BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 A Gambaran Umum Perusahaan

PT. Fajar Surya Wisesa, Tbk atau yang lebih dikenal dengan entitas PT. Fajar Paper, Tbk, didirikan pada 13 Juni 1987 dan memulai kegiatan usaha komersialnya pada 1989. Perusahaan ini memiliki anak usaha sejenis, yaitu PT. Dayasa Aria Prima. Kantor pusat kedua unit usaha tersebut berlokasi di Jalan Abdul Muis No. 30, Jakarta. Sementara itu, kedua pabrik pengolahan kertas masing-masing berlokasi di Jalan Gardu Sawah RT 001/01, Kalijaya, Cikarang Barat, Kabupaten Bekasi, serta di Kawasan industri Gresik, Surabaya.

Berdasarkan tujuan dasar pendiriannya, ruang lingkup kegiatan produksi PT. Fajar Paper, Tbk. meliputi usaha produksi kertas kemasan. Pabrik pengolahan tersebut menghasilkan berbagai tipe kertas yang diminati oleh konsumen. Adapun jenis kertas yang dihasilkan dari pengolahan bahan baku kertas daur ulang (*recycle paper*) meliputi jenis *Kraft Liner Board (KLB)* dan *Corrugated Medium Paper (CMP)* yang dipakai sebagai bahan dasar pembuatan kotak kemasan karton, serta tipe lain yang diproduksi dengan jenis *Coated Duplex Board (CDB)*.

1.1 B Lingkungan Perusahaan (*Organizational Enviroment*)

Hasil olahan utama yang dihasilkan dari industri pengolahan kertas di PT. Fajar Paper, Tbk. menggunakan sumber bahan baku dari kertas bekas pakai *(recycle paper).* Jenis kertas bekas yang digunakan adalah kertas kemasan yang aplikasinya banyak dipakai di berbagai sektor industri makanan dan minuman. Untuk operasional seluruh peralatan industri, PT. Fajar Paper, Tbk. menggunakan sumber energi listrik internal dan eksternal. Konsumsi energi utama tersebut digunakan untuk mendukung proses produksi dengan memanfaatkan energi uap panas yang dihasilkan dari beberapa tipe thermal boiler.

Pasokan energi internal berasal dari pembangkitan mandiri yang terdiri atas tiga unit mesin turbin pembangkit listrik dengan memanfaatkan output generatornya. Ketiga unit pembangkitan tersebut terdiri atas dua unit Gas Turbine (GT) dengan bahan bakar gas yang bercampur dengan udara terkompresi. Proses ini menghasilkan ledakan di ruang bakar yang mendorong sudu-sudu turbin untuk memutar generator berkapasitas 45 MVA secara paralel. Sementara itu, satu unit Steam Turbine Generator (STG) menggunakan uap panas dari boiler berbahan bakar batu bara sebagai penggerak sudu-sudu turbin.

Selain itu, PT. Fajar Paper, Tbk. juga memanfaatkan sumber energi *eksternal* dari PLN. Penggunaan energi *eksternal* dilakukan di titik hubung PCC *(Point of Common Coupling)* pada jaringan tegangan tinggi 150 kV Gardu Induk PLN (GI)) yang ter interkoneksi dengan sistem jaringan Jawa-Bali *(National Grid 150 kV)* dengan sisi *Fajar Grid Connection 150 kV (Switchyard Fajar)*. Pemanfaatan energi thermal dilakukan melalui tujuh unit boiler yang menghasilkan uap panas bertekanan dengan total produksi mencapai 555 ton/jam. Energi uap tersebut dimanfaatkan untuk proses pengolahan bahan

mentah menjadi bubur kertas (pulp), serta digunakan untuk menghasilkan energi listrik melalui unit Steam Turbine Generator.

1.2 Latar Belakang Masalah *(Research Backgroud))*

PT. Fajar Paper, Tbk sebagai salah satu perusahaan terbesar di industri kertas box *(packaging)* Indonesia, sangat bergantung pada keberlanjutan dan kestabilan pasokan energi listrik. Sistem kelistrikan perusahaan ini memiliki konfigurasi hibrida yang bersumber dari pasokan eksternal melalui jaringan interkoneksi nasional (national grid) pada sisi tegangan 150 kV, serta sumber internal dari Captive Power Plant. Pembangkitan internal tersebut menggunakan dua unit Gas Turbine Generator (GTG) produksi General Electric dengan kapasitas masing-masing 45MVA, dan satu unit Steam Turbine Generator (STG) produksi Shandong, China, berkapasitas 75 MVA. Rata-rata output energi yang dibangkitan dan di konsumsi untuk kebutuhan pabrik adalah sebesar 80 MW ditambah dengan cadangan daya external (sebagai backup power supply) dengan kapasitas transformator distribusi terpasang sebesar 50 MVA atau 40 MW. Meskipun total kebutuhan energi listrik harian pabrik saat seluruh pabrik beroperasi normal mencapai 93MW dapat terpenuhi dan masih memiliki cadangan daya namun kontinuitas pasokan energi menjadi aspek yang sangat krusial dan realitas di lapangan menunjukkan adanya kendala ketidakstabilan sistem saat menerima gangguan dari *external* maupun *internal*.

Sering terjadi pemadaman total (blackout) akibat dampak ketidak seimbangan sistem *(unstability)* saat menerima masuknya arus gangguan kedalam sistem. Pada kondisi tersebut, setiap generator berupaya menyeimbangkan beban melalui peralatan kontrol turbin, yaitu sistem *Governor* dan *Automatic Voltage Regulator (AVR)* yang mengatur eksitasi generator. Proses ini menimbulkan ayunan beban *(swing load)* yang memicu kenaikan arus beban secara cepat dalam durasi singkat (Muhamad Fikri, 2025). Fenomena ini sering terjadi saat gangguan hubung singkat atau pelepasan titik sinkron pada pembangkit yang terhubung ke jaringan interkoneksi (Abdurrohim et al., 2024). Gangguan tersebut berdampak pada penurunan nilai tegangan dan frekuensi secara cepat hingga mencapai ambang batas minimum, yang berimplikasi pada terjadinya kondisi voltage sag pada jaringan transmisi 150 kV *(Pradyumna Kumar Behera & Monalisa Pattnaik, 2024; Raj Kumar Chaudhari & Anurag Verma, 2023)*. Analisis dan investigasi menunjukkan bahwa blackout disebabkan oleh dua kategori gangguan (Risqi & Sunardiyo, 2024):

1. Gangguan *eksternal* berupa kedip tegangan *(voltage sag)* dari jaringan interkoneksi, seperti gangguan hubung singkat pada sistem transmisi 150 kV milik PLN di titik gangguan yang jauh. Kondisi ini paling sering terjadi akibat terlepasnya titik sinkron generator berkapasitas besar yang memicu penurunan frekuensi secara mendadak pada jaringan interkoneksi yang terhubung dengan PT. Fajar Paper, Tbk. Gangguan tersebut dapat memicu aktivasi sistem proteksi secara berantai sehingga menyebabkan ketidakstabilan pada sistem distribusi dan pembangkitan. Hal ini berujung pada terlepasnya (trip) sistem pembangkitan captive di PT. Fajar Paper, Tbk, meskipun terdapat dukungan daya cadangan *(backup supply)* yang terhubung dari *grid 150 kV PLN*.

2. Gangguan *internal* berupa hubung singkat *(short circuit)* di sisi beban *(downstream)* distribusi dapat memicu ketidakseimbangan pada sistem

pembangkitan dan produksi uap *(steam generation)*. Contoh gangguan pada sisi terdekat antara lain adalah terjadinya hubung singkat pada sisi bus-feeder utama di bagian 20 kV-MV-*Switchgear* atau sisi 3,3 kV/MV-MCC. Kondisi ini menyebabkan timbulnya arus hubung singkat yang cukup besar *(sub-transient)* secara langsung menuju generator, sehingga memicu aktifnya sistem proteksi untuk melindungi peralatan dari kerusakan. Dampak dari kondisi tersebut dapat menyebabkan penghentian mendadak *(shutdown)* pada unit pembangkitan.

Sementara itu, gangguan pada sisi terjauh dapat menimbulkan arus transien yang tinggi serta arus balik *(backfeed current)* akibat adanya daya balik (reverse power) yang mengganggu kestabilan tegangan generator. Dalam beberapa kasus, gangguan ini menyebabkan sistem pemantauan distribusi *Power Management System* (*PMS*) gagal melakukan pelepasan beban *(load shedding)* secara tepat sasaran dan cepat. Perangkat sistem proteksi *Is-Limiter* terkadang tidak aktif secara efektif untuk memutus rangkaian feeder saat arus gangguan melintasi zona cakupan proteksinya, sehingga arus gangguan transien yang bernilai besar akan mengalir menuju generator. Selain itu, perangkat *Is-Limiter* dapat aktif secara tidak selektif, yang justru memicu pemutusan total sistem *(blackout*) karena salah satu unit generator keluar dari sistem. Hal ini kemudian mengaktivasi load shedding yang dikontrol oleh *PMS* sebesar nilai unit yang keluar dari sistem tersebut.

Gangguan internal berupa hubung singkat *(short circuit*) pada sisi beban *(downstream)* distribusi daya dapat memicu ketidakseimbangan sistem pembangkitan dan distribusi secara keseluruhan. Hal ini dapat terjadi baik pada gangguan di sisi terdekat maupun terjauh dari sumber pembangkit (Abdurrohim et al., 2024; Dede Rilwan Alwaini & Hasna Satya Dini, 2021). Contoh gangguan pada sisi terdekat adalah saat hubung singkat terjadi pada bus feeder utama di level tegangan 20 kV-Switchgear atau 3,3 kV-Switchgear. Kondisi tersebut menimbulkan arus hubung singkat bernilai besar *(sub-transient)* yang mengalir langsung menuju arah generator, memicu aktifnya relai proteksi *(tripping protection)*, hingga menyebabkan penghentian mendadak *(shutdown)* pada unit pembangkitan (Risqi & Sunardiyo, 2024).

Sementara itu, gangguan pada sisi terjauh, seperti hubung singkat di panel beban akhir atau di ujung saluran penyulang *(feeder)* yang panjang, dapat menimbulkan dan membawa arus transien yang masih tinggi serta arus balik *(back-feed current)*. Munculnya daya balik *(reverse power)* ini dapat mengganggu kestabilan tegangan generator (Korjani et al, 2022, Raj Kumar Chaudhari & Anurag Verma, 2023). Dalam beberapa kasus, gangguan tersebut menyebabkan sistem pemantauan distribusi *Power Management System* (*PMS*) gagal melakukan pelepasan beban *(load shedding*) secara selektif dan tepat waktu. Selain itu, perangkat proteksi *Is-Limiter* terkadang tidak aktif secara efektif untuk memutus rangkaian feeder saat arus gangguan melintasi zona proteksinya, sehingga arus transien yang masih bernilai besar tetap mengalir menuju arah generator.

Perangkat *Is-Limiter* juga dapat aktif secara tidak selektif, yang justru memicu ayunan beban *(swing load)* akibat terlepasnya salah satu saluran feeder. Hal ini menimbulkan fluktuasi beban yang cepat dan memengaruhi

beban yang sedang dipikul oleh sistem, sehingga berdampak pada ketidak normalan sistem pengendali generator. Akibatnya, generator tersebut terlepas dari sistem paralel (Faridha & Kalimantan MAB Banjarmasin, 2024) dan mengaktivasi skema *load shedding* pada kontrol *PMS* sebesar nilai beban unit pembangkit yang keluar. Fenomena ini memicu ayunan beban pada unit generator lain yang masih aktif, yang pada akhirnya menyebabkan unit tersebut tidak stabil dan keluar dari sistem paralel jaringan hingga memaksa proteksi unit lain memerintahkan untuk melepaskan beban yang masih di pikul dan akhirnya terjadi pemadaman total.

Meskipun telah mengaplikasikan program pemantauan *Power Management System* (*PMS*) yang mampu mendeteksi serta merespons perubahan pembangkitan daya yang cepat selama proses distribusi energi, serta perangkat *Is-Limiter* yang memberikan respons terhadap aliran arus gangguan dalam rentang waktu 20 ms hingga 80 ms *(Prodi et al., 2023)*, kondisi pemadaman total *(blackout)* masih tetap terjadi. Penggunaan *Is-Limiter* bertujuan mempercepat pemutusan arus gangguan agar tidak melebihi kapasitas arus hubung singkat pada masing-masing saluran penghantar di penyulang *(feeder)* distribusi (Firdaus et al., 2017). Dalam perencanaan *design*, level arus gangguan yang berada dalam nilai *transien* seharusnya tidak masuk ke dalam sistem pembangkitan yang akan memengaruhi kinerja generator. Namun, tidak optimalnya konfigurasi *PMS* mengakibatkan *blackout* masih terjadi area pabrik pengolahan kertas PT. Fajar Paper, Tbk yang mencakup enam area produksi kertas.

Sebelum menerapkan sistem *supervisory PMS*, mitigasi yang digunakan hanya menggunakan metode pelepasan beban *(load shedding)* dengan memanfaatkan perangkat proteksi jenis *Under Frequency Relay* (Abdurrohim et al., 2024). Perangkat *UFR* tersebut ditempatkan pada panel feeder utama, baik di sisi beban terbesar maupun terendah *(up-stream dan downstream)* (Risqi & Sunardiyo, 2024). Namun, metode mitigasi menggunakan *UFR* tidak sesuai dengan harapan dan memiliki tingkat efektivitas yang rendah. Hal ini terbukti dari frekuensi terjadinya blackout yang cukup sering setiap tahunnya (Faridha & Kalimantan MAB Banjarmasin, 2024). Kondisi ini menunjukkan bahwa perangkat proteksi yang ada belum sepenuhnya efektif dalam merespons jenis gangguan yang kompleks (Abdurrohim et al., 2024). Oleh karena itu, penelitian ini krusial untuk menggali akar masalah lebih dalam dan mengusulkan strategi perbaikan guna meningkatkan keandalan sistem kelistrikan di PT. Fajar Paper, Tbk.

1.2.1 *Historical blackout* sebelum Implementasi Mitigasi *PMS dan Is-Limiter* periode tahun 2014 sampai 2019

Kondisi pemadaman total *(blackout)* sebelum implementasi *Power Management System (PMS*) yang diintegrasikan dengan perangkat pembatas arus hubung singkat *Is-Limiter* sangat rentan terhadap gangguan *eksternal* dari sistem *interkonek*si PLN. Gangguan tersebut masuk dan menyebabkan ketidakseimbangan pada sistem distribusi daya *internal* PT. Fajar Paper, Tbk. Sebagai contoh, kedip tegangan *(voltage dip)* yang disebabkan oleh pelepasan beban salah satu pembangkit besar yang *terinterkoneksi* akan menimbulkan ayunan beban *(swing load)* secara cepat. Dalam waktu singkat, hal

ini mengganggu keseimbangan tiap unit turbin generator dan segera merespon dengan melepaskan beban pada unit mesin pembangkit yang sedang memikul 90% load kapasitas dan kemudian *swing load* ke unit lain akhirnya semua unit lepas sinkron.

Berikut adalah data dari kelompok Lampiran A yang bersumber dari dokumen laporan peristiwa *(Root Cause Analysis Report)*. Laporan ini menjelaskan sebab dan akibat dari beberapa peristiwa pemadaman total. Setiap peristiwa pemadaman segera diikuti dengan investigasi oleh tim operasional dan pemeliharaan untuk mendapatkan akar masalah yang terjadi.

A. Kronologis peristiwa terjadinya *Blackout*:

1) Terjadinya Pemadaman Total *(Blackout Power)* tanggal 01 Agusus 2019
   Terjadi kondisi *blackout* yang di awali dengan terjadinya *short circuit* 3-phase to ground pada cubicle panel spare JA-107, dimana saat dilakukan kegiatan energize untuk sebuah transformer 3MVA, dan pada saat yang sama sistem grounding panel masih terhubung ke konduktor phase belum dilakukan penormalan ke posisi siap di operasikan, dalam waktu yang cepat berakibat terjadi kondisi *short circuit* yang menimbulkan munculnya arus *short circuit* yang sangat besar. Dalam kondisi arus gangguan di level *sub-transient*, arus gangguan tidak dapat di deteksi oleh perangkat proteksi relay pada panel outgoing dan ncoming feeder sehingga arus gangguan tersebut masuk kesistem distribusi utama dan unit generator pembangkitan. Besarnya arus gangguan masuk lebih kedalam sistem kontrol utama peralatan, hal ini di sebabkan perangkat proteksi relay yang terpasang tidak responsif dan selektif dalam menangkap arus gangguan yang cukup besar. Dampak yang merusak sistem keseimbangan dari masuknya arus gangguan pada sisi *upstream* sisi pembangkitan dan distribusi, menyebabkan unit mesin pembangkit yang awalnya beroperasi dalam kondisi normal dan juga mendapat *backup supply* dari power PLN akhirnya menimbulkan pemadaman total di seluruh lingkup pabrik kertas PT. Fajar Paper dan dengan kerugian secara financial yang besar bagi perusahaan karena produksi berhenti.

2) Terjadi Pemadaman total *(Blackout Power)* tanggal 08 September 2019
   Sebelum peristiwa pemadaman total terjadi, unit pembangkitan mendistribusikan energy listrik secara parallel dengan kondisi sistem dalam keadaan stabil dengan power generating bersumber dari unit Gas Turbine-2 (31.8MW), Steam Turbine Generator (22.4MW) dan di backup dari Grid PLN (2.5MW). Namun beberapa saat terjadi kondisi ledakan yang bersumber dari dalam cubicle out going panel JA107 dari tempat yang sama dengan kejadian sebelumnya di bulan yang sama. *Short circuit* terjadi karena hewan yang masuk dan lompat ke dalam cubicle yang menyentuh salah satu busbar yang sedang dalam kondisi bertegangan (20kV). Dampak dari peristiwa *short circuit* tersebut kembali mengganggu keseimbangan sistem kontrol unit pembangkitan dimana selektivitas dari kerja proteksi awal di beberapa cubicle outgoing dan incoming tidak optimal untuk mengisolasi area gangguan yang terdekat. Dampak akhir dari kegagalan beberapa peralatan proteksi yang menyebabkan perangkat proteksi pada unit mesin pembangkitan aktif untuk membuka perangkat switching pada panel circuit breaker relay proteksi Turbine generator. Proteksi

pada turbine generator harus bekerja secara efektif untuk melindungi generator dari kerusakan akibat *short circuit*.

3) Peristiwa Pemadaman Total (Blackout Power) tanggal 12 September 2019
Kronologis dari peristiwa di tanggal 12 September hampir sama sumber penyebab terjadinya pemadaman total seluruh area pabrik. Terjadinya *short circuit* dikarenakan salah satu kabel terminasi pada *cubicle JA107 incoming feeder* Drum Pulper mengalami kerusakan isolasi dan *grounded*, sehingga menimbulkan arus gangguan *short circuit* yang besar. Meskipun proteksi incoming feeder cubicle JA107 membuka circuit breaker, namun arus gangguan yang besar tadi *(subsequent short circuit current level)* sudah lebih dulu melintasi cakupan area *proteksi relay incoming feeder cubicle JA107*, menuju sistem distribusi utama serta kembali menyebabkan unit pembangkitan mengalami ketidak seimbangan beban sehingga meningkatkan arus output generator sesaat yang cukup besar. Hal ini menggambarkan bahwa hampir semua peristiwa pemicu terjadinya kondisi blackout dikarenakan selektivitas dan sensifitas pada proteksi relay di level beban *(Downstream level)* tidak efektif dan sensitif untuk melepaskan diri dari arus gangguan dekat sumber gangguan terjadi.

B. Tindakan Mitigasi yang di rencanakan setelah peristiwa Seringnya *Blackout*

1) Team operasional melakukan review operasional philosophy dan atas fungsi sistem yang tidak beroperasi sesuai dengan perencanaan sehingga berdampak negatif saat salah satu unit seperti STG keluar dari sistem, hal ini di karenakan karakteristik masing masing sistem pengontrolan berbeda dengan Unit pembangkit lain seperti dengan tipe Gas Turbine (GT) yang di tentukan dengan batasan nilai pengontrolan yang berbeda dengan yang lain..
2) Dilakukan optimalisasi terhadap load shedding sistem
3) Perbaikan atas sistem fault logging system (sistem informasi gangguan dan alarm) serta penyimpanan data gangguan yang tersedia atas Unit Generator dan Main Circuit Breaker dalam satu sistem aplikasi.
4) Dilakukan Power Studi Analisa terhadap semua peristiwa blackout yang terjadi dari periode tahun 2014 sampai 2019.
5) Perencanaan perbaikan atas kinerja kordinasi relay proteksi *existing* dengan menggunakan perangkat relay proteksi yang lebih efektif, selektif dan memiliki kemampuan mengirim dan memproses sinyal gangguan dalam kecepatan <80 millisekend (ms) untuk tindakan akhir.

1.2.2 *Historical blackout* setelah Implementasi sistem *PMS dan Is-Limiter* periode 2021 sampai medio tahun 2026

Implementasi sistem Power Management System (*PMS*) dan *Is-Limiter* dimulai setelah masa komisioning serta pengujian sistem dan perangkat selesai dilakukan pada akhir Desember 2019. Kelompok dokumen Lampiran B di bawah ini berisi data laporan peristiwa pemadaman total, yang terdiri atas beberapa dokumen *investigasi blackout* dan rencana tindakan *(action plan)*. Dokumen tersebut menjelaskan kronologi berbagai peristiwa pemadaman total setelah diterapkannya sistem baru. Sistem ini dirancang untuk mencegah blackout melalui integrasi fungsi-fungsi vital, seperti mode load shedding dan pemantauan adaptif melalui *PMS*. Selain itu, diaplikasikan pula sistem

pembatas arus hubung singkat yang mampu memutus arus gangguan *(short circuit current)* secara cepat dengan jangkauan durasi ≤ 20ms menggunakan perangkat *Is-Limiter*. Meskipun implementasi pemutus arus hubungsingkat sudah berjalan, namun peristiwa pemadaman total masih terjadi, sehingga investigasi dan studi kembali dilakukan untuk menemukan akar masalah agar upaya perbaikan selama periode penjaminan *(warranty period 2021–2022)* dapat segera dilaksanakan.

A. Kronologis beberapa peristiwa terjadinya pemadaman total seluruh area Pabrik:

1) Peristiwa Pemadaman Total *(Blackout*) tanggal 21 Maret 2021
   Peristiwa Plant PT. Fajar Paper mengalami kondisi *blackout*, saat sore hari dimana load produksi pabrik biasanya sedang tinggi. Sumber gangguan yang memicu dan menjadi pintu masuk peristiwa terjadinya pemadaman datangnya di mulai dari arah jaringan *interkoneksi 150kV (power grid)*. Tepat jam 14:41 Wib (berdasarkan fakta pada event list) peralatan *switching incoming* di level 20kV pada *cubicle incomer AO1* atau di titik *power coupling switching supply energy* listrik dari PLN ke area pabrik PT. Fajar Paper mengalami kondisi terjadinya pelepasan beban atau unit keluar dari sistem interkoneksi karena proteksi relay pada panel *(Cubicle A01)* menangkap adanya kondisi *dip voltage* (penurunan tegangan yang cepat pada sistem grid 150kV), sehingga proteksi relay Trafo distribusi external bekerja melepas beban, mengakibatkan unit pembangkitan PT. Fajar Paper beroperasi dengan status *island mode under captive generation type* (pembangkitan berdiri sendiri). Kemudian perangkat sistem *monitoring (PMS)* menerima sinyal feedback CB aktif untuk melakukan tindakan *fast load shedding scheme*. Beban yang masih ada di sistem akan di pikul oleh unit pembangkit Gas Turbine-2 dan Steam Turbine Generator-3. Sayangnya dalam waktu beberapa menit kemudian (±3 menit) kedua unit pembangkitan tersebut melepaskan beban yang di pikul sebelumnya karena mengalami ketidak seimbangan karena mengalirnya arus gangguan di level *transient current* yang memicu proteksi relay generator bekerja untuk melepaskan beban melalui pembukaan circuit breaker.

2) Terjadi pemadaman total di picu relay proteksi external aktif (4 May 2021)
   Peristiwa ini terjadi karena proteksi relay pada *sisi interconnection 150kV* di Gardu Induk cikarang aktif *(operated)*, sehingga sumber dari PLN ke PT. Fajar Paper terputus.
   Setelah dilakukan investigasi, di peroleh data, bahwa perangkat proteksi relay mengalami kegagalan fungsi atau mengalami kondisi *error.* Pada kondisi awal, semua peralatan dan perangkat pada captive power PT. Fajar dalam kondisi normal, dengan semua unit pembangkitan kecuali *Gas Turbine*-1 dalam kondisi *standby*.
   Efek dari kondisi pelepasan beban yang cepat, menimbulkan ketidakstabilan pada pembangkitan unit STG. Beban yang di pikul oleh Unit STG mengalami ayunan sehingga team operasional harus mengubah secara cepat mode control pada sistem Governor yang awalnya si pilih mode Droop di ubah ke mode speed control sehingga unit segera secara berlahan lahan dapat kembali stabil. Akibat dari perubahan beban yang tiba tiba yang disebabkan berpindahnya beban ke unit pembangkitan GT-2 dalam waktu cepat dan menimbulkan lonjakan sesaat sehingga arus beban naik cepat dan melebihi arus beban normal. Hal ini berdampak pada unit GT-2 dan mengakibatkan unit generating GT-2 mengalami

terjadinya penurunan speed dan frekuensi generator. Hal ini memberikan signal atas kondisi *low turbine speed* dan mengaktifasi *relay proteksi low speed* aktif dan memerintahkan keluar dari sistem. Terjadinya perpindahan beban ke unit GT-2 seharusnya tidak terjadi, hal ini di akibatkan *PMS* sistem mengalami kondisi *failed to shedd* dalam *schema* yang di program pada sistem *PMS* yaitu schema untuk pelepasan beban prioritas pada pusat beban di area pabrik. Kompensasi hilangnya energi listrik yang di bangkitkan oleh unit generator pada sistem akan di seimbangkan dengan melepaskan beban yang sudah dipilih sebagai prioritas untuk di keluarkan sesuai dengan beban yang hilang di sistem. Program pelepasan beban dan memberikan keseimbangan beban menjadi salah satu fungsi yang di program dalam *Power Management System*.

3) Peristiwa keluarnya beberapa Unit Pembangkit (17 June 2021)
   Akibat dari penurunan beban STG, karena adanya temuan masuknya air ke unit STG, maka dalam pola operasional pembangkitan harus mengalihkan beban yang di pikul unit STG ke line sumber yang disupply dari PLN. Pola ini untuk menyeimbangkan sistem agar supply kesistem Fajar stabil dan tidak terganggu. Namun proses pengalihan ini berdampak terhadap adanya kelebihan beban yang di pikul dan menyebabkan unit STG mengalami kondisi *unbalance load* sehingga menyebabkan aktifnya pemutus beban (CB) unit STG dan akan keluar dari sinkronisasi sistem. Dalam filosophy sistem kerja dari perangkat sistem *PMS*, yaitu bila salah satu pemutus beban (Circuit breaker) dari unit pembangkitan keluar, akan megirimkan input signal ke PMS dan segera di respon untuk memicu *schema Fast Load Shedding (FLS)* aktif dalam program *PMS*, dan akan menyeleksi beban beban yang lebih kurang sama dengan unit pembangkitan yang keluar sistem. Akibatnya beberapa pemutus beban akan keluar dari sistem karena jumlah beban-beban yang di lepaskan telah di kalkulasi secara algoritma program, minimal sama atau lebih akan di lepaskan untuk menjaga agar sistem tetap stabil dan tidak sampai mengalami total pemadaman. Namun pelepasan beban dari beberapa internal pabrik di area PT. Fajar menimbulkan pengaruh ketidakstabilan pada sistem sehingga unit pembangkitan GT-2 yang pada awalnya *running* turut keluar dari sistem pembangkitan setelah pemutus beban (CB) di buka oleh program sistem *PMS*. Dalam peristiwa ini, sistem masih dapat mendistribusikan *energy* walaupun hanya untuk kebutuhan *utilitas* karena di topang supplai dari *external* yaitu *PLN*.

4) Peristiwa *Blackout* akibat Perangkat *Is-Limiter* Gagal Kerja (18 &19, Oktober 2021)
   Perangkat proteksi pembatas level arus short sirkuit pada *zone-zone* distribusi power sistem PT. Fajar Paper, yaitu *Is-Limiter*, mengalami kerusakan yang dipicu oleh adanya kondisi hubung singkat yang berasal dari area Mills PM1,2 pada panel Outgoing 20kV (JA-108). Dampak dari kondisi hubung singkat tersebut menyebabkan hampir semua *fuse Is-Limiter* pemutus penghantar saluran distribusi energi pada 3 set panel kontrol perangkat *Is-Limiter* meledak dan menimbulkan efek pemadaman total seluruh area pabrik. Pada peristiwa ini semua perangkat instalasi *Is-Limiter* yang terpasang di PT. Fajar Paper mengalami kerusakan. Kerusakan terjadi pada perangkat utama, yaitu pada perangkat pemutusnya yang masing-masing terdiri dari 3 set *fuse* proteksi *short* sirkuit dan *limiter insert* pada masing-masing panel kontrol perangkat.

Perangkat sistem *Is-Limiter* dirancang sebagai salah satu sistem perangkat yang dapat melindungi sistem distribusi energi di seluruh area PT. Fajar Paper, namun mengalami kegagalan secara fungsi dalam mengisolasi rangkaian aliran arus hubung singkat serta menimbulkan kerusakan. Setelah peristiwa tersebut sistem dan perangkat *Is-Limiter* yang sudah diimplementasikan sementara waktu tidak di kombinasikan kedalam sistem manajemen *power* PT. Fajar Paper dan segera dilakukan kajian untuk mengetahui root cause atas perangkat yang tidak efektif dapat bekerja sesuai dengan perencanaan dan tujuan implementasi.

5) Peristiwa Pemadaman Total (7 September 2024) akibat transformer ground fault efek dari peristiwa hubung singkat akibat salah satu fase yang sedang dalam tegangan pada line bushing transformator phase-R bersentuhan dengan seekor kucing dan mengakibatkan terjadinya *flashover* ditandai dengan munculnya ledakan dan menimbulkan arus hubung singkat. Perangkat proteksi relay untuk area transformator SP-3 tersebut merespon aktif, namun terlambat untuk memutus arus gangguan transient yang mengalir ke sisi upstream. Dengan kata lain, perangkat proteksi memberikan aksi slow respons sehingga arus hubung singkat yang pada level *transient* sudah lebih dahulu melintasi area proteksi pada Transformator SP-3 tersebut.
   Kontribusi arus gangguan meningkat yang terus melintas mengalir sampai pada panel penghubung utama (main feeder) panel incoming supply ke area Mills di SP-3, namun perangkat relay proteksi tidak cepat merespons dengan memberikan perintah open CB terhadap sinyal arus yang diterima saat melintasi current transformer (CT) pada panel incoming SP3/PM3. Akibat tidak bekerjanya relay proteksi pada sisi panel penyulang *(Incoming panel feeder)* ke arah Mills SP3/PM3, berdampak dengan kondisi unit pembangkitan yang sedang dalam mode operasional yaitu GT-1, GT-2 dan STG. Kondisi pembangkitan segera mengalami ketidakstabilan selama dalam mempertahankan kondisi normalnya dan berakibat pada teraktifasinya perangkat proteksi sistem pada ketiga unit pembangkitan tersebut dengan merespon melakukan pembukaan perangkat pemutus beban *(Circuit Breaker)* pada masing masing unit yang di perintahkan oleh sistem kerja proteksi relay dan berakibat semua unit generator dalam kondisi berputar tanpa ada energy yang di kirim kesistem *(Under spinning reserve)* dan sumber dari PLN masih sinkron dengan sistem internal.

Dari data kuantitatif yang dihimpun peneliti, serta aspek permasalahan real yang terjadi dalam jumlah periode waktu yang sama, maka secara jelas gambaran permasalahan dapat di lihat dalam tabel ringkasan dibawah ini:

Tabel 1. 1 Rangkuman latar belakang permasalahan dalam periode gangguan

Permasalahan & Dampak Yang Sering Terjadi	Upaya Mitigasi yang Dilakukan	Efektivitas Implementasi Mitigasi
Terjadi kondisi blackout yang berulang, akibat sistem internal menerima sinyal dari Grid saat kondisi Voltage Dip dari Jaringan	Implementasi instalasi Perangkat Sistem Power managemen System dalm skema fast Load Shedding	Berhasil mempercepat durasi pelepasan beban (<80ms), mengurangi deviasi frekuensi dan mempertahankan titik

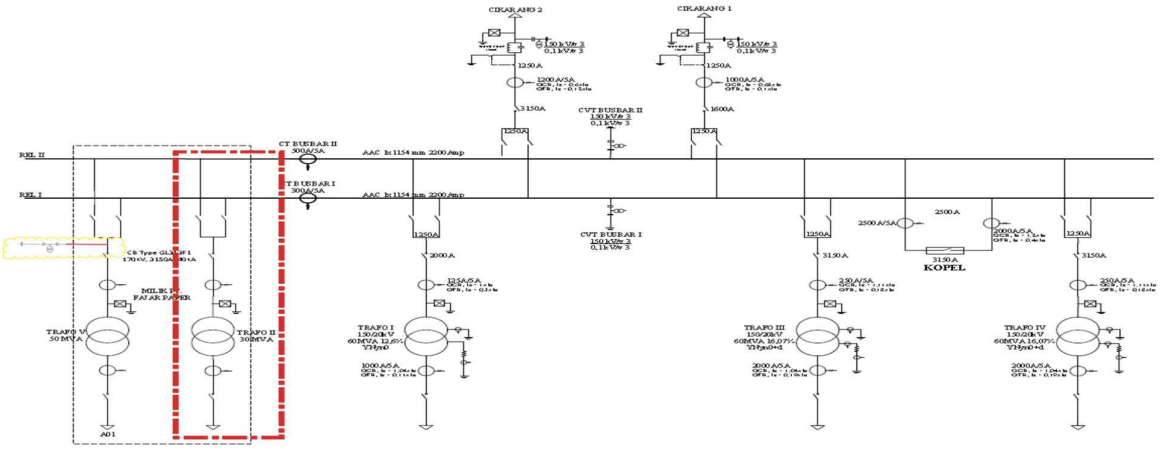
Interkoneksi 150kV		sinkronisasi antar Generator dalam mode operasional
Dampak nilai Level arus hubung singkat sub-transient sangat tinggi (±30kA), hal ini akan menambah arus beban Generator dalam waktu singkat sehingga sistem pengaturan AVR dan excitasi akan mengalami goncangan dan tidak stabil	Implementasi Perangkat Fast Current Limiter dalam tipe Is-Limiter	Level Arus gangguan turun dalam nilai antara-12kA-15kA, sehingga nilai energy gangguan ($I^2.t$) dapat turun lebih dari 70%
Kordinasi relay proteksi belum terkordinasi secara selektif sehingga berdampak trip beruntun (cascade trip)	Optimasi setting parameter relay proteksi serta evaluasi time current characteristic (TCC)	Selektifitas proteksi meningkat, sehingga gangguan lebih cepat diisolasi tanpa memutus sistem secara keseluruhan
Ketidak stabilan tegangan dan frekuensi akibat gangguan hubungan singkat di internal dan akibat adanya pelepasan unit pembangkitan di jaringan interkoneksi internal	Integrasi PMS dengan strategi adaptive load shedding	Profile tegangan meningkat dari <,0.6pu memjadi >.0.8pu, sedangkan deviasi frekuensi turun dari -1,2Hz menjadi ±0.4Hz
Terjadi kehilangan sinkronisasi antar unit pembangkitan di internal saat Sistem loadshedding PMS bekerja	Respon perangkat PMS yang pasif saat gangguan arus hubungsingkat terjadi di sisi downstream sehingga menyebabkan sistem tidak stabil.	Sinkronisasi antar generator tidak dapat dipertahankan pada sebagian besar kondisi saat gangguan
Kegagalan dalam system proteksi gangguan type lama berbasis perangkat Under Frequency Relay (UFR)	**Migrasi ke Teknologi perangkat PMS berbasis logika supervisori**	**Perangkat PMS memberikan respon jauh lebih cepat, adaptif, dan selektif**

Dari tabulasi rangkuman permasalahan latar belakang penelitian ini menunjukkan akar permasalahan utama sistem kelistrikan di PT.fajar paper, Tbk, berasal dari interaksi antara gangguan external berupa voltage dip dan frekuensi sistem yang turun secara cepat dalam jaringan interkoneksi 150kV serta efek dari gangguan internal berupa efek saat terjadi gangguan arus hubungsingkat sub-transien. Kedua jenis gangguan tersebut menyebabkan penurunan tegangan yang signifikan, deviasi frekuensi, hilangnya sinkronisasi unit generator, serta terjadinya *cascade tripping* yang berakhir pada kondisi *blackout total*. Sebagai strategi mitigasi, perusahaan mengimplementasikan integrasi *Power Management System (PMS)* dan *Is-Limiter* serta optimasi kordinasi relay proteksi. Implementasi Mitigasi meningkatkan kehandalan sistem, namun dalam kondisi gangguan yang datang dari bawah *(downstream)* dapat menimbulkan efek ketidakstabilan sistem dan blackout. Kondisi ini yang menjadi fokus utama penelitian ini. Evaluasi integrasi pada sistem kontrol unit Turbin generator serta koordinasi antar relay disisi beban menjadi poin penting dalam mempertahankan kestabilan sistem.

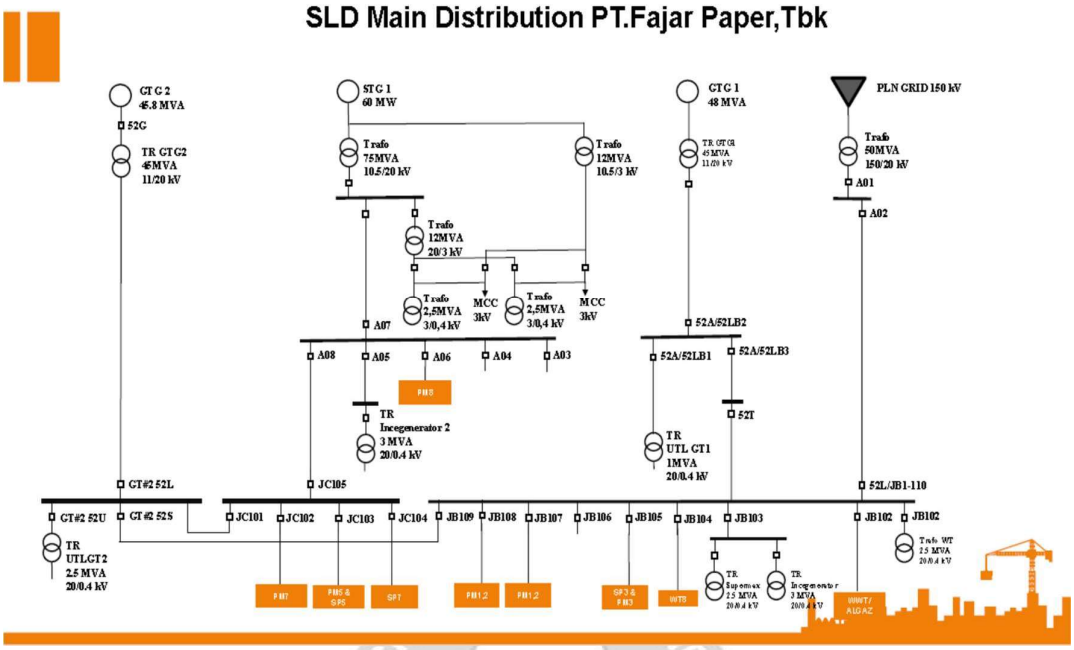
B. Kajian dan Rencana Perbaikan

1) Tim dari aplikator, dalam hal ini ABB engineer, datang dan melakukan kajian dan investigasi untuk mendapatkan data-data kejadian dalam bentuk pengolahan data dari gejala awal pada setiap peristiwa sampai analisis data yang dibaca pada perangkat penyimpanan data menggunakan software perangkat.
2) Aplikator melakukan optimalisasi terhadap kinerja *PMS* dalam skema *load shedding sistem*
3) Penambahan parameter dalam konfigurasi *PMS* dengan parameter setting penggunaan perangkat yang ada di masing masing area pabrik untuk optimalisasi kinerja skema *load shedding*.
4) Untuk mencegah timbulnya ayunan beban yang lebih dalam pada unit generator pembangkitan saat terjadinya kondisi *short circuit*, perlu dilakukan optimalisasi setting pada kontrol generator unit pembangkitan.
5) Perbaikan kinerja kordinasi antar perangkat relay proteksi dan optimalisasi parameter *setting* untuk memperoleh nilai yang tepat serta sensifitas efektif dalam proses isolasi arus gangguan yang cepat.

1.2.3 Jaringan Distribusi Titik Sambungan Supply Sistem internal & External



Gambar 1. 1 SLD Grid 150kV PLN External Supply to Plant PT. Fajar Paper, Tbk



Gambar 1. 2 SLD Existing Power Generating & Line Distribusi

Gambar *Single Line Diagram* (SLD) diatas adalah konstruksi sistem sebelum implementasi mitigasi yang di integrasikan pada pembangkitan dan distribusi energi di PT. Fajar Paper, Tbk dengan beberapa jenis gangguan yang masuk kedalam sistem, ada 2tipe karakteristik gangguan yang sering terjadi dan menjadi pemicu untuk mempengaruhi kondisi sistem dan perangkat proteksi relay aktif, seperti:

1. Karakteristik *Voltage dip* yang sering datang dari jaringan eksternal yaitu grid PLN 150kV dan memengaruhi kestabilan pembangkitan *Captive power* dan sistem distribusi daya di area PT. Fajar Paper yang meliputi besarnya penurunan level tegangan *(Voltage depth),* lamanya durasi gangguan, frekuensi kejadian, serta lokasi gangguan terhadap titik interkoneksi *main feeder*. *Voltage dip* pada level (40–60%) dengan durasi lebih dari 200 ms dapat menyebabkan efek gangguan yang sangat serius pada peralatan industri dan komersial, terlebih lagi sangat rentan mengganggu sistem kontrol pada unit pembangkitan seperti *Governor* dan *AVR* generator yang cepat merespon setelah mendeteksi adanya anomali gangguan dalam sistem dan akan segera bertindak mengaktifkan proteksi *Under voltage* atau *loss of excitatio*n. Selain itu, *Voltage dip* yang berulang dapat menurunkan *margin stabilitas* tegangan, menyebabkan ketidak seimbangan arus, dan memicu respon *aktifasi* proteksi pada *feeder distribusi*, seperti *tripping circuit breaker* sisi *incoming* dan juga sisi *outgoing* atau dapat juga mengaktivasi perangkat *Is-Limiter* dengan tidak selektif. Ada beberapa peristiwa *PMS* gagal menyeimbangkan beban sistem, menyebabkan kontribusi arus *transien*t menuju ke unit generator, dan memicu terjadinya rentetan trip pada circuit breaker (CB) utama Generator. Dalam hal ini *PMS* harus segera merespon dengan mengaktifasi *sheddable load* dan akan melepaskan beban beban yang bukan prioritas yang akan berdampak pada kestabilan sistem internal pembangkitan maupun sistem distribusi daya.

2. Munculnya Arus hubung singkat di sisi *downstream* dapat menyebabkan *blackout* meskipun telah diterapkan *Power Management System* (*PMS*) dan *Is-Limiter*, karena beberapa faktor teknis dan operasional. Pertama, gangguan arus hubung singkat yang terjadi di sisi *downstream*, terutama di panel-panel beban dengan level tegangan menengah 3.3kV atau di MV-MCC (Medium Voltage Motor Control Center), menghasilkan arus yang sangat besar dalam waktu sangat singkat. *Is-Limiter* dirancang untuk membatasi arus gangguan sub-transient dan kontribusi arus gangguan transient yang berasal dari penggunaan peralatan utama di sisi main power distribusi seperti pada trafo tenaga dan trafo distribusi berkapasitas besar, namun tidak dapat menganalisis arah arus atau selektivitas gangguan, sehingga dalam kondisi tertentu dapat aktif secara tidak selektif dan memutus suplai utama. Kedua, *PMS* memiliki fungsi *load shedding* otomatis, tetapi jika kecepatan masuknya arus gangguan sangat cepat atau gangguan terjadi pada titik yang tidak dimonitor langsung oleh *PMS*, maka respon load shedding bisa terlambat atau tidak sinkron. Ketiga, ketidakstabilan tegangan akibat gangguan disisi *downstream* bisa menyebabkan proteksi generator seperti *under-voltage relay, overcurrent relay*, atau *out-of-step protection* taktifasi, sehingga unit pembangkitan *captive trip* secara mendadak. Dalam kondisi ini, lepasnya titik *sinkronisasi* antar pembangkit dan beban yang tidak seimbang dapat memicu rentetan perangkat proteksi trip, yang berujung pada *blackout total* meskipun sistem telah dilengkapi dengan perangkat mitigasi modern seperti *PMS* dan *Is-Limiter*.
3. Strategi mitigasi teknis yang paling efektif dan efisien untuk mengurangi kejadian *blackout* akibat *voltage dip eksternal* dan gangguan *short circuit internal* melibatkan pendekatan berlapis yang mencakup peningkatan sistem proteksi, optimalisasi *PMS*, dan pemanfaatan perangkat teknologi penunjang. Beberapa strategi yang dapat diterapkan antara lain:
    1. Implementasi *fast transfer scheme* antara sumber PLN dan *Captive Power* dengan waktu transfer <100ms untuk menjaga kontinuitas daya.
    2. Peningkatan selektivitas dan koordinasi proteksi arus lebih dan tegangan drop untuk meminimalkan area terdampak saat terjadi gangguan.
    3. Penambahan *Dynamic Voltage Restorer (DVR)* atau tipe *UPS industrial* pada level tegangan menengah pada beban-beban kritikal untuk mencegah timbulnya *Voltage dip transient*.
    4. Optimalisasi pengaturan *Is-Limiter* agar lebih selektif berdasarkan lokasi dan arah arus gangguan.
4. Integrasi sistem monitoring kualitas daya real-time untuk mendeteksi pola gangguan dan melakukan tindakan korektif dan proaktif. Strategi-strategi ini bertujuan mempertahankan kestabilan sistem distribusi kelistrikan dengan mengurangi respon proteksi yang tidak selektif yang seharusnya tidak perlu dan mempertahankan kondisi dalam titik *sinkronisasi* pada unit pembangkitan *Hybrid Power*.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi peristiwa di lapangan, dapat dirumuskan sebagai penelitian permasalahan utama yang mendasari peristiwa seringnya terjadi *blackout* didalam mode pembangkitan *Captive Power* dan distribusi daya di area pabrik kertas PT. Fajar Paper, Tbk.

1. Bagaimana karakteristik kestabilan sistem (tegangan, frekuensi, dan sudut rotor) pada sistem *hybrid captive power* PT. Fajar Paper saat menghadapi gangguan hubung singkat internal dan *voltage dip eksternal?*
2. Sejauh mana implementasi perangkat *Is-Limiter* efektif dalam mereduksi level arus hubung singkat *sub-transien* dan melindungi peralatan distribusi utama?
3. Bagaimana efektivitas koordinasi relay proteksi dan skema load shedding pada *Power Management System* (*PMS*) dalam mencegah terjadinya rentetan pelepasan beban dengan CB *(cascade trip)*?
4. Bagaimana efektivitas integrasi kombinasi *PMS* dan *Is-Limiter* dalam memitigasi potensi *blackout* dan menjaga kontinuitas operasi pada sistem hybrid captive power?

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dan menganalisa karakteristik kestabilan sistem distribusi energi listrik tipe *hybrid* antara grid PLN dan captive power distribusi 20kV di PT. Fajar Paper saat mengalami gangguan hubung-singkat (saat dalam level arus *sub-transient).* Kajian dilakukan untuk mengetahui pengaruh gangguan terhadap kinerja sistem ditinjau dari perubahan arus hubung singkat, penurunan tegangan *(voltage dip), deviasi frekuensi,* serta perubahan sudut rotor generator *(rotor angle stability)*. Melalui simulasi *load flow*, *short circuit analysis*, dan *transient stability analysis* dengan menggunakan perangkat lunak *(software ETAP),* penelitian ini diharapkan mampu memvisualisasikan kondisi dinamis sistem secara komprehensif pada saat sebelum, selama, dan sesudah gangguan terjadi. Ada 4 (empat) pokok pikiran utama yang menjadi basis penelitian ini dilakukan.

1. Dapat menganalisa karakteristik kestabilan sistem dengan model captive power pada parameter tegangan, frekuensi, dan sudut rotor ketika menghadapi gangguan hubung singkat external dan internal berupa *voltage dip*, sehingga dapat diketahui profil kestabilan sistem sebelum dan sesudah penerapan strategi mitigasi.
2. Dapat mengevaluasi efektivitas perangkat Is-Limiter dalam mereduksi level arus hubung singkat sub-transien serta menilai kontribusinya dalam melindungi peralatan distribusi utama dari kerusakan thermal maupun mekanis.
3. Dapat menilai efektivitas dari koordinasi relay proteksi dan skema load shedding pada *Power Management System* (*PMS*) dalam mencegah terjadinya *cascade trip,* dengan fokus pada kecepatan respon, selektivitas pelepasan beban, dan kemampuan menjaga kestabilan sistem.
4. Dapat mengukur efektivitas integrasi kombinasi *PMS* dan Is-Limiter dalam memitigasi potensi *blackout* serta menjaga kontinuitas operasi sistem captive hybrid power, sehingga dapat menentukan strategi mitigasi paling optimal sesuai standar keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi teknis dan akademis dalam pengembangan sistem distribusi tenaga listrik dalam sektor industrial berbasis hybrid power sistem, khususnya pada sektor industri dengan karakteristik beban induktif seperti motor-motor listrik yang berkapasitas besar dan kebutuhan akan kontinuitas operasional yang tinggi.

1.5 Batasan Penelitian

- Fokus pada sistem pembangkitan sendiri *(Captive Power Plant))* dan distribusi power pada level tegangan menengah yang diaplikasikan di PT. Fajar Paper, Tbk (20kV dan 3.3kV).
- Perhitungan nilai penyimpangan akibat sistem mengalami ketidakstabilan yang di terima unit pengontrolani generator *(AVR*) dan kontrol *Speed* dan *Frekwensi (Governor)* yang memengaruhi nya.
- Perhitungan level *short circuit feeder dan peralatan utama* serta skema Simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP.
- Berdasarkan penggunaan data historical dan skenario *recovery* yang di aplikasikan selama masa pemulihan sistem.
- Rekomendasi implementasi teknologi baru ataupun peningkatan kinerja perangkat dan peralatan yang sudah ada sebagai bagian solusi.
- Konfigurasi *logic* baru pada *PMS* untuk pelepasan beban *(Load sheed)* yang selektif

1.6 Manfaat Penelitian

Bagi Perusahaan (PT. Fajar Paper, Tbk):

- Memberikan gambaran secara teknis akan kondisi kehandalan sistem yang sudah mengimplementasikan teknologi terbaru dengan *software PMS* dan dikombinasikan dengan perangkat *Is-Limiter*, serta memahami akan kelemahan sistem yang di implementasikan dan dampak yang di akibatkan dari aspek ekonomi setelah terjadinya kegagalan sistem dalam mencegah dampak selama terjadinya gangguan dimana aplikasi mitigasi diharapkan dapat mengeliminasi efek yang menyebabkan terjadinya pemadaman total *(blackout)*.
- Memberikan pemahaman akan dinamika kompleks terhadap sistem ketenaga listrikan di sektor industri dengan menggunakan sumber energi suplai ganda *(Hybrid Power)*.

Bagi dunia Akademisi dan praktisi :

- Menambah pengetahuan dan kemampuan dalam melakukan analisa dan dalam melakukan pemilihan perangkat teknologi yang tepat untuk mengurangi biaya *trial error* teknologi terbaru, dan dapat memberikan rekomendasi yang tepat dalam penggunaan perangkat dan peralatan untuk memberikan kestabilan sistem kelistrikan di dunia industri.
- Memberikan wawasan tentang keterbatasan dan kelemahan dari suatu sistem proteksi yang terbaru yang menjadi produk unggulan dari produsen perangkat dan peralatan proteksi.

Bagi Peneliti:

- Hasil penelitian ini mendukung pencapaian akademik dalam melakukan pengembangan secara tioritis dan praktis serta menemukan formula praktis untuk di kembangkan dan di integrasikan kedalam sistem dan kedalam dunia artificial teknologi.
- Memberikan kontribusi pada literatur ilmiah di bidang stabilitas distribusi power di dalam sistem ketenaga listrikan dengan kompleksitas sumber pembangkitan yang terintegrasi dalam jaringan interkoneksi, serta memberikan tinjauan praktis terhadap problematika atas fenomena dari sistem kerja proteksi relay dan kordinasi terhadap operasi sistem di segment implementasi dunia industrial.