BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data, simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP, dan pembahasan yang telah dilakukan pada bab-bab sebelumnya, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakteristik Kestabilan Sistem (tegangan, frekuensi, dan sudut rotor): Implementasi strategi mitigasi terbukti secara signifikan meningkatkan profil kestabilan sistem saat menghadapi gangguan. Pada kondisi *existing* (sebelum mitigasi), gangguan menyebabkan penurunan tegangan hingga di bawah 0,6 pu dan deviasi *frekuensi* mencapai -1,2 Hz. Setelah dilakukan mitigasi, profil tegangan berhasil dijaga pada rentang stabil di atas 0,8 pu. Selain itu, *deviasi frekuensi* maksimum dapat diredam menjadi ±0,4 Hz dengan waktu pemulihan *(recovery*) yang lebih singkat, serta osilasi sudut rotor generator yang sebelumnya tidak teredam berhasil mencapai kondisi konvergen (stabil) kembali.
2. Efektivitas Perangkat *Is-Limiter* dalam Mereduksi Arus Hubung Singkat: Penggunaan *Is-Limiter* efektif dalam membatasi arus gangguan sub-transien yang mengalir ke sistem distribusi utama dan unit pembangkitan. Data simulasi menunjukkan bahwa arus gangguan puncak dapat diturunkan secara drastis dari 30 kA menjadi berkisar antara 12 kA hingga 15 kA. Penggunaan perangkat ini juga berhasil menurunkan tingkat stres thermal dan mekanis pada peralatan melalui pengurangan energi gangguan (I^2xt) hingga lebih dari 70% dibandingkan kondisi tanpa instalasi perangkat *Is-Limiter*.
3. Efektivitas Koordinasi Relay Proteksi dan Skema *Load Shedding PMS*: Sistem proteksi menggunakan relay ABB REF.615 menunjukkan kinerja yang responsif dan selektif dengan waktu operasi gangguan (t_{fault}) pada rentang 0,4 – 0,6 detik, yang memberikan ruang bagi relay di sisi *downstream* untuk bekerja lebih dahulu. Di sisi lain, algoritma *Fast Load Shedding* pada *Power Management System* (*PMS*) mampu bereaksi dalam waktu kurang dari 80 ms setelah gangguan terdeteksi. Kombinasi ini efektif mencegah terjadinya *cascade trip* (pelepasan beban berantai) dengan memastikan pelepasan beban dilakukan secara adaptif dan tepat sasaran.
4. Efektivitas integrasi perangkat *PMS* dan *Is-Limiter* dalam mitigasi *blackout*: integrasi antara *PMS* dan *Is-Limiter* terbukti secara kuantitatif mampu mengeliminasi potensi pemadaman total (total blackout) pada sistem *hybrid captive power* PT Fajar Paper. Sinergi ini memungkinkan sistem untuk tetap mempertahankan sinkronisasi unit pembangkitan meskipun terjadi gangguan besar, baik dari internal maupun eksternal (grid PLN). Temuan ini menunjukkan bahwa pengendalian beban secara *makro* oleh *PMS* dan pembatasan arus gangguan secara fisik oleh *Is-Limiter* merupakan strategi paling optimal untuk menjamin kontinuitas operasional dalam dunia Industry.

Strategi mitigasi yang sudah di implementasikan melalui kombinasi *PMS* dan *Is-Limiter* terbukti mampu meningkatkan keandalan sistem pembangkitan tipe captive hybrid power di site PT, Fajar paper, Tbk. Profile kestabilan sistem yang sebelumnya rentan terhadap dampak gangguan yang terjadi kini dapat dijaga dalam batas aman, dengan tegangan dalam rentang level stabil, deviasi frekuensi lebih kecil dan sudut rotor dapat terjaga dalam sudut sinkron. Perangkat *Is-Limiter* efektif menurunkan arus hubung singkat transien sehingga lebih dari 70%. Sementara itu, koordinasi relay proteksi dan skema *loadshedding PMS* bekerja cepat dan selektif sesuai prioritas load yang di inginkan. Secara keseluruhan, integrasi *PMS* dan *Is-Limiter* menjadi strategi paling optimal dalam implementasi mitigasi untuk mengeliminasi potensi blackout dan menjamin kontinuitas operasional dalam dunia *Industry*.

Dengan mengacu pada IEEE standar, yang terkait langsung dengan kasus yang terjadi di site PT, Fajar paper seperti: IEEE Std 1159 & 1110 (*benchmark* untuk voltage dan frekuensi), IEEE Std C37.010 & EC 60909 (nilai batasan hubung singkat yang tidak melebihi nilai thermal witstand pada peralatan distribusi energi), IEEE Std C.37.2 & best practice di industrial yang menitik beratkan pada koordinasi proteksi relay dan skema *load shedding* berbasis *PMS*. Penerapan standar power quality seperti yang di terapkan di Perusahaan Listrik negara (PLN) juga bagian dari *benchmark* mitigasi yang di implementasikan di sistem *PMS* dan *Is-Limiter*. Dengan target frekuensi terjadinya gangguan (SAIFI) serendah-rendahnya <3kali/tahun dan penanganan lamanya gangguan (SAIDI) dapat kembali normal dicapai secepatnya dengan target <100 menit/tahun.

5.2 Saran

Para praktisi dibidang distribusi tenaga listrik disarankan untuk memperhatikan kordinasi proteksi relay secara cermat, karena tingkat presisi perencanaan set-up nilai parameter di perangkatnya akan menentukan kecepatan memutus aliran arus gangguan yang melintas. *PMS* juga harus di integrasikan dengan relay proteksi yang dapat merespon dengan analisa keseimbangan beban serta memberikan keputusan cepat untuk menstabilkan sistem. Hal yang juga penting dalam implementasi perangkat *Is-Limiter* adalah penggantian fuse pada *Is-Limiter* perlu perencanaan dalam penyediaan dan pemeliharaan terutama biaya penggantian fuse bila putus karena bersifat sekali pakai dan harga *sparepart* yang cukup mahal. Hasil kajian ini dapat mendorong managemen maintenance di dunia industri terkhusus pabrik kertas yang memiliki mode sistem distribusi dan pembangkitan yang sama untuk mempertimbangkan investasi pengadaan perangkat *Fault Current Limiter* atau *Is-Limiter* yang lebih modern dan harga *sparepart* yang rendah serta diintegrasikan menggunakan sistem kontrol pintar.

Penelitian ini juga memiliki beberapa batasan yang perlu diperhatikan dalam analisa hasil pengolahan simulasi ETAP. Pertama, analisa hanya bersifat simulasi ETAP dan untuk validasi dilakukan dilapangan, sehingga kondisi sebenarnya akan menjadi tantangan yang lebih komplek yang memberikan dasar penelitian baru untuk tindakan perbaikan yang lebih *komprehensif*.