

BAB II

KAJIAN TEORI

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Gardu Induk

Gardu induk merupakan elemen vital dalam sistem tenaga listrik yang ditempatkan pada lokasi strategis sebagai titik pertemuan antara jaringan transmisi dan distribusi. Di dalam gardu induk terdapat sejumlah komponen utama seperti saluran transmisi, saluran distribusi, peralatan pemutus dan penghubung, transformator, perangkat pengaman, serta sistem kendali. Seluruh komponen tersebut berfungsi untuk mendukung proses penyaluran energi listrik dari pembangkit menuju beban.

Secara umum, gardu induk memiliki beberapa fungsi utama. Pertama, berperan dalam melakukan transformasi tegangan listrik, baik dari tingkat tegangan tinggi ke tegangan tinggi lainnya maupun dari tegangan tinggi ke tegangan menengah sesuai dengan kebutuhan sistem distribusi. Kedua, gardu induk berfungsi sebagai pusat pemantauan dan pengendalian operasi sistem tenaga listrik, meliputi kegiatan pengukuran dan pengaturan untuk menjaga keamanan dan keandalan sistem. Ketiga, gardu induk juga berperan dalam pendistribusian daya listrik ke gardu induk lain melalui jaringan tegangan tinggi, serta ke gardu distribusi melalui peralatan bertegangan menengah.

Gardu induk terdiri atas berbagai komponen utama yang berperan penting dalam proses penyaluran tenaga listrik, di antaranya:

- a. *Switch Yard* dan *Switch Gear* – Merupakan area utama tempat pemasangan peralatan penting gardu induk, baik yang berada di luar ruangan maupun di dalam gedung.
- b. Transformator Tenaga – Berfungsi untuk mengubah tingkat tegangan listrik sesuai kebutuhan sistem tanpa mengubah frekuensinya. Termasuk di dalamnya trafo pentanahan yang berfungsi untuk menentukan titik netral sistem.
- c. *Neutral Grounding Resistance (NGR)* – Digunakan untuk menghubungkan

titik netral transformator melalui tahanan tertentu agar dapat menyalurkan arus gangguan dengan aman.

- d. Pemutus Tenaga (PMT) – Berfungsi memutus atau menghubungkan aliran listrik baik dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan, dengan sistem pemadaman busur api menggunakan udara, gas, atau minyak.
- e. Pemisah (PMS) – Digunakan untuk memisahkan rangkaian listrik dalam kondisi tanpa beban, dan berperan sebagai pengaman tambahan pada sistem.
- f. *Lightning Arrester (LA)* – Melindungi peralatan gardu dari sambaran petir dengan cara menyalurkan arus gangguan ke tanah.
- g. *Current Transformer (CT)* dan *Potential Transformer (PT)* – Berfungsi menurunkan nilai arus dan tegangan agar dapat digunakan untuk keperluan proteksi serta pengukuran sistem.
- h. Busbar – Menjadi titik keluar masuknya arus listrik, bertindak sebagai terminal utama dari aliran listrik
- i. Sumber DC dan Sistem Proteksi – Menyediakan daya untuk pengoperasian relay, PMT, dan PMS, serta menjaga sistem agar tetap aman dari gangguan dan kesalahan operasional.
- j. Kubikel 20 kV – Berfungsi sebagai titik keluaran tegangan menengah dari transformator menuju konsumen melalui saluran penyulang.

Konfigurasi busbar merupakan salah satu aspek fundamental dalam perancangan gardu induk karena menentukan fleksibilitas operasi, keandalan sistem, serta kemudahan pemeliharaan peralatan. Busbar berfungsi sebagai titik penghubung utama antara saluran transmisi, transformator, dan peralatan *switching*, sehingga pemilihan konfigurasi berpengaruh langsung terhadap kontinuitas penyaluran tenaga listrik.

Konfigurasi yang umum digunakan pada sistem transmisi meliputi *single busbar*, *double busbar*, dan *1 ½ breaker*. Pada konfigurasi *single busbar*, seluruh bus terhubung pada satu busbar utama. Konfigurasi ini memiliki keunggulan dalam kesederhanaan desain serta biaya investasi yang relatif rendah, namun memiliki keterbatasan dari sisi keandalan. Gangguan atau pemeliharaan pada busbar utama dapat menyebabkan pemadaman pada seluruh peralatan yang terhubung, sehingga konfigurasi ini umumnya digunakan pada sistem dengan tingkat kepentingan operasi yang lebih rendah.

Konfigurasi *double busbar* memberikan fleksibilitas yang lebih tinggi dengan menyediakan dua rel utama yang dapat dipilih sebagai jalur operasi. Sistem ini memungkinkan pengalihan beban dari satu bus ke bus lain selama pemeliharaan atau gangguan, sehingga kontinuitas pelayanan dapat dipertahankan. Kompleksitas operasi meningkat karena diperlukan koordinasi *switching* yang lebih cermat, namun keuntungan dalam aspek keandalan menjadikan konfigurasi ini banyak digunakan pada gardu induk transmisi. Konfigurasi *1 ½ breaker* merupakan konfigurasi dengan tingkat keandalan tinggi yang menggunakan tiga pemutus tenaga untuk melayani dua bay. Setiap sirkuit terhubung pada dua pemutus tenaga sehingga gangguan pada satu pemutus tidak langsung menyebabkan kehilangan suplai. Konfigurasi ini memberikan fleksibilitas operasi maksimal dan sering diterapkan pada gardu induk dengan peran strategis dalam sistem interkoneksi. Namun demikian, kompleksitas desain dan biaya investasi yang tinggi menjadi pertimbangan dalam penerapannya.

Pemilihan konfigurasi busbar pada gardu induk ditentukan oleh pertimbangan teknis yang mencakup keandalan sistem, fleksibilitas operasi, kebutuhan pemeliharaan, serta tingkat pentingnya instalasi dalam jaringan transmisi.

Gardu induk memiliki peran strategis dalam menjaga stabilitas sistem tenaga listrik, baik dari aspek tegangan, frekuensi, maupun kontinuitas aliran daya. Sebagai titik interkoneksi antara berbagai komponen sistem tenaga, gardu induk berfungsi sebagai pusat pengaturan distribusi energi listrik dalam jaringan transmisi.

Dari perspektif stabilitas tegangan, gardu induk memungkinkan pengaturan aliran daya reaktif melalui konfigurasi jaringan dan pengoperasian peralatan *switching*. Pengaturan ini berpengaruh terhadap profil tegangan sistem serta kemampuan jaringan mempertahankan kondisi operasi normal setelah terjadi gangguan. Selain itu, gardu induk juga berperan dalam stabilitas operasional sistem melalui kemampuan melakukan rekonfigurasi jaringan. Proses manuver *switching* memungkinkan pengalihan jalur aliran daya untuk menghindari kelebihan beban pada saluran tertentu atau untuk mempertahankan suplai ke pusat beban. Fungsi ini menjadi sangat penting pada sistem interkoneksi besar di mana perubahan konfigurasi lokal dapat mempengaruhi kondisi sistem secara luas.

Dalam konteks keandalan sistem, gardu induk juga berfungsi sebagai titik isolasi

gangguan. Kemampuan memisahkan bagian sistem yang terganggu dari bagian yang masih sehat memungkinkan pemulihan sistem dilakukan secara bertahap tanpa menyebabkan pemadaman meluas.

Operasi *switching* pada gardu induk tidak hanya mempengaruhi kondisi lokal peralatan, tetapi juga dapat menimbulkan efek transien pada sistem tenaga secara keseluruhan. Proses pembukaan atau penutupan rangkaian menyebabkan perubahan mendadak pada arus dan tegangan yang dapat menghasilkan fenomena elektromagnetik seperti lonjakan tegangan (*switching surge*) dan arus transien.

Switching pada rangkaian kapasitif, seperti busbar panjang atau saluran transmisi tanpa beban, dapat menghasilkan tegangan lebih akibat pelepasan energi medan listrik. Sebaliknya, *switching* pada rangkaian induktif dapat menimbulkan tegangan induksi akibat perubahan arus yang cepat. Fenomena tersebut dapat mempengaruhi umur isolasi peralatan dan memerlukan pengendalian melalui teknik operasi yang tepat.

Selain dampak teknis, operasi *switching* juga berpengaruh terhadap stabilitas sistem tenaga karena perubahan konfigurasi jaringan dapat mengubah distribusi aliran daya. Oleh karena itu, setiap tindakan *switching* harus direncanakan dengan mempertimbangkan kondisi sistem secara keseluruhan, termasuk batas pembebanan dan koordinasi proteksi.

Perancangan dan pengoperasian gardu induk mengacu pada standar internasional yang memastikan keselamatan, keandalan, serta kompatibilitas sistem. Standar IEC 61936 memberikan pedoman umum mengenai instalasi tenaga listrik tegangan tinggi, termasuk aspek keselamatan, jarak isolasi, dan persyaratan teknis instalasi. Standar ini menjadi acuan dalam penentuan tata letak peralatan serta pengendalian risiko operasi pada gardu induk. Selain itu, pedoman desain gardu induk juga banyak mengacu pada praktik yang dikembangkan oleh IEEE, khususnya terkait konfigurasi sistem, koordinasi isolasi, dan keandalan operasi. Pendekatan desain berbasis standar tersebut memastikan bahwa instalasi mampu memenuhi tuntutan operasional sistem tenaga modern yang kompleks dan saling terhubung. Penggunaan standar internasional dalam perancangan gardu induk tidak hanya berfungsi sebagai referensi teknis, tetapi juga sebagai landasan untuk memastikan interoperabilitas sistem serta perlindungan keselamatan personil dan peralatan selama operasi maupun pemeliharaan.

2.1.2 Disconnecting Switch (DS) / Pemisah (PMS)

Disconnecting Switch atau Pemisah (PMS) merupakan peralatan *switching* yang dirancang untuk membuka atau menutup rangkaian pada kondisi tanpa beban atau arus sangat kecil. Berbeda dengan pemutus tenaga, PMS tidak memiliki kemampuan pemadaman busur listrik berenergi tinggi, sehingga karakteristik operasinya bergantung pada kondisi medan listrik lokal dan sifat rangkaian yang terhubung.

Pada praktik operasi sistem transmisi, pembukaan atau penutupan PMS tetap dapat menimbulkan fenomena listrik tertentu, khususnya ketika berinteraksi dengan elemen kapasitif seperti busbar panjang, konduktor tidak berbeban, atau peralatan yang memiliki penyimpanan energi medan listrik. Selama proses pemisahan kontak, peningkatan gradien medan listrik pada celah udara dapat memicu ionisasi lokal yang menghasilkan busur sementara. Intensitas fenomena ini dipengaruhi oleh kecepatan gerakan kontak, bentuk geometri elektroda, serta kondisi atmosfer sekitar.

Karakteristik operasi *switching* PMS tidak hanya ditentukan oleh desain mekanis peralatan, tetapi juga oleh sifat elektromagnetik sistem yang terhubung. Oleh karena itu, walaupun PMS diklasifikasikan sebagai peralatan isolasi, proses *switching* tetap harus dilakukan dengan mempertimbangkan potensi fenomena transien yang muncul.

Transient Recovery Voltage merupakan tegangan transien yang muncul pada terminal peralatan *switching* setelah arus terputus. Tegangan ini terbentuk akibat redistribusi energi elektromagnetik dalam sistem setelah pemisahan rangkaian terjadi.

Pada konteks PMS, TRV umumnya lebih kecil dibandingkan pada pemutus tenaga karena arus yang terlibat relatif rendah. Namun demikian, pada rangkaian dengan komponen kapasitif dominan, tegangan pemulihan dapat meningkat dengan cepat dan membentuk gradien tegangan tinggi pada celah kontak. Kondisi ini berpotensi menyebabkan restriking atau penyalaan ulang busur jika jarak isolasi belum cukup berkembang. Karakteristik TRV dipengaruhi oleh parameter sistem seperti induktansi jaringan, kapasitansi terhadap tanah, serta konfigurasi rangkaian. Oleh karena itu, evaluasi terhadap TRV menjadi bagian penting dalam memahami dinamika tegangan pada proses *switching*, khususnya pada instalasi tegangan tinggi dengan panjang penghantar signifikan.

Fenomena *capacitive switching* terjadi ketika peralatan *switching* mengoperasikan rangkaian yang didominasi oleh karakteristik kapasitif. Dalam kondisi ini, energi yang tersimpan pada medan listrik konduktor akan dilepaskan saat rangkaian dibuka, atau sebaliknya menghasilkan arus pengisian saat rangkaian ditutup kembali.

Pada sistem busbar extension atau konduktor panjang, kapasitansi terhadap tanah dapat menyebabkan arus pengisian muncul meskipun tidak terdapat beban aktif. Proses *switching* terhadap kondisi tersebut dapat menghasilkan percikan listrik akibat pelepasan energi kapasitif. Fenomena ini menjadi relevan dalam konteks pekerjaan lapangan karena berkaitan dengan observasi percikan lokal pada pelepasan konduktor.

Selain itu, *switching* kapasitif dapat menghasilkan osilasi tegangan akibat interaksi antara kapasitansi dan induktansi sistem. Osilasi ini dapat memicu tegangan lebih sesaat yang mempengaruhi kondisi isolasi peralatan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap fenomena ini penting dalam merancang prosedur *switching* yang aman dan terkendali. *Switching surge* merupakan lonjakan tegangan transien yang timbul akibat perubahan konfigurasi rangkaian secara mendadak. Fenomena ini merupakan konsekuensi dari redistribusi energi elektromagnetik dalam sistem tenaga dan dapat muncul pada saat pembukaan atau penutupan rangkaian. Besarnya *switching surge* dipengaruhi oleh parameter sistem seperti panjang saluran, karakteristik beban, serta waktu operasi peralatan *switching*. Pada instalasi tegangan tinggi, lonjakan tegangan sesaat dapat mencapai beberapa kali tegangan nominal sistem, meskipun berlangsung dalam waktu sangat singkat.

Dari perspektif operasional, *switching surge* memiliki implikasi terhadap koordinasi isolasi peralatan serta keandalan sistem. Pengendalian fenomena ini dilakukan melalui desain sistem, pengaturan prosedur *switching*, serta pemilihan peralatan yang sesuai dengan karakteristik jaringan. Perancangan dan pengujian *Disconnecting Switch* mengacu pada standar internasional untuk memastikan keandalan dan keselamatan operasi. Standar IEC 62271 memberikan spesifikasi teknis untuk peralatan *switching* tegangan tinggi, termasuk persyaratan performa isolasi, kemampuan mekanis, serta metode pengujian. Sementara itu, standar IEEE C37 series memberikan pedoman terkait karakteristik operasi peralatan *switching* dalam sistem tenaga, termasuk aspek performa tegangan transien dan koordinasi

isolasi. Standar tersebut menjadi referensi penting dalam evaluasi desain serta pengoperasian PMS pada sistem transmisi.

Penggunaan standar ini memastikan bahwa peralatan yang digunakan dalam instalasi mampu memenuhi tuntutan operasional serta memberikan tingkat keselamatan yang memadai bagi personil dan sistem. Berikut ini adalah beberapa jenis PMS dari segi fungsi yang terdapat pada gardu induk :

- a. PMS Busbar, adalah PMS yang menghubungkan antara Busbar dengan PMT. Saat pemeliharaan berfungsi memisahkan PMT dari Busbar yang bertegangan
- b. PMS Line , adalah PMS yang terpasang pada Bay Penghantar dan berfungsi untuk memutuskan tegangan dari Line menuju peralatan gardu induk
- c. PMS Ground , adalah PMS yang umumnya berada pada PMS Line dengan fungsi membuang tegangan imbas pada jaringan SUTT/SUTET setelah PMS Ground dibuka / dilepas.

Pemisah atau *Disconnecting Switch* (PMS) terdiri atas beberapa bagian utama yang memiliki fungsi spesifik dalam mendukung kinerja sistem tenaga listrik. Berikut ini adalah beberapa bagian yang terdapat pada sebuah PMS :

- a. Isolator Tumpu ,salah satu komponen terpenting dalam sistem PMS adalah isolator atau dielektrik, yang berfungsi untuk memisahkan bagian-bagian sistem dengan perbedaan potensial listrik. Selain itu, isolator juga berperan sebagai penopang mekanis bagi peralatan atau konduktor listrik. Dengan demikian, isolator tidak hanya mencegah terjadinya aliran arus antara saluran atau ke tanah, tetapi juga memberikan stabilitas mekanis agar sistem tetap beroperasi dengan aman dan efisien. Apabila isolator gagal berfungsi—misalnya akibat kerusakan atau penurunan kemampuan isolasinya—maka distribusi energi listrik dapat terganggu dan bahkan menyebabkan kegagalan operasi pada jaringan tenaga listrik. Oleh karena itu, keandalan isolator menjadi faktor krusial dalam menjaga kontinuitas penyaluran listrik. Isolator pada PMS umumnya terbuat dari porselin atau bahan komposit. Porselin dipilih karena memiliki kekuatan isolasi tinggi serta tahan terhadap cuaca ekstrem, sedangkan bahan komposit seperti resin polimer yang diperkuat serat kaca lebih ringan, tahan terhadap

polusi, dan memiliki kekuatan mekanis tinggi. Desain dan ukuran isolator disesuaikan dengan berbagai parameter, seperti tingkat tegangan sistem, jenis penghantar, kekuatan mekanis yang dibutuhkan, serta struktur penopangnya. Untuk sistem bertegangan ekstra tinggi, isolator dirancang lebih besar dengan jumlah piringan lebih banyak guna meningkatkan kemampuan isolasinya. Selain itu, isolator juga harus mampu menahan beban akibat berat konduktor, tekanan angin, dan kondisi lingkungan lainnya. Karena fungsinya yang vital, isolator memerlukan perawatan dan inspeksi rutin. Pemeriksaan visual terhadap retakan, kotoran, atau kerusakan permukaan, serta pengujian nilai tahanan isolasi sangat penting dilakukan agar isolator tetap berfungsi optimal.

- b. Subsistem primer / Media Pelangsir Arus, Subsistem primer merupakan bagian dari PMS yang bersifat konduktif dan berfungsi menghantarkan arus listrik dari satu bagian sistem ke bagian lainnya. Sebagai komponen yang berinteraksi langsung dengan aliran arus, subsistem ini berperan penting dalam menjaga kelancaran dan efisiensi aliran energi listrik. Kegagalan atau kerusakan pada bagian ini dapat berdampak langsung terhadap keandalan sistem secara keseluruhan. Subsistem primer terdiri dari dua komponen utama, yaitu pisau/kontak PMS dan klem penghubung. Pisau atau Kontak PMS berfungsi untuk membuka dan menutup rangkaian listrik. Komponen ini dirancang agar proses pemutusan dan penyambungan arus dapat dilakukan dengan aman tanpa menimbulkan loncatan busur api yang berbahaya. Bahan yang digunakan umumnya logam dengan konduktivitas tinggi seperti tembaga atau paduan perak, guna mengurangi hambatan dan memastikan transfer energi yang efisien. Klem berfungsi sebagai pengikat mekanis yang menjaga agar penghantar listrik terpasang kuat pada PMS. Klem dirancang untuk memastikan kontak yang kuat sekaligus mengurangi resistansi antara penghantar dan sistem konduktor utama. Material yang digunakan biasanya tahan terhadap korosi dan memiliki kekuatan mekanis tinggi, mengingat posisinya yang terpapar langsung oleh kondisi lingkungan luar. Kedua komponen ini bekerja secara sinergis untuk menjaga kestabilan aliran listrik. Oleh karena itu, perawatan rutin seperti pemeriksaan visual, pengukuran

hambatan kontak, serta pembersihan dari kotoran atau oksidasi perlu dilakukan secara berkala untuk memastikan kinerja optimal. Keandalan subsistem primer tidak hanya menentukan kinerja PMS, tetapi juga berdampak pada keamanan serta efisiensi keseluruhan sistem tenaga listrik. Desain, pemilihan material, dan pemeliharaan yang tepat menjadi faktor penting dalam mendukung operasi sistem yang stabil dan berkelanjutan.

- c. Pisau/Kontak PMS, pisau atau kontak PMS berfungsi untuk menghubungkan dan memisahkan bagian bertegangan dalam sistem kelistrikan. Fungsinya adalah membuka atau menutup sirkuit sesuai kebutuhan operasional—baik untuk menghentikan aliran arus listrik maupun untuk menghubungkannya kembali. Karena bekerja pada kondisi bertegangan tinggi, pemilihan jenis pisau harus disesuaikan dengan karakteristik sistem yang digunakan. Masing-masing tipe memiliki mekanisme kerja yang disesuaikan dengan kebutuhan operasional dan desain sistem gardu induk.
- d. Terminal Utama / HV Connector, berfungsi sebagai titik sambungan antara PMS dan konduktor eksternal. Komponen ini menjadi penghubung utama aliran arus listrik dari PMS ke konduktor luar atau sebaliknya. Kualitas sambungan terminal ini sangat memengaruhi kontinuitas aliran energi listrik pada sistem. Selain sebagai penghubung mekanis, terminal juga dirancang untuk memberikan kontak listrik yang kuat dan stabil, sehingga mencegah terjadinya pemanasan berlebih (hotspot) akibat hambatan kontak. Proses pemasangan terminal harus dilakukan dengan hati-hati agar sambungan benar-benar rapat dan bebas dari celah yang dapat menimbulkan gangguan atau penurunan efisiensi sistem.
- e. Mekanisme Penggerak, untuk mengoperasikan pisau atau kontak PMS, digunakan stang atau tuas penggerak yang dihubungkan dengan tenaga penggerak mekanis. Sistem ini biasanya ditempatkan di dalam lemari kontrol, bersama terminal serta rangkaian wiring kendali lainnya. Mekanisme penggerak ini memungkinkan operator melakukan proses buka-tutup PMS dari jarak aman dengan tingkat presisi yang tinggi. Dengan kombinasi fungsi dari setiap komponen tersebut mulai dari

isolator, subsistem primer, pisau dan klem, terminal utama, hingga sistem penggerak PMS dapat menjalankan perannya secara optimal dalam memastikan pemisahan dan pengamanan sistem kelistrikan berlangsung dengan aman, andal, serta efisien.

2.1.3 Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan Tegangan Tinggi / Extra Tinggi (PDKB TT/TET)

PDKB TT/TET adalah serangkaian kegiatan pemeliharaan atau perbaikan yang dilakukan pada peralatan jaringan listrik tegangan tinggi (TT) dan tegangan ekstra tinggi (TET) tanpa memutus aliran listrik. Pekerjaan ini melibatkan sistem dengan level tegangan antara 70 kV hingga 500 kV.

Tujuan utama dari PDKB TT/TET adalah untuk:

1. Menjaga kontinuitas suplai listrik agar pelanggan tidak mengalami pemadaman.
2. Meningkatkan keandalan sistem transmisi dan gardu induk.
3. Mengurangi risiko gangguan sistem akibat peralatan rusak yang tidak segera diperbaiki.
4. Meningkatkan efisiensi operasional PLN dengan menekan downtime peralatan.

Pelaksanaan PDKB TT/TET mengacu pada beberapa regulasi dan standar internal PLN, di antaranya:

1. SPLN T3.010:2020 – *Spesifikasi Umum dan Prosedur Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan Tegangan Tinggi/Tegangan Ekstra Tinggi.*
2. SPLN 62:1985 – *Pedoman Pemeliharaan Jaringan Tegangan Tinggi dalam Keadaan Bertegangan (edisi lama).*
3. Permen ESDM No. 12 Tahun 2021 – tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Bidang Ketenagalistrikan.
4. Prosedur Operasi Standar PLN PDKB (SOP-PDKB TT/TET) – meliputi prosedur teknis, inspeksi alat, serta metode pelaksanaan pekerjaan.

Standar ini memastikan seluruh kegiatan dilakukan dengan memperhatikan aspek

keselamatan (safety), keandalan (reliability), dan kompetensi personel (competency). Dalam pelaksanaannya, terdapat dua metode utama yang digunakan pada PDKB TT/TET:

1. Metode Berjarak (*Hot Stick Method*)

- Petugas bekerja dengan menggunakan tongkat isolasi (*hot stick*) untuk menjaga jarak aman dari konduktor bertegangan.
- Cocok untuk pekerjaan ringan hingga menengah seperti pembersihan isolator, penggantian clamp, atau pengukuran arus bocor.
- Diterapkan pada sistem 70–150 kV.

2. Metode Sentuh Langsung (*Bare Hand Method*)

- Petugas berada pada potensial yang sama dengan konduktor bertegangan menggunakan baju konduktif (*conductive suit*).
- Tubuh petugas disejajarkan dengan potensial konduktor melalui tangga konduktif dan sistem penyeimbang muatan.
- Umumnya digunakan pada sistem di atas 150 kV (hingga 500 kV) baik di SUTT/SUTET maupun di GI/GITET

Kedua metode tersebut hanya dapat dilakukan oleh tim bersertifikat PDKB TT/TET yang telah menjalani pelatihan dan memiliki sertifikat kompetensi yang dikeluarkan oleh lembaga sertifikasi kompetensi

2.1.4 Busur Api Akibat *Switching* Tegangan

Disconnecting Switch (Pemisah) merupakan peralatan mekanis yang digunakan pada gardu induk untuk memastikan suatu bagian rangkaian berada dalam kondisi tidak bertegangan secara visual. Meskipun fungsi utamanya adalah sebagai perangkat isolasi, dalam praktik operasional terdapat kemungkinan timbulnya fenomena bunga api (*electric arc*) apabila perangkat ini dioperasikan ketika masih terdapat arus yang mengalir, baik berupa arus beban, arus sisa kapasitif, maupun arus induktif. Ketika kontak mulai terpisah, medan listrik pada celah udara meningkat tajam dan dapat menyebabkan udara mengalami ionisasi.

Ionisasi tersebut menjadikan udara bersifat konduktif sementara sehingga arus listrik tetap dapat mengalir dalam bentuk plasma bercahaya. Temperatur busur api yang terbentuk dapat mencapai kisaran 5000–10000°C, yang berpotensi merusak permukaan kontak, menimbulkan risiko *flashover*, serta membahayakan keselamatan personil di sekitar lokasi operasi. Oleh karena itu, pengoperasian *Disconnecting Switch* harus dilakukan dalam kondisi tanpa beban (*no-load condition*), dengan urutan operasi yang benar yaitu memutus *Circuit Breaker* terlebih dahulu sebelum membuka *Disconnecting Switch* (CB → DS). Prosedur ini bertujuan mencegah terbentuknya busur akibat arus yang masih mengalir pada rangkaian.

Fenomena bunga api tersebut tidak hanya dipengaruhi oleh arus beban, tetapi juga oleh arus pengisian kapasitif pada konduktor panjang, arus magnetisasi transformator, serta tegangan induksi antar penghantar. Untuk mengurangi risiko yang muncul, sistem operasi gardu induk umumnya dilengkapi dengan interlock mekanis atau elektrik, rangkaian pelepasan muatan (*discharge circuit*), serta mekanisme pengoperasian jarak jauh berbasis motorisasi. Secara fisika, terjadinya loncatan listrik ini dapat dijelaskan melalui Hukum Paschen yang menyatakan bahwa udara akan mengalami *breakdown* apabila medan listrik melampaui kekuatan dielektriknya, sekitar 3 kV/mm. Ketika batas tersebut terlampaui, medium udara berubah menjadi plasma konduktif dan memungkinkan terjadinya busur listrik.

Busur listrik pada sistem tegangan tinggi pada dasarnya merupakan fenomena transformasi medium udara dari kondisi isolatif menjadi konduktif akibat proses ionisasi berantai. Elektron bebas yang dipercepat oleh medan listrik menumbuk molekul udara dan menghasilkan pelepasan elektron tambahan, membentuk kanal plasma dengan konduktivitas tinggi. Kanal ini memungkinkan arus mengalir secara kontinu di antara dua elektroda yang terpisah.

Plasma yang terbentuk bukan sekadar percikan cahaya, melainkan fase materi dengan partikel bermuatan dan temperatur sangat tinggi yang dapat mencapai ribuan hingga puluhan ribu derajat Kelvin. Temperatur ekstrem ini memicu ekspansi termal cepat serta emisi radiasi intens. Dalam lingkungan gardu induk, pembentukan plasma

busur sering berkaitan dengan aktivitas *switching* maupun kegagalan isolasi yang memicu pelepasan energi elektromagnetik pada celah udara. Pemahaman mengenai proses pembentukan plasma ini menjadi penting bukan hanya untuk memahami fenomena fisiknya, tetapi juga untuk menilai implikasinya terhadap keselamatan kerja personil yang berada dalam jarak operasi dekat.

Energi yang dilepaskan oleh busur listrik tidak hanya terkonsentrasi pada titik pembentukan plasma, melainkan merambat melalui berbagai mekanisme fisik. Energi tersebut menyebar dalam bentuk radiasi elektromagnetik, konveksi panas, serta partikel material yang teruapkan. Radiasi termal menjadi komponen dominan dalam paparan energi, karena mampu menjalar langsung ke lingkungan sekitar dan mempengaruhi material isolasi maupun jaringan biologis manusia. Selain itu, ekspansi gas panas di sekitar plasma menghasilkan aliran konvektif yang membawa energi menjauh dari sumber busur, menciptakan zona paparan yang lebih luas.

Perambatan energi ini juga memiliki dampak mekanik terhadap lingkungan. Pemanasan mendadak menyebabkan ekspansi udara yang sangat cepat dan menghasilkan gelombang tekanan yang dikenal sebagai *arc blast*. Gelombang tekanan tersebut dapat mempengaruhi kestabilan peralatan maupun personil melalui gangguan keseimbangan atau pergerakan tak terkendali. Fenomena ini menunjukkan bahwa *arc flash* bukan hanya kejadian listrik, tetapi juga melibatkan dinamika fluida dan mekanika tekanan yang berpotensi meningkatkan risiko operasional, terutama pada pekerjaan di ketinggian atau ruang terbatas.

Selain efek tekanan, energi termal dari busur listrik berpindah melalui mekanisme radiasi, konveksi, dan konduksi. Radiasi memungkinkan perpindahan energi tanpa kontak langsung, konveksi membawa panas melalui aliran udara yang dipanaskan, sedangkan konduksi mentransfer panas melalui material konduktif di sekitar titik busur. Kombinasi mekanisme ini menentukan tingkat paparan energi yang diterima oleh personil maupun peralatan. Dari sudut pandang teknik keselamatan, pemahaman terhadap mekanisme transfer panas menjadi dasar dalam menentukan batas paparan serta strategi mitigasi risiko. Dalam perspektif yang lebih humanis,

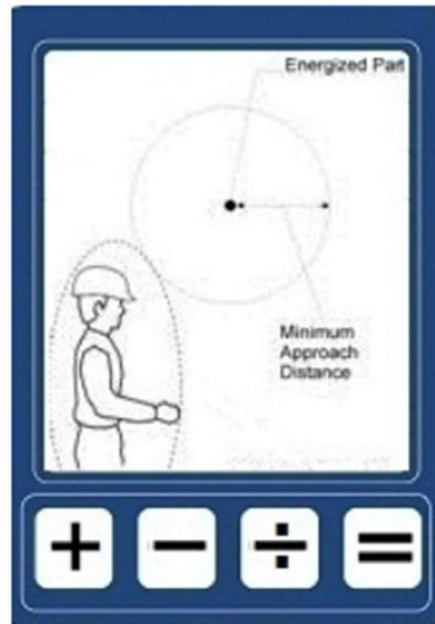
fenomena ini mengingatkan bahwa interaksi manusia dengan sistem tenaga merupakan hubungan antara tubuh manusia dan lingkungan energi yang dinamis, sehingga perlindungan terhadap paparan panas menjadi bagian penting dalam menjaga keseimbangan antara kebutuhan operasional dan keselamatan kerja.

Besarnya energi yang dilepaskan selama peristiwa busur juga sangat dipengaruhi oleh durasi kejadian. Secara konseptual, energi merupakan hasil integrasi daya terhadap waktu, sehingga semakin lama busur bertahan, semakin besar energi yang dipindahkan ke lingkungan. Dalam operasi *switching*, kecepatan pemisahan kontak atau pemutusan arus menentukan lamanya busur bertahan. Peralatan dengan karakteristik operasi cepat cenderung menghasilkan pelepasan energi yang lebih kecil dibandingkan proses pemutusan yang berlangsung lebih lambat. Oleh karena itu, pengendalian durasi *switching* menjadi faktor penting dalam mitigasi risiko *arc flash*.

Dalam konteks pekerjaan gardu induk, hubungan antara durasi busur dan energi yang dilepaskan memperlihatkan bahwa aspek mekanis peralatan *switching* memiliki konsekuensi langsung terhadap keselamatan personil. Pengurangan durasi busur tidak hanya meningkatkan kinerja sistem, tetapi juga menurunkan tingkat paparan energi terhadap lingkungan kerja. Hal ini menunjukkan keterkaitan erat antara desain teknis peralatan, prosedur operasi, dan perlindungan manusia sebagai bagian integral dari sistem tenaga listrik.

2.1.5 Live Line Maintenance Approach Distance (LLMAD)

Live Line Maintenance Approach Distance (LLMAD) merupakan parameter keselamatan utama dalam pekerjaan ketenagalistrikan yang dilakukan dalam kondisi bertegangan (*energized work*). LLMAD didefinisikan sebagai jarak minimum aman yang harus dipertahankan antara pekerja, bagian tubuh, peralatan, atau benda konduktif dengan bagian listrik yang masih bertegangan, guna mencegah terjadinya kontak listrik langsung, loncatan listrik (*flashover*), serta risiko *arc flash* dan *arc blast*. Dalam regulasi Occupational Safety and Health Administration (OSHA), konsep LLMAD ini dikenal sebagai Minimum Approach Distance (MAD).



Gambar 2.1 MAD Calculator OSHA Sumber <https://www.osha.gov/power-generation/rulemaking/madcalculator>

OSHA mengatur ketentuan terkait jarak pendekatan minimum tersebut dalam 29 CFR 1910.269 untuk pekerjaan pada pembangkitan, transmisi, dan distribusi tenaga listrik, serta 29 CFR 1926 Subpart K untuk pekerjaan konstruksi kelistrikan. Regulasi ini menegaskan bahwa tidak seorang pun pekerja diperbolehkan mendekati atau melampaui jarak pendekatan minimum terhadap bagian bertegangan, kecuali pekerja tersebut merupakan tenaga kerja yang berkualifikasi (*qualified person*) dan menggunakan metode kerja, peralatan, serta alat pelindung diri yang sesuai dengan standar keselamatan.

Penentuan nilai LLMAD menurut OSHA dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu tingkat tegangan nominal sistem, metode kerja bertegangan yang digunakan, kondisi lingkungan kerja seperti kelembaban, tingkat polusi, dan ketinggian, serta kualifikasi pekerja. OSHA membedakan penerapan LLMAD antara *qualified person* dan *unqualified person*. *Unqualified person* sama sekali tidak

diperbolehkan berada dalam zona LLMAD dan wajib dilindungi dengan pembatas fisik atau sistem pengamanan tambahan untuk mencegah paparan bahaya listrik.

Berdasarkan OSHA Table R-6 dan Table R-7, nilai LLMAD meningkat seiring dengan kenaikan tegangan sistem. Secara umum, jarak pendekatan minimum untuk sistem dengan tegangan hingga 1 kV adalah sekitar 300 mm. Untuk sistem dengan tegangan di atas 1 kV hingga 15 kV, LLMAD berada pada kisaran 600–700 mm. Pada sistem dengan tegangan 15 kV hingga 36 kV, jarak minimum yang ditetapkan berkisar antara 800–1.000 mm. Untuk sistem tegangan tinggi pada rentang 72,5 kV hingga 150 kV, LLMAD yang ditetapkan lebih dari 1,5 meter, sedangkan pada sistem 230 kV ke atas, jarak pendekatan minimum yang dipersyaratkan melebihi 2,5 meter. Nilai-nilai tersebut merupakan jarak minimum absolut, sehingga dalam praktik lapangan sering kali ditambahkan faktor pengaman tambahan sesuai dengan prosedur perusahaan atau standar nasional yang berlaku.

Tabel 2.1 Daftar LLMAD Menurut standar OSHA 29 CFR 1910.269

Tegangan Sistem	<i>Minimum Approach Distance OSHA</i>
≤ 1 kV	± 300 mm
$> 1 - 15$ kV	$\pm 600 - 700$ mm
$> 15 - 36$ kV	$\pm 800 - 1.000$ mm
72,5 – 150 kV	$> 1,5$ m
≥ 230 kV	$> 2,5$ m

Dalam penerapannya, LLMAD sangat berkaitan dengan metode kerja bertegangan yang digunakan. Pada metode *hot stick*, pekerja tetap berada di luar batas LLMAD dengan memanfaatkan tongkat isolasi, sehingga jarak aman dijaga melalui isolasi peralatan kerja. Pada metode rubber glove, pengurangan jarak pendekatan hanya diperbolehkan pada bagian tubuh yang terlindungi oleh sarung tangan dan lengan isolasi, sementara bagian tubuh lainnya tetap harus berada di luar batas LLMAD. Adapun pada metode bare hand, yang umumnya diterapkan pada sistem tegangan

sangat tinggi, pekerja disamakan potensialnya dengan konduktor yang dikerjakan, sehingga LLMAD justru berlaku terhadap tanah (*ground*) dan fasa lain yang memiliki beda potensial.

OSHA juga menegaskan bahwa LLMAD berbeda dengan batas energi *arc flash* (*arc flash boundary*), meskipun keduanya saling berkaitan dalam analisis risiko kelistrikan. Pelanggaran terhadap LLMAD dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya *arc flash* akibat jarak udara yang tidak mencukupi antara pekerja dan bagian bertegangan. Oleh karena itu, setiap penetapan LLMAD harus disertai dengan analisis risiko *arc flash*, pembatasan zona kerja, serta penggunaan alat pelindung diri (*personal protective equipment*) yang sesuai dengan tingkat bahaya yang ada.

Standar OSHA sering dijadikan sebagai rujukan internasional yang kemudian diadaptasi ke dalam standar nasional, seperti Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) dan standar internasional IEC. Dengan demikian, penetapan LLMAD atau JAM merupakan langkah wajib dalam perencanaan keselamatan kerja sebelum pekerjaan bertegangan dilakukan. Secara keseluruhan, LLMAD merupakan elemen fundamental dalam landasan teori keselamatan kerja listrik bertegangan. Penerapan jarak pendekatan minimum yang tepat, didukung oleh metode kerja yang benar, tenaga kerja yang kompeten, serta peralatan dan alat pelindung diri yang sesuai, menjadi kunci utama dalam mencegah kecelakaan kerja akibat bahaya listrik dan menjamin keselamatan pekerja selama pelaksanaan pekerjaan dalam keadaan bertegangan. Pendekatan jarak aman pada pekerjaan bertegangan, yang dikenal sebagai *Live Line Maintenance Approach Distance (LLMAD)*, pada dasarnya tidak hanya ditentukan oleh parameter fisika medan listrik dan probabilitas tembus isolasi udara, tetapi juga oleh interaksi antara manusia dan lingkungan energi listrik tersebut. Pembahasan sebelumnya mengenai model probabilitas *breakdown* udara, konsep *statistical withstand voltage*, serta gradien medan listrik menunjukkan bahwa jarak aman merupakan hasil kompromi antara batas fisik isolasi dan tingkat ketidakpastian fenomena elektromagnetik. Namun dalam praktik operasional, jarak ini juga berfungsi sebagai ruang adaptasi bagi manusia dalam menjalankan pekerjaan secara stabil dan

terkendali.

Dalam konteks tersebut, keandalan manusia (*human reliability*) menjadi faktor yang tidak terpisahkan dari penerapan LLMAD. Pekerjaan bertegangan menuntut ketepatan persepsi jarak, koordinasi motorik, serta pemrosesan informasi yang akurat dalam lingkungan berisiko tinggi. Variasi kecil dalam posisi tubuh, alat kerja, atau respons terhadap gangguan eksternal dapat mempengaruhi margin keselamatan terhadap batas medan listrik kritis. Oleh karena itu, LLMAD tidak hanya dimaknai sebagai parameter teknis, tetapi juga sebagai batas operasional yang mempertimbangkan keterbatasan manusia dalam mempertahankan akurasi gerak dan penilaian situasional.

Pendekatan ini sejalan dengan prinsip hierarki pengendalian risiko teknik yang menempatkan pengurangan bahaya pada tingkat sistem sebagai prioritas utama. Dalam penerapan LLMAD, pengendalian tidak semata dilakukan melalui kedisiplinan operator, tetapi melalui pengaturan metode kerja, penggunaan alat isolatif, serta konfigurasi sistem yang mengurangi kemungkinan paparan medan listrik berlebih. Dengan demikian, jarak aman berfungsi sebagai bentuk pengendalian rekayasa yang mengurangi ketergantungan pada ketepatan tindakan individu semata.

Konsep tersebut diperkuat melalui penerapan *engineering safety barrier*, yaitu lapisan perlindungan teknis yang membatasi interaksi langsung antara manusia dan sumber energi listrik. Dalam pekerjaan bertegangan, barrier ini dapat berupa peralatan isolasi, sistem monitoring jarak, hingga desain prosedur kerja yang menjaga posisi operator tetap berada dalam zona medan listrik yang dapat diterima. Keberadaan barrier tersebut menunjukkan bahwa keselamatan tidak hanya bergantung pada kemampuan manusia menjaga jarak, tetapi juga pada sistem teknis yang membantu mempertahankan kondisi aman secara konsisten.

Selain faktor teknis, penerapan LLMAD juga berkaitan erat dengan beban kognitif operator (*cognitive workload*). Penilaian jarak aman, pemantauan posisi peralatan, komunikasi tim, serta kesadaran terhadap kondisi energi dilakukan secara simultan selama pekerjaan berlangsung. Beban mental yang tinggi dapat

mempengaruhi ketelitian persepsi ruang dan pengambilan keputusan. Oleh karena itu, desain prosedur kerja serta pembagian peran tim menjadi bagian penting dalam menjaga keseimbangan antara tuntutan tugas dan kapasitas kognitif manusia.

Dalam perspektif yang lebih humanis, penerapan LLMAD mencerminkan upaya sistem tenaga listrik untuk menyesuaikan lingkungan kerja dengan kemampuan manusia, bukan sebaliknya. Jarak aman bukan sekadar batas matematis hasil analisis medan listrik, tetapi ruang perlindungan yang memungkinkan manusia bekerja dengan stabil, percaya diri, dan terkendali di tengah kompleksitas energi bertegangan tinggi.

Dengan demikian, integrasi antara prinsip fisika isolasi udara, pengendalian risiko teknik, serta faktor manusia menunjukkan bahwa LLMAD merupakan konsep multidimensional. Ia tidak hanya melindungi sistem dari kegagalan isolasi, tetapi juga melindungi manusia sebagai bagian integral dari operasi tenaga listrik. Pendekatan ini memperlihatkan bahwa keselamatan kerja bertegangan merupakan hasil sinergi antara ilmu teknik, desain sistem, dan pemahaman terhadap kapasitas manusia dalam berinteraksi dengan lingkungan energi.

2.2 Penelitian Terdahulu

Kajian penelitian terdahulu menjadi dasar dalam memahami perkembangan keilmuan yang berkaitan dengan keselamatan pekerjaan bertegangan, fenomena busur listrik, serta dinamika *switching* pada sistem tenaga. Literatur internasional menunjukkan bahwa penelitian dalam bidang ini tidak hanya menitikberatkan pada aspek teknis peralatan, tetapi juga pada interaksi antara fenomena elektromagnetik dan faktor manusia dalam lingkungan kerja berisiko tinggi.

Salah satu kelompok penelitian yang relevan adalah studi mengenai *arc flash* yang dikembangkan melalui publikasi IEEE. Penelitian ini banyak berfokus pada pemodelan energi insiden, karakteristik propagasi panas, serta penentuan batas paparan aman bagi personil. Studi tersebut menunjukkan bahwa intensitas energi busur dipengaruhi oleh arus gangguan, konfigurasi sistem, serta durasi pemutusan arus. Pendekatan berbasis model ini menjadi dasar bagi pengembangan standar keselamatan

dan metode evaluasi risiko pada instalasi tegangan tinggi. Temuan tersebut memperkuat pemahaman bahwa fenomena busur listrik tidak hanya merupakan kejadian lokal, tetapi memiliki dampak radiasi energi yang dapat menjangkau lingkungan kerja di sekitarnya.

Selain itu, penelitian terkait keselamatan *live-line maintenance* memberikan kontribusi penting dalam memahami bagaimana pekerjaan bertegangan dapat dilaksanakan dengan tingkat risiko yang terkendali. Kajian dalam bidang ini menekankan pentingnya pendekatan multidisiplin yang menggabungkan analisis medan listrik, ergonomi kerja, serta pelatihan personil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa keberhasilan pekerjaan bertegangan tidak hanya bergantung pada desain peralatan isolatif, tetapi juga pada keandalan manusia dalam memahami kondisi sistem serta menjaga konsistensi prosedur operasi. Perspektif ini menegaskan pentingnya integrasi antara teknologi dan kompetensi operator dalam menjaga keselamatan kerja.

Penelitian lain yang relevan membahas fenomena transien akibat *switching* pada sistem tenaga. Publikasi akademik mengenai *switching transient* menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi rangkaian dapat menghasilkan osilasi tegangan dan arus yang berdampak pada isolasi peralatan serta stabilitas sistem. Analisis berbasis simulasi elektromagnetik memperlihatkan bahwa fenomena transien tidak hanya bergantung pada karakteristik peralatan *switching*, tetapi juga pada parameter jaringan seperti induktansi dan kapasitansi sistem. Pemahaman terhadap dinamika transien ini menjadi penting dalam merancang prosedur *switching* yang aman dan meminimalkan dampak terhadap lingkungan kerja.

Selain kajian teknis, penelitian dalam bidang faktor manusia (*human factors studies*) memberikan perspektif tambahan terhadap keselamatan kerja di lingkungan energi tinggi. Studi ini menyoroti bagaimana beban kognitif, persepsi risiko, serta komunikasi tim mempengaruhi tingkat kesalahan operasional. Temuan menunjukkan bahwa desain sistem kerja yang mempertimbangkan keterbatasan manusia mampu mengurangi potensi kesalahan secara signifikan. Pendekatan ini memperlihatkan bahwa keselamatan kerja tidak hanya ditentukan oleh perlindungan teknis, tetapi juga

oleh struktur organisasi dan budaya kerja yang mendukung pengambilan keputusan yang tepat.

Secara keseluruhan, penelitian terdahulu menunjukkan bahwa keselamatan dan efektivitas pekerjaan pada sistem tenaga merupakan hasil integrasi antara pemahaman fenomena fisika, desain peralatan, serta faktor manusia. Kajian literatur ini memberikan landasan konseptual yang kuat bagi penelitian yang dilakukan, khususnya dalam memahami pengaruh penggunaan perangkat *switching* terhadap keselamatan personil dalam pekerjaan bertegangan.

Adapun beberapa referensi yang mendukung penelitian ini antara lain:

- a. Berdasarkan hasil penelitian Maulana dkk. (2023), diketahui bahwa energi *arc flash* dan jangkauan *arc flash boundary* sangat dipengaruhi oleh durasi gangguan atau *Fault Clearing Time (FCT)*. Pada kondisi gangguan dengan FCT yang relatif lama, energi *arc flash* dapat mencapai nilai yang sangat tinggi dan menghasilkan jangkauan bahaya hingga beberapa meter dari titik gangguan. Kondisi ini menunjukkan bahwa aktivitas *switching* termasuk dalam kategori gangguan / *fault* karena terjadi proses pemisahan / penyambungan antara peralatan bertegangan dan tidak bertegangan yang memiliki potensi bahaya *arc flash*. Dalam konteks Pekerjaan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) di Gardu Induk 150 kV, potensi terjadinya busur api (*arc flash*) menjadi perhatian utama, khususnya pada pekerjaan pemberian dan pembebasan tegangan sambungan busbar. Aktivitas tersebut melibatkan perubahan konfigurasi sistem dan proses *switching* yang apabila terjadi kesalahan prosedur, kegagalan peralatan, atau keterlambatan pemutusan gangguan, dapat memicu terbentuknya busur api dengan energi tinggi. Semakin cepat sistem dapat diamankan dan dikendalikan, maka energi *arc flash* yang mungkin timbul akan semakin kecil, begitu pula dengan jarak aman (*arc flash boundary*).
- b. Menurut Soni Zulfikar , 2022 dalam skripsinya yang berjudul ANALISIS SISTEM PROTEKSI TERHADAP BAHAYA BUSUR API (ARC FLASH) Arcing-fault sendiri dapat didefinisikan sebagai busur api yang diakibatkan oleh arus gangguan yang mengalir melalui udara antara konduktor dengan konduktor atau konduktor

dengan tanah. Sedangkan bolted fault terjadi akibat adanya perantara konduktor sebagai jalur arus gangguannya.

- c. Menurut Sulistianingsih Nur Fitri dan Fatmawati Azis (2024) dalam jurnal berjudul *“Pengaruh Parameter Sistem Transmisi Tenaga Listrik pada Saluran Transmisi Pendek”*, sistem transmisi sebagai bagian integral dari sistem tenaga listrik memiliki parameter-parameter elektrik yang sangat menentukan performa dan kemampuannya dalam menyalurkan daya secara andal dan efisien. Parameter-parameter tersebut meliputi resistansi (R), induktansi (L), kapasitansi (C), dan konduktansi (G). Keempat parameter ini dikenal sebagai parameter primer saluran transmisi dan menjadi dasar dalam pemodelan matematis maupun analisis aliran daya (power flow) pada sistem tenaga listrik. Resistansi penghantar merupakan parameter yang secara langsung berhubungan dengan rugi-rugi daya (power losses) pada saluran transmisi. Secara fisik, resistansi muncul akibat hambatan material konduktor terhadap aliran arus listrik. Ketika arus mengalir melalui penghantar, sebagian energi listrik akan berubah menjadi energi panas akibat efek Joule (I^2R losses). Dalam analisis sistem tenaga, resistansi yang digunakan umumnya adalah resistansi efektif, yaitu nilai resistansi yang telah memperhitungkan efek frekuensi, temperatur operasi, serta distribusi arus pada penampang konduktor (skin effect). Pada sistem transmisi tegangan tinggi seperti 150 kV, meskipun arus relatif lebih kecil dibanding sistem tegangan rendah untuk daya yang sama, nilai resistansi tetap berpengaruh terhadap penurunan tegangan (voltage drop) dan efisiensi penyaluran daya, khususnya pada jarak yang cukup panjang.

Induktansi merupakan sifat rangkaian yang menyebabkan timbulnya gaya gerak listrik (GGL) induksi akibat perubahan arus terhadap waktu. Ketika suatu konduktor dialiri arus listrik, akan terbentuk medan magnet di sekelilingnya sesuai dengan hukum Ampere. Perubahan arus akan menyebabkan perubahan fluks magnetik, yang selanjutnya menimbulkan tegangan induksi sesuai dengan hukum Faraday. Induktansi pada saluran transmisi berpengaruh terhadap reaktansi induktif (XL), yang nilainya sebanding dengan frekuensi dan nilai induktansi. Pada sistem tenaga

listrik arus bolak-balik (AC), keberadaan reaktansi induktif menyebabkan terjadinya penurunan tegangan reaktif serta mempengaruhi stabilitas tegangan dan kemampuan transfer daya. Induktansi juga berperan dalam pembentukan impedansi total saluran, yang menentukan besarnya arus hubung singkat dan distribusi daya pada jaringan transmisi.

Kapasitansi saluran transmisi muncul akibat adanya beda potensial antara penghantar dengan penghantar lain maupun antara penghantar dengan tanah. Secara prinsip, dua konduktor yang dipisahkan oleh media isolasi (misalnya udara) akan membentuk sistem seperti kapasitor. Ketika terdapat tegangan, muatan listrik akan tersimpan pada konduktor tersebut. Pada saluran transmisi, kapasitansi menghasilkan arus kapasitif yang mengalir meskipun tidak ada beban pada ujung saluran. Pada saluran pendek, pengaruh kapasitansi relatif kecil dan sering kali dapat diabaikan dalam perhitungan sederhana. Namun demikian, pada sistem tegangan tinggi seperti 150 kV, efek kapasitif tetap perlu dipertimbangkan karena dapat mempengaruhi profil tegangan di sepanjang saluran, terutama dalam kondisi tanpa beban (no-load condition) yang dapat menimbulkan fenomena kenaikan tegangan ujung saluran (Ferranti effect).

Konduktansi merupakan parameter yang merepresentasikan kebocoran arus melalui media isolasi antara penghantar maupun antara penghantar dan tanah. Pada saluran udara, kebocoran arus melalui isolator umumnya sangat kecil sehingga nilai konduktansi dapat diabaikan dalam perhitungan dasar. Namun pada kondisi tertentu seperti kelembaban tinggi, polusi, atau degradasi isolator, konduktansi dapat meningkat dan mempengaruhi performa isolasi sistem. Walaupun dalam analisis saluran transmisi pendek konduktansi sering dianggap mendekati nol, pemahaman terhadap parameter ini tetap penting dalam kajian keandalan dan keselamatan sistem tegangan tinggi.

Keempat parameter tersebut secara bersama-sama membentuk impedansi dan admitansi saluran transmisi yang menentukan karakteristik aliran daya dan distribusi tegangan pada sistem. Nilai resistansi dan induktansi mempengaruhi

komponen impedansi seri saluran, sedangkan kapasitansi dan konduktansi membentuk komponen admitansi paralel terhadap tanah. Dalam analisis aliran daya, perubahan nilai parameter ini akan berdampak langsung terhadap besarnya tegangan bus, faktor daya, rugi daya, serta stabilitas sistem.

Selain itu, nilai parameter saluran sangat dipengaruhi oleh panjang saluran transmisi. Pada saluran pendek, efek kapasitansi dan konduktansi relatif kecil sehingga model yang digunakan biasanya hanya mempertimbangkan impedansi seri (model saluran pendek). Namun seiring bertambahnya panjang saluran, efek distribusi parameter menjadi lebih signifikan dan memerlukan model yang lebih kompleks. Oleh karena itu, dalam penelitian yang dilakukan oleh Sulistianingsih Nur Fitri dan Fatmawati Azis (2024), dilakukan simulasi untuk menganalisis pengaruh variasi parameter transmisi terhadap kinerja saluran transmisi pendek. Simulasi tersebut bertujuan untuk melihat bagaimana perubahan nilai resistansi, induktansi, dan kapasitansi mempengaruhi tegangan bus dan aliran daya, sehingga dapat diperoleh gambaran kuantitatif mengenai sensitivitas sistem terhadap parameter-parameter tersebut.

Pemahaman terhadap parameter sistem transmisi ini menjadi sangat relevan dalam analisis sistem 150 kV, karena setiap perubahan konfigurasi jaringan, termasuk saat dilakukan pembebasan dan pemberian tegangan, akan mempengaruhi distribusi arus dan tegangan dalam sistem. Dengan demikian, karakteristik parameter saluran tidak hanya berdampak pada efisiensi penyaluran daya, tetapi juga berpengaruh terhadap aspek keselamatan kerja dan keandalan sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

- d. Menurut IEEE Std 1584 (*Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*), *arc hazard* atau bahaya busur api merupakan salah satu risiko utama dalam pekerjaan kelistrikan bertegangan, khususnya pada peralatan tegangan rendah hingga menengah seperti panel, switchgear, motor control center (MCC), maupun instalasi gardu induk. Bahaya ini didefinisikan sebagai potensi risiko yang timbul akibat pelepasan energi listrik melalui gangguan busur (*arc flash*) yang dapat

menyebabkan cedera serius atau fatal pada manusia serta kerusakan pada peralatan. Fenomena *arc flash* terjadi ketika arus gangguan mengalir melalui media udara akibat kegagalan isolasi, kesalahan operasi, atau kontak tidak disengaja antara konduktor bertegangan dengan konduktor lain atau tanah. Peristiwa ini menghasilkan pelepasan energi panas yang sangat besar dalam waktu singkat, disertai cahaya intens, tekanan ledakan (*arc blast*), gelombang suara, serta lontaran partikel logam cair. Oleh karena itu, paparan bahaya busur api tidak hanya bersifat termal, tetapi juga mencakup dampak mekanis dan fisiologis terhadap pekerja. Dalam IEEE Std 1584, tingkat bahaya busur dinyatakan dalam bentuk *incident energy*, yaitu energi panas yang diterima permukaan tubuh pada jarak tertentu dari sumber busur, dinyatakan dalam satuan cal/cm^2 . Parameter ini digunakan sebagai dasar evaluasi tingkat bahaya serta pemilihan alat pelindung diri (*personal protective equipment*). Standar tersebut menetapkan bahwa nilai $1,2 \text{ cal/cm}^2$ merupakan ambang batas energi yang berpotensi menyebabkan luka bakar tingkat dua pada kulit manusia, sehingga menjadi referensi utama dalam analisis keselamatan. Besarnya *incident energy* dipengaruhi oleh sejumlah parameter sistem, antara lain tegangan operasi, arus hubung singkat, jarak kerja (*working distance*), waktu pemutusan gangguan oleh sistem proteksi, serta konfigurasi peralatan listrik (terbuka atau tertutup). Untuk mengevaluasi parameter tersebut, IEEE Std 1584 menyediakan model empiris berbasis pengujian eksperimental pada sistem tiga fasa, yang menggunakan pendekatan matematis dan statistik untuk memperkirakan energi insiden serta menentukan jarak batas bahaya. Selain parameter energi, standar ini memperkenalkan konsep *Arc Flash Boundary*, yaitu jarak dari sumber busur di mana energi insiden turun hingga $1,2 \text{ cal/cm}^2$. Pada zona di dalam batas ini, pekerja diwajibkan menggunakan APD tahan busur dengan rating yang sesuai. Batas ini berbeda dari jarak pendekatan minimum listrik (*LLMAD*), namun keduanya saling melengkapi dalam perencanaan keselamatan kerja bertegangan, karena LLMAD berfokus pada risiko tembus isolasi medan listrik sedangkan *arc flash boundary* berkaitan dengan paparan energi busur. Tingkat paparan bahaya

dapat dikelompokkan berdasarkan nilai energi insiden. Nilai hingga sekitar 1,2 cal/cm² umumnya berkaitan dengan risiko luka ringan, rentang 1,2 hingga sekitar 4 cal/cm² menunjukkan potensi luka bakar tingkat dua, sementara pada kisaran 4 hingga 8 cal/cm² risiko cedera meningkat signifikan. Pada nilai di atas 8 cal/cm², potensi cedera berat hingga fatal menjadi sangat tinggi tanpa perlindungan memadai. Oleh karena itu, IEEE Std 1584 menekankan pengendalian risiko melalui rekayasa proteksi sistem, pengurangan waktu pemutusan gangguan, peningkatan jarak kerja, serta penggunaan APD dengan rating sesuai. Perkembangan penelitian yang mengacu pada standar ini menunjukkan bahwa analisis bahaya busur listrik terus berkembang melalui studi yang dilakukan komunitas teknik tenaga. Model perhitungan energi insiden digunakan untuk memperkirakan paparan energi termal dan menentukan jarak aman kerja operator. Parameter seperti tegangan sistem, arus hubung singkat, jarak elektroda, konfigurasi lingkungan, serta jarak kerja menjadi variabel utama dalam estimasi tersebut. Pendekatan ini bertujuan membantu melindungi pekerja melalui prediksi arus busur dan energi insiden yang dapat digunakan dalam perancangan sistem proteksi maupun prosedur keselamatan. Kolaborasi penelitian antara IEEE dan NFPA juga menekankan bahwa pemahaman fenomena *arc flash* dan *arc blast* menjadi dasar penting dalam pengembangan standar keselamatan kerja kelistrikan. Di luar studi arc flash, penelitian terkait pekerjaan bertegangan (*live-line maintenance*) menunjukkan bahwa proses seperti transfer potensial pada metode ekuipotensial dapat menimbulkan arus transien dan energi sesaat yang signifikan, sehingga berpotensi mengancam keselamatan pekerja. Hal ini menegaskan pentingnya analisis teknis mendalam dalam pengembangan metode kerja tanpa pemadaman sistem. Dari perspektif operasi sistem tenaga, penelitian mengenai transien *switching* memperlihatkan bahwa kinerja peralatan *switching* mempengaruhi stabilitas sistem melalui pengaruhnya terhadap dinamika tegangan dan arus transien. Studi simulasi menunjukkan bahwa pendekatan probabilistik diperlukan untuk mengevaluasi kontribusi peralatan *switching* terhadap kestabilan sistem tenaga modern yang kompleks. Selain aspek teknis,

penelitian faktor manusia menunjukkan bahwa keselamatan kerja kelistrikan juga sangat dipengaruhi oleh kondisi perilaku dan kapasitas kognitif operator. Kajian literatur menegaskan bahwa cedera akibat pekerjaan kelistrikan masih menjadi risiko signifikan, sehingga analisis faktor manusia diperlukan untuk memahami peran beban kognitif, komunikasi tim, serta kondisi organisasi kerja dalam mencegah kesalahan operasional.

Secara keseluruhan, literatur terdahulu memperlihatkan bahwa keselamatan pekerjaan pada sistem tenaga listrik merupakan hasil integrasi antara pemahaman fenomena fisika busur listrik, karakteristik operasi peralatan *switching*, serta faktor manusia dalam lingkungan kerja. Landasan teoritis ini menjadi dasar penting bagi penelitian yang dilakukan dalam mengkaji pengaruh penggunaan perangkat *switching* terhadap keselamatan personil dalam pekerjaan bertegangan.

2.3 Kerangka Penelitian

Kerangka pemikiran dalam penelitian ini menggambarkan hubungan antara penggunaan mobile switch sebagai variabel utama dengan keselamatan kerja, keandalan sistem, dan efektivitas pekerjaan sebagai variabel hasil. Melalui penelitian lapangan, pengaruh penggunaan mobile switch terhadap pelaksanaan pekerjaan bertegangan di Gardu Induk 150 kV dapat dianalisis secara sistematis.