

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Beberapa penelitian dan kajian terdahulu terkait penggunaan pengunci baut pada sistem transmisi tenaga listrik dapat dijadikan referensi:

1. Penggunaan Spacer pada SUTET

Spacer berfungsi menjaga jarak antar konduktor, mengurangi tegangan mekanis, serta meredam getaran (*aeolian vibration* dan *subspan oscillation*). Menurut studi dari PLN (2019), kegagalan spacer dapat menyebabkan peningkatan risiko kerusakan konduktor dan gangguan jaringan transmisi.

2. Masalah Kekencangan Baut pada *Spacer*

Beberapa laporan inspeksi pada jaringan transmisi menunjukkan kasus baut spacer yang kendur atau lepas (misalnya pada jalur Ungaran–Pedan, Kediri–Pedan, dan Pedan–Kesugihan). Fenomena ini umumnya dipicu oleh getaran jangka panjang yang menyebabkan ring per kehilangan daya pegasnya sehingga baut tidak lagi stabil.

3. Kelemahan *Ring Per*

Ring per atau *spring washer* digunakan luas dalam aplikasi mekanik, namun penelitian oleh Junker (1969) memperlihatkan bahwa ring per kurang efektif menahan gaya putar akibat getaran (*Junker vibration test*). Hal ini membuat ring per tidak optimal dalam aplikasi yang memiliki intensitas vibrasi tinggi, seperti pada konduktor transmisi 500 kV.

4. *Wedge Washer* sebagai Alternatif

Studi oleh Nord-Lock Group (2020) menjelaskan bahwa *wedge washer* mampu mencegah kelonggaran baut dengan prinsip penguncian berbasis keausan irisan (*cam effect*), sehingga baut tetap stabil meski terpapar getaran. Penerapan *wedge washer* di berbagai industri (*aerospace*, otomotif, energi) terbukti lebih tahan lama dibanding ring per.

5. Implementasi pada Jaringan PLN

Sejak 2023, PLN UPT Salatiga mulai mengganti ring per dengan wedge washer pada spacer SUTET 500 kV. Hasil uji coba lapangan menunjukkan pengurangan signifikan pada kasus baut kendur/lepas serta berkurangnya frekuensi inspeksi dan perawatan.

Beberapa penelitian dan kajian terdahulu terkait penggunaan pengunci baut pada sistem transmisi tenaga listrik dapat dijadikan referensi:

Menurut Dhamala dan Ghassemi dalam jurnal berjudul *“An Extra-High Voltage Test System for Transmission Expansion Planning Studies Considering Single Contingency Conditions”*, penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem uji transmisi tegangan ekstra tinggi (EHV) yang mampu mensimulasikan kondisi kontingensi tunggal pada jaringan 500-765 kV. Tujuan utamanya adalah menyediakan model uji yang dapat menilai kestabilan sistem secara akurat ketika terjadi gangguan parsial pada saluran transmisi. Metodologi yang digunakan meliputi pengembangan model simulasi aliran daya dan kestabilan menggunakan parameter nyata jaringan, serta validasi hasil terhadap data sistem aktual. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model EHV yang dikembangkan mampu meniru kondisi operasional dengan penyimpangan kurang dari 3%, menandakan tingkat akurasi yang tinggi. Namun demikian, penelitian ini belum diterapkan pada jaringan tropis dengan konfigurasi beban campuran seperti di Indonesia, yang memiliki karakteristik resistansi dan kelembapan udara tinggi sehingga diperlukan adaptasi lanjutan terhadap kondisi local [9].

Menurut Perzyński et al. dalam jurnal *“Transient Electromagnetic Processes Analysis in High Voltage (EHV) Transmission Lines”*, penelitian ini menyoroti tantangan dalam memahami fenomena elektromagnetik transien, seperti efek switching dan petir, pada saluran transmisi EHV. Pendekatan yang digunakan adalah simulasi numerik menggunakan metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD) tiga dimensi untuk menganalisis gelombang elektromagnetik pada saluran 500-800 kV. Model tersebut kemudian divalidasi dengan data hasil uji laboratorium untuk memastikan

akurasinya. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa model FDTD memiliki presisi tinggi dalam memprediksi lonjakan tegangan dan arus saat kejadian transien, dengan deviasi hasil hanya sekitar 5% dari data pengukuran aktual. Walaupun begitu, penelitian ini belum memperluas penerapannya pada sistem 500 kV AC dengan topografi kompleks seperti di daerah tropis yang memiliki variasi medan dan kelembapan tinggi [10].

Menurut Cao dan Bukhsh dalam artikel berjudul “*A Review of Evolving Challenges in Transmission Expansion Planning*”, penelitian ini mengkaji berbagai tantangan yang muncul dalam perencanaan ekspansi jaringan transmisi EHV, terutama terkait integrasi sumber energi terbarukan dan koordinasi antarwilayah. Studi ini menggunakan pendekatan systematic literature review terhadap lebih dari 120 publikasi ilmiah yang membahas ekspansi transmisi dan pengelolaan jaringan EHV di berbagai negara. Analisis dilakukan dengan mengidentifikasi faktor penghambat utama, seperti kompleksitas model daya terbarukan dan koordinasi antar operator sistem. Hasil kajian menunjukkan bahwa faktor-faktor tersebut berperan besar dalam keterlambatan dan ketidakefisienan ekspansi jaringan EHV lintas negara. Namun, penelitian ini masih bersifat teoretis dan belum dilengkapi studi empiris berbasis data aktual sistem EHV di kawasan Asia Tenggara untuk memvalidasi tantangan-tantangan tersebut secara kontekstual [11].

Menurut Tang et al. dalam penelitian berjudul “*Current- and Voltage-Actuated Transmission Line Protection Scheme Using a Hybrid Combination of Signal Processing Techniques*”, fokus penelitian adalah pada pengembangan sistem proteksi cerdas untuk saluran transmisi EHV yang mampu merespons gangguan listrik dengan cepat dan akurat. Metodologi yang digunakan melibatkan kombinasi analisis sinyal arus dan tegangan menggunakan *Discrete Wavelet Transform* (DWT) dan *Hilbert-Huang Transform* (HHT), yang kemudian diintegrasikan dengan sistem klasifikasi berbasis *Artificial Neural Network* (ANN). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem proteksi hibrida yang dikembangkan dapat mendeteksi gangguan dalam waktu kurang dari 10 milidetik dengan tingkat akurasi mencapai 98,7%. Meski hasilnya menjanjikan, penelitian ini belum diuji

secara luas pada jaringan multi-sirkuit 500 kV, dan integrasi dengan sistem *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) nasional masih memerlukan penelitian lanjutan [12].

Menurut Pijarski dan Belowski dalam jurnal “*Outage Rates and Failure Removal Times for Power Lines and Transformers*”, penelitian ini menganalisis tingkat gangguan serta waktu pemulihan saluran transmisi dan transformator pada sistem tegangan tinggi dan ekstra tinggi. Tujuan penelitian adalah memahami pola keandalan sistem dan memprediksi waktu pemulihan rata-rata setelah gangguan. Pendekatan yang digunakan berupa analisis statistik terhadap 500 dataset gangguan saluran 400-765 kV dan transformator besar, dengan penerapan model distribusi probabilitas untuk menghitung durasi pemulihan. Hasil menunjukkan bahwa waktu pemulihan rata-rata tercatat sekitar 6,2 jam, dengan tingkat kegagalan tahunan sebesar 0,21 kali per 100 km. Meskipun demikian, studi ini masih terbatas pada sistem subtropis dan belum mencakup kondisi lingkungan lembap tinggi serta variasi resistansi tanah seperti yang banyak dijumpai pada wilayah tropis Asia Tenggara [13].

Tabel 2.1 Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1	<i>An Extra-High Voltage Test System for Transmission Expansion Planning Studies Considering Single Contingency Conditions</i> [9]	Sistem uji transmisi EHV belum tersedia secara lengkap untuk simulasi kontingensi tunggal, sehingga sulit menilai stabilitas jaringan tegangan tinggi secara akurat.	Studi pengembangan model uji EHV menggunakan parameter saluran 500-765 kV; analisis aliran daya dan stabilitas melalui simulasi kontingensi; validasi terhadap data sistem nyata.	Model sistem EHV baru terbukti mampu meniru kondisi kontingensi dan kestabilan jaringan dengan akurasi tinggi; hasil validasi menunjukkan penyimpangan <3%.	Belum diterapkan pada jaringan tropis dengan konfigurasi beban campuran; diperlukan adaptasi untuk sistem 500 kV Indonesia yang memiliki karakteristik resistansi

					dan kelembapan tinggi.
2	<i>Transient Electromagnetic Processes Analysis in High Voltage (EHV) Transmission Lines</i> [10]	Fenomena elektromagnetik transien (<i>switching, petir</i>) pada saluran EHV belum sepenuhnya dipahami secara numerik.	Analisis gelombang elektromagnetik menggunakan <i>metode finite-difference time-domain</i> (FDTD) dan simulasi 3D untuk saluran 500-800 kV; validasi dengan data eksperimen laboratorium.	Model FDTD memberikan hasil presisi tinggi dalam memprediksi lonjakan tegangan dan arus selama kejadian transien; selisih hasil <5% dari pengukuran aktual.	Belum dilakukan penerapan langsung untuk sistem 500 kV AC dengan topografi kompleks seperti hutan dan pegunungan di wilayah tropis.
3	<i>A Review of Evolving Challenges in Transmission Expansion Planning</i> [11]	Perencanaan ekspansi jaringan EHV menghadapi tantangan baru berupa integrasi energi terbarukan dan keandalan antarwilayah.	Kajian literatur sistematis (<i>systematic literature review</i>) terhadap lebih dari 120 artikel terkait ekspansi transmisi dan EHV; analisis faktor-faktor penghambat perencanaan lintas wilayah.	Ditemukan bahwa faktor utama kendala EHV ialah kompleksitas model daya terbarukan dan koordinasi antar operator sistem.	Kajian masih bersifat teoretis; diperlukan studi empiris berbasis data aktual sistem EHV di Asia untuk validasi tantangan spesifik.
4	<i>Current- and Voltage-Actuated Transmission Line Protection Scheme Using a Hybrid Combination of Signal Processing Techniques</i> [12]	Proteksi saluran EHV konvensional tidak cukup cepat dalam mendeteksi gangguan nonlinier dan perubahan arus mendadak.	Pengembangan skema proteksi hibrida berbasis analisis gelombang arus dan tegangan (<i>DWT, Hilbert Transform</i>) dengan sistem klasifikasi berbasis ANN.	Skema hibrida mampu mendeteksi gangguan dalam waktu <10 ms dengan akurasi 98,7%.	Belum diuji secara luas pada jaringan multi-sirkuit 500 kV; perlu penelitian lebih lanjut untuk integrasi dengan sistem

					SCADA nasional.
5	<i>Outage Rates and Failure Removal Times for Power Lines and Transformers</i> [13]	Data gangguan dan waktu pemulihan saluran EHV masih terbatas, menghambat analisis keandalan sistem.	Analisis statistik pada 500 dataset gangguan saluran 400-765 kV dan transformator besar; pemodelan distribusi probabilitas untuk durasi pemulihan.	Didapatkan model reliabilitas yang menggambarkan waktu pemulihan rata-rata 6,2 jam dan tingkat kegagalan tahunan 0,21 kali per 100 km.	Data hanya mencakup sistem subtropis; belum mencakup kondisi iklim lembap tinggi dan variasi tanah resistif seperti di Asia Tenggara.

2.2 Tinjauan Pustaka

2.2.1 Teori Transmisi Listrik Tegangan Ekstra Tinggi (EHV Transmission)

Sistem transmisi EHV (*Extra High Voltage*) 500 kV digunakan untuk menyalurkan daya jarak jauh dengan rugi-rugi rendah. Pada sistem ini, konduktor sering disusun berkas (*bundle conductor*) untuk mengurangi rugi-rugi corona dan meningkatkan kapasitas hantar arus.

Sistem transmisi EHV atau sering disebut Sistem Transmisi Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) adalah komponen penting dalam infrastruktur kelistrikan yang berperan dalam mengalirkan energi listrik dari sumber pembangkitan ke area konsumsi dengan menggunakan tegangan minimal 500 kV. Perancangan SUTET bertujuan untuk mengurangi kehilangan daya selama proses transmisi, meningkatkan performa pengiriman energi, dan menjaga keseimbangan operasional sistem ketenagalistrikan secara keseluruhan. Di Indonesia, jaringan transmisi dengan tegangan 500 kV menjadi fondasi utama yang menghubungkan Jawa dan Bali, khususnya dalam memenuhi kebutuhan listrik yang besar dari sektor industri dan pusat-pusat perkotaan [14].

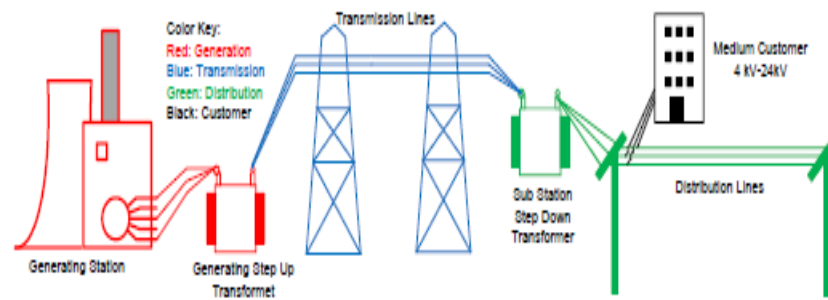
Menurut [15], keandalan sistem tenaga listrik dipengaruhi oleh kemampuan jaringan dalam mempertahankan operasi normal ketika terjadi

gangguan atau kondisi kontingensi. Sistem transmisi harus memiliki tingkat keandalan yang tinggi karena gangguan pada jaringan transmisi dapat menyebabkan pemadaman listrik dalam skala luas. Oleh karena itu, pemeliharaan serta pengembangan teknologi pendukung transmisi menjadi faktor penting dalam menjaga stabilitas sistem tenaga listrik.

Selain itu, stabilitas sistem tenaga listrik juga dipengaruhi oleh pengendalian frekuensi jaringan. [16] menjelaskan bahwa variasi beban dan keterbatasan pembangkit dapat memengaruhi kestabilan frekuensi sistem tenaga listrik. Pengendalian frekuensi melalui *Automatic Generation Control* menjadi salah satu metode yang digunakan untuk menjaga keseimbangan antara pembangkitan dan beban. Hal ini menunjukkan bahwa keandalan sistem transmisi merupakan hasil integrasi berbagai komponen jaringan tenaga Listrik

Berdasarkan Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi No. 01.P/47/MPE/1992 tanggal 07 Februari 1992 Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) adalah saluran tenaga listrik yang menggunakan kawat telanjang (penghantar) di udara bertegangan diatas 35 s/d 245 kV sesuai standar Bidang Ketenagalistrikan (Pasal 1 Ayat 3), dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) adalah saluran tenaga listrik yang menggunakan kawat telanjang (penghantar) di udara bertegangan di atas 245 kV sesuai standar Bidang Ketenagalistrikan (Pasal 1 ayat 4).

Saluran transmisi adalah sarana yang digunakan untuk mengirim energi listrik dari pembangkit listrik stasiun dan sistem transmisi ke titik-titik pusat konsumsi (beban). Energi listrik disalurkan melalui bahan konduktor yang disebut saluran transmisi listrik. Ketika listrik disalurkan, terdapat jarak yang cukup jauh antara pembangkit dan beban. Kondisi ini menurunkan kualitas tegangan dan rugi-rugi daya yang diakibatkan oleh kehilangan energi pada jaringan. Oleh karena itu, diperlukan perangkat untuk mengurangi efek penurunan tegangan. Besarnya rugi-rugi daya dapat dihitung berdasarkan sifat penghantar dan panjang lintasan. Gambar 2.1 mengilustrasikan bagaimana daya listrik mengalir dari produsen ke konsumen melalui sistem distribusi [17].



Gambar 2.1 Distribusi Sistem Tenaga Listrik [17]

Berdasarkan fungsi dari tiap-tiap komponennya, sistem transmisi SUTT/SUTET dikelompokkan sebagai berikut:

1. *Current Carrying/* Pembawa Arus

Komponen yang termasuk dalam fungsi pembawa arus adalah komponen SUTT/SUTET yang berfungsi dalam proses penyaluran arus listrik dari Pembangkit ke GI/ GITET atau dari GI/ GITET ke GI/ GITET lainnya.

2. *Insulation/* Isolasi

Insulation berfungsi untuk mengisolasi bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan/ ground, baik saat normal continuous operation dan saat terjadi surja (termasuk petir) di dalam saluran transmisi.

3. *Structure/* Struktur

Komponen utama dari Fungsi structure pada sistem transmisi SUTT/SUTET adalah Tiang (Tower). Tiang adalah konstruksi bangunan yang kokoh untuk menyangga/ merentang konduktor penghantar dengan ketinggian dan jarak yang aman bagi manusia dan lingkungan sekitarnya dengan sekat insulator. Structure terbagi dalam 3 bagian, yaitu:

a. *Bracing Tower* (Besi Siku Tower)

Rangkaian Bracing tower membentuk struktur tower yang berfungsi menjaga dan mempertahankan kawat penghantar pada jarak ground clearance tertentu sehingga proses transmisi daya berlangsung kontinyu. Tiang/ Tower menurut fungsi:

1) Tiang penegang (tension tower)

- 2) Tiang sudut (*angle tower*)
- 3) Tiang akhir (*dead end tower*)
- 4) Tiang penyangga (*suspension tower*)
- 5) Tiang penyekat (*section tower*)
- 6) Tiang transposisi
- 7) Tiang portal (*Gantry Tower*)
- 8) Tiang kombinasi (*Combined Tower*)

Tiang menurut bentuk:

- 1) Tiang pole
- 2) Tiang kisi - kisi (*Lattice Tower*)

b. Mur dan Baut Tower

Mur dan baut tower berfungsi menyatukan bracing sehingga membentuk konstruksi tower.

c. Pondasi dan Halaman Tower

Pondasi adalah bagian struktur bawah berupa konstruksi beton bertulang yang berguna untuk menyalurkan beban tower ke dalam lapisan tanah di sekitarnya. Pondasi tower harus dapat menanggung stabilitas gaya tower berupa :

- 1) Stabilitas gaya aksial tarik (*uplift*)
- 2) Stabilitas gaya aksial tekan (*compress*)
- 3) Stabilitas gaya guling (*overturning*)
- 4) Stabilitas gaya lateral geser (*sliding*).

Pondasi pada tower yang menanggung beban tarik (*tension / dead end*) dirancang lebih kuat/besar daripada tower yang menanggung beban gantung (*suspension*).

Halaman tower adalah daerah tapak *tower* yang luasnya diukur dari proyeksi keatas tanah galian pondasi. Secara *general* di luar *stub* tergantung pada kriteria *tower* dengan ketentuan *type* tower, kemudian jenis *Leg Extension* dan *type* pondasinya.

4. *Junctions/* Penghubung

Berfungsi menghubungkan subsistem *Current carrying* (pembawa arus), sub system *insulation* (isolasi) dan subsistem *structure* (struktur).

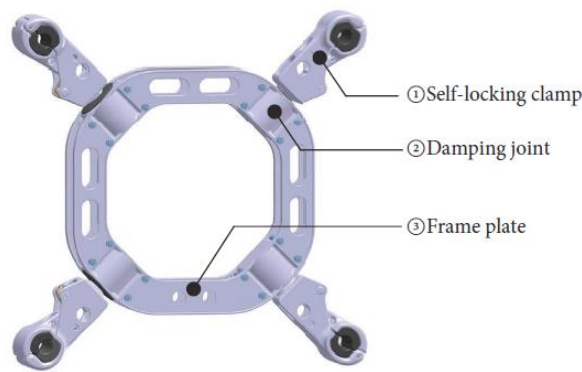
Junction pada sistem transmisi SUTT/SUTET adalah semua komponen pendukung fungsi pembawa arus, isolasi dan struktur.

2.2.2 *Spacer*

1. Definisi dan Fungsi *Spacer Damper*

Spacer damper merupakan komponen penting pada saluran transmisi *extra high voltage* (EHV) yang dipasang pada konduktor bundel. *Spacer damper* memiliki fungsi utama untuk mengendalikan jarak antar konduktor bundel guna mencegah terjadinya mutual whipping (saling bersentuhan) yang disebabkan oleh angin kencang dan beban es. Selain itu, *spacer damper* juga berfungsi meredam getaran *breeze* (*aeolian vibration*) dan osilasi subspan yang dapat membahayakan integritas konduktor. Mekanisme kerja *spacer damper* dalam meredam getaran adalah melalui penyerapan dan konsumsi energi getaran. Proses ini terjadi melalui gerakan relatif antara komponen peredam karet (*rubber damping components*) dan *frame plate*. Semakin besar energi getaran konduktor bundel yang dikonsumsi oleh *spacer* dalam satu siklus getaran, semakin kecil amplitudo getaran keseluruhan sistem *spacer damper*-konduktor bundel [18].

Spacer sering digunakan pada saluran transmisi tegangan tinggi *overhead* dengan konduktor berikat untuk menjaga konduktor sekunder pada jarak yang ditentukan dan mengurangi getaran akibat angin. Desain dasar *spacer* terdiri dari rangka kaku yang dilengkapi dengan dua atau lebih lengan yang dihubungkan melalui bantalan karet dan poros. Lengan-lengan ini diperlukan untuk menghubungkan subkonduktor, tergantung pada konfigurasi bundel, yaitu ganda, tiga, empat, atau lebih. Inertia dan rotasi rangka kaku memicu dua mode utama, yaitu mode *breathe* dan mode kaku. Jika *spacer-damper* tidak cukup efektif untuk menekan getaran mekanis akibat angin, hal ini dapat mempengaruhi konduktor dan menyebabkan penuaan, bahkan kegagalan sebelum masa pakai yang diharapkan. Oleh karena itu, sangat penting untuk melakukan pemilihan yang lebih baik terhadap *spacer* yang tersedia di pasaran terutama terkait responsnya terhadap getaran mekanis selain sifat listriknya [19].



Gambar 2.2 Struktur *Spacer Quad-Bundle Spacer Damper*

Spacer dan *spacer damper* umumnya dibuat dari aluminium cor atau tempa untuk rangka dan clamp, dengan baut baja berkekuatan tinggi sebagai sistem pengikat. Beberapa tipe menggunakan *neoprene insert* atau *washer* untuk memberikan fleksibilitas tambahan dan efek peredaman. Semua produk dirancang sesuai standar IEC 61854, yang mengatur persyaratan dan pengujian spacer pada saluran transmisi tegangan tinggi dan ekstra tinggi.

2. Jenis *Spacer*

Jenis-jenis spacer yaitu:

d. *Spacer Kaku (Rigid Spacer / Spacer Clamp)*

Spacer kaku berfungsi menjaga jarak antar konduktor bundel tanpa elemen peredam khusus. Jenis ini memiliki konstruksi yang relatif sederhana dan bersifat kaku, sehingga lebih fokus pada kestabilan posisi konduktor. Spacer kaku umumnya digunakan pada kondisi bentangan pendek, jumper loop, atau lokasi dengan tingkat getaran rendah. Kekurangan spacer kaku adalah rentan terhadap pengaruh getaran angin, sehingga jika baut pengikat mengendur dapat menyebabkan pergeseran konduktor dan kerusakan mekanis.

e. *Spacer Fleksibel (Flexible Spacer)*

Spacer fleksibel dirancang memiliki tingkat kelenturan tertentu untuk mengikuti pergerakan konduktor akibat angin. Spacer ini biasanya menggunakan sambungan baut yang memungkinkan sedikit pergerakan antar bagian. Spacer fleksibel lebih direkomendasikan untuk sistem konduktor bundel karena mampu mengurangi gaya

dinamis dibanding spacer kaku. Namun, karena tetap menggunakan sistem baut, kestabilan kekencangan baut menjadi faktor penting dalam menjaga kinerjanya.

f. Spacer dengan *Neoprene Insert / Washer*

Jenis spacer ini dilengkapi neoprene insert atau washer elastomer di antara body dan clamp. Neoprene berfungsi menyerap sebagian energi getaran serta melindungi permukaan konduktor dari gesekan langsung. Spacer jenis ini sering digunakan pada kondisi operasi yang memerlukan perlindungan tambahan namun belum membutuhkan spacer damper penuh. Material elastomer membantu meredam getaran ringan, tetapi kekencangan baut tetap sangat berpengaruh terhadap efektivitas spacer.

g. Spacer untuk *Jumper Loop*

Spacer ini digunakan khusus pada jumper loop di dekat tower atau tension clamp. Fungsinya menjaga jarak dan bentuk jumper agar tidak mendekati struktur tower atau konduktor lain. Umumnya bersifat rigid spacer dan dapat dilengkapi counterweight. Karena dipasang pada area dengan perubahan arah konduktor, spacer jumper sangat bergantung pada kekuatan dan keandalan sambungan baut.

3. Jenis *Spacer Damper*

a. Spacer Damper dengan Elemen Elastomer

Spacer damper jenis ini dilengkapi elemen peredam elastomer yang berfungsi menyerap energi getaran konduktor. Elemen elastomer memiliki sifat elastis dan daya serap energi tinggi, sehingga mampu meredam getaran Aeolian dan sub-conductor vibration. Spacer damper ini banyak digunakan pada saluran transmisi tegangan tinggi dan ekstra tinggi dengan paparan angin yang signifikan.

b. Spacer Damper untuk Twin, Triple, dan Quadruple Bundle

Spacer damper tersedia dalam berbagai konfigurasi sesuai jumlah konduktor, yaitu twin, triple, dan quadruple bundle. Meskipun bentuk dan ukurannya berbeda, prinsip kerjanya sama, yaitu menjaga jarak antar konduktor sekaligus meredam getaran. Pada konfigurasi bundel

yang lebih banyak, beban dan getaran yang terjadi lebih kompleks sehingga keandalan sistem fastening menjadi semakin kritis.

c. Spacer Damper dengan Clamp Engsel (Hinge Type Clamp)

Jenis ini menggunakan clamp berengsel untuk memudahkan pemasangan dan meningkatkan fleksibilitas gerakan konduktor. Clamp dikencangkan menggunakan baut penegang (tensioning bolt). Desain ini memberikan kemudahan instalasi, namun juga menuntut sistem penguncian baut yang baik agar tidak terjadi pelonggaran akibat getaran.

4. Komponen Utama *Spacer Damper*

Spacer damper terdiri dari tiga komponen utama yang saling terintegrasi untuk menghasilkan kinerja optimal dalam meredam getaran konduktor dengan komponen-komponen sebagai berikut [18]:

a. *Clamp* (Penjepit)

Clamp merupakan komponen yang berfungsi memegang konduktor bundel dan menjadi dasar bagi *spacer* untuk menjalankan peran redaman getaran serta disipasi energi. Struktur *clamp* terdiri dari *clamp gland*, *clamp body*, dan rubber pad. Clamp harus mampu memberikan gaya pengikat yang stabil dan kontinu terhadap konduktor bundel dengan syarat tidak merusak konduktor tersebut.

Pada *spacer damper* konvensional, struktur fiksasi *clamp* terdiri dari *clamp gland*, *cotter pin*, dan *pin spindle*. Namun, struktur ini memiliki dua defisiensi operasional, yaitu: (1) masa pakai *cotter pin* yang jauh lebih pendek dibandingkan *pin spindle* karena kapasitas beban yang rendah dan mudah terkorosi dalam lingkungan yang lembab, dan (2) efisiensi penanganan yang tidak memuaskan karena proses instalasi dan pelepasan memerlukan penggunaan bergantian dari berbagai alat kerja.

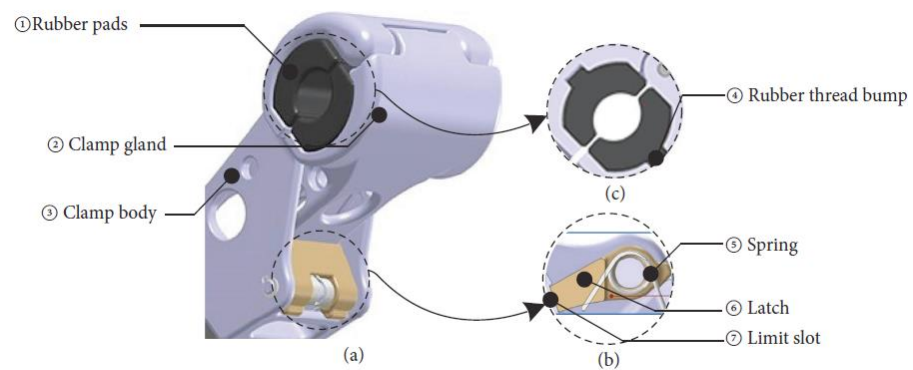
Spacer clamp merupakan komponen mekanik yang berfungsi menjaga jarak antar konduktor pada sistem transmisi multi bundle conductor. Penggunaan spacer clamp bertujuan untuk mengurangi getaran konduktor, mencegah gesekan antar konduktor, serta menjaga kestabilan posisi konduktor selama operasi jaringan transmisi. Kondisi

lingkungan sangat memengaruhi kinerja konduktor pada sistem transmisi. [20] menjelaskan bahwa temperatur lingkungan berpengaruh terhadap andongan dan kekuatan tarik konduktor. Peningkatan temperatur dapat menyebabkan perubahan panjang konduktor serta memengaruhi tegangan mekanik pada konduktor. Oleh karena itu, penggunaan *spacer clamp* menjadi penting untuk menjaga kestabilan posisi konduktor serta mengurangi risiko kerusakan mekanik akibat perubahan kondisi lingkungan.

Selain itu, kondisi pembumian pada menara transmisi juga berpengaruh terhadap keamanan sistem transmisi. [21] menjelaskan bahwa tahanan pembumian menara transmisi harus memenuhi standar tertentu agar mampu menyalurkan arus gangguan secara efektif ke tanah. Sistem pembumian yang baik dapat meningkatkan keselamatan serta mengurangi risiko kerusakan peralatan transmisi akibat gangguan petir maupun gangguan hubung singkat.

Spacer clamp digunakan pada bundle conductor untuk menjaga jarak antar konduktor dan meredam getaran. Fungsi utamanya adalah:

- a. Menjaga kestabilan jarak antar konduktor.
- b. Mengurangi efek getaran yang dapat merusak kawat konduktor.
- c. Mendistribusikan gaya mekanis agar tidak terjadi konsentrasi tegangan pada satu titik.
- d. Memisahkan kawat berkas agar tidak beradu dan pada jarak yang diinginkan dapat mengurangi bunyi desis/ berisik korona.



Gambar 2.3 Struktur penjepit damper spacer empat bundel baru: (a) komposisi komponen penjepit, (b) komposisi struktur penjepit bagian pemasangan, dan (c) penampang melintang struktur matras karet.

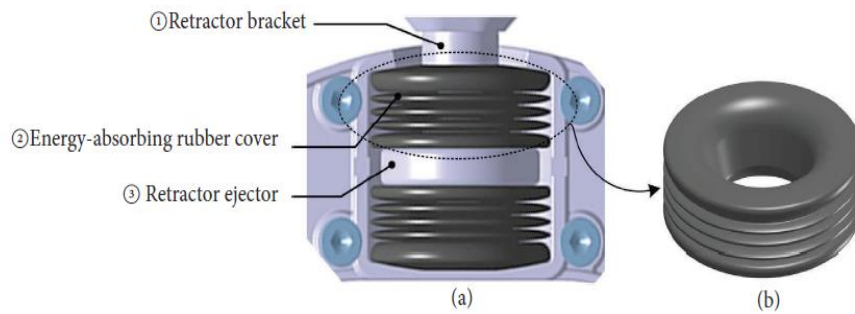
b. *Damper Joint* (Sambungan Peredam)

Damper joint merupakan struktur penghubung antara *clamp spacer damper* dan *frame plate*. Kinerjanya ditentukan oleh struktur mekanis sambungan dan sifat *viscoelastic* dari komponen karet peredam. *Damper joint* terletak di ujung *clamp* dan terdiri dari *damping blocks*, *star-shaped shaft*, *bolt assembly hole*, dan *damping joint enclosure*.

Damping blocks bersifat viscoelastis dimana elastisitasnya berfungsi untuk menahan kekakuan konduktor bundel, sedangkan viskositasnya digunakan untuk mengonsumsi energi getaran. *Star-shaped shaft* bersama dengan *damping joint enclosure* bertindak sebagai pengekang kaku untuk menghindari getaran konduktor dengan amplitudo berlebihan. *Assembly holes* dihubungkan dengan baut ke *clamp* dan *frame plate* untuk mempertahankan stabilitas keseluruhan

Pada struktur *damper joint* konvensional, terdapat dua kelemahan operasional: (1) koneksi antara *star-shaped shaft* dan *frame plate* merupakan kontak metal kaku yang memiliki ketahanan aus yang buruk, sehingga dalam kondisi getaran konduktor bundel yang signifikan dapat menyebabkan *rupture* dan keausan pada *groove*, dan (2) energi getaran dalam arah linier tidak dapat diserap oleh *damping blocks* karena *star shaft* terhubung langsung ke *frame plate recess* tanpa margin gerakan

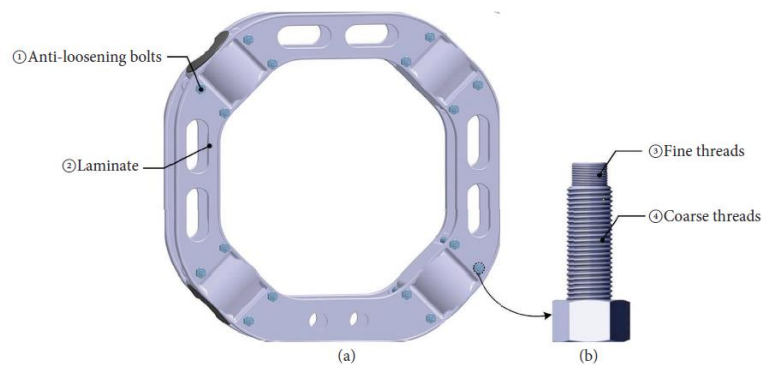
dalam arah *parallelogram*, yang menyebabkan akumulasi energi getaran dan keausan pada *star shaft* dan *frame plate recess*.



Gambar 2.4 Struktur sambungan peredam pada peredam spacer empat bundel baru: (a) komposisi komponen sambungan peredam dan (b) struktur selongsong karet penyerap energi.

c. *Frame Plate*

Frame plate berfungsi mempertahankan stabilitas keseluruhan spacer dengan menjaga damper joints tetap pada posisinya. Transmisi dan supresi getaran oleh damper joints membuat beban mekanis pada frame plate lebih terkonsentrasi, sehingga frame plate harus memiliki kekuatan mekanis yang baik. Pada spacer damper konvensional, frame plate menggunakan struktur composite double plate yang dihubungkan dengan fastening bolt dan round hole nuts.



Gambar 2.5 Struktur pelat rangka *damper spacer* empat bundel baru: (a) komposisi komponen pelat rangka dan (b) struktur baut anti-longgar.

5. Gangguan *Spacer*

Berdasarkan data statistik gangguan spacer pada saluran 500 kV ke atas, distribusi kerusakan spacer tercantum pada Tabel 2.1.

Tabel 2.2 Tipe Kerusakan Pada Spacer Damper [18]

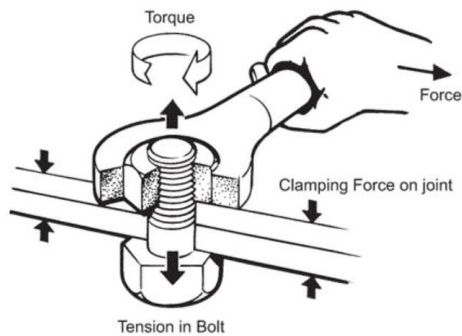
Tipe Kesalahan	Jumlah	Persentase
Baut yang hilang atau cotter pin yang hilang	340	57,14
Fraktur dan kerusakan	145	24,3
Bantalan karet yang longgar	46	7,7
Klem yang copot	28	4,7
Pergeseran	25	4,2
Lainnya	11	2,2

Jenis gangguan yang terjadi selama operasi spacer terutama adalah baut yang hilang atau pin cotter dan patah dan patah, dimana patah dan patah merupakan gangguan serius yang dapat dengan mudah menyebabkan kerusakan saluran dan kecelakaan lainnya. Dalam hal struktur spacer, kesalahan terutama terkonsentrasi di penjepit dan sambungan peredam. penjepit peredam jarak quadbundle biasa terdiri dari kelenjar penjepit, badan penjepit, dan bantalan karet. Badan penjepit dilengkapi dengan lubang perakitan, dan pin memberikan tekanan pada kelenjar penjepit untuk menahan konduktor bundel di dalam bantalan karet [18].

6. Mekanisme *Spacer*

Pemasangan serta pelepasan spacer dalam pemeliharaan saluran transmisi umumnya merupakan operasi saluran langsung di atas kepala, dan personel pemeliharaan harus menyelesaikan operasi pelepasan pin cotter dan ekstraksi spindel pin melalui penggunaan beberapa alat secara bergantian. Karena ruang kerja yang kecil, sulit untuk menggunakan alat secara bergantian, dan pembongkaran serta penggantian spacer memerlukan waktu yang lama. Selain itu, ada ketidakteraturan pemasangan karena kesulitan pemasangan, tingkat operasi personel, dan

faktor lain yang menyebabkan ketidakteraturan pemasangan pin cotter dan pengurangan masa pakai penjepit [18].



Gambar 2.6 Baut Sebagai *Fastener* pada *Clamp*

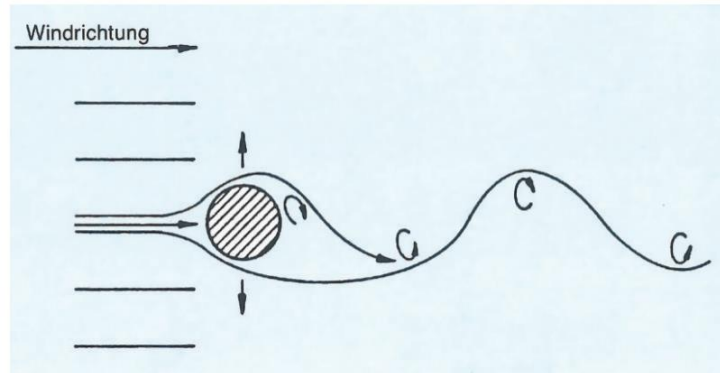
Torsi untuk pengencangan baut yang direkomendasikan sebagai berikut.

Tabel 2.3 Torsi yang Direkomendasikan

Bolt Diameter (mm)	Rekomendasi Torsi (Nm)	
	Class 8.8	Class 10.9
5	7	9
6	12	16
8	30	40
10	55	75
12	100	135
14	160	215
16	245	335

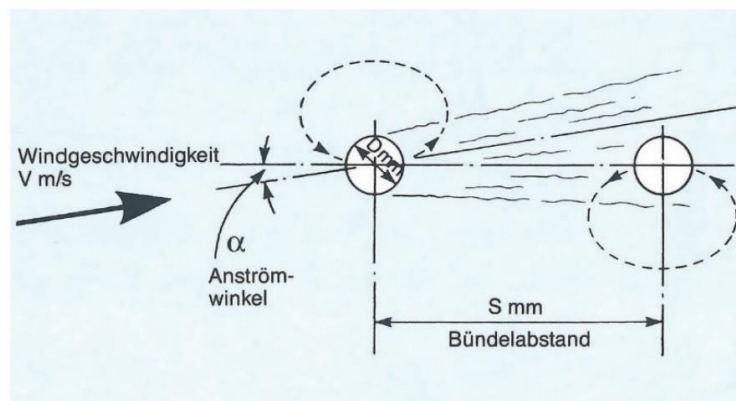
Spacer pada saluran transmisi overhead berfungsi menjaga jarak antar konduktor bundel untuk mencegah terjadinya tabrakan akibat pengaruh angin dan kondisi operasi. Pemasangan spacer dengan jumlah dan posisi yang tepat diperlukan untuk menjaga stabilitas konduktor serta melindungi sistem dari beban mekanis seperti angin kencang. Selain itu, spacer dirancang memiliki fleksibilitas terkontrol agar mampu menahan beban tarik dan tekan akibat arus hubung singkat maupun getaran konduktor. Pada saluran transmisi, aliran angin dapat menimbulkan getaran Aeolian dengan frekuensi sekitar 1-7 m/s, menyebabkan frekuensi getaran 5-100 Hz tergantung pada diameter konduktor dan tegangan yang disebabkan oleh pembentukan vorteks di sekitar konduktor. Getaran ini terjadi pada kecepatan angin rendah hingga sedang dan menjadi salah satu

faktor utama yang mempengaruhi kinerja mekanis spacer serta kekencangan sistem penguncian baut pada instalasi transmisi tegangan ekstra tinggi [22].



Gambar 2.7 Getaran yang Diinduksi Oleh Angin yang Tegak Lurus Terhadap Aliran Angin

Selain getaran frekuensi tinggi, getaran sub-konduktor frekuensi rendah juga terjadi. Getaran ini terjadi pada kecepatan angin sekitar 4-18 m/s dan menyebabkan konduktor bergerak mendekati satu sama lain pada frekuensi ≤ 5 Hz. Sistem jarak juga memberikan perlindungan terhadap tabrakan sub-konduktor pada getaran frekuensi rendah dengan amplitudo tinggi ini.



Gambar 2.8 Getaran SubKonduktor

Baik spacer maupun spacer damper sangat bergantung pada keandalan sistem baut dan pengunciannya. Getaran konduktor yang terjadi secara terus-menerus dapat menyebabkan baut mengendur, sehingga menurunkan fungsi spacer dalam menjaga jarak maupun meredam getaran. Oleh karena itu, penggunaan sistem pengunci baut

yang lebih efektif menjadi penting untuk meningkatkan keandalan spacer pada saluran transmisi.

2.2.3 *Wedge Washer*

Wedge washer berfungsi menjaga baut tetap terikat di tempat pemasangan yang terdapat banyak getaran. Dalam sistem tenaga listrik, pemantauan kondisi peralatan merupakan bagian penting dari pemeliharaan jaringan. Sistem monitoring beban trafo distribusi dapat digunakan untuk memantau kondisi operasi peralatan secara real time. Pemantauan kondisi peralatan ini bertujuan untuk mencegah kerusakan yang dapat mengganggu keandalan sistem tenaga listrik. Prinsip pemantauan kondisi ini juga relevan dalam memastikan sambungan mekanik seperti baut dan spacer tetap dalam kondisi optimal [23].



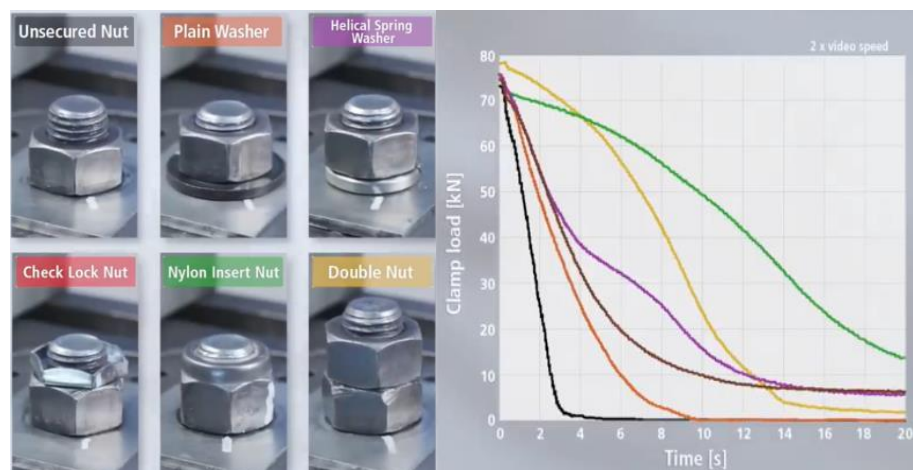
Gambar 2.9 *Wedge Washer*

Type ring atau washer lain yang terpasang di jaringan transmisi terdiri dari beberapa jenis antara lain sebagai berikut.

1. *Unsecured Nut* adalah jenis paling sederhana tanpa fitur pengaman apapun berbentuk heksagonal sederhana dengan material carbon steel dan stainless steel. Bentuk heksagonal adalah standar internasional karena mudah dikerjakan dengan kunci pas tetapi mudah lepas karena tidak ada mekanisme penahan dan hanya mengandalkan gesekan dan friksi.
2. *Plain Washer* memiliki washer berbentuk piringan datar melingkar di bawah kepala mur berbahan carbon steel dan stainless steel. Bentuk lingkaran menyebarkan beban merata ke semua arah (360°). Fungsinya

untuk mendistribusikan beban dan melindungi permukaan, namun tetap tidak mencegah pelonggaran.

3. *Helical Spring Washer* dilengkapi pegas spiral yang memberikan tekanan konstan. Desain ini tampak seperti matahari/ spiral yang berputar berbahan Spring Steel dan stainless steel. Desain ini membantu mencegah pelonggaran karena elastisitasnya yang terus mendorong baut tetap kencang.
4. *Check Lock Nut* adalah mur ganda di mana lapisan atas lebih kecil dan dikencangkan terhadap mur utama berbahan carbon steel dan stainless steel. Gesekan antara kedua lapisan mencegah pelonggaran karena gesekan berlapis antara kedua mur menciptakan hambatan rotasi ganda.
5. *Nylon Insert Nut* memiliki cincin nylon di dalam mur yang menciptakan hambatan gesekan saat baut memasuki ulirnya berbahan carbon steel dan stainless steel. Ini adalah salah satu metode pengaman paling efektif untuk mencegah pelonggaran akibat getaran.
6. *Double Nut* menggunakan dua mur standar identik yang dikencangkan bersama-sama berbahan carbon steel dan stainless steel. Gesekan antara kedua mur mencegah keduanya berputar lepas secara bersamaan



Gambar 2.10 Grafik Beban Clamp Terhadap Waktu

2.2.4 Fenomena Getaran Konduktor

Konduktor SUTET mengalami berbagai jenis getaran:

1. Aeolian vibration: getaran frekuensi tinggi akibat angin kecepatan rendah.
2. Galloping: getaran amplitudo besar akibat angin kencang dan es.
3. Subspan oscillation: getaran antar span konduktor karena ketidakstabilan spacer. Getaran inilah yang menjadi penyebab utama longgarnya baut pada spacer.

2.2.5 Prinsip Penguncian Baut

Penguncian baut merupakan metode yang digunakan untuk menjaga kekencangan sambungan mekanik pada berbagai peralatan transmisi. Sambungan baut yang mengalami kelonggaran dapat menyebabkan penurunan kekuatan mekanik serta meningkatkan risiko kerusakan peralatan. [24] menjelaskan bahwa pembebanan pada peralatan listrik dapat memengaruhi efisiensi dan kinerja peralatan. Beban mekanik yang bekerja secara terus-menerus dapat menyebabkan perubahan kondisi sambungan mekanik, sehingga diperlukan metode penguncian baut yang mampu mempertahankan kestabilan sambungan pada kondisi operasi yang dinamis

1. Ring Per (Spring Washer): bekerja dengan gaya pegas untuk menekan baut agar tetap kencang. Kelemahannya, kehilangan elastisitas seiring waktu dan tidak efektif menahan vibrasi intens.
2. Wedge Washer: menggunakan prinsip cam action dengan sudut irisan yang lebih besar dari ulir baut. Saat baut berusaha berputar karena getaran, wedge washer menciptakan gaya gesek balik yang menahan ulir, sehingga baut tetap terkunci

2.2.6 Dampak Baut Kendor pada Transmisi

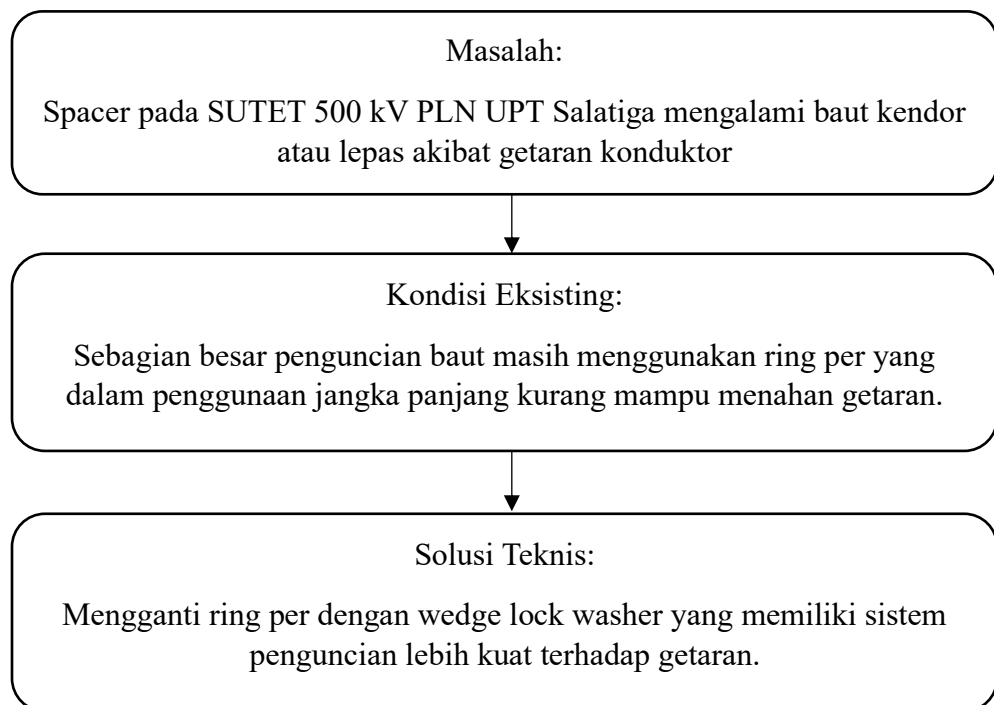
Baut spacer yang kendor dapat menimbulkan:

1. Kerusakan urat konduktor akibat gesekan.
2. Timbulnya hotspot karena peningkatan resistansi.
3. Putusnya konduktor, yang berdampak pada TLOD dan TLOF



Gambar 2.11 Baut Pengunci U-Nut, nylon lock nut, Ring Per

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.12 Kerangka Berpikir

Pada sistem transmisi SUTET 500 kV di wilayah kerja UPT Salatiga, sering ditemukan permasalahan berupa spacer dan jumper yang mengalami baut kendur atau bahkan lepas akibat pengaruh getaran konduktor yang terjadi secara terus-menerus. Kondisi ini dapat menimbulkan berbagai dampak serius, seperti munculnya hotspot akibat meningkatnya resistansi pada titik sambungan, kerusakan pada konduktor karena gesekan dengan spacer, hingga berpotensi menyebabkan gangguan penyaluran tenaga listrik yang berdampak pada menurunnya keandalan sistem.

Selama ini, sistem penguncian baut yang banyak digunakan masih mengandalkan ring per (spring washer). Namun, berdasarkan karakteristik mekanisnya, ring per memiliki keterbatasan dalam mempertahankan kekencangan baut jika bekerja pada lingkungan dengan tingkat getaran tinggi dalam jangka waktu lama. Hal ini menyebabkan penguncian baut menjadi kurang optimal dan meningkatkan risiko terjadinya kelonggaran kembali pada baut spacer dan jumper.

Sebagai alternatif solusi, digunakan wedge lock washer yang memiliki prinsip penguncian berbasis sistem pengunci mekanis (wedge/cam effect) sehingga mampu menahan kecenderungan baut untuk berputar akibat getaran. Berdasarkan karakteristik tersebut, wedge lock washer diharapkan dapat menjaga kekencangan baut lebih stabil dibandingkan ring per pada kondisi operasi saluran transmisi.