik ke tanah, yang bertujuan untuk menyalurkan arus gangguan atau petir ke bumi.

2.3 Konsep Keandalan Sistem Distribusi

Keandalan jaringan distribusi diukur dengan indeks-indeks seperti SAIDI, SAIFI, ENS (Energy Not Served), serta frekuensi dan durasi gangguan per unit panjang jaringan (mis. gangguan per 100 km). Upaya peningkatan keandalan dilakukan melalui desain redundansi, peningkatan kualitas peralatan, dan pemeliharaan proaktif. Pendekatan modern juga merekomendasikan pengukuran dan analisis historis gangguan untuk mengarahkan strategi pemeliharaan yang cost effective mis. prioritas feeder atau elemen yang menyumbang proporsi besar konsekuensi gangguan. [2]

2.3.1 System Average Interruption Duration Index (SAIDI)

SAIDI merupakan indeks keandalan sistem distribusi listrik yang mengukur durasi rata-rata total pemadaman yang dialami pelanggan selama periode waktu tertentu, dan diukur dalam satuan menit. Nilai SAIDI yang lebih rendah menunjukkan bahwa sistem distribusi yang andal karena waktu pemadaman yang lebih singkat ataupun lebih sedikit. [3]

SAIDI dapat dihitung berdasarkan rumus :

$$SAIDI = \frac{\text{Lama Pelanggan Padam} \times \text{Total Pelanggan Padam}}{\text{Jumlah Pelanggan}}$$

2.3.2 System Average Interruption Frequency Index (SAIFI)

SAIFI merupakan indeks keandalan sistem distribusi tenaga listrik yang mengukur rata-rata berapa kali pelanggan mengalami pemadaman. Indeks ini dihitung dengan membagi total jumlah gangguan yang dialami semua pelanggan dengan jumlah total pelanggan yang dilayani dalam periode tertentu. Nilai SAIFI yang lebih rendah menunjukkan bahwa sistem distribusi yang andal karena frekuensi pemadaman yang lebih sedikit. [4]

SAIFI dapat dihitung berdasarkan rumus :

$$SAIFI = \frac{\text{Jumlah Pelanggan Padam}}{\text{Total Jumlah Pelanggan}}$$

2.3.3 Klasifikasi Gangguan

Dalam sistem jaringan distribusi, gangguan dapat diklasifikasikan menjadi dua tipe berdasarkan sifat dan tindakan yang diperlukan untuk pemulihannya, diantaranya :

1. Gangguan Temporer

Adalah gangguan yang sifatnya sementara atau sesaat, dan akan hilang dengan sendirinya setelah isolasi sesaat. Gangguan ini sering disebabkan oleh faktor eksternal yang tidak meninggalkan kerusakan permanen pada peralatan sistem seperti misalnya sambaran petir dan sentuhan sesaat dahan pohon dengan konduktor.

2. Gangguan Permanen

Adalah gangguan yang diakibatkan oleh kerusakan fisik atau mekanis pada peralatan yang tidak dapat pulih dengan sendiri. Gangguan akan terus terjadi meskipun tegangan telah dipulihkan. Gangguan ini sering disebabkan oleh faktor internal seperti diantaranya adalah isolator pecah atau rusak, konduktor atau jointing putus, dan kegagalan proteksi (Lightning Arrester).

2.4 Prinsip Inspeksi Jaringan Tenaga Listrik

Inspeksi jaringan bertujuan mendeteksi kondisi abnormal sebelum menyebabkan gangguan. Prinsip inspeksi meliputi:

1. Pengamatan visual: memeriksa kondisi fisik isolator, konduktor, sambungan, dan tiang

2. Pengukuran elektrik dan diagnostik non-destruktif: mis. pengukuran resistansi tanah, pengukuran tahanan sambungan, termografi untuk mendeteksi hotspot, pengukuran partial discharge, atau metode khusus kabel seperti IRC analysis;
 3. Pemantauan kondisi berkelanjutan (online monitoring): sensor arus/tegangan, monitoring temperatur/gangguan;
 4. Pencatatan dan analisis data untuk membentuk prioritas perbaikan. Kombinasi teknik ini meningkatkan kemungkinan deteksi dini dan menurunkan gangguan tak terduga.
- [5]

2.4.1 Tujuan Inspeksi

Tujuan pemeliharaan jaringan listrik distribusi adalah untuk memastikan keberlangsungan penyaluran energi listrik serta menjamin keandalan, antara lain :

1. Meningkatkan ketersediaan, keandalan, dan efisiensi penyaluran energi listrik
2. Memperpanjang usia peralatan
3. Mengurangi resiko kegagalan dan kerusakan peralatan
4. Meningkatkan keamanan peralatan
5. Mengurangi durasi padam yang diakibatkan oleh gangguan

2.4.2 Jenis-Jenis Inspeksi

Inspeksi Visual Rutin

Inspeksi visual adalah metode pemeriksaan dasar yang sering dilakukan. Tujuannya adalah untuk kondisi fisik komponen secara langsung atau menggunakan alat bantu.

Inspeksi Menggunakan Thermo

Termografi merupakan metode inspeksi yang sangat penting untuk mendeteksi hotspot atau titik panas yang tidak terlihat oleh mata. Tujuan dari inspeksi ini adalah mendeteksi resistansi kontak yang tinggi pada sambungan mekanis dan terminal yang dapat menyebabkan panas berlebih

2.4.3 Komponen Kritis

Komponen kritis merupakan elemen-elemen yang memiliki kemungkinan kegagalan operasi suatu alat atau sistem yang tinggi, jika terjadi akan berdampak fatal pada penyaluran energi listrik (pemadaman lama dan meluas).

Daftar komponen kritis yang wajib diinspeksi diantaranya adalah :

Sambungan konduktor (hotspot)

Isolator (retak, pecah, atau flashover)

Fuse Cut Out, Recloser, dan Sectionalizer (hotspot)

Lightning Arrester (grounding putus, atau LA pecah)

Tiang (miring atau korosi)

2.5 Strategi Dan Metode Pemeliharaan

Tiga strategi pemeliharaan utama yang umum dipakai adalah:

1. Corrective maintenance (pemeliharaan korektif): perbaikan setelah kegagalan; efektif jangka pendek tapi meningkatkan downtime.
2. Preventive maintenance (pemeliharaan preventif): jadwal rutin (inspeksi berkala, pembersihan, penggantian bagian habis pakai) untuk mencegah kegagalan.
3. Live Line Maintenance (PDKB): dilakukan secara terencana dan terjadwal tanpa melakukan pemadaman jaringan listrik [6]

2.6 Penelitian yang Relevan

Berikut beberapa penelitian/referensi terkait inspeksi dan pemeliharaan SUTM 20 kV yang relevan untuk tugas akhir ini:

1. Analisis Dampak PDKB terhadap SAIDI, SAIFI dan Penyimpanan Energi (PT. PLN Area Malang).

Pamungkas menganalisis pengaruh penerapan PDKB TM pada jaringan 20 kV terhadap parameter keandalan (SAIDI, SAIFI, CAIDI) serta kWh yang terselamatkan. Hasil penelitian menunjukkan penurunan signifikan nilai SAIDI dan SAIFI setelah implementasi PDKB TM dan adanya peningkatan kWh yang terjual (energi terselamatkan). Studi ini memberikan bukti empiris bahwa PDKB mampu meningkatkan keandalan dan nilai ekonomi operasi jaringan distribusi 20 kV. [7]

2. Evaluasi Kinerja PDKB terhadap SAIDI dan SAIFI (Studi pada PT. PLN UP3 Langsa)

Penelitian oleh tim dari Universitas Syiah Kuala mengevaluasi performa PDKB di UP3 Langsa dengan metode kuantitatif deskriptif, mengumpulkan data gangguan, pemeliharaan dan perhitungan SAIDI/SAIFI serta kWh terselamatkan. Hasil menunjukkan bahwa PDKB menyelamatkan energi dalam jumlah besar dan memberikan peningkatan performa keandalan (penurunan SAIDI & SAIFI) sekaligus manfaat finansial dari energi yang terselamatkan. Studi ini relevan sebagai model evaluasi before-after penerapan PDKB pada UP3 regional. [8]

3. Studi Ekonomi dan Feasibility Investasi PDKB (Kasus UP3 Kudus dan Area Jawa)
Beberapa studi tugas akhir dan artikel mengevaluasi aspek ekonomi PDKB (NPV, IRR) serta kWh yang terselamatkan akibat pekerjaan tanpa pemadaman. Salah satu kajian menunjukkan bahwa investasi pada PDKB 20 kV dapat memiliki NPV positif dan memberikan pengembalian ekonomi melalui peningkatan penjualan energi dan pengurangan jam pemadaman. Temuan ini penting untuk mendukung argumen adopsi PDKB secara luas dari sisi biaya-manfaat. [9]

4. Kasus Lokal dan Laporan Praktik PDKB (PLN Area—laporan/TA/Repositori)
Beberapa laporan kerja praktek dan tugas akhir pada ULP/UP3 (mis. Medan Utara, Serpong, Klaten, Demak) membahas prosedur PDKB, metode perhitungan kWh terselamatkan, serta pengaruhnya terhadap SAIDI/SAIFI pada penyulang 20 kV. [10]

5. Analisis Keandalan Jaringan 20 kV dan Metode Penilaian (RIA, Section Technique dsb.)

Penelitian terkait keandalan jaringan 20 kV menggunakan metode RIA (Reliability Index Assessment) dan teknik analisis segment/section memberikan kerangka kuantitatif untuk menghitung SAIDI, SAIFI, CAIDI, dan ENS. Hasil-hasil dari studi ini menunjukkan perlunya penggabungan analisis statistik gangguan dengan data pemeliharaan untuk menilai dampak nyata PDKB terhadap keandalan jaringan. [11]

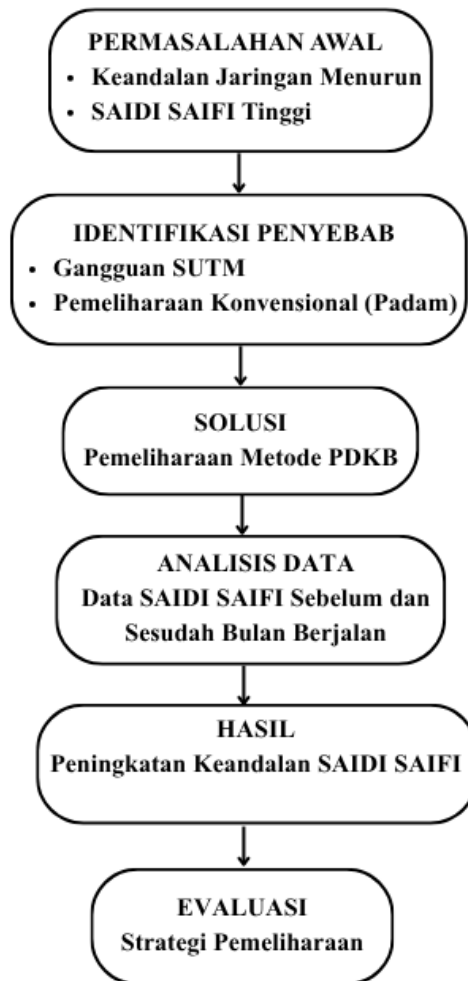
Tabel 1. Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1.	<i>Analisis Dampak PDKB terhadap SAIDI, SAIFI dan Penyimpanan Energi (PT PLN Area Malang) — Pamungkas, 2022 (Jim Unisma)</i>	Bagaimana pengaruh penerapan PDKB Tegangan Menengah terhadap parameter keandalan (SAIDI, SAIFI, CAIDI) dan energi terselamatkan (kWh).	Pendekatan kuantitatif; analisis data gangguan dan waktu pemadaman sebelum–sesudah penerapan PDKB TM pada jaringan 20 kV.	Nilai SAIDI dan SAIFI menurun signifikan, peningkatan energi terselamatkan (kWh terjual).	Belum menilai faktor biaya atau efektivitas investasi PDKB (aspek ekonomi belum dianalisis).
2.	<i>Evaluasi Kinerja PDKB terhadap SAIDI dan SAIFI (PT PLN UP3 Langsa) — Tim Univ. Syiah Kuala, 2023 (UIN Ar-Raniry Journal)</i>	Evaluasi performa PDKB terhadap keandalan sistem (penurunan SAIDI dan SAIFI) dan nilai energi	Metode kuantitatif deskriptif; pengumpulan data gangguan dan kWh terselamatkan; analisis before–after.	PDKB meningkatkan keandalan sistem dan menurunkan nilai SAIDI/SAIFI secara signifikan; terdapat manfaat finansial dari	Belum mengkaji hubungan antara intensitas pelaksanaan PDKB dan besarnya penurunan SAIDI/SAIFI.

		terselamatkan.		energi terselamatkan.	
3.	<i>Studi Ekonomi dan Feasibility Investasi PDKB (Kasus UP3 Kudus dan Area Jawa) — 2021 (Formosa Publisher)</i>	Apakah PDKB layak secara finansial dilihat dari NPV, IRR, dan kWh terselamatkan.	Analisis ekonomi investasi (NPV, IRR, BCR) menggunakan data keuangan dan perhitungan energi terselamatkan akibat pekerjaan tanpa padam.	PDKB memberikan NPV positif, IRR di atas standar kelayakan; investasi menguntungkan karena peningkatan keandalan dan penjualan energi.	Fokus ekonomi, belum membahas pengaruh langsung terhadap indeks keandalan (SAIDI/SAIFI).
4.	<i>Kasus Lokal dan Laporan Praktik PDKB pada Jaringan 20 kV (ULP/UP3 Medan, Serpong, Klaten, Demak) — 2020–2023 (Unissula, UMA, PLN Repository)</i>	Implementasi teknis PDKB, perhitungan kWh terselamatkan, dan dampaknya terhadap SAIDI/SAIFI pada penyulang lokal.	Studi lapangan / laporan kerja praktek; observasi langsung pekerjaan PDKB; dokumentasi metode (sentuh langsung, berjarak).	Memberikan contoh prosedur pelaksanaan dan hasil nyata perbaikan SAIDI/SAIFI.	Bersifat lokal dan deskriptif; belum ada analisis komparatif antar wilayah maupun model perhitungan umum.

5.	<i>Analisis Keandalan Jaringan 20 kV dan Metode Penilaian (RIA, Section Technique) — 2022 (ResearchGate Collection)</i>	Penggunaan metode kuantitatif untuk menghitung indeks keandalan (SAIDI, SAIFI, CAIDI, ENS).	Analisis statistik dan reliability assessment pada data penyulang 20 kV.	Menyediakan kerangka metodologis perhitungan keandalan yang bisa diterapkan pada studi PDKB.	Tidak membahas PDKB secara spesifik; hanya metode umum keandalan jaringan.
----	---	---	--	--	--

2.7 Kerangka Pemikiran



Gambar 14. Kerangka Pemikiran

Penelitian ini berawal dari permasalahan tingginya nilai SAIDI dan SAIFI pada jaringan distribusi 20 kV di wilayah kerja PLN UP3 Banten Utara. Nilai keandalan yang tinggi menunjukkan bahwa durasi dan frekuensi gangguan listrik masih sering terjadi, sehingga kontinuitas suplai listrik ke pelanggan belum optimal.

Kondisi ini umumnya disebabkan oleh gangguan jaringan dan pelaksanaan pemeliharaan secara konvensional yang masih memerlukan pemadaman listrik. Pemeliharaan konvensional memang dapat menjaga kondisi peralatan, tetapi sering

menimbulkan waktu padam tambahan yang berdampak pada peningkatan nilai SAIDI dan SAIFI.

Sebagai solusi, metode PDKB (Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan) diterapkan untuk melakukan perawatan jaringan tanpa harus memadamkan aliran listrik. PDKB memungkinkan pekerjaan pemeliharaan seperti pembersihan isolator, penggantian komponen, pengencangan sambungan, serta inspeksi jaringan dilakukan dalam kondisi sistem tetap bertegangan, sehingga durasi dan frekuensi gangguan dapat diminimalkan.

Penelitian ini kemudian menganalisis data SAIDI, SAIFI, dan energi terselamatkan (kWh) sebelum dan sesudah penerapan metode PDKB. Analisis dilakukan untuk menilai sejauh mana implementasi PDKB mampu meningkatkan keandalan jaringan distribusi dan efisiensi operasional.

Hasil analisis diharapkan menunjukkan adanya penurunan signifikan nilai SAIDI dan SAIFI, yang berarti peningkatan keandalan sistem distribusi. Selain itu, diharapkan terjadi peningkatan jumlah energi terselamatkan sebagai dampak langsung dari berkurangnya waktu padam pelanggan.

Berdasarkan hasil penelitian, selanjutnya akan disusun rekomendasi strategis bagi PLN UP3 Banten Utara dalam optimalisasi program PDKB, baik dari sisi frekuensi pelaksanaan, penguatan kapasitas tim kerja, maupun efektivitas perencanaan jadwal pemeliharaan.