

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

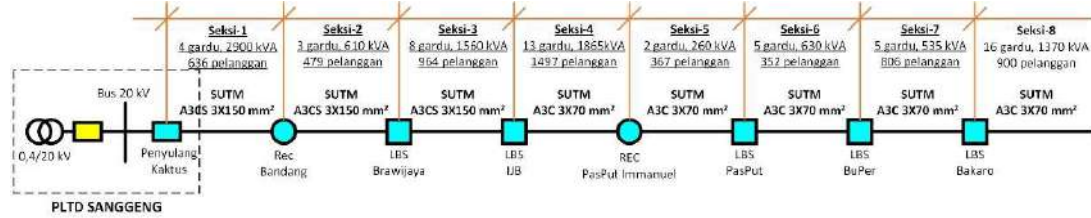
2.1.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk ke konsumen akhir. Sistem ini harus memiliki keandalan tinggi agar kontinuitas suplai listrik dapat terjaga. Gangguan pada sistem distribusi dapat menyebabkan pemadaman listrik yang berdampak langsung terhadap kenyamanan dan produktivitas pelanggan.

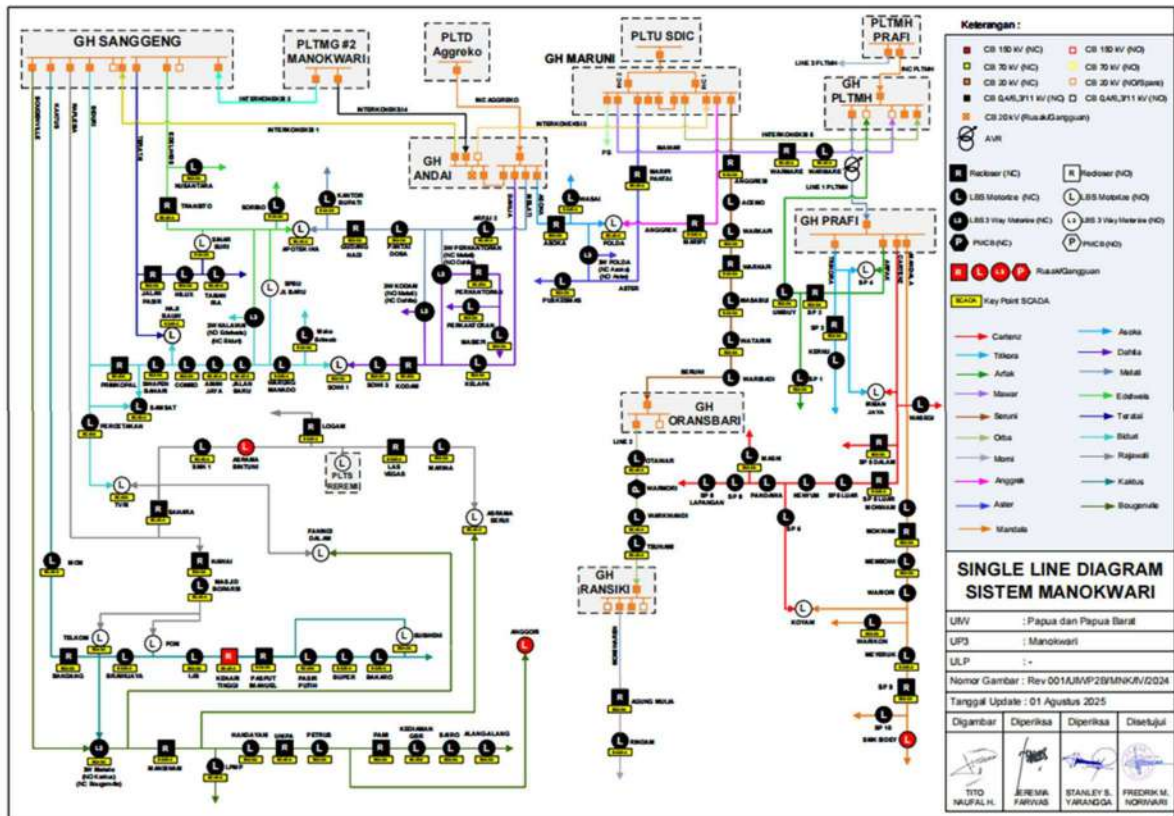
Sistem distribusi terdiri dari berbagai komponen utama, antara lain jaringan penghantar primer dan sekunder, gardu distribusi, trafo distribusi, serta peralatan proteksi dan pengendalian. Jaringan distribusi biasanya beroperasi pada tegangan menengah (*medium voltage*) dan tegangan rendah (*low voltage*) untuk menyesuaikan dengan kebutuhan pelanggan

Keandalan sistem distribusi sangat penting karena gangguan yang terjadi dapat mengakibatkan pemadaman listrik yang berdampak langsung pada konsumen. Oleh karena itu, sistem distribusi dilengkapi dengan perangkat proteksi seperti pemutus beban, recloser, dan load *break switch* (LBS) yang berfungsi untuk mendeteksi dan mengisolasi gangguan agar pemadaman dapat diminimalkan dan proses pemulihan gangguan dapat berlangsung cepat

Selain itu, dalam pengelolaan sistem distribusi modern, teknologi monitoring dan kontrol jarak jauh seperti SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) digunakan untuk meningkatkan pengawasan dan penanganan gangguan secara real-time. Dengan adanya sistem ini, operator dapat mengontrol dan memantau kondisi jaringan distribusi secara efektif



Gambar 2.1 Single Line Diagram Penyulang Kaktus



Gambar 2.2 Single Line Keypoint Diagram Sistem Manokwari

2.1.2 Pengertian Sistem Proteksi

Sistem proteksi tenaga listrik merupakan suatu rangkaian perangkat teknik yang dirancang untuk mendeteksi, mengidentifikasi, serta mengisolasi bagian sistem tenaga listrik yang mengalami gangguan agar dampaknya tidak merambat ke area lain yang masih sehat. Dalam jaringan distribusi 20 kV seperti Penyulang Kaktus UP3 Manokwari, sistem proteksi menjadi komponen fundamental yang menjaga keandalan penyaluran daya dari pembangkit

ke pelanggan. Sistem proteksi bertugas memastikan bahwa setiap gangguan, baik berupa hubung singkat antar fasa, gangguan fasa ke tanah, beban lebih, maupun kelainan arus lainnya, dapat ditangani secara cepat dan selektif sehingga kontinuitas pelayanan tetap terjaga. Tanpa sistem proteksi yang baik, gangguan kecil sekalipun dapat menyebabkan kerusakan besar pada peralatan atau bahkan pemadaman menyeluruh.

Pada prinsipnya, sistem proteksi dibangun berdasarkan empat karakteristik utama: kecepatan, selektivitas, keandalan, dan sensitivitas. *Kecepatan* sangat penting untuk mengurangi energi gangguan yang dapat merusak peralatan, terutama transformator, kabel, dan generator di pembangkit. *Selektivitas* memastikan bahwa perangkat proteksi yang bekerja pertama kali adalah peralatan yang paling dekat dengan lokasi gangguan, sehingga area terdampak pemadaman menjadi minimal. *Keandalan* merupakan kemampuan sistem untuk bekerja sesuai fungsinya setiap saat, termasuk pada kondisi ekstrem. *Sensitivitas* menuntut perangkat mampu mendeteksi gangguan meskipun besarnya kecil, namun tetap membedakan gangguan aktual dari kondisi transient agar tidak terjadi trip palsu. Keempat karakteristik tersebut menjadi standar dasar dalam perancangan koordinasi proteksi di seluruh subsistem tenaga listrik.

Proteksi pada sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem peralatan yang terpasang pada sistem pembangkitan listrik, sistem transmisi listrik, dan sistem distribusi listrik yang bertujuan untuk mengamankan sistem dari gangguan listrik dengan cara memisahkan bagian yang terdampak dan tidak terdampak gangguan. Pemisahan dilakukan agar wilayah yang terdampak dapat diatur seminimal mungkin sehingga tidak tembus ke wilayah lain dan keandalan dapat terjaga [4].

Dalam konteks jaringan distribusi, sistem proteksi terdiri dari beberapa perangkat seperti PMT Gardu Induk yang dilengkapi relay OCR (Overcurrent Relay) dan GFR (Ground Fault Relay), recloser, FCO, dan LBS. Relay OCR–GFR di PMT menjadi proteksi utama penyulang karena bertugas memutus aliran listrik ketika terdeteksi arus gangguan yang melebihi batas setting. Recloser bertugas menangani gangguan sementara (*transient fault*) dengan melakukan operasi buka–tutup otomatis. Sementara LBS (Load Break Switch) berfungsi sebagai pemutus beban untuk isolasi manual atau otomatis, tergantung jenisnya.

Pada era modern distribusi tenaga listrik, LBS kini dilengkapi fitur *fault detection* yang pada dasarnya berperan sebagai sensor gangguan cerdas untuk meningkatkan kemampuan monitoring dan analisis sistem proteksi.

Fitur *fault detection* pada LBS motorised tidak berfungsi sebagai pemutus gangguan, melainkan sebagai perangkat deteksi yang mampu mengidentifikasi adanya arus abnormal yang mengarah pada gangguan di sisi hilir atau hulu LBS. Informasi yang dikirimkan LBS biasanya mencakup nilai arus gangguan, fasa yang terlibat, durasi gangguan, hingga arah arus (pada LBS directional). Data ini sangat penting dalam sistem proteksi modern karena dapat menjadi indikator awal untuk menentukan lokasi gangguan sebelum relay utama melakukan trip. Dengan kata lain, LBS motorised membantu memberikan konteks tambahan untuk membuat keputusan operasi lebih cepat dan lebih presisi. Hal ini sangat bermanfaat pada penyulang panjang seperti Penyulang Kaktus yang memiliki banyak percabangan dan potensi gangguan tinggi akibat vegetasi, cuaca, maupun hewan.

Pada Penyulang Kaktus UP3 Manokwari, optimalisasi pemanfaatan fitur *fault detection* pada LBS motorised menjadi sangat strategis karena penyulang ini melayani wilayah dengan karakteristik geografis yang beragam, termasuk daerah hutan, dataran rendah, serta permukiman yang tersebar. Gangguan sering terjadi pada titik-titik yang sulit dijangkau, sehingga sistem proteksi membutuhkan dukungan data deteksi lapangan. Ketika PMT GI trip akibat gangguan, keberadaan LBS motorised memungkinkan operator melihat titik mana yang mendeteksi arus gangguan sehingga lokasi gangguan dapat diidentifikasi secara cepat dan akurat. Tanpa fitur ini, tim lapangan harus menyusuri penyulang secara manual yang memakan waktu panjang dan memperburuk nilai SAIDI/SAIFI.

Sebagai bagian dari sistem proteksi yang lebih cerdas, integrasi data LBS motorised dengan SCADA memungkinkan adanya *real-time fault monitoring* yang memperkuat proses analisis gangguan. Data gangguan yang dikumpulkan dapat digunakan untuk mempelajari pola gangguan, mengevaluasi kinerja proteksi OCR–GFR, menentukan kebutuhan pemangkasan vegetation, dan menilai kebutuhan penggantian peralatan. Dalam konteks koordinasi proteksi, fitur LBS membantu memastikan bahwa proteksi di seluruh rantai sistem—mulai dari pembangkit, gardu induk, hingga jaringan distribusi—dapat bekerja

secara harmonis tanpa memicu trip berlebihan yang dapat memengaruhi stabilitas pembangkit.

Secara keseluruhan, sistem proteksi tenaga listrik yang terintegrasi dengan fitur *fault detection* pada LBS motorised membawa paradigma baru dalam penanganan gangguan di jaringan distribusi. Pemanfaatan fitur ini tidak hanya meningkatkan efisiensi proses penelusuran gangguan, tetapi juga memberikan kontribusi signifikan dalam menjaga kestabilan pembangkit, meningkatkan selektivitas kerja proteksi, dan mempercepat restorasi penyulang. Dengan optimalisasi ini, Penyulang Kaktus UP3 Manokwari dapat beroperasi lebih andal, responsif, dan efisien dalam menghadapi dinamika gangguan yang terjadi di lapangan.

2.1.3 Syarat Sistem Proteksi

Sistem proteksi listrik yang dipasangkan pada masing-masing sistem harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

1. Kepekaan (*sensitivity*)

Sistem proteksi harus peka dalam mendeteksi gangguan pada suatu kawasan pemasangannya meskipun dalam kondisi yang memberikan rangsangan yang minimum. Contoh rangsangan minimum ini biasanya terjadi saat penghantar udara tersentuh bagian pohon sehingga terjadi gangguan fase-tanah atau *ground fault*.

2. Keandalan (*reliability*)

Keandalan pada sistem proteksi terbagi menjadi tiga aspek yaitu:

- *Dependability*

Sistem proteksi harus dapat dipastikan tingkat kepastiannya dalam bekerja mengamankan jaringan dari gangguan.

- *Security*

Sistem proteksi harus mampu dalam bekerja tepat dan tidak salah dalam bekerja.

- *Availability*

Sistem proteksi harus tersedia dengan parameter perbandingan antara waktu dalam

kondisi siaga dan waktu total operasinya.

3. Selektif (*selectivity*)

Sistem proteksi harus mampu dalam memisahkan bagian yang terganggu sekecil mungkin. Sistem proteksi pada jaringan harus mampu membedakan apakah gangguan berada pada wilayahnya atau tidak sehingga wilayah yang terdampak gangguan dapat diperoleh sekecil mungkin.

4. Kecepatan (*speed*)

Sistem proteksi harus mampu bekerja dengan cepat ketika terdapat gangguan sehingga gangguan tersebut tidak tembus ke bagian lain di luar zona proteksinya. Untuk itu dibutuhkan koordinasi pada peralatan proteksi sehingga wilayah yang terdampak gangguan dapat diisolasi dengan cepat.

5. Ekonomis (*economic*)

Sistem proteksi yang dipasangkan pada sistem listrik juga harus memperhatikan faktor ekonomisnya. Hal ini diperlukan agar pada implementasinya tidak merugikan perusahaan dari segi investasi namun tetap menjaga syarat-syarat sebelumnya.

Analisis DGA terhadap pemanfaatan fitur fault detection pada LBS Motorised di Penyulang Kaktus UP3 Manokwari mengungkap adanya kesenjangan yang jelas antara kondisi eksisting di lapangan dan kondisi ideal yang seharusnya dicapai dalam sistem penelusuran gangguan permanen. Pada kondisi eksisting, LBS Motorised memang telah terpasang di beberapa titik strategis penyulang, namun fitur fault detection yang seharusnya berfungsi sebagai indikator awal terjadinya arus gangguan belum digunakan secara efektif. Hal ini disebabkan oleh sejumlah faktor, seperti kurangnya pemahaman teknis petugas terhadap parameter kerja FPI, tidak adanya SOP baku untuk membaca, menginterpretasi, dan menindaklanjuti sinyal fault, serta ketidakterhubungan sebagian perangkat dengan sistem SCADA yang menyebabkan informasi fault tidak terekam atau tidak muncul secara real time. Selain itu, pencatatan dan analisis histori fault belum dilakukan secara sistematis sehingga pola gangguan yang sebenarnya dapat menjadi dasar prediksi ataupun perbaikan jangka panjang tidak dapat dimanfaatkan dengan baik.

Di sisi lain, kondisi ideal yang diharapkan adalah sistem di mana setiap LBS Motorised mampu memberikan informasi fault yang akurat, cepat, dan konsisten, baik melalui tampilan lokal maupun melalui integrasi penuh SCADA. Dalam kondisi ideal, indikator fault menjadi alat bantu utama untuk mempersempit lokasi gangguan, sehingga petugas tidak perlu menelusuri seluruh lintasan penyulang yang panjang dan bercabang. Selain itu, pemanfaatan fitur fault detection seharusnya didukung oleh SOP yang jelas, data logging yang baik, analisis trending fault, serta struktur organisasi yang memastikan bahwa informasi fault dapat segera ditindaklanjuti oleh tim operasi dan pemeliharaan. Dengan demikian, terjadi percepatan dalam proses isolasi gangguan, pemulihan suplai, serta peningkatan keandalan penyulang yang tercermin pada penurunan durasi dan frekuensi padam (SAIDI/SAIFI).

Kesenjangan antara kondisi eksisting dan kondisi ideal tersebut menunjukkan perlunya strategi optimalisasi yang menyeluruh. Optimalisasi perlu mencakup aspek teknis seperti kalibrasi sensor fault, perbaikan logika pengukuran, dan peningkatan komunikasi data; aspek operasional berupa penyusunan SOP, alur koordinasi, serta kewajiban analisis pascagangguan; dan aspek SDM berupa pelatihan penggunaan LBS Motorised, interpretasi sinyal FPI, serta pemahaman hubungan FPI dengan mekanisme proteksi penyulang. Melalui penutupan gap ini, fitur fault detection pada LBS Motorised di Penyulang Kaktus dapat berfungsi sesuai tujuan yakni memberikan indikasi cepat, akurat, dan terukur tentang aliran arus gangguan sehingga mempercepat proses troubleshooting di lapangan dan meningkatkan keandalan sistem distribusi secara keseluruhan.

2.1.4 Koordinasi Proteksi

Koordinasi proteksi antara pembangkit dan jaringan distribusi merupakan fondasi utama dalam menjaga keandalan sistem tenaga listrik, khususnya di wilayah seperti Manokwari yang memiliki struktur sistem kelistrikan campuran antara pembangkit skala kecil dan jaringan distribusi berkonfigurasi radial. Pada kondisi ini, gangguan yang terjadi di jaringan distribusi dapat memberikan dampak langsung terhadap kestabilan unit pembangkit, terutama bila proteksi di sisi distribusi tidak mampu bekerja secara selektif. Oleh karena itu, penggunaan fitur *fault detection* pada LBS motorised menjadi elemen penting dalam

memperkuat koordinasi proteksi di sepanjang Penyulang Kaktus. Fitur ini memungkinkan identifikasi lokasi gangguan secara cepat, sehingga relai proteksi pada sisi pembangkit tidak perlu merespons gangguan yang seharusnya menjadi tanggung jawab sistem distribusi.

Di sisi pembangkit, relay proteksi seperti OCR, GFR, diferensial generator, dan proteksi tegangan harus tetap stabil selama gangguan pada jaringan distribusi masih dapat dilokalisasi oleh peralatan distribusi seperti PMT GI, recloser, ataupun LBS. Kerja proteksi pembangkit yang tidak selektif bisa berakibat fatal karena dapat menyebabkan berhentinya suplai daya secara luas. Pemanfaatan fitur *fault detection* pada LBS motorised membantu menghindari kondisi tersebut. Ketika gangguan terjadi di hilir LBS tertentu, perangkat ini akan mendeteksi arus gangguan dan mengirimkan alarm sebelum PMT atau relai pembangkit beroperasi. Dengan demikian, operator SCADA dapat mengonfirmasi bahwa gangguan berada di jaringan distribusi sehingga pembangkit tidak perlu menurunkan daya atau mengaktifkan proteksi cadangan yang bersifat sensitif.

Selain itu, fitur *fault detection* memberikan nilai tambah berupa kemampuan analisis awal terhadap besarnya arus gangguan yang tercatat di titik-titik LBS. Data ini dapat digunakan oleh proteksion engineer untuk mengevaluasi apakah arus gangguan masih dalam batas kemampuan pemutusan PMT GI dan apakah level gangguan tersebut berpotensi memberikan tekanan berlebih pada unit pembangkit. Informasi ini sangat krusial terutama pada sistem kelistrikan lokal yang tersuplai oleh pembangkit diesel atau pembangkit kapasitas kecil. Bila arus gangguan terlalu besar, pembangkit dapat mengalami ketidakseimbangan tegangan, lonjakan arus rotor, atau ketidakstabilan sistem eksitasi. Dengan mengetahui karakteristik gangguan melalui data LBS, koordinasi proteksi dapat disusun lebih baik sehingga setiap perangkat bekerja sesuai zona dan fungsinya.

Penguatan koordinasi proteksi juga terjadi pada sisi distribusi. LBS motorised yang terpasang pada Penyulang Kaktus berfungsi sebagai *sectionalizer* cerdas yang memberikan sinyal indikatif lokasi gangguan. Ketika PMT GI bekerja memutus penyulang, operator SCADA dapat langsung melihat LBS mana yang mendeteksi arus gangguan. Hal ini membantu mempercepat proses isolasi karena zona gangguan dapat ditentukan secara lebih spesifik. Dampaknya adalah waktu penelusuran oleh tim lapangan semakin singkat,

pelanggan pada daerah yang tidak terkena gangguan dapat direstorasi lebih cepat, dan kinerja pembangkit tetap stabil karena tidak terjadi trip berulang akibat gangguan yang tidak jelas lokasinya.

Lebih jauh lagi, integrasi fitur *fault detection* dengan SCADA membuka kesempatan untuk menerapkan sistem analitik atau *fault location estimation* yang lebih maju. Dengan membandingkan data arus gangguan dari beberapa LBS motorised di penyulang yang sama, operator dapat memperkirakan jarak gangguan dari gardu induk, bahkan memprediksi jenis gangguan seperti fasa ke tanah, fasa ke fasa, atau gangguan transient akibat vegetasi. Informasi ini memberikan konteks yang penting bagi pembangkit, karena jenis gangguan tertentu dapat mempengaruhi kestabilan generator, sementara gangguan ringan dapat ditangani tanpa perlu tindakan dari sisi pembangkit. Dengan demikian, koordinasi proteksi menjadi lebih adaptif dan responsif.

Pada akhirnya, optimalisasi fitur *fault detection* pada LBS motorised memperkuat keseluruhan rantai proteksi dari pembangkit hingga pelanggan. Sistem proteksi pembangkit menjadi lebih stabil karena hanya akan merespons gangguan yang benar-benar berada di zona proteksinya. Sistem distribusi menjadi lebih selektif dalam menentukan lokasi gangguan dan lebih cepat dalam proses restorasi, sehingga mengurangi durasi padam dan memperbaiki indeks keandalan seperti SAIDI dan SAIFI. Sinergi ini menciptakan sistem tenaga listrik yang lebih andal, aman, dan efisien di wilayah UP3 Manokwari serta meningkatkan stabilitas operasional baik pada sisi pembangkit maupun jaringan distribusi.

Proteksi antara satu peralatan proteksi dengan proteksi lainnya dibutuhkan agar syarat suatu sistem proteksi dapat terpenuhi. Bila sistem pengamanan tidak bekerja dengan baik, maka kemungkinan yang terjadi adalah wilayah padam meluas hingga dapat mengakibatkan wilayah mengalami blackout. Hal ini tentu saja tidak diinginkan bagi penyedia listrik sehingga diperlukan koordinasi proteksi. Secara umum, terdapat gangguan yang sering terjadi pada sistem distribusi yaitu:

6. Gangguan hubung singkat 3 fasa
7. Gangguan hubung singkat 2 fasa
8. Gangguan hubung singkat 2 fasa ke tanah

9. Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Untuk mengatasi gangguan di atas, diperlukan relai yang mampu mendeteksi jenis gangguan. Relai yang digunakan adalah relai arus lebih atau *Over Current Relay* (OCR) dan relai gangguan tanah atau *Ground Fault Relay* (GFR).

2.1.5 Pengertian Load Break Switch (LBS)

Load Break Switch (LBS) *Motorised* adalah saklar pemutus beban seperti LBS manual namun tidak hanya dapat dioperasikan menggunakan tuas manual tetapi dapat juga dioperasikan secara *local electric* dengan *push button*, maupun secara *remote* jarak jauh. Selain itu LBS *Motorised* juga mempunyai fungsi proteksi sebagai saklar seksi otomatis, sehingga akan secara otomatis memutus beban jika ada gangguan terdeteksi.

Load Break Switch (LBS) merupakan salah satu peralatan switching yang digunakan pada jaringan distribusi tenaga listrik untuk membuka dan menutup rangkaian listrik dalam kondisi berbeban. Peralatan ini dirancang agar dapat memutus arus beban normal secara aman tanpa menimbulkan kerusakan pada sistem. LBS biasanya digunakan pada jaringan tegangan menengah sebagai bagian dari sistem pengoperasian dan pengendalian jaringan distribusi. Secara umum, LBS berfungsi sebagai alat pemisah atau penghubung jaringan listrik yang memungkinkan operator untuk melakukan pengaturan aliran daya listrik sesuai kebutuhan sistem. LBS berbeda dengan circuit breaker karena tidak dirancang untuk memutus arus gangguan yang sangat besar seperti arus hubung singkat. Namun demikian, LBS memiliki kemampuan yang sangat penting dalam pengoperasian jaringan distribusi, terutama dalam proses manuver jaringan dan isolasi gangguan. Penggunaan LBS pada sistem distribusi listrik memberikan banyak keuntungan, antara lain meningkatkan fleksibilitas operasi jaringan, mempercepat penanganan gangguan, serta mengurangi luas wilayah yang mengalami pemadaman. Dengan demikian, LBS menjadi salah satu components utama dalam sistem distribusi tenaga listrik modern.

2.1.6 Fungsi Load Break Switch (LBS)

Load Break Switch memiliki beberapa fungsi penting dalam sistem distribusi tenaga listrik. Fungsi utama dari LBS adalah untuk membuka dan menutup jaringan listrik pada kondisi berbeban normal. Kemampuan ini memungkinkan operator untuk melakukan pengaturan jaringan tanpa harus memadamkan seluruh sistem distribusi. Selain itu, LBS juga digunakan dalam proses manuver jaringan distribusi. Manuver jaringan dilakukan untuk mengalihkan suplai listrik dari satu jalur ke jalur lainnya ketika terjadi gangguan atau saat dilakukan pemeliharaan jaringan. Dengan adanya LBS, proses pengalihan beban dapat dilakukan dengan cepat dan efisien. Fungsi lain dari LBS adalah sebagai alat isolasi jaringan. Ketika terjadi gangguan pada suatu bagian jaringan, operator dapat membuka LBS yang berada di sekitar lokasi gangguan sehingga bagian jaringan yang bermasalah dapat dipisahkan dari sistem. Hal ini bertujuan untuk mencegah gangguan menyebar ke seluruh jaringan distribusi.

2.1.7 Fungsi LBS dalam Keandalan Sistem Distribusi

Keandalan sistem distribusi tenaga listrik sangat dipengaruhi oleh kemampuan sistem dalam menangani gangguan dengan cepat dan efektif. LBS berperan penting dalam meningkatkan keandalan sistem karena memungkinkan operator untuk mengisolasi gangguan dengan segera. Dengan adanya LBS, waktu pemulihan jaringan dapat dipersingkat karena operator dapat langsung melakukan manuver jaringan untuk mengembalikan suplai listrik ke pelanggan yang tidak terdampak gangguan. Hal ini sangat penting dalam meningkatkan kualitas pelayanan listrik serta menurunkan indeks gangguan pada sistem distribusi. Selain itu, LBS juga membantu dalam mengurangi luas wilayah yang mengalami pemadaman listrik. Dengan mengisolasi bagian jaringan yang mengalami gangguan, bagian jaringan lainnya tetap dapat beroperasi secara normal. Hal ini memberikan keuntungan bagi perusahaan penyedia listrik maupun pelanggan.

2.1.8 Fungsi LBS dalam Pemeliharaan Jaringan

LBS juga memiliki peranan penting dalam kegiatan pemeliharaan jaringan distribusi

tenaga listrik. Ketika dilakukan pekerjaan perawatan atau perbaikan pada jaringan listrik, bagian jaringan yang akan diperbaiki dapat dipisahkan terlebih dahulu menggunakan LBS. Hal ini bertujuan untuk menjamin keselamatan petugas serta mencegah terjadinya kecelakaan kerja. Penggunaan LBS dalam proses pemeliharaan juga memungkinkan pekerjaan dilakukan tanpa harus memadamkan seluruh jaringan distribusi. Dengan demikian, pelanggan tetap dapat menikmati suplai listrik meskipun sedang dilakukan pekerjaan pemeliharaan pada sebagian jaringan

2.1.9 Jenis-Jenis Load Break Switch (LBS)

- **LBS Manual**

LBS manual merupakan jenis LBS yang dioperasikan secara langsung oleh petugas dilapangan menggunakan tuas atau mekanisme penggerak manual. Pengoperasian LBS jenis ini membutuhkan kehadiran petugas di lokasi peralatan untuk membuka atau menutup sakelar.

Meskipun masih banyak digunakan, LBS manual memiliki keterbatasan dalam hal kecepatan penanganan gangguan karena proses pengoperasian memerlukan waktu untuk menuju lokasi peralatan. Namun demikian, LBS manual tetap menjadi pilihan pada jaringan distribusi yang belum dilengkapi dengan sistem otomasi.

- **LBS Motorised**

LBS motorised merupakan pengembangan dari LBS manual yang dilengkapi dengan motor penggerak sehingga dapat dioperasikan secara otomatis atau dari jarak jauh. Dengan adanya motor penggerak, LBS dapat dikendalikan melalui sistem pengendalian seperti SCADA.

Penggunaan LBS motorised memberikan banyak keuntungan, terutama dalam hal kecepatan penanganan gangguan dan efisiensi operasional. Operator di pusat pengendalian dapat langsung melakukan manuver jaringan tanpa harus menunggu petugas datang ke lokasi.

Load Break Switch (LBS) *Motorised* adalah saklar pemutus beban seperti LBS

manual namun tidak hanya dapat dioperasikan menggunakan tuas manual tetapi dapat juga dioperasikan secara *local electric* dengan *push button*, maupun secara *remote* jarak jauh. Selain itu LBS *Motorised* juga mempunyai fungsi proteksi sebagai saklar seksi otomatis, sehingga akan secara otomatis memutus beban jika ada gangguan terdeteksi.

Berikut adalah jenis-jenis LBS (Load Break Switch) yang umum digunakan pada sistem distribusi tenaga listrik tegangan menengah (20 kV):

1. LBS Manual
LBS yang dioperasikan secara manual menggunakan tuas atau handle oleh petugas di lapangan untuk membuka dan menutup jaringan saat berbeban.
2. LBS Motorised
LBS yang dilengkapi motor penggerak (motor actuator) sehingga dapat dioperasikan dari jarak jauh melalui panel kontrol atau sistem SCADA.
3. LBS Outdoor
LBS yang dipasang di luar ruangan (biasanya di tiang jaringan distribusi 20 kV).

Load Break Switch (LBS) adalah peralatan switching pada jaringan distribusi tegangan menengah (umumnya 20 kV) yang berfungsi untuk melakukan manuver jaringan dalam kondisi berbeban normal, seperti membuka dan menutup penyulang, membagi atau memindahkan beban antar feeder, mengisolasi bagian jaringan saat pemeliharaan, serta membatasi area padam ketika terjadi gangguan agar kontinuitas suplai tetap terjaga. Secara prinsip kerja, LBS terdiri dari kontak tetap dan kontak bergerak yang dioperasikan melalui mekanisme pegas (spring mechanism) baik secara manual maupun motorised; pada kondisi close, kontak menyatu sehingga arus mengalir dari sisi incoming ke outgoing, sedangkan saat dilakukan perintah open, energi mekanis dari pegas atau motor actuator memisahkan kontak secara cepat sehingga timbul busur api (arc) akibat pemutusan arus beban, yang kemudian dipadamkan oleh media pemadam seperti udara (air break), gas SF₆, atau vacuum interrupter untuk mencegah kerusakan kontak dan mempertahankan kemampuan isolasi. LBS tidak dirancang untuk memutus arus hubung singkat besar seperti circuit breaker, namun dalam praktiknya dapat dikombinasikan dengan fuse atau relay proteksi eksternal; pada sistem distribusi modern, LBS motorised yang terintegrasi SCADA memungkinkan operasi jarak jauh, monitoring posisi (open/close), serta percepatan proses fault isolation

dan service restoration sehingga meningkatkan keandalan dan efisiensi penanganan gangguan pada penyulang.

Dalam perkembangan sistem tenaga listrik saat ini, penggunaan LBS menjadi semakin penting terutama dalam mendukung implementasi jaringan listrik pintar atau smart grid. LBS yang dilengkapi dengan sistem otomasi memungkinkan pengoperasian jaringan dilakukan secara lebih cepat, efisien, dan akurat. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan LBS yang dilengkapi dengan fitur deteksi gangguan dapat meningkatkan kecepatan penanganan gangguan pada jaringan distribusi. Selain itu, penerapan LBS motorised juga terbukti mampu meningkatkan efisiensi operasional serta menurunkan indeks gangguan pada sistem distribusi listrik. Penelitian mengenai optimalisasi penggunaan LBS juga menunjukkan bahwa teknologi ini memiliki potensi besar dalam mendukung pengembangan sistem distribusi tenaga listrik yang lebih modern dan andal. Selain itu, integrasi LBS dengan sistem monitoring jaringan memungkinkan operator untuk memantau kondisi jaringan secara real time. Hal ini sangat membantu dalam proses pengambilan keputusan serta dalam upaya meningkatkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

2.2.1 Cara Kerja Load Break Switch (LBS)

- **Prinsip Kerja LBS**

Prinsip kerja Load Break Switch pada dasarnya adalah membuka dan menutup kontak listrik untuk mengatur aliran daya pada jaringan distribusi. Ketika LBS dalam kondisi tertutup (close), arus listrik akan mengalir melalui jaringan distribusi menuju pelanggan. Sebaliknya, ketika LBS dalam kondisi terbuka (open), aliran listrik akan terputus sehingga bagian jaringan tertentu dapat diisolasi.

Proses pemutusan arus listrik pada LBS dirancang agar dapat dilakukan dengan aman meskipun dalam kondisi berbeban. Hal ini dimungkinkan karena LBS dilengkapi dengan sistem pemadam busur api yang berfungsi untuk menghilangkan busur listrik yang muncul saat proses pemutusan arus.

- **Proses Pembukaan (Opening)**

Proses pembukaan LBS dilakukan ketika operator ingin memutus aliran listrik pada suatu bagian jaringan. Ketika LBS dibuka, kontak utama di dalam peralatan akan terpisah sehingga arus listrik tidak dapat mengalir. Proses ini biasanya dilakukan saat terjadi gangguan pada jaringan atau ketika dilakukan pekerjaan pemeliharaan. Pada LBS motorised, proses pembukaan dapat dilakukan secara otomatis dari pusat pengendalian sistem. Hal ini memungkinkan proses isolasi gangguan dilakukan dengan lebih cepat.

- **Proses Penutupan (Closing)**

Proses penutupan LBS dilakukan ketika operator ingin mengalirkan kembali listrik ke suatu bagian jaringan. Ketika LBS ditutup, kontak utama akan saling terhubung sehingga arus listrik dapat kembali mengalir ke jaringan distribusi.

Proses ini harus dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi sistem agar tidak terjadi lonjakan arus yang dapat merusak peralatan jaringan

- **Sistem Pemadam Busur Api**

Pada saat pemutusan arus listrik, biasanya akan muncul busur listrik yang dapat merusak kontak sakelar. Oleh karena itu, LBS dilengkapi dengan sistem pemadam busur api. Sistem ini dapat berupa gas, vakum, atau udara yang berfungsi untuk memadamkan busur listrik dengan cepat.

Sistem pemadam busur ini sangat penting untuk menjaga keandalan peralatan serta memperpanjang umur operasional LBS.

2.2.2 Optimalisasi Pemanfaatan Fitur Fault Detection pada LBS Motorised

- **Konsep Optimalisasi dalam Sistem Distribusi Tenaga Listrik**

Optimalisasi dalam sistem distribusi tenaga listrik merupakan upaya untuk meningkatkan kinerja sistem agar lebih efektif, efisien, dan andal dalam menyalurkan energi listrik kepada pelanggan. Proses optimalisasi dilakukan dengan memanfaatkan teknologi, sistem monitoring, serta peralatan yang tersedia secara

maksimal untuk mengurangi gangguan dan meningkatkan kualitas pelayanan listrik. Dalam jaringan distribusi modern, optimalisasi tidak hanya dilakukan pada aspek teknis, tetapi juga pada aspek operasional dan manajemen sistem.

Pada jaringan distribusi tegangan menengah, gangguan listrik merupakan salah satu permasalahan utama yang sering terjadi. Gangguan tersebut dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti cuaca ekstrem, kerusakan peralatan, gangguan hewan, maupun gangguan akibat aktivitas manusia. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem yang mampu mendeteksi gangguan secara cepat dan akurat agar proses penanganan dapat dilakukan dengan lebih efektif.

Optimalisasi pemanfaatan fitur fault detection pada LBS motorised menjadi salah satu solusi yang dapat diterapkan dalam meningkatkan keandalan sistem distribusi listrik. Dengan memanfaatkan fitur ini secara maksimal, operator dapat memperoleh informasi mengenai lokasi gangguan secara lebih cepat sehingga proses penelusuran gangguan dapat dilakukan secara efisien.

Selain itu, optimalisasi juga bertujuan untuk meminimalkan waktu pemadaman listrik yang dialami oleh pelanggan. Semakin cepat gangguan terdeteksi dan ditangani, maka semakin kecil dampak yang ditimbulkan terhadap sistem distribusi listrik secara keseluruhan

- **Pengertian Fault Detection pada Sistem Distribusi**

Fault detection merupakan suatu metode atau teknologi yang digunakan untuk mendeteksi adanya gangguan pada sistem tenaga listrik. Gangguan yang dimaksud dapat berupa hubung singkat, gangguan tanah, maupun gangguan lainnya yang dapat mempengaruhi kinerja sistem distribusi listrik.

Dalam sistem distribusi tenaga listrik, fault detection memiliki peranan yang sangat penting karena membantu operator dalam mengidentifikasi lokasi gangguan secara lebih cepat. Tanpa adanya sistem deteksi gangguan, proses pencarian gangguan biasanya dilakukan secara manual yang membutuhkan waktu cukup lama.

Fitur fault detection pada LBS motorised bekerja dengan cara mendeteksi arus

gangguan yang melewati jaringan distribusi. Ketika terjadi gangguan, perangkat akan memberikan indikasi berupa sinyal atau alarm yang menunjukkan bahwa terdapat gangguan pada jaringan listrik.

Dengan adanya fitur ini, operator dapat segera melakukan tindakan yang diperlukan untuk mengisolasi gangguan serta memulihkan sistem distribusi listrik.

Berikut penjelasan lengkap mengenai fungsi dan cara kerja LBS (Load Break Switch) pada sistem distribusi tegangan menengah (umumnya 20 kV):

Fungsi LBS:

- (1) Melakukan manuver jaringan distribusi 20 kV dalam kondisi berbeban normal (open–close penyulang),
- (2) Mengisolasi bagian jaringan saat pemeliharaan atau ketika terjadi gangguan agar area padam lebih terbatas (sectionalizing),
- (3) Membagi atau memindahkan beban antar penyulang untuk menjaga keseimbangan sistem,
- (4) Mendukung peningkatan keandalan sistem distribusi melalui skema loop atau tie switch,
- (5) Pada tipe motorised, memungkinkan pengoperasian jarak jauh dan integrasi SCADA untuk mempercepat fault isolation dan service restoration;

Cara Kerja LBS:

- (1) Pada posisi **close**, kontak tetap dan kontak bergerak saling terhubung sehingga arus mengalir dari sisi incoming ke outgoing,
- (2) Saat perintah **open** diberikan (manual atau motor actuator), mekanisme pegas bekerja cepat memisahkan kontak,
- (3) Pemisahan kontak menimbulkan busur api (arc) akibat pemutusan arus beban,
- (4) Busur api dipadamkan oleh media pemadam seperti udara (air break), gas SF₆, atau vacuum interrupter sehingga mencegah kerusakan kontak dan menjaga kemampuan isolasi,
- (5) Setelah busur padam, terbentuk celah isolasi yang aman dan arus berhenti mengalir,
- (6) LBS tidak dirancang untuk memutus arus hubung singkat besar seperti circuit breaker,

sehingga biasanya dilengkapi fuse atau proteksi eksternal untuk pengamanan gangguan arus lebih.



Gambar 2.3 Panel LBS Motorised

Dalam segi operasi, LBS *Motorised* dapat dioperasikan dengan 3 cara berikut:

1. Secara *local electric*, LBS dilengkapi dengan *push-button* untuk dapat dioperasikan

melalui panel kontrol secara *electric*

2. Secara *remote*, memungkinkan untuk dapat dioperasikan secara jarak jauh yang dilengkapi dengan sakelar *local remote* untuk mengunci pengoperasian jarak jauh
3. Secara manual, dioperasikan menggunakan kait *stick* ataupun tuas

Dalam segi proteksi, LBS *Motorised* memanfaatkan fungsi proteksi Saklar Seksi Otomatis (SSO), dimana SSO sebagai alat pemutus rangkaian/beban otomatis untuk memisah- misahkan saluran utama dalam beberapa seksi, agar pada keadaan gangguan permanen, luas daerah (jaringan) yang harus dibebaskan di sekitar lokasi gangguan sekecil mungkin.

2.1.10 *System Average Interruption Duration Index (SAIDI)*

SAIDI merupakan nilai rata-rata dari lamanya pemadaman listrik setiap pelanggan selama periode waktu tertentu pada pelanggan dalam suatu sistem secara keseluruhan. Untuk melihat kinerja dari perusahaan ketenagalistrikan, PT PLN (PERSERO) salah satunya menggunakan SAIDI sebagai indikator keandalan sistem distribusi. Perhitungan SAIDI sesuai surat edaran Direksi PT PLN (PERSERO) No. 0004.E/DIR/2014 mengenai ketentuan analisa dan evaluasi keandalan penyediaan tenaga listrik serta perhitungan SAIDI. Nilai SAIDI dapat diformulasikan sebagai berikut:

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

Apabila dari hasil perhitungan ditemukan semakin kecil nilai SAIDI, maka mengindikasikan semakin andal pasokan listrik yang diberikan.

2.1.11 *Energi Not Served (ENS)*

Energy Not Served (ENS) merupakan parameter untuk mengukur berapa besar energi yang tidak terjual akibat suatu hal. Salah hal yang dapat diukur nilai ENS nya adalah ketika terjadi padam listrik. Dalam rentang waktu padam tersebut, dapat dihitung berapa energi yang tidak bisa terjual ketika listrik padam. Perhitungan ENS dalam kWh dapat menggunakan perhitungan sebagai berikut [6]:

$$ENS = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos(\theta) \times duration(h)$$

Keterangan :

V : Tegangan (V)

I : Arus (A)

$\cos(\theta)$: Faktor Daya

H : Durasi dalam jam

2.2 Penelitian Terkait

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurna, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut :

Penelitian tahun 2019 dengan judul *Optimalisasi LBS Motorised Keypoint* pada Jaringan Distribusi 20 kV untuk Meningkatkan Keandalan Sistem. Penelitian ini dilakukan di penyulang 20 kV loop Gunung Agung yang berpasangan dengan penyulang Cokro yang berlokasi di Area Bali Selatan namun pengaturan system 20 kVnya dilakukan oleh PT PLN (Persero) Unit Induk Distribusi Bali, Unit Pelaksana Pengatur Distribusi Bali, Kecamatan Denpasar Barat Kota Denpasar Provinsi Bali. Pada loop Penyulang Cokro diperoleh tingkat SAIDI sebelum LBS dioptimalisasi adalah sebesar 1,182 jam/pelanggan dan ENS nya sebesar 2.455,88 KWH. Sedangkan dengan LBS yang sudah dioptimalisasi diperoleh tingkat SAIDI sebesar 0,414 jam/pelanggan dan ENS nya sebesar 910,85 KWH. Dengan selisih perhitungan pada system loop Cokro sebelum dan sesudah LBS Motorized di Optimalisasi maka diperoleh tingkat SAIDI sebesar 0,768 jam/pelanggan dan ENS nya sebesar 1.545,03 KWH. Selisih tersebut menunjukkan dengan menggunakan LBS Motorized yang sudah dioptimalisasi di sistem loop penyulang Cokro maka tingkat keandalan sistem pada penyulang akan lebih baik [7].

Penelitian tahun 2020 menjelaskan tentang Pengaruh Penerapan Fdir (Fault Detection Isolation Restoration) Pada Penyulang Cpk13 & Bdr03 Di Pt Pln (Persero) Up2d Kskt. Pada loop penyulang CPK13 & BDR03 ketika mengalami gangguan jaringan SUTM dilakukan

perhitungan waktu dan diperoleh durasi waktu Isolasi dan restorasi / pemulihan, baik sebelum maupun sesudah menggunakan sistem FDIR. Selisih tersebut dapat menunjukkan hasil dari penerapan sistem FDIR pada penyulang CPK13 dan BDR03. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui lama waktu yang dibutuhkan dalam melakukan isolasi dan restorasi/pemulihan terhadap gangguan jaringan distribusi dengan menggunakan sistem FDIR maupun dengan menggunakan sistem manual/konvensional pada Penyulang CPK13 dan BDR03 dan bagaimana meningkatkan kehandalan sistem tenaga listrik di Wilayah Kalsel dan Kalteng dengan mempercepat proses penormalan gangguan maupun manuver beban dihitung dari menurunkan SAIDI, dan mengurangi ENS (Energy Not Sale). Sistem FDIR diterapkan pada Penyulang CPK13 dapat mengurangi beban padam rata – rata 74,78%, durasi pemulihan lebih cepat rata – rata 62,33%, mengurangi SAIDI sebesar 99,80%, mengurangi ENS sebesar 98,60%, dan pada Penyulang BDR03 dapat mengurangi beban. padam rata – rata 73,36%, durasi pemulihan lebih cepat rata – rata 80,03%, mengurangi SAIDI sebesar 99,30%, mengurangi ENS sebesar 98,08% [8]. Dari beberapa penelitian yang dirujuk dapat disimpulkan bahwa pengaruh optimalisasi/pemanfaatan fitur fault detection pada LBS Motorised sangat berpengaruh untuk keandalan sistem distribusi 20 kV. Pada penelitian ini menganalisa LBS Motorised yang ada di Penyulang Kaktus hasil dari analisa berupa laporan berupa persentase penurunan SAIDI di Penyulang Kaktus.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu Terkait Optimalisasi *LBS Motorised & Fault Detection*

N o	Peneliti / Tahun	Judul Penelitian	Lokasi Penelitian	Metode / Fokus Penelitian	Hasil Utama	Relevansi dengan Penelitian Ini
1	Penelitian 2019	Optimalisasi LBS Motorised Keypoint pada Jaringan Distribusi 20 kV untuk Meningkatkan Keandalan Sistem	Penyulang 20 kV Loop Gunung Agung – Cokro, UID Bali	Evaluasi sebelum– sesudah optimasi LBS motorised; analisis SAIDI & ENS	SAIDI turun dari 1,182 → 0,414 jam / pelanggan; ENS turun dari 2.455,88 → 910,85 kWh; peningkatan keandalan signifikan	Menunjukkan bahwa optimalisasi LBS motorised mampu mengurangi area padam & meningkatkan keandalan penyulang

						secara signifikan
2	Penelitian 2020	Pengaruh Penerapan FDIR (Fault Detection Isolation Restoration) Pada Penyulang CPK13 & BDR03	PT PLN UP2D Kalselteng (KS-KT)	Perbandingan waktu isolasi–restorasi sebelum dan sesudah FDIR; analisis SAIDI & ENS	Penyulang CPK13: SAIDI turun 99,80%, ENS turun 98,60%. Penyulang BDR03: SAIDI turun 99,30%, ENS turun 98,08%; restorasi lebih cepat 62–80%	Membuktikan sistem fault detection & otomatisasi mempercepat penormalan, membantu identifikasi gangguan, dan meningkatkan keandalan jaringan
3	Penelitian ini (2025)	Optimalisasi Pemanfaatan Fitur Fault Detection LBS Motorised sebagai Indikator Monitoring Penelusuran Penyebab Gangguan di Penyulang Kaktus UP3 Manokwari	UP3 Manokwari – Penyulang Kaktus 20 kV	Analisis event <i>fault detection</i> LBS motorised; integrasi SCADA; perbandingan SAIDI sebelum–sesudah; evaluasi efektivitas indikator gangguan	Menghasilkan persentase penurunan SAIDI, percepatan identifikasi lokasi gangguan, dan peningkatan keandalan distribusi 20 kV	Melanjutkan dan memperluas penelitian sebelumnya dengan fokus pada pemanfaatan <i>fault indicator</i> LBS motorised sebagai alat bantu monitoring & penentuan zona gangguan

Tabel 2.2 Ringkasan Dampak Penelitian Terdahulu terhadap Keandalan Sistem Distribusi

Penelitian	Teknologi / Sistem	Parameter yang Dianalisis	Hasil Penurunan SAIDI	Hasil Penurunan ENS	Kesimpulan Dampak
------------	--------------------	---------------------------	-----------------------	---------------------	-------------------

Penelitian 2019	LBS Motorised (Keypoint)	SAIDI, ENS, manuver beban	1,182 → 0,414 (↓ 0,768 jam/pelanggan)	2.455,88 → 910,85 (↓ 1.545,03 kWh)	Optimalisasi LBS meningkatkan keandalan sistem loop
Penelitian 2020	FDIR (Fault Detection, Isolation, Restoration)	Waktu isolasi/restorasi, SAIDI, ENS	Turun hingga 99%	Turun hingga 98%	FDIR sangat efektif mempercepat penormalan dan menurunkan dampak gangguan
Penelitian ini (2025)	LBS Motorised – Fault Detection	Akurasi deteksi gangguan, waktu identifikasi, SAIDI Penyulang Kaktus	(Hasil akan ditentukan dalam penelitian)	(Hasil akan ditentukan dalam penelitian)	Fault detection LBS dapat menjadi indikator kuat untuk pelokalan gangguan dan peningkatan keandalan

2.3 Kerangka Pemikiran

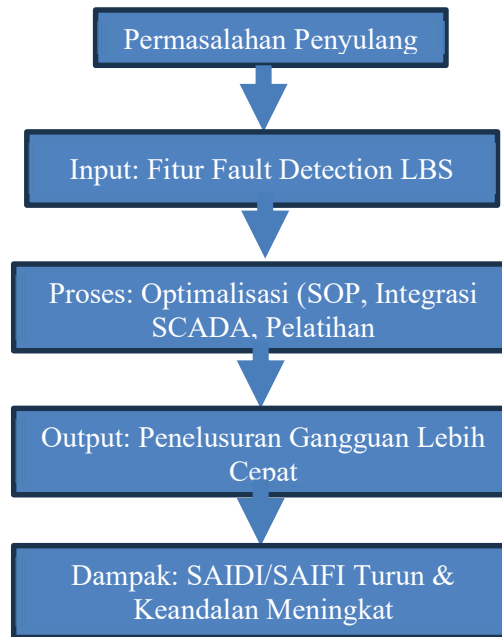
Penyulang distribusi tenaga listrik merupakan komponen penting dalam sistem distribusi yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk ke pelanggan melalui jaringan tegangan menengah. Gangguan permanen pada penyulang dapat menyebabkan padamnya aliran listrik ke pelanggan, menurunkan kualitas pelayanan, dan berdampak pada keandalan sistem distribusi. Salah satu tantangan dalam penanganan gangguan permanen adalah lamanya waktu penelusuran lokasi gangguan, terutama pada jaringan yang memiliki lintasan panjang dan bercabang. Saat terjadi gangguan, sistem proteksi akan bekerja memutus aliran listrik, namun penelusuran lokasi gangguan secara manual seringkali memakan waktu karena tidak adanya petunjuk awal yang jelas.

Di sinilah peran fitur fault detection pada LBS (Load Break Switch) Motorised menjadi penting. LBS Motorised yang dilengkapi dengan indikator fault atau fault passage indicator (FPI) dapat memberikan sinyal atau tanda apabila arus gangguan melewati titik tersebut. Dengan memanfaatkan fitur ini secara optimal, petugas dapat mempercepat identifikasi segmen jaringan yang terpapar gangguan, sehingga area pencarian bisa dipersempit secara sistematis. Namun, berdasarkan pengamatan awal di lapangan, fitur fault detection pada LBS

Motorised belum dimanfaatkan secara maksimal, baik karena kurangnya pemahaman teknis, belum adanya SOP yang jelas, atau keterbatasan integrasi ke sistem monitoring seperti SCADA. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu upaya optimalisasi, baik dari segi teknis pemanfaatan, prosedur operasional, maupun pelatihan petugas, agar indikator fault pada LBS dapat benar-benar berfungsi sebagai alat bantu utama dalam proses penelusuran gangguan.

Penelitian ini mengambil studi kasus pada Penyulang Kaktus, karena penyulang ini memiliki karakteristik yang kompleks, seperti lintasan panjang, banyak cabang, serta histori gangguan permanen yang relatif tinggi. Dengan melakukan analisis terhadap kinerja LBS Motorised di penyulang ini sebelum dan sesudah dilakukan optimasi pemanfaatan fitur fault detection, diharapkan dapat diperoleh model pemanfaatan fault detection yang efektif untuk mempercepat penelusuran dan penanganan gangguan permanen. Gambaran hubungan antar variabel dalam penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Variabel input: Fitur fault detection pada LBS Motorised.
- Variabel proses: Strategi optimalisasi pemanfaatan (SOP, pelatihan, integrasi SCADA/manual).
- Variabel output: Kecepatan penelusuran gangguan permanen.
- Variabel dampak: Peningkatan keandalan penyulang (SAIDI/SAIFI menurun), percepatan pemulihan layanan ke pelanggan.



Gambar 2.4 Balok Diagram