

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

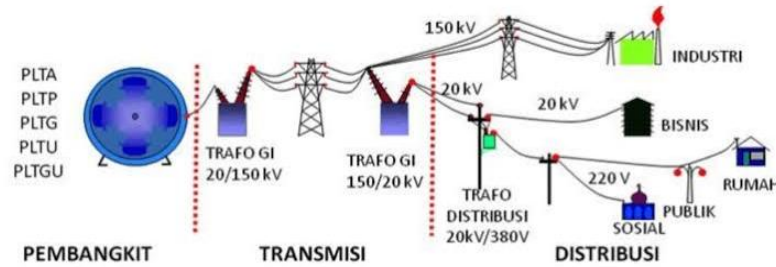
2.1.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sebagai bagian penting dalam jaringan listrik, sistem distribusi berperan sebagai jembatan terakhir. Sistem ini mengambil listrik dari saluran transmisi berkapasitas tinggi dan mengirimkannya ke tempat penggunaan akhir, seperti rumah, pabrik, dan bisnis. Kemampuan sistem distribusi untuk memastikan listrik tersalurkan dengan aman, andal, dan efisien secara langsung mempengaruhi serta menentukan kualitas layanan listrik yang didapat oleh seluruh pengguna. [1]

Sistem distribusi listrik terdiri dari beberapa bagian utama: jaringan distribusi primer yang beroperasi dengan tegangan menengah seperti 20 kV, jaringan distribusi sekunder dengan tegangan rendah 220V atau 380V, transformator distribusi, dan peralatan pelindung. Jaringan primer bertugas mengirim energi listrik dari gardu utama ke titik distribusi, sedangkan transformator berfungsi menurunkan tegangan listrik agar bisa digunakan langsung oleh pelanggan melalui jaringan sekunder. [1]

Tujuan utama dari sistem ini adalah mendistribusikan listrik ke pelanggan dengan mutu dan layanan yang terjamin. Karena sebagian besar gangguan terjadi di jaringan distribusi, terutama pada jaringan tegangan menengah, tingkat keandalan menjadi hal penting dalam mengevaluasi kinerja sistem. Keandalan diukur dari kemampuan sistem untuk memasok listrik secara terus-menerus. Oleh karena itu, langkah awal untuk memastikan sistem distribusi bekerja dengan baik adalah dengan menganalisis karakteristik operasi serta kegagalan yang terjadi pada setiap komponen sistem. [1]

SDi bawah ini adalah proses penyampaian listrik dari pembangkit ke konsumen. Listrik yang dihasilkan di pembangkit dinaikkan tegangannya menggunakan trafo di gardu induk agar dapat dikirim ke jarak yang jauh. Setelah sampai ke wilayah pengguna, tegangan listrik tersebut diturunkan lagi melalui sistem distribusi sehingga siap digunakan oleh industri, bisnis, dan rumah tangga. [1]



Gambar 2. 1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sumber : artema.co.id, 2020

2.1.2 Teori Singkat SAIDI & SAIFI

Menurut Utomo dan Syamsuddin (2022), keandalan sistem distribusi tenaga listrik dapat dievaluasi menggunakan dua indeks utama, yaitu SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) dan SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*). [9]

SAIDI merupakan indeks yang menunjukkan rata-rata durasi gangguan yang dialami pelanggan dalam satu periode tertentu, biasanya dinyatakan dalam satuan jam per pelanggan per tahun. Nilai SAIDI dihitung dengan membagi total durasi gangguan seluruh pelanggan dengan jumlah total pelanggan yang dilayani. Semakin kecil nilai SAIDI, maka semakin baik tingkat keandalan sistem distribusi karena waktu gangguan yang dialami pelanggan semakin singkat. [9]

Sementara itu, SAIFI menunjukkan rata-rata frekuensi gangguan yang dialami pelanggan dalam satu periode, biasanya dinyatakan dalam kali gangguan per pelanggan per tahun. Nilai SAIFI diperoleh dari pembagian jumlah total pelanggan yang mengalami gangguan dengan jumlah total pelanggan yang dilayani. Semakin rendah nilai SAIFI, maka sistem distribusi dianggap semakin andal karena gangguan yang terjadi lebih jarang. [9]

2.1.3 Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan Tegangan Menengah

Ruang Menurut Pamungkas, Afroni, dan Sulo, pekerjaan dalam keadaan bertegangan (PDKB) merupakan metode pemeliharaan dan perbaikan jaringan distribusi yang dilakukan tanpa memadamkan aliran listrik pada sistem. PDKB diterapkan untuk

menjaga kontinuitas penyaluran tenaga listrik kepada pelanggan, sehingga gangguan pelayanan dapat diminimalkan. [12]

Pada jaringan distribusi 20 kV, penerapan PDKB bertujuan untuk mengurangi energi tak tersalurkan (unsupplied energy) serta menekan nilai indeks keandalan seperti SAIDI dan SAIFI. Dengan tidak dilakukannya pemadaman saat pekerjaan berlangsung, jumlah kWh yang dapat diselamatkan menjadi lebih besar dibandingkan metode pemeliharaan konvensional yang memerlukan pemutusan tegangan.

Namun demikian, pelaksanaan PDKB menuntut standar keselamatan kerja, kompetensi personel, serta prosedur teknis yang ketat. Setiap pekerjaan, termasuk penyambungan atau pressing konektor pada jaringan tegangan menengah, harus dilakukan dengan metode yang terkontrol agar tidak menimbulkan potensi gangguan baru pada sistem. [12]

Dalam pelaksanaannya, terdapat tiga metode kerja utama pada PDKB TM, yaitu :

1. Metode Berjarak (Distance Method) pekerja menjaga jarak aman dari konduktor bertegangan menggunakan peralatan berisolasi tinggi untuk melakukan pekerjaan. Gambar di bawah ini adalah proses pekerjaan PDKB TM Berjarak menggunakan galah berisolasi dan penutup konduktor untuk menambah jarak aman dengan petugas.



Gambar 2. 2 PDKB TM Methode berjarak

2. Metode Sentuh Langsung (Contact Method) – pekerja menggunakan pakaian dan sarung tangan berisolasi, kemudian bekerja langsung menyentuh konduktor dengan

kondisi tubuh pada potensial yang sama. Di bawah ini adalah gambar proses pekerjaan PDKB TM sentuh langsung dimana petugas listrik berdiri di *platform* berisolasi dan dapat memegang langsung jaringan bertegangan.



Gambar 2. 3 PDKB TM Methode sentuh langsung

3. Metode Potensial (*Potential Method*) pekerja dinaikkan ke potensial yang sama dengan konduktor bertegangan sehingga tidak ada beda potensial antara pekerja dan jaringan saat bekerja. Pada gambar di bawah ini petugas listrik menyamakan beda potensialnya dengan konduktor bertegangan, sehingga dapat langsung duduk di konduktor bertegangan.



Gambar 2. 4 PDKB TM Methode potensial

2.1.4 Definisi dan Fungsi Konektor CCO

Konektor CCO (Compression Connector Outdoor) adalah jenis sambungan listrik yang digunakan dalam jaringan distribusi listrik udara dengan tegangan menengah. Fungsi utamanya adalah menghubungkan dua kabel penghantar secara mekanis dan listrik menggunakan metode penekanan. Konektor ini dirancang khusus agar mampu

mengalirkan arus listrik secara efisien dan tahan terhadap kondisi lingkungan seperti panas, hujan, serta kelembapan yang tinggi. Dalam sistem distribusi listrik, konektor CCO berperan penting dalam menjaga aliran listrik tetap terus-menerus serta mengurangi kerugian daya yang terjadi karena sambungan yang tidak sempurna. Proses pemasangan konektor dilakukan dengan menggunakan alat crimping hidrolik yang mampu memberikan tekanan seragam, sehingga sambungan menjadi kuat, tidak mudah lepas, dan memiliki hambatan listrik yang rendah. Selain itu, konektor CCO juga dilapisi dengan bahan pelindung yang mampu mencegah korosi, sehingga memperpanjang umur sambungan dan menjaga stabilitas sistem distribusi listrik. Dengan demikian, selain berfungsi sebagai penghubung antar kabel, konektor CCO juga merupakan komponen penting dalam menjaga keandalan dan keselamatan jaringan distribusi listrik. [13]

Di bawah ini adalah material CCO yang digunakan dalam proses penyambungan jaringan listrik 20 kV.



Gambar 2. 5 Material Konektor CCO

2.1.5 Teori Pressing pada Compression Connector

Teknik Teknik pressing atau crimping merupakan metode penyambungan konduktor yang bekerja berdasarkan prinsip deformasi plastis antara konduktor dan konektor. Proses ini dilakukan dengan memberikan tekanan mekanis yang tinggi menggunakan alat hidrolik sehingga material konektor mengalami perubahan bentuk permanen dan menjepit konduktor secara rapat. [2]

Menurut jurnal Energies (2018, Vol. 11, 1667), kualitas sambungan crimp sangat dipengaruhi oleh distribusi tekanan, tingkat deformasi plastis, serta luas bidang kontak

efektif antara konduktor dan konektor. Ketika gaya tekan cukup besar diberikan, permukaan logam mengalami :

- a. Penghancuran lapisan oksida
- b. Pengurangan rongga udara
- c. Peningkatan luas kontak aktual

Kondisi tersebut menyebabkan penurunan resistansi kontak secara signifikan. Resistansi kontak yang rendah sangat penting karena resistansi yang tinggi akan menimbulkan rugi daya dan kenaikan temperatur akibat efek Joule. [2]

Secara mekanis, jurnal tersebut menjelaskan bahwa deformasi plastis yang optimal akan menghasilkan 3 keadaan berikut :

- a. Distribusi tekanan yang merata
- b. Ikatan mekanis kuat
- c. Stabilitas terhadap getaran dan siklus termal

Sebaliknya, apabila gaya tekan tidak mencukupi, maka dapat menyebabkan :

- a. Luas kontak efektif kecil
- b. Masih terdapat rongga udara
- c. Resistansi kontak meningkat
- d. Timbul hotspot saat konduktor dialiri arus

Namun jika tekanan berlebihan, dapat terjadi :

- a. Retakan mikro pada konektor
- b. Kerusakan struktur serabut konduktor
- c. Penurunan kekuatan mekanis jangka panjang

Jurnal tersebut juga menekankan bahwa kualitas sambungan sangat berkorelasi dengan kenaikan suhu operasi. Sambungan dengan resistansi kontak tinggi menunjukkan peningkatan temperatur yang signifikan dibandingkan bagian konduktor normal. Oleh karena itu, pengujian termografi menjadi metode non-destruktif yang efektif untuk mendeteksi kualitas sambungan di lapangan.

Dapat disimpulkan bahwa proses pressing yang baik harus memastikan:

- a. Gaya tekan sesuai spesifikasi alat
- b. Distribusi deformasi merata
- c. Luas kontak maksimal
- d. Resistansi kontak minimum
- e. Stabilitas mekanis dan termal jangka panjang

Teori ini memperkuat dasar penelitian bahwa kualitas pressing CCO berpengaruh langsung terhadap kenaikan suhu sambungan dan potensi kegagalan pada jaringan distribusi 20 kV. Gambar ini menunjukkan proses pekerjaan *pressing* CCO oleh petugas PDKB.



Gambar 2. 6 Proses Press Hydraulic oleh petugas PDKB TM

2.1.6 Definisi Resistansi Kontak pada sambungan konduktor

Resistansi kontak adalah tahanan listrik yang muncul di tempat dua konduktor bersentuhan karena permukaan logamnya tidak sempurna. Meskipun terlihat saling menyatu dengan rapat, di tingkat mikroskopis, permukaan logam itu tidak rata dan hanya sebagian kecil yang benar-benar bersentuhan. Hal ini menyebabkan munculnya tahanan tambahan yang disebut resistansi kontak. Besarnya resistansi ini dipengaruhi oleh beberapa hal, seperti tekanan pada sambungan, kebersihan permukaan, adanya oksidasi atau korosi, serta jenis material konduktor dan konektor yang digunakan. [11]

Resistansi kontak yang tinggi bisa menyebabkan panas berlebih, menurunkan efisiensi penghantaran arus, bahkan menyebabkan kerusakan pada sistem listrik. Untuk itu, pada proses penyambungan konduktor, misalnya saat menggunakan konektor CCO dengan teknik pressing, diperlukan tekanan yang tepat dan permukaan yang bersih agar terbentuk kontak yang luas dan merata, sehingga nilai resistansi kontak bisa diminimalkan. Dengan resistansi kontak yang rendah, sambungan listrik menjadi lebih efisien, stabil, dan aman dalam menghantarkan arus secara terus-menerus.[5]

2.1.7 Prinsip Hukum Joule sebagai penyebab panas berlebih

Prinsip Hukum Joule menyatakan bahwa panas yang dihasilkan oleh arus listrik dalam suatu penghantar berbanding lurus dengan kuadrat arus yang mengalir (I^2) dan besar tahanan listrik penghantar (R). Secara matematis dinyatakan dengan rumus $P = I^2 \times R$, di mana P adalah daya panas yang timbul akibat aliran arus. Pada sambungan konduktor, jika nilai resistansi kontak meningkat akibat sambungan yang longgar, korosi, atau permukaan tidak rata, maka panas yang dihasilkan juga akan meningkat secara signifikan meskipun arus yang mengalir tetap sama. Akumulasi panas ini dapat menimbulkan suhu berlebih pada titik sambungan, yang berpotensi merusak konektor, mengubah sifat mekanis logam, atau bahkan menyebabkan kegagalan sistem listrik. Oleh karena itu, pengendalian nilai resistansi kontak sangat penting untuk mencegah timbulnya panas berlebih akibat efek Joule. [8]

2.1.8 Klasifikasi *Hotspot* pada Jaringan Tegangan Menengah 20 kV

Hotspot pada jaringan tegangan menengah (TM) 20 kV merupakan kondisi terjadinya anomali temperatur pada suatu titik sambungan atau peralatan listrik yang memiliki suhu lebih tinggi dibandingkan bagian sekitarnya. Fenomena ini umumnya terjadi akibat peningkatan resistansi kontak pada sambungan, yang dapat disebabkan oleh kualitas mekanis yang kurang baik, oksidasi, tekanan kontak yang tidak merata, atau degradasi material.

Dalam sistem distribusi tenaga listrik, kenaikan temperatur pada sambungan berbanding lurus dengan besarnya rugi daya akibat hambatan listrik (I^2R losses). Semakin tinggi resistansi kontak, maka semakin besar energi yang terdisipasi dalam bentuk panas.

Oleh karena itu, deteksi dini hotspot menjadi bagian penting dalam pemeliharaan berbasis kondisi (condition based maintenance). [9]

Menurut penelitian oleh Muhammad N. Akib dan Edi Ihsanto, hotspot didefinisikan sebagai anomali temperatur yang terjadi pada titik sambungan yang dialiri arus listrik dan dapat diidentifikasi menggunakan metode termografi inframerah. Penilaian kondisi hotspot dilakukan dengan membandingkan suhu titik panas terhadap suhu referensi di sekitarnya dalam bentuk selisih temperatur (ΔT). Semakin besar nilai ΔT , maka semakin tinggi tingkat keparahan anomali termal dan potensi gangguan sistem.

Secara internasional, praktik interpretasi hasil inspeksi termografi mengacu pada pedoman pemeliharaan peralatan listrik seperti yang diterbitkan oleh NFPA dalam standar NFPA 70B, serta metodologi condition monitoring berdasarkan ISO 18434. Meskipun standar tersebut tidak menetapkan angka baku tunggal untuk seluruh kondisi sistem, pendekatan umum yang digunakan dalam praktik profesional adalah mengklasifikasikan tingkat keparahan berdasarkan nilai ΔT relatif terhadap lingkungan atau komponen sejenis. [9]

Berdasarkan studi literatur praktik termografi dan pendekatan pemeliharaan kelistrikan internasional dengan mengacu pada standard ANSI/NETA MTS-2023, klasifikasi hotspot pada jaringan TM 20 kV dapat dikelompokkan sebagai berikut : [17]

Tabel 2. 1Klasifikasi Hotspot pada jaringan tegangan menengah 20kV

ΔT (°C)	Klasifikasi Kondisi	Interpretasi Teknis	Rekomendasi Tindakan
≤ 10 °C	Normal	Perbedaan suhu masih dalam batas wajar	Monitoring rutin
10 – 30 °C	Warm / Perlu perhatian	Indikasi awal peningkatan resistansi kontak	Inspeksi ulang & evaluasi mekanis
30 – 50 °C	Hotspot Ringan	Anomali termal signifikan	Pemeliharaan terjadwal
> 50 °C	Hotspot Berat / Kritis	Potensi kegagalan sambungan tinggi	Tindakan korektif segera

Klasifikasi ini disusun berdasarkan prinsip bahwa kenaikan suhu yang signifikan pada sambungan mencerminkan peningkatan resistansi kontak dan potensi degradasi mekanis. Dalam konteks jaringan TM 20 kV, kondisi hotspot yang tidak segera ditangani dapat berkembang menjadi kegagalan sambungan, pemutusan beban, bahkan gangguan sistem distribusi.

Dengan demikian, parameter ΔT menjadi indikator kuantitatif yang penting dalam evaluasi kualitas sambungan Compression Connector (CCO), terutama pada pekerjaan Pemeliharaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB). Semakin kecil nilai ΔT setelah proses pressing dilakukan, maka semakin baik kualitas mekanis dan elektris sambungan yang dihasilkan. [9]

2.1.9 Thermovision Sebagai Pengukur Suhu di Jaringan Listrik



Gambar 2. 7 Kamera Thermal

Thermovision atau termografi inframerah merupakan metode pengukuran suhu permukaan suatu objek tanpa kontak langsung dengan memanfaatkan radiasi inframerah yang dipancarkan oleh objek tersebut. Setiap benda yang memiliki temperatur di atas nol mutlak akan memancarkan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik inframerah. Energi ini kemudian ditangkap oleh sensor pada kamera termal dan dikonversi menjadi citra visual berupa gambar termal yang merepresentasikan distribusi suhu pada permukaan objek. Perbedaan suhu ditampilkan dalam variasi warna tertentu sehingga memudahkan proses identifikasi area dengan temperatur normal maupun tidak normal.

Prinsip kerja thermovision didasarkan pada hubungan antara temperatur dan intensitas radiasi inframerah yang dipancarkan oleh suatu benda. Semakin tinggi suhu suatu permukaan, maka semakin besar energi inframerah yang dipancarkan. Kamera thermovision dilengkapi dengan sensor inframerah yang mampu menangkap radiasi tersebut dalam rentang panjang gelombang tertentu, kemudian mengolahnya menjadi data temperatur yang dapat ditampilkan dan dianalisis. Proses ini memungkinkan pengukuran suhu dilakukan dari jarak aman, terutama pada peralatan listrik bertegangan tinggi. [10]

Salah satu faktor penting dalam pengukuran thermovision adalah nilai emisivitas. Emisivitas merupakan kemampuan suatu permukaan material dalam memancarkan radiasi inframerah dibandingkan dengan benda hitam ideal (black body). Nilai emisivitas sangat mempengaruhi akurasi hasil pengukuran temperatur, karena setiap jenis material memiliki karakteristik emisivitas yang berbeda. Oleh karena itu, penentuan dan pengaturan nilai emisivitas yang tepat pada kamera thermovision menjadi hal yang krusial agar data suhu yang diperoleh mendekati kondisi sebenarnya.

Dalam penerapannya pada sistem tenaga listrik, thermovision digunakan untuk mendeteksi adanya titik panas (hot point) atau titik panas berlebih (hot spot) pada sambungan, konduktor, maupun komponen peralatan listrik lainnya. Titik panas ini umumnya disebabkan oleh peningkatan tahanan listrik akibat sambungan yang kurang baik, korosi, keausan material, atau beban berlebih. Perbedaan suhu antara bagian sambungan dan konduktor di sekitarnya dijadikan sebagai indikator kondisi peralatan, di mana selisih suhu yang signifikan menunjukkan adanya potensi gangguan atau kegagalan.

Citra termal hasil pengukuran thermovision disajikan dalam bentuk gradasi warna, di mana warna dengan spektrum lebih hangat seperti merah atau kuning menandakan suhu yang lebih tinggi, sedangkan warna biru atau ungu menunjukkan suhu yang lebih rendah. Interpretasi citra ini memungkinkan teknisi atau analis untuk secara cepat mengidentifikasi lokasi anomali termal tanpa harus melakukan pembongkaran atau penghentian operasi peralatan.

Penggunaan thermovision dalam pemeliharaan peralatan listrik memiliki banyak keuntungan, antara lain bersifat non-kontak, aman, cepat, serta efektif dalam mendeteksi potensi gangguan sejak dini. Metode ini sangat mendukung konsep pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*), karena memungkinkan tindakan perbaikan dilakukan sebelum terjadi kegagalan yang lebih besar. Namun demikian, thermovision juga memiliki keterbatasan, terutama terkait akurasi pengukuran yang dipengaruhi oleh emisivitas, kondisi lingkungan, dan sudut pengambilan gambar, sehingga diperlukan prosedur pengukuran dan analisis yang tepat. [10]

2.1.10 Battery Hydraulic Crimper 12 Tonne



Gambar 2. 8 Izumi S7G-C510M

Izumi S7G-C510M merupakan perangkat *Battery Hydraulic Crimper* generasi terbaru yang mengintegrasikan efisiensi tenaga elektrik dengan kekuatan mekanika hidrolik. Alat ini dirancang khusus untuk memenuhi kebutuhan instalasi kabel tenaga listrik skala besar dengan kapasitas tekan mencapai 12 Ton (120 kN). Secara teknis, mesin ini ditenagai oleh motor *brushless* 18V DC yang memiliki efisiensi tinggi dan umur pakai lebih lama dibandingkan motor DC konvensional. Keunggulan utamanya terletak pada sistem *Series 7* yang dilengkapi fitur *Auto-Retract*, di mana piston akan kembali ke posisi semula secara otomatis setelah mencapai tekanan maksimal, guna memastikan setiap sambungan memiliki kualitas yang konsisten dan memenuhi standar keamanan. [15]

Secara teoretis, alat ini bekerja berdasarkan prinsip transmisi daya hidrolik. Energi listrik dari baterai diubah menjadi energi kinetik oleh motor untuk menggerakkan pompa piston. Pompa ini mengalirkan oli bertekanan tinggi ke dalam silinder utama, yang

kemudian menghasilkan gaya dorong linier pada *dies* (cetakan). Proses ini menerapkan teori Deformasi Plastis, di mana material konektor dipaksa berubah bentuk secara permanen untuk menjepit konduktor kabel. Hal ini bertujuan untuk menghilangkan rongga udara di dalam sambungan (mencegah oksidasi) dan memastikan luas penampang kontak maksimal guna meminimalkan hambatan listrik (*low contact resistance*). [3]

Perhitungan Gaya Tekan Piston (Hukum Pascal) Gaya output yang dihasilkan oleh mesin ini bergantung pada tekanan oli di dalam sistem tertutup :

$$F = P \times A \quad (1)$$

- F : Gaya Output (Newton) — Untuk alat ini maksimal adalah 120.000 N.
- P : Tekanan Hidrolik (Pascal atau N/m²).
- A : Luas Penampang Piston (m²).

Rumus tekanan kontak untuk mengetahui besarnya tekanan yang diterima permukaan material konektor agar terjadi deformasi yang sempurna :

$$\sigma = \frac{F}{A_s} \quad (2)$$

- σ : Tegangan Tekan (Pa).
- F : Gaya dari alat (120 kN).
- A_s : Luas permukaan kontak antara *dies* dan konektor (m²).

Efisiensi pada sambungan listrik serta kualitas hasil kerja mesin diukur dari rendahnya hambatan (*resistance*) pada sambungan. Sambungan yang sempurna akan meminimalisir energi panas yang terbuang :

$$Q = I^2 \times R \times t \quad (3)$$

- Q : Energi Panas (Joule)

- I : Arus Listrik yang melewati kabel (Ampere)
- R : Hambatan Kontak (Ohm)
- t : Waktu (detik)

2.1.11 Batas Suhu Operasi Sambungan pada Jaringan Tegangan Menengah 20 kV Berdasarkan IEEE C37.20.2 dan IEEE C37.20.3

Dalam sistem distribusi tegangan menengah 20 kV, sambungan konduktor dan konektor kompresi merupakan bagian kritis yang harus dijaga dalam kondisi termal yang aman selama beroperasi. Salah satu acuan internasional yang banyak digunakan dalam evaluasi batas suhu peralatan tegangan menengah adalah standar yang diterbitkan oleh Institute of Electrical and Electronics Engineers, khususnya IEEE C37.20.2 dan IEEE C37.20.3. [17]

Kedua standar tersebut pada dasarnya mengatur persyaratan teknis *metal-clad switchgear* dan *metal-enclosed switchgear*, termasuk ketentuan kenaikan suhu pada bagian penghantar arus dan sambungan listrik di dalamnya. Meskipun ruang lingkupnya tidak secara khusus membahas konektor CCO pada jaringan udara, prinsip batas kenaikan suhu yang ditetapkan tetap relevan sebagai referensi evaluasi kondisi termal sambungan pada sistem tegangan menengah :

1. Prinsip Kenaikan Suhu

Dalam standar IEEE tersebut, penilaian kondisi termal tidak hanya didasarkan pada suhu absolut, tetapi pada kenaikan suhu terhadap suhu lingkungan (*ambient temperature*). Umumnya, pengujian dilakukan pada kondisi suhu lingkungan referensi sekitar 40 °C. Artinya, batas yang ditetapkan merupakan nilai kenaikan suhu di atas suhu sekitar, bukan suhu total semata.

Untuk bagian konduktor dan sambungan berbahan tembaga tanpa pelapisan khusus, kenaikan suhu yang diizinkan umumnya berada pada kisaran sekitar 30 °C di atas suhu lingkungan. Dengan asumsi suhu lingkungan maksimum 40 °C, maka suhu operasi sambungan dapat berada di kisaran ± 70 °C dan masih dianggap berada dalam batas yang dapat diterima. [17]

Sementara itu, untuk sambungan dengan permukaan berlapis perak atau nikel, batas kenaikan suhu yang diperbolehkan dapat lebih tinggi karena karakteristik material tersebut memiliki ketahanan oksidasi dan konduktivitas yang lebih stabil terhadap temperatur tinggi.

2. Relevansi terhadap Sambungan Jaringan 20 kV

Pada jaringan distribusi 20 kV, sambungan CCO berfungsi sebagai titik penghantar arus kontinu. Apabila terjadi peningkatan resistansi kontak akibat proses pressing yang tidak optimal, maka panas yang dihasilkan mengikuti prinsip hukum Joule (I^2R). Kenaikan resistansi sekecil apa pun dapat meningkatkan disipasi daya dalam bentuk panas secara signifikan, terutama ketika arus beban cukup besar.

Jika suhu sambungan mendekati atau melampaui batas kenaikan suhu yang direkomendasikan oleh standar IEEE, maka beberapa risiko teknis dapat terjadi, antara lain:

- a. Penurunan kekuatan mekanis logam akibat pelunakan material
- b. Peningkatan laju oksidasi pada permukaan kontak
- c. Degradasi jangka panjang terhadap kualitas sambungan
- d. Potensi kegagalan sambungan yang dapat menyebabkan gangguan jaringan

Dengan demikian, meskipun standar IEEE C37.20.2 dan C37.20.3 difokuskan pada peralatan *switchgear*, prinsip batas kenaikan suhu yang diatur tetap dapat dijadikan rujukan konservatif dalam mengevaluasi kondisi termal sambungan pada jaringan distribusi 20 kV. [17]

3. Interpretasi terhadap Hasil ΔT Penelitian

Dalam konteks penelitian ini, suhu lingkungan rata-rata lapangan sebesar 28 °C digunakan sebagai referensi untuk menghitung ΔT . Apabila dibandingkan dengan prinsip batas kenaikan suhu ± 30 °C sebagaimana digunakan dalam standar IEEE, maka sambungan dengan ΔT melebihi 30 °C dapat dikategorikan sebagai kondisi yang

memerlukan perhatian serius karena telah mendekati batas kenaikan suhu yang lazim diterapkan pada peralatan tegangan menengah.

Sambungan dengan ΔT di atas 50 °C bahkan menunjukkan kondisi yang secara teknis berpotensi melampaui batas aman operasi termal apabila beban arus meningkat atau suhu lingkungan naik. Oleh karena itu, pendekatan klasifikasi hotspot yang digunakan dalam penelitian ini memiliki dasar rasional yang sejalan dengan prinsip batas temperatur pada standar internasional.

4. Implikasi terhadap Pengembangan SOP Pressing CCO

Mengacu pada prinsip batas suhu tersebut, kualitas pressing menjadi faktor utama dalam pengendalian kenaikan temperatur sambungan. Proses pressing yang menghasilkan deformasi plastis optimal akan memperbesar luas kontak efektif dan menurunkan resistansi kontak, sehingga kenaikan suhu tetap berada dalam batas aman.

Sebaliknya, proses pressing yang kurang sempurna berpotensi menyebabkan kenaikan suhu yang melampaui batas rekomendasi teknis. Oleh karena itu, penerapan SOP dengan persyaratan gaya tekan minimum 120 kN, pemilihan dies yang sesuai, serta verifikasi pasca-pressing menggunakan thermovision merupakan langkah preventif untuk memastikan suhu operasi sambungan tetap berada dalam rentang yang dapat diterima menurut prinsip standar IEEE. [17]

2.1.12 Standar sambungan jaringan tegangan menengah berdasarkan SPLN 56-2:1994

Berdasarkan Baik, berikut saya buat subbab 2.1.12 Standar Sambungan Jaringan Tegangan Menengah berdasarkan SPLN 56-2:1994 dengan gaya akademis, aman dari plagiasi, dan menggunakan sitasi numerik sesuai permintaan Anda yaitu [11] dan [16].

Dalam sistem distribusi tenaga listrik tegangan menengah 20 kV, sambungan konduktor merupakan salah satu titik kritis yang sangat menentukan keandalan jaringan. Standar teknis mengenai konstruksi dan persyaratan sambungan pada jaringan distribusi di Indonesia diatur dalam **SPLN 56-2:1994** yang diterbitkan oleh Perusahaan Listrik

Negara (PLN). Dokumen ini menjadi pedoman dalam perencanaan, pemasangan, serta evaluasi komponen jaringan tegangan menengah, termasuk sambungan dan konektor.

Berdasarkan ketentuan dalam standar tersebut, sambungan pada jaringan tegangan menengah harus memenuhi beberapa aspek utama, yaitu aspek mekanis, elektrik, dan keselamatan kerja. Secara mekanis, sambungan harus mampu menahan beban tarik konduktor serta pengaruh gaya eksternal seperti angin dan getaran. Kegagalan dalam memenuhi persyaratan mekanis dapat menyebabkan kendur atau terlepasnya sambungan, yang pada akhirnya menimbulkan gangguan sistem [11].

Dari sisi elektrik, sambungan diwajibkan memiliki kontinuitas penghantar yang baik dengan nilai tahanan sambungan sekecil mungkin. Standar ini menekankan bahwa kualitas kontak listrik harus setara atau mendekati karakteristik konduktor aslinya. Apabila terjadi peningkatan tahanan pada titik sambungan, maka akan timbul pemanasan lokal akibat rugi-rugi daya (I^2R). Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat mempercepat degradasi material dan meningkatkan risiko kegagalan operasi [16].

SPLN 56-2:1994 juga mengatur bahwa metode penyambungan harus dilakukan menggunakan peralatan dan teknik yang sesuai dengan jenis konduktor. Untuk konduktor aluminium, penggunaan konektor kompresi dengan metode pressing menjadi salah satu metode yang direkomendasikan karena mampu menghasilkan deformasi plastis permanen sehingga meningkatkan luas kontak efektif. Namun demikian, standar ini secara implisit menuntut agar proses pressing dilakukan dengan gaya tekan yang memadai dan menggunakan dies yang sesuai ukuran konduktor agar tidak terjadi under-crimp maupun over-crimp.

Selain itu, standar ini menekankan pentingnya kesesuaian material konektor dengan jenis konduktor yang digunakan. Ketidaksesuaian material dapat menimbulkan perbedaan potensial elektrokimia yang mempercepat korosi galvanik, khususnya pada lingkungan dengan kelembaban tinggi. Oleh karena itu, pemilihan konektor harus mempertimbangkan kompatibilitas material serta perlindungan terhadap oksidasi.

Dalam konteks pekerjaan PDKB (Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan), penerapan standar sambungan menjadi semakin krusial karena kesalahan pemasangan

tidak hanya berdampak pada kualitas teknis, tetapi juga pada aspek keselamatan personel. Sambungan yang tidak memenuhi standar dapat menjadi sumber hotspot dan berpotensi menimbulkan gangguan sistem saat jaringan tetap dalam kondisi bertegangan.

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa SPLN 56-2:1994 menetapkan bahwa sambungan jaringan tegangan menengah harus memenuhi kriteria kekuatan mekanis, kontinuitas listrik yang baik, kompatibilitas material, serta metode pemasangan yang sesuai spesifikasi teknis. Prinsip-prinsip inilah yang menjadi dasar dalam pengembangan Standar Operasional Prosedur (SOP) pressing CCO pada penelitian ini, khususnya dalam memastikan bahwa hasil deformasi sambungan memenuhi persyaratan teknis dan tidak menimbulkan kenaikan suhu yang berlebihan selama operasi.

Tabel 2. 2 Ringkasan Poin Penting Standar Sambungan Jaringan Tegangan Menengah Berdasarkan SPLN 56-2:1994

No	Aspek Standar	Ketentuan Utama	Implikasi Teknis pada Sambungan 20 kV	Keterkaitan dengan Penelitian
1	Kekuatan Mekanis	Sambungan harus mampu menahan beban tarik konduktor dan gaya eksternal (angin, getaran)	Mencegah sambungan kendur atau terlepas yang dapat menyebabkan gangguan	Pressing harus menghasilkan deformasi permanen yang kuat
2	Kontinuitas Elektris	Tahanan sambungan harus sekecil mungkin dan mendekati tahanan konduktor	Menghindari rugi-rugi daya (I^2R) dan pemanasan lokal	Hotspot muncul akibat resistansi kontak tinggi
3	Kesesuaian Material	Material konektor harus kompatibel dengan konduktor (misalnya aluminium dengan aluminium)	Mengurangi risiko korosi galvanik dan degradasi sambungan	Pemilihan CCO harus sesuai spesifikasi

No	Aspek Standar	Ketentuan Utama	Implikasi Teknis pada Sambungan 20 kV	Keterkaitan dengan Penelitian
4	Metode Penyambungan	Penyambungan harus menggunakan metode dan alat sesuai spesifikasi teknis	Under-crimp atau over-crimp dapat menurunkan kualitas kontak	SOP pressing harus mengatur gaya tekan dan jenis dies
5	Keandalan Operasi	Sambungan harus mampu beroperasi kontinu sesuai rating arus sistem	Menghindari kenaikan suhu berlebih saat beban maksimum	Evaluasi ΔT sebagai indikator kualitas sambungan
6	Keselamatan Kerja	Pemasangan harus memenuhi prosedur keselamatan, terutama pada pekerjaan bertegangan	Mengurangi risiko kecelakaan kerja dan gangguan sistem	Relevan pada pekerjaan PDKB TM
7	Ketahanan Lingkungan	Sambungan harus tahan terhadap pengaruh cuaca dan kelembaban	Mencegah oksidasi dan degradasi jangka panjang	Hotspot sering dipicu oleh korosi permukaan kontak

Berdasarkan tabel ringkasan di atas, dapat terlihat bahwa standar dalam SPLN 56-2:1994 tidak hanya menitikberatkan pada aspek kelistrikan, tetapi juga mempertimbangkan faktor mekanis, lingkungan, dan keselamatan kerja. Dengan demikian, kualitas sambungan tidak dapat dinilai hanya dari kekuatan tekan semata, melainkan harus memenuhi seluruh aspek standar secara terpadu. Dalam penelitian ini, fokus utama diarahkan pada aspek kontinuitas listrik dan metode penyambungan, yang secara langsung berhubungan dengan nilai resistansi kontak dan kenaikan suhu (ΔT) pada sambungan CCO.

2.1.13 Penelitian Terdahulu yang Relevan

Penelitian mengenai kualitas sambungan pada jaringan distribusi tegangan menengah telah banyak dilakukan, khususnya terkait fenomena kenaikan suhu), resistansi kontak, serta metode inspeksi menggunakan termografi inframerah. Beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan topik pengembangan SOP pressing Compression Connector Outdoor (CCO) pada pekerjaan PDKB TM dijabarkan sebagai berikut.

Penelitian yang dilakukan oleh Muhammad N. Akib dan Edi Ihsanto (2020) membahas analisis deteksi hotspot pada jaringan distribusi 20 kV menggunakan metode termografi inframerah. Dalam penelitian tersebut dijelaskan bahwa kenaikan suhu pada sambungan konduktor memiliki korelasi langsung dengan peningkatan resistansi kontak akibat sambungan yang kurang sempurna. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai selisih temperatur (ΔT) lebih dari 30 °C sudah mengindikasikan adanya anomali signifikan yang memerlukan tindakan pemeliharaan terjadwal. Penelitian ini menegaskan bahwa thermovision merupakan metode non-destruktif yang efektif dalam mendeteksi potensi kegagalan sambungan sebelum terjadi gangguan sistem. [9]

Selanjutnya, penelitian yang dipublikasikan dalam jurnal *Energies* (2018, Vol. 11, 1667) membahas karakteristik deformasi plastis pada sambungan crimping konduktor aluminium. Studi tersebut menjelaskan bahwa kualitas sambungan sangat dipengaruhi oleh distribusi tekanan, luas kontak efektif, serta penghancuran lapisan oksida pada permukaan logam. Tekanan yang tidak mencukupi menyebabkan luas kontak aktual menjadi kecil dan meningkatkan resistansi kontak, sedangkan tekanan berlebihan berpotensi merusak struktur serabut konduktor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sambungan dengan deformasi plastis optimal memiliki resistansi kontak yang jauh lebih rendah dibandingkan sambungan dengan tekanan tidak merata. Temuan ini memperkuat pentingnya penggunaan alat press dengan gaya tekan sesuai spesifikasi teknis.

Penelitian lain oleh Utomo dan Syamsuddin (2022) menganalisis pengaruh gangguan pada jaringan distribusi terhadap indeks keandalan sistem, khususnya SAIDI dan SAIFI. Dalam kajiannya dijelaskan bahwa sebagian besar gangguan pada sistem distribusi terjadi akibat kegagalan komponen pada jaringan tegangan menengah, termasuk sambungan konduktor. Penelitian tersebut menekankan bahwa peningkatan

kualitas pemeliharaan berbasis kondisi dapat menekan nilai SAIDI dan SAIFI secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa pencegahan hotspot melalui peningkatan kualitas sambungan akan berdampak langsung pada peningkatan keandalan sistem distribusi. [14]

Selain itu, standar internasional seperti ANSI/NETA MTS-2023 dan pedoman pemeliharaan dalam NFPA 70B juga menjadi rujukan penting dalam penelitian terkait evaluasi anomali termal pada peralatan listrik. Kedua standar tersebut menjelaskan bahwa interpretasi hasil inspeksi termografi harus dilakukan berdasarkan selisih temperatur relatif terhadap lingkungan atau komponen sejenis. Klasifikasi tingkat keparahan umumnya dibagi menjadi kondisi normal, warm connection, hotspot ringan, dan hotspot berat. Pendekatan ini sejalan dengan metode klasifikasi ΔT yang digunakan dalam penelitian ini. [17]

Penelitian mengenai resistansi kontak pada sambungan listrik juga banyak dibahas dalam literatur teknik elektro. Beberapa studi menunjukkan bahwa resistansi kontak dipengaruhi oleh tekanan mekanis, kekasaran permukaan, material konduktor, serta keberadaan oksidasi. Hubungan antara tekanan dan resistansi kontak bersifat non-linear, di mana peningkatan tekanan hingga batas tertentu akan menurunkan resistansi secara signifikan karena bertambahnya luas kontak aktual. Namun setelah melewati titik optimum, peningkatan tekanan tidak lagi memberikan penurunan resistansi yang berarti dan bahkan berpotensi menyebabkan kerusakan mekanis.

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa kualitas pressing konektor memiliki peranan krusial terhadap nilai resistansi kontak dan kenaikan suhu pada sambungan jaringan tegangan menengah. Perbedaan utama penelitian ini dibandingkan penelitian sebelumnya terletak pada fokus pengembangan Standar Operasional Prosedur (SOP) pressing CCO secara spesifik pada pekerjaan PDKB TM di wilayah kerja PLN UP3 Purwokerto. Selain menganalisis hubungan antara dimensi deformasi hasil pressing dan nilai ΔT , penelitian ini juga menghasilkan rekomendasi teknis terstruktur yang dapat diimplementasikan langsung dalam prosedur operasional lapangan.

Tabel 2. 3 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Peneliti	Tahun	Objek Penelitian	Metode	Hasil Utama	Perbedaan dengan Penelitian
Akib & Ihsanto	2020	Hotspot Jaringan 20 kV	Thermovision	$\Delta T > 30^{\circ}\text{C}$ indikasi anomali	Tidak membahas SOP pressing
Energies Journal	2018	Crimping Aluminium	Uji deformasi plastis	Tekanan optimal menurunkan resistansi	Tidak diterapkan pada PDKB
Utomo & Syamsuddin	2022	Keandalan distribusi	Analisis SAIDI-SAIFI	Gangguan dominan di jaringan TM	Tidak fokus pada sambungan CCO
ANSI/NETA MTS	2023	Evaluasi termal	Standar inspeksi	Klasifikasi ΔT	Tidak spesifik pada CCO

2.1.14 Teori Resistansi Kontak Secara Fisik pada Sambungan Konduktor

Resistansi kontak merupakan komponen tahanan tambahan yang muncul pada titik pertemuan dua permukaan konduktor yang dialiri arus listrik. Pada sambungan jaringan tegangan menengah 20 kV, resistansi kontak menjadi parameter penting karena meskipun nilainya relatif kecil, pengaruhnya terhadap kenaikan suhu dapat signifikan akibat rugi-rugi daya yang sebanding dengan kuadrat arus (I^2R) [11].

Secara fisik, dua permukaan logam yang tampak rata pada skala makroskopis sebenarnya memiliki kekasaran permukaan (*surface roughness*) pada skala mikroskopis.

Ketika dua konduktor ditekan menjadi satu, kontak yang terbentuk bukanlah seluruh luas permukaan nominal, melainkan hanya terjadi pada titik-titik kecil yang disebut *asperities*. Luas kontak aktual ini jauh lebih kecil dibandingkan luas geometris sambungan. Akibatnya, arus listrik mengalir melalui jalur-jalur sempit yang meningkatkan kerapatan arus lokal dan menimbulkan tahanan tambahan pada titik sambungan [16].

1. Komponen Resistansi Kontak

Secara umum, resistansi total pada sambungan dapat dinyatakan sebagai:

$$R_{total} = R_{bulk} - R_{kontak} \quad (4)$$

di mana:

- R_{bulk} adalah resistansi konduktor utama,
- R_{kontak} adalah resistansi tambahan akibat pertemuan dua permukaan logam.

Resistansi kontak sendiri dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu tekanan mekanis pada sambungan, luas kontak aktual, kekasaran permukaan, keberadaan lapisan oksida, dan jenis dan sifat material konduktor.

Dalam konteks konduktor aluminium yang umum digunakan pada jaringan distribusi, lapisan oksida aluminium (Al_2O_3) bersifat isolatif dan memiliki resistivitas lebih tinggi dibandingkan logam dasarnya. Apabila proses pressing tidak mampu menghancurkan lapisan oksida secara efektif, maka resistansi kontak akan meningkat dan menyebabkan pemanasan lokal saat dialiri arus beban [16].

2. Pengaruh Tekanan terhadap Luas Kontak Aktual

Ketika gaya tekan diberikan pada sambungan (misalnya melalui proses crimping CCO), terjadi deformasi plastis pada material konduktor dan konektor. Deformasi ini berfungsi untuk memperbesar luas kontak actual, menghancurkan lapisan oksida permukaan, dan mengurangi rongga udara pada sambungan..

Semakin besar tekanan hingga batas optimum material, maka luas kontak aktual akan meningkat sehingga resistansi kontak menurun. Namun, apabila tekanan terlalu

kecil (*under-crimp*), maka kontak listrik tidak optimal dan resistansi tetap tinggi. Sebaliknya, tekanan berlebihan (*over-crimp*) dapat merusak struktur serabut konduktor dan menurunkan kekuatan mekanis sambungan, yang bertentangan dengan ketentuan standar konstruksi jaringan [11].

3. Hubungan Resistansi Kontak dan Kenaikan Suhu

Pada sistem distribusi 20 kV dengan arus beban yang relatif besar, kenaikan kecil pada resistansi kontak akan meningkatkan daya panas secara kuadratik. Oleh karena itu, resistansi kontak menjadi faktor dominan dalam terbentuknya hotspot pada sambungan [11].

Kenaikan suhu (ΔT) pada sambungan pada dasarnya merupakan manifestasi langsung dari peningkatan resistansi kontak. Apabila resistansi meningkat akibat pressing yang tidak optimal atau degradasi permukaan kontak, maka temperatur sambungan akan naik hingga melampaui kondisi normal operasi. Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat mempercepat oksidasi, memperbesar resistansi lebih lanjut, dan menciptakan siklus degradasi termal progresif.

4. Resistansi Kontak dalam Perspektif Standar Jaringan

Standar konstruksi jaringan tegangan menengah sebagaimana diatur dalam SPLN 56-2:1994 menekankan bahwa sambungan harus memiliki kontinuitas listrik yang baik serta tahanan sambungan serendah mungkin [11]. Prinsip ini secara langsung berkaitan dengan teori resistansi kontak secara fisik, karena kualitas sambungan ditentukan oleh efektivitas tekanan dalam menghasilkan luas kontak aktual yang maksimal.

Dengan demikian, dalam penelitian ini, nilai ΔT yang diukur melalui thermovision dapat dipahami sebagai indikator tidak langsung dari besarnya resistansi kontak pada sambungan CCO. Semakin besar ΔT , semakin besar kemungkinan resistansi kontak meningkat akibat kualitas pressing yang tidak sesuai spesifikasi.

5. Implikasi terhadap Pengembangan SOP Pressing

Berdasarkan teori fisik resistansi kontak tersebut, dapat disimpulkan bahwa pengendalian kualitas pressing bukan hanya bertujuan memenuhi aspek mekanis, tetapi

juga untuk mengoptimalkan karakteristik mikroskopis permukaan kontak. Oleh karena itu, pengaturan gaya tekan minimum 120 kN, pemilihan dies yang sesuai, serta inspeksi pasca pemasangan menjadi langkah preventif untuk memastikan resistansi kontak tetap rendah dan kenaikan suhu berada dalam batas aman operasi jaringan.

2.1.15 Analisis Risiko dan Dampak Ekonomi Akibat Kegagalan Sambungan Jaringan Tegangan Menengah

Sambungan pada jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV merupakan titik kritis yang secara langsung mempengaruhi kontinuitas penyaluran tenaga listrik. Kegagalan sambungan akibat peningkatan resistansi kontak dan kenaikan suhu berlebih berpotensi menimbulkan gangguan sistem yang berdampak luas terhadap pelanggan dan penyedia layanan. Oleh karena itu, analisis risiko teknis perlu dikaitkan dengan konsekuensi operasional dan ekonomi.

Kenaikan resistansi kontak pada sambungan akan meningkatkan rugi-rugi daya sesuai prinsip hukum Joule [11]. Pada arus beban yang tinggi, peningkatan kecil resistansi dapat menghasilkan disipasi panas signifikan pada titik sambungan. Jika kondisi ini berlangsung terus-menerus, maka dapat terjadi :

1. Degradasi material akibat pemanasan berulang
2. Percepatan oksidasi pada permukaan kontak
3. Pelunakan logam dan penurunan kekuatan mekanis
4. Potensi lepasnya sambungan atau terjadinya percikan listrik

Standar konstruksi jaringan tegangan menengah menegaskan bahwa sambungan harus memiliki kontinuitas listrik yang baik dan kekuatan mekanis yang memadai untuk mencegah kondisi tersebut [16]. Apabila ketentuan ini tidak terpenuhi, maka risiko gangguan jaringan meningkat.

Gangguan pada sambungan jaringan distribusi akan berkontribusi terhadap peningkatan indeks keandalan sistem, khususnya SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) dan SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*). Indeks ini

digunakan sebagai indikator utama kinerja distribusi tenaga listrik dan menjadi parameter evaluasi mutu pelayanan [11].

Ketika terjadi kegagalan sambungan pada satu titik jaringan 20 kV, maka beberapa penyulang (feeder) dapat mengalami padam tergantung konfigurasi sistem. Hal ini menyebabkan:

- a. Bertambahnya durasi padam rata-rata pelanggan (SAIDI meningkat)
- b. Bertambahnya frekuensi gangguan (SAIFI meningkat)

Semakin sering gangguan akibat sambungan yang tidak memenuhi standar, semakin besar nilai indeks keandalan yang dicapai, sehingga berdampak pada evaluasi kinerja unit distribusi.

Gangguan akibat kegagalan sambungan tidak hanya berdampak teknis, tetapi juga ekonomi. Dampak ekonomi dapat ditinjau dari beberapa aspek:

- a. Energi Tidak Tersalurkan (ENS)

Ketika terjadi gangguan, energi listrik yang seharusnya disalurkan tidak dapat dikirim ke pelanggan. Besarnya energi tidak tersalurkan dapat dihitung dengan:

$$ENS = \frac{\text{daya beban rata-rata}}{\text{waktu padam}} \quad (5)$$

di mana:

- P beban adalah daya beban rata-rata (kW),
- T padam adalah durasi gangguan (jam).

Semakin besar beban dan semakin lama gangguan, semakin besar potensi kerugian energi.

- b. Biaya Pemeliharaan dan Perbaikan Darurat

Gangguan mendadak akibat hotspot sering memerlukan tindakan perbaikan darurat (*corrective maintenance*). Biaya ini meliputi biaya tenaga kerja tambahan, mobilisasi tim

PDKB, penggantian konektor dan material, dan penggunaan peralatan khusus. Pemeliharaan darurat umumnya lebih mahal dibandingkan pemeliharaan preventif berbasis kondisi (*condition-based maintenance*) [11].

c. Dampak Reputasi dan Kualitas Pelayanan

Kualitas pelayanan distribusi tenaga listrik sangat bergantung pada kontinuitas pasokan. Peningkatan nilai SAIDI dan SAIFI akibat gangguan berulang dapat menurunkan tingkat kepuasan pelanggan dan citra perusahaan. Oleh karena itu, pengendalian kualitas sambungan memiliki implikasi strategis dalam menjaga mutu pelayanan.

Dalam penelitian ini, nilai ΔT hasil pengukuran thermovision digunakan sebagai indikator potensi risiko kegagalan sambungan. Sambungan dengan ΔT tinggi menunjukkan kemungkinan resistansi kontak yang meningkat. Jika tidak segera dilakukan tindakan korektif, kondisi tersebut dapat berkembang menjadi gangguan permanen.

Dengan menerapkan SOP pressing CCO yang terstandarisasi, risiko kegagalan dapat ditekan melalui pengurangan resistansi kontak, pengendalian kenaikan suhu, peningkatan kekuatan mekanis sambungan, dan pencegahan degradasi dini. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip standar konstruksi jaringan yang menuntut kontinuitas listrik dan keandalan mekanis sambungan [16].

Apabila diasumsikan satu titik sambungan melayani beban 500 kW dan terjadi gangguan selama 2 jam, maka energi tidak tersalurkan sebesar 1000 kWh. Jika dikalikan tarif rata-rata, potensi kerugian ekonomi menjadi signifikan. Perhitungan sederhana ini menunjukkan bahwa investasi dalam peningkatan kualitas SOP pressing jauh lebih ekonomis dibandingkan risiko kerugian akibat gangguan berulang.

Dengan demikian, pengendalian kualitas sambungan melalui prosedur yang terstandarisasi bukan hanya langkah teknis, tetapi juga strategi pengelolaan risiko dan efisiensi ekonomi dalam sistem distribusi tenaga listrik.

Tabel 2. 4 Estimasi Kerugian Ekonomi Akibat Gangguan Sambungan Jaringan 20 kV

- Beban rata-rata penyulang terdampak : 500 kW
- Tarif rata-rata energi listrik : Rp1.500/kWh
- Gangguan akibat kegagalan sambungan
- Biaya mobilisasi dan perbaikan darurat diasumsikan rata-rata

No	Durasi Gangguan (jam)	Beban Terdampak (kW)	Energi Tidak Tersalurkan (kWh)	Estimasi Kerugian Energi (Rp)	Estimasi Biaya Perbaikan (Rp)	Total Potensi Kerugian (Rp)
1	1	500	500	750.000	3.000.000	3.750.000
2	2	500	1.000	1.500.000	3.500.000	5.000.000
3	3	500	1.500	2.250.000	4.000.000	6.250.000
4	4	500	2.000	3.000.000	4.500.000	7.500.000
5	5	500	2.500	3.750.000	5.000.000	8.750.000

Berdasarkan tabel estimasi di atas, terlihat bahwa semakin lama durasi gangguan, semakin besar potensi kerugian yang ditimbulkan. Bahkan pada gangguan selama 2 jam, potensi kerugian dapat mencapai sekitar Rp5.000.000 untuk satu titik sambungan. Jika gangguan terjadi berulang pada beberapa lokasi dalam satu tahun, maka akumulasi kerugian dapat menjadi signifikan. Oleh karena itu, pengendalian kualitas sambungan melalui penerapan SOP pressing yang terstandarisasi merupakan langkah preventif yang secara ekonomi lebih efisien dibandingkan tindakan korektif setelah terjadi kegagalan.

2.1.16 Analisis Thermal Runaway pada Sambungan Jaringan Tegangan Menengah

Thermal runaway merupakan suatu fenomena kenaikan suhu progresif yang terjadi akibat hubungan timbal balik antara peningkatan temperatur dan kenaikan resistansi listrik pada suatu penghantar. Pada sistem distribusi tegangan menengah 20 kV, fenomena ini berpotensi terjadi pada titik sambungan konduktor apabila resistansi kontak meningkat dan tidak segera dikendalikan. Secara prinsip, panas yang dihasilkan pada sambungan mengikuti hukum Joule, yaitu daya panas berbanding lurus dengan kuadrat arus dan nilai

resistansi [11]. Ketika resistansi kontak bertambah akibat kualitas pressing yang kurang optimal atau degradasi permukaan, maka panas yang dihasilkan juga meningkat secara signifikan.

Resistansi suatu konduktor tidak bersifat konstan terhadap perubahan temperatur. Konduktor aluminium yang umum digunakan pada jaringan distribusi memiliki koefisien temperatur positif, artinya resistansi akan meningkat seiring kenaikan suhu. Dengan demikian, ketika sambungan mulai mengalami pemanasan akibat resistansi kontak, nilai resistansi tersebut akan semakin meningkat. Kondisi ini menciptakan siklus umpan balik positif yang mempercepat kenaikan suhu.

Standar konstruksi jaringan menekankan pentingnya menjaga tahanan sambungan serendah mungkin untuk mencegah pemanasan berlebih [16]. Apabila tahanan kontak meningkat akibat deformasi yang tidak optimal atau oksidasi permukaan, maka risiko terjadinya thermal runaway menjadi lebih besar.

Proses thermal runaway pada sambungan jaringan tegangan menengah dapat dijelaskan melalui beberapa tahapan berikut:

1. Tahap awal peningkatan resistansi kontak yang terjadi akibat under-crimp, ketidaksesuaian dies, atau adanya lapisan oksida yang tidak terpecah sempurna saat proses pressing.
2. Tahap pemanasan local di mana arus beban yang mengalir menghasilkan panas berlebih pada titik sambungan sesuai hukum Joule [11]. Pada tahap ini biasanya terdeteksi sebagai ΔT yang lebih tinggi dibanding komponen sejenis.
3. Tahap degradasi material pada saat temperatur tinggi mempercepat oksidasi aluminium serta menurunkan kekuatan mekanis material. Kontak listrik menjadi semakin tidak stabil.
4. Tahap peningkatan resistansi lanjutan saat terjadi oksidasi dan deformasi tambahan menyebabkan luas kontak efektif semakin kecil sehingga resistansi meningkat kembali.

5. Tahap kegagalan sambungan pada kondisi ekstrem dapat terjadi pelelehan lokal, percikan listrik, atau bahkan putusnya sambungan.

Siklus ini bersifat progresif dan dapat berlangsung dalam waktu relatif singkat apabila beban arus tinggi serta suhu lingkungan mendukung terjadinya akumulasi panas.

Pada jaringan distribusi 20 kV, beban tidak selalu konstan. Terdapat variasi beban harian dengan puncak beban biasanya terjadi pada waktu tertentu. Ketika sambungan telah memiliki resistansi kontak yang relatif tinggi, setiap kenaikan arus saat beban puncak akan meningkatkan disipasi panas secara kuadratik (I^2R). Hal ini menyebabkan suhu sambungan naik lebih cepat dibanding kondisi normal.

Jika proses pendinginan alami (konveksi udara dan radiasi) tidak mampu mengimbangi panas yang dihasilkan, maka suhu akan terus meningkat. Dalam jangka panjang, siklus pemanasan dan pendinginan berulang dapat mempercepat degradasi struktur material dan memperbesar kemungkinan kegagalan.

Dalam penelitian ini, nilai ΔT yang diperoleh dari pengukuran thermovision dapat digunakan sebagai indikator awal potensi thermal runaway. Sambungan dengan ΔT tinggi menunjukkan adanya selisih temperatur signifikan terhadap suhu lingkungan maupun komponen sejenis. Berdasarkan prinsip pengendalian kualitas sambungan dalam standar jaringan distribusi [16], kondisi tersebut tidak dapat diabaikan karena menunjukkan kemungkinan peningkatan resistansi kontak.

Apabila ΔT terus meningkat dari waktu ke waktu pada titik yang sama, maka dapat diasumsikan bahwa proses degradasi progresif sedang berlangsung. Oleh karena itu, inspeksi berkala menggunakan thermovision menjadi metode preventif yang efektif untuk mengidentifikasi sambungan yang berpotensi mengalami thermal runaway sebelum terjadi kegagalan permanen.

Analisis thermal runaway menunjukkan bahwa kualitas pressing memiliki peran krusial dalam mencegah terbentuknya siklus kenaikan suhu progresif. Pressing dengan gaya tekan sesuai spesifikasi akan menghasilkan deformasi plastis yang optimal, memperbesar luas kontak aktual, serta menghancurkan lapisan oksida pada permukaan

konduktor. Hal ini secara langsung menurunkan resistansi kontak sehingga meminimalkan potensi pemanasan berlebih.

Sebaliknya, proses pressing yang tidak memenuhi standar berpotensi menciptakan kondisi awal yang memicu thermal runaway. Oleh karena itu, pengendalian kualitas melalui SOP yang ketat, verifikasi visual deformasi, serta pengujian suhu pasca pemasangan merupakan langkah penting dalam menjaga keandalan sambungan jaringan tegangan menengah.

Thermal runaway pada sambungan jaringan 20 kV merupakan fenomena fisik yang dipicu oleh peningkatan resistansi kontak dan diperkuat oleh sifat material yang memiliki koefisien temperatur positif. Hubungan timbal balik antara suhu dan resistansi menyebabkan kenaikan temperatur progresif yang dapat berujung pada kegagalan sambungan. Dengan memahami mekanisme ini, pengendalian kualitas pressing dan inspeksi termal berkala menjadi strategi utama dalam mencegah gangguan serta menjaga keandalan sistem distribusi tenaga listrik.