

Analisis Gangguan Hubung Singkat dan Evaluasi Pemutus Tenaga Berbasis Worst-Case Scenario di PT XYZ

Thoif Albastoni

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Siliwangi

Email: 217002027@student.unsil.ac.id

Riyadi, Regi Rivera

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Siliwangi

Email: 217002507@student.unsil.ac.id

Abstrak

Dinamisnya sistem kelistrikan industri menuntut evaluasi berkala terhadap spesifikasi perangkat proteksi untuk menjamin keselamatan aset. Penelitian ini mengevaluasi keandalan sistem proteksi pada panel *Low Voltage Main Distribution Board (LVMDB)* PT XYZ menggunakan pendekatan *Worst-Case Scenario*. Metode penelitian dilakukan melalui simulasi eksperimental pada perangkat lunak ETAP 19.0.1 dengan memodifikasi topologi berupa eliminasi impedansi seluruh kabel *feeder* untuk menyimulasikan gangguan hubung singkat tiga fasa (*bolted fault*) pada terminal perangkat. Hasil simulasi menunjukkan arus gangguan murni mencapai 19,908 kA. *Main Breaker* (CB10) tervalidasi aman dengan persentase pembebanan 54,28%. Namun, seluruh pemutus tenaga cabang (CB3-CB9) berstatus *Critical* dengan beban operasi hingga 194,0% pada kondisi *breaking* dan 146,6% pada kondisi *making*. Rekomendasi teknis berupa peningkatan kapasitas pemutus cabang menjadi minimal 25 kA. Berdasarkan perhitungan rasio pembebanan, mampu menurunkan beban operasi menjadi 79,6%, sehingga memenuhi standar keamanan IEC 60909.

Kata Kunci: LVMDB, ETAP, *Worst-Case Scenario*, Hubung Singkat, *Device Duty*.

Abstract

The dynamic nature of industrial electrical systems demands periodic evaluation of protection device specifications to ensure asset safety. This study evaluates the reliability of the protection system in the Low Voltage Main Distribution Board (LVMDB) at PT XYZ using a Worst-Case Scenario approach. The research methodology involves experimental simulation using ETAP 19.0.1 software, modifying the topology by eliminating the impedance of all feeder cables to simulate a three-phase bolted fault at the device terminals. Simulation results indicate that the pure fault current reaches 19.908 kA. The Main Breaker (CB10) is validated as safe with a 54.28% operating duty. However, all branch circuit breakers (CB3-CB9) are in Critical status, with operating loads up to 194.0% for breaking conditions and 146.6% for making conditions. Technical recommendations for upsizing branch circuit breakers to at least 25 kA. Based on load ratio calculation, this will reduce the operating load to 79.6%, thereby meeting the safety standards of IEC 60909

Keywords: LVMDB, ETAP, *Worst-Case Scenario*, Short Circuit, *Device Duty*.

PENDAHULUAN

Keandalan suatu sistem distribusi di fasilitas industri sangat bergantung pada ketahanan sistem proteksi dalam mengisolasi gangguan tanpa menghentikan keseluruhan proses operasional (Agustian et al., 2025). Salah satu ancaman paling destruktif dalam sistem tenaga listrik adalah gangguan hubung singkat tiga fasa. Gangguan ini mampu menghasilkan lonjakan arus ekstrem yang berpotensi menghancurkan peralatan secara mekanis maupun memicu kegagalan termal pada

panel distribusi utama (Glover et al., 2012). Untuk mengantisipasi gangguan tersebut, pemutus tenaga (*circuit breaker*) dirancang sebagai garda terdepan pelindung sistem dengan batasan kapasitas pemutusan (*breaking capacity*) yang bersifat statis berdasarkan desain pabrikan.

Di sisi lain, sistem kelistrikan di fasilitas industri memiliki karakteristik yang dinamis (Das, 2017). Penambahan beban operasional maupun peningkatan kapasitas suplai dari sumber utilitas seiring berjalannya waktu akan secara langsung memperbesar magnitudo arus hubung singkat yang

mengalir di dalam jaringan. Ketimpangan antara spesifikasi alat yang statis dan pertumbuhan jaringan yang dinamis inilah yang memunculkan permasalahan serius di lapangan. Kurangnya peninjauan dan evaluasi sistem proteksi secara berkala sering kali menyebabkan spesifikasi *Circuit Breaker* eksisting menjadi tertinggal dan tidak lagi relevan (Marbun et al., 2024). Kondisi kritis ini memaksa perangkat proteksi berhadapan dengan arus gangguan yang jauh melampaui batas kemampuannya (*over-duty*), yang pada akhirnya mengakibatkan kegagalan pemadaman busur api (*arc flash*) dan berisiko tinggi memicu ledakan fatal pada panel utama (Schlabach, 2005).

Dalam studi kelistrikan modern, perangkat lunak *Electrical Transient Analyzer Program* (ETAP) telah diakui dan divalidasi secara luas sebagai alat bantu komputasi yang efektif untuk menyimulasikan analisis gangguan serta mengevaluasi kapasitas batas aman perangkat pengaman (Abdulrazak et al., 2023). Secara teori studi hubung singkat konvensional, perangkat lunak akan menghitung besaran arus gangguan yang mengalir melalui parameter redaman berupa impedansi kabel penghantar di sepanjang jaringan kelistrikan (Glover et al., 2012). Semakin panjang jarak kabel, semakin besar pula redaman impedansi yang secara alami akan menekan dan menurunkan nilai arus hubung singkat sebelum hantamannya mencapai terminal pemutus beban. Namun, evaluasi menggunakan metode konvensional ini memiliki celah kelemahan yang berisiko menciptakan "ilusi keamanan" pada pengelola sistem. Hal ini terjadi karena pendekatan tersebut jarang memperhitungkan skenario insiden paling fatal, yakni kemungkinan terjadinya gangguan padat (*bolted fault*) tepat pada terminal bus masuk perangkat proteksi tanpa adanya intervensi redaman kabel sama sekali (International Electrotechnical Commission, 2016).

Sebagai solusi atas celah keamanan tersebut, penelitian ini menerapkan pendekatan *Worst-Case Scenario* pada pemodelan sistem proteksi di *Low Voltage Main Distribution Board* (LVMDB) PT XYZ. Berbeda dengan studi konvensional yang mengandalkan redaman impedansi saluran untuk menurunkan arus, penelitian ini secara sengaja memodifikasi topologi jaringan dalam simulasi ETAP dengan mengeliminasi atau menyetel parameter panjang dan impedansi seluruh kabel cabang (*feeder*) mendekati angka nol. Manipulasi ekstrem ini dirancang khusus

untuk mem-*bypass* redaman arus alami, sehingga hantaman arus hubung singkat maksimum dari utilitas dipaksa menerjang langsung masuk ke dalam kontak pemutus tenaga cabang. Melalui pendekatan ekstrem tanpa redaman ini, batas absolut dari daya tahan termal dan mekanis perangkat dapat divalidasi secara murni melalui fitur evaluasi *Short-Circuit Device Duty* di dalam ETAP.

Berdasarkan landasan tersebut, tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menghitung kalkulasi besaran arus gangguan hubung singkat tiga fasa secara murni, serta mengevaluasi keandalan spesifikasi pemutus tenaga eksisting di PT XYZ berbasis *Worst-Case Scenario*. Secara khusus, penelitian difokuskan untuk memvalidasi apakah kapasitas pemutusan sirkuit (*breaking capacity*) dan penahanan kejutan arus pertama (*making capacity*) pada unit MCCB sanggup menahan hantaman arus gangguan maksimal sesuai standar keselamatan operasional (Schlabach, 2005). Manfaat praktis dari evaluasi ini adalah tersedianya data analitis berupa indikator keamanan (*alert view*) yang kuat bagi manajemen PT XYZ. Data tersebut akan menjadi landasan teknis kelistrikan dalam mengambil kebijakan *upsizing* (peningkatan kapasitas) pada *Circuit Breaker* yang terbukti rentan, sehingga stabilitas produksi, keandalan sistem distribusi, dan keselamatan aset pekerja dapat terjamin secara berkelanjutan di masa depan (Agustian et al., 2025).

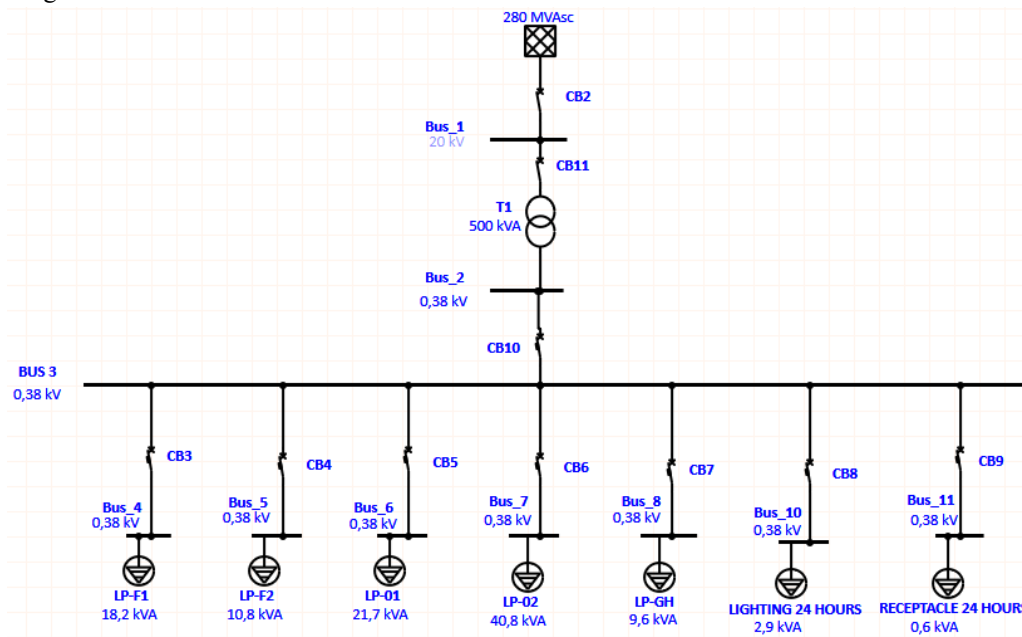
METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah kuantitatif dengan pendekatan simulasi eksperimental. Sasaran penelitian difokuskan pada pengujian keandalan *Circuit Breaker* (CB) utama dan cabang di panel *Low Voltage Main Distribution Board* (LVMDB) PT XYZ menggunakan perangkat lunak *Electrical Transient Analyzer Program* (ETAP) 19.0.1. Rincian tahapan metode diuraikan sebagai berikut:

Diagram Segaris LVMDB PT XYZ

Pemodelan awal dilakukan dengan membangun *Single Line Diagram* (SLD) sistem kelistrikan pabrik di dalam lembar kerja ETAP. Topologi jaringan dimodelkan mulai dari sumber utilitas (*Power Grid*) dengan kapasitas hubung singkat 280 MVA_{sc}, transformator daya 500 kVA (20 kV/0,38 kV), *Main Breaker* berkapasitas 800A, hingga titik akhir berupa bus beban pada panel penerangan. Pemodelan ini mensyaratkan input data spesifikasi perangkat yang presisi sesuai dengan

data *nameplate* di lapangan agar hasil simulasi relevan dengan kondisi riil.



Gambar 1. Single Line Diagram Pemodelan Panel LVMSB

Skenario Gangguan Hubung Singkat (Worst-Case)

Gangguan hubung singkat tiga fasa merupakan jenis gangguan yang paling ekstrem karena tidak melibatkan impedansi urutan nol, sehingga menghasilkan lonjakan arus tertinggi di dalam sistem. Untuk mengevaluasi keandalan maksimal alat, penelitian ini menerapkan pendekatan *Worst-Case Scenario* melalui dua manipulasi parameter utama. Pertama, nilai impedansi transformator pada lembar *rating* ETAP diatur menggunakan pendekatan konservatif sebesar 4% guna meloloskan arus gangguan maksimal dari sumber. Kedua, langkah modifikasi topologi dilakukan dengan mengeliminasi (menghapus) seluruh komponen kabel *feeder* cabang dari *Single Line Diagram*. Pemutusan perantara ini bertujuan untuk meniadakan efek redaman impedansi penghantar secara total. Kombinasi skenario ini memastikan bahwa pemutus tenaga terhubung langsung dengan sumber gangguan (*Bolted Fault*) dan menerima hantaman arus secara utuh tanpa mengalami jatuh tegangan.

Evaluasi Kapasitas Pemutus Tenaga (Device Duty)

Evaluasi kerusakan perangkat dilakukan menggunakan fitur *Short-Circuit Device Duty* pada ETAP yang mengacu pada standar IEC 60909 (International Electrotechnical Commission, 2016).

Algoritma perangkat lunak akan secara otomatis membandingkan besaran arus gangguan yang terjadi dengan spesifikasi batas aman pabrikan. Parameter evaluasi difokuskan pada dua kondisi kritis: *Making Capacity* (kemampuan mekanis alat menahan arus kejut pertama) dan *Ultimate Breaking Capacity* atau *Icu* (kemampuan termal memutus arus RMS searah). Kelayakan operasi pemutus tenaga tersebut diukur berdasarkan persentase pembebanan perangkat (*% Operating*) melalui Persamaan (1) berikut:

$$\% \text{ Operating} = \left(\frac{I_{sc}}{I_{cu}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

I_{sc} = Arus gangguan hubung singkat hasil simulasi (kA)

I_{cu} = *Ultimate Short-Circuit Breaking Capacity* perangkat (kA)

Berdasarkan nilai tersebut, tingkat keandalan perangkat diklasifikasikan ke dalam tiga kondisi yang rigid. Jika hasil kalkulasi *% Operating* menunjukkan angka kurang dari 95%, perangkat divalidasi sanggup menahan gangguan dan berstatus Aman (*Normal*). Apabila beban operasi berada pada rentang 95% hingga 100%, perangkat dikategorikan dalam pengawasan Peringatan (*Marginal*). Namun, apabila rasio pembebanan melampaui angka 100%, maka perangkat dinyatakan gagal beroperasi dan berstatus Kritis (*Critical*). Dalam hal ditemukan perangkat berstatus *Critical*, maka rekayasa mitigasi

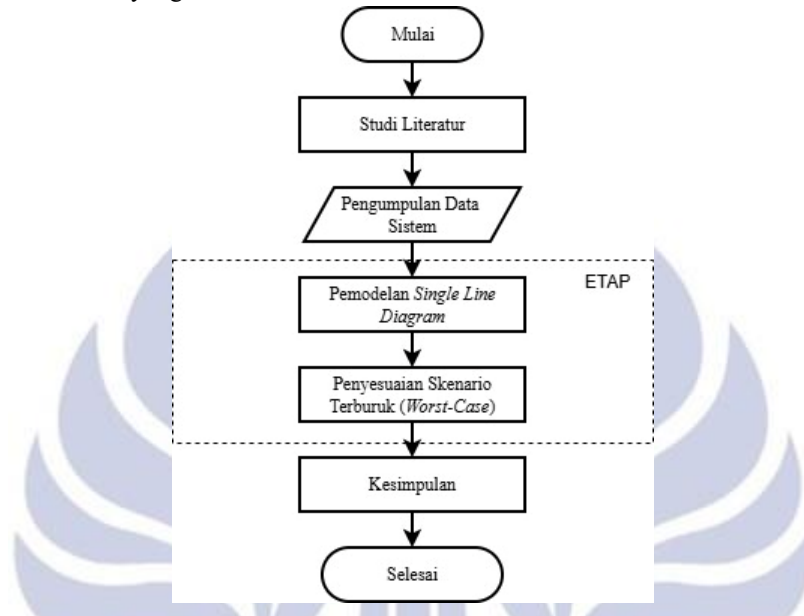
dilakukan melalui peningkatan kapasitas (*upsizing*) perangkat pengganti, yang dikalkulasi menggunakan Persamaan (2):

$$I_{cu(baru)} \geq I_{sc} \times (1 + \text{Safety Margin}) \quad (2)$$

Tahapan dan Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan sistematis yang divisualisasikan

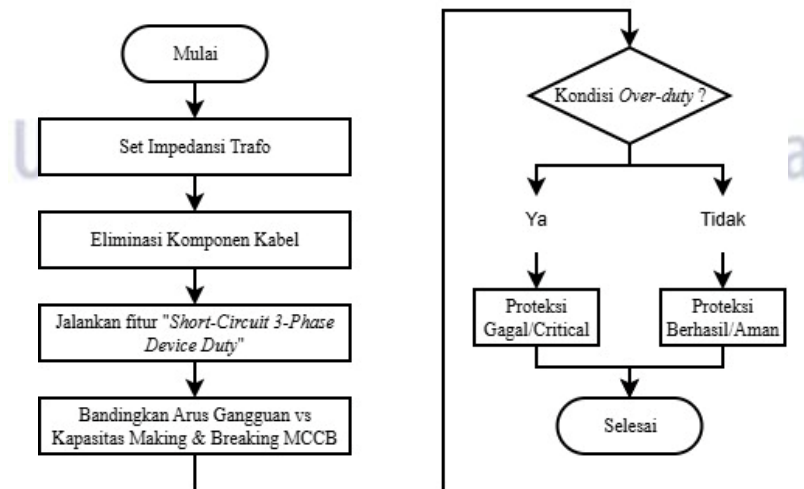
pada Gambar 2. Tahapan dimulai dengan melakukan studi literatur dan pengumpulan data sistem eksisting, yang kemudian digunakan sebagai basis pemodelan SLD pada perangkat lunak ETAP. Setelah penerapan skenario terburuk disimulasikan, tahap akhir dari penelitian ini adalah penarikan kesimpulan berdasarkan hasil evaluasi perangkat proteksi.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Secara spesifik, urutan proses eksekusi simulasi di dalam ETAP 19.0.1 ditunjukkan pada Gambar 3. Proses ini dimulai dari pengaturan impedansi transformator dan eliminasi komponen kabel, dilanjutkan dengan eksekusi modul *Short-Circuit 3-Phase Device Duty*. Pada tahap akhir

simulasi, algoritma ETAP akan memvalidasi status perangkat melalui tabel *Alert View* untuk menentukan apakah persentase pembebanan menembus kondisi *over-duty* (proteksi gagal) atau masih di bawah batas toleransi (International Electrotechnical Commission, 2016).



Gambar 3. Diagram Alir Proses Simulasi pada ETAP

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi gangguan hubung singkat tiga fasa (bolted fault) pada panel *Low Voltage Main Distribution Board* (LVMDB) dieksekusi menggunakan perangkat lunak ETAP 19.0.1 berdasarkan standar IEC 60909. Untuk memberikan evaluasi keandalan proteksi yang komprehensif, analisis dilakukan melalui dua tahapan skenario pengujian: kondisi eksisting (dengan redaman kabel) dan Worst-Case Scenario (tanpa redaman kabel).

Evaluasi Kapasitas pada Kondisi Eksisting (Pengaruh Redaman)

Simulasi tahap awal dieksekusi dengan mempertahankan topologi *Single Line Diagram* (SLD) sesuai kondisi riil instalasi, di mana seluruh komponen kabel *feeder* cabang yang menuju panel beban masih terhubung. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem beroperasi dalam batas aman, dan tidak ada peringatan kerusakan yang muncul pada tabel *Alert View* perangkat pemutus tenaga.

Kondisi aman ini tercipta karena impedansi bawaan dari kabel penghantar ($Z = R + jX$) bertindak sebagai peredam arus alami (*current limiter*). Jarak dan ukuran penampang kabel

memberikan nilai resistansi yang secara fisik membatasi lonjakan arus hubung singkat sebelum mencapai titik beban. Meskipun merepresentasikan kondisi normal sistem tertutup, evaluasi pada tahap ini belum menguji batas kekuatan termal dan mekanis absolut dari pemutus tenaga yang berada di pangkal distribusi (LVMDB). Oleh karena itu, simulasi lanjutan dengan modifikasi skenario terburuk mutlak diperlukan.

Evaluasi Keandalan Berbasis Skenario Terburuk (Tanpa Redaman)

Skenario terburuk (*Worst-Case*) disimulasikan dengan mengeliminasi seluruh komponen kabel penghantar secara total dan mengatur impedansi transformator pada angka 4%. Secara konsep keandalan kelistrikan, eliminasi kabel pada *software* tidak bertujuan untuk mengubah fisik instalasi pabrik, melainkan memodelkan titik jatuh gangguan padat (*Bolted Fault*) yang terjadi secara spesifik di pangkal terminal keluaran (*outgoing terminal*) pada *Circuit Breaker* di dalam panel LVMDB. Pada titik kritis tersebut, arus hubung singkat masif dari transformator akan menghantam perangkat pelindung tanpa sempat melewati efek redaman kabel sama sekali. Hasil komparasi antara arus gangguan murni yang tercipta dengan spesifikasi kapasitas pemutus tenaga dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Evaluasi *Device Duty* Pemutus Tenaga Berbasis *Worst-Case Scenario*

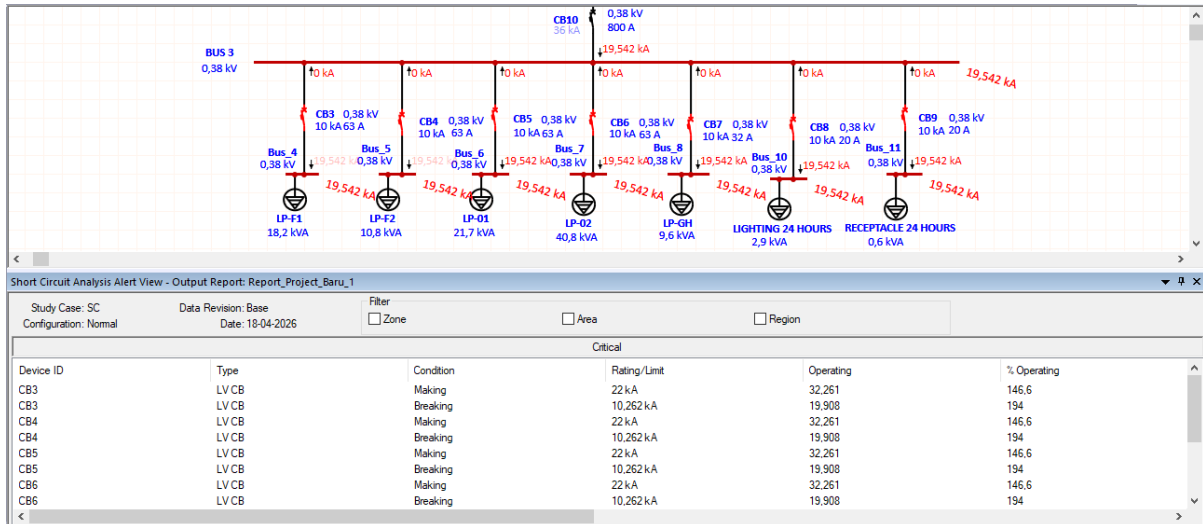
No	Nama CB	Kondisi Parameter	Kapasitas Limit (kA)	Arus Gangguan (kA)	%Operating	Status
1.	CB10	Breaking (Icu)	36	19,542	54,28%	Aman
		Making (Peak)	79	32,261	40,83%	Aman
2.	CB3	Breaking (Icu)	10,262	19,908	194,00%	Critical
		Making (Peak)	22	32.261	146,60%	Critical
3.	CB4	Breaking (Icu)	10,262	19,908	194,00%	Critical
		Making (Peak)	22	32.261	146,60%	Critical
4.	CB5	Breaking (Icu)	10,262	19,908	194,00%	Critical
		Making (Peak)	22	32.261	146,60%	Critical
5.	CB6	Breaking (Icu)	10,262	19,908	194,00%	Critical
		Making (Peak)	22	32.261	146,60%	Critical
6.	CB7	Breaking (Icu)	10,262	19,908	194,00%	Critical
		Making (Peak)	22	32.261	146,60%	Critical
7.	CB8	Breaking (Icu)	10,262	19,908	194,00%	Critical
		Making (Peak)	22	32.261	146,60%	Critical
8.	CB9	Breaking (Icu)	10,262	19,908	194,00%	Critical
		Making (Peak)	22	32.261	146,60%	Critical

Berdasarkan laporan pada fitur *Alert View* yang tertera pada tabel 1, sistem proteksi LVMDB

PT XYZ terbukti memiliki tingkat kerentanan tinggi saat dihadapkan pada gangguan ekstrem di panel

distribusi. Meskipun *Main Breaker* (CB10) tervalidasi aman dengan beban operasi hanya sebesar 54,28%, seluruh unit pemutus tenaga cabang (CB3-CB9) berada pada status *Critical*. Fenomena *over-duty* yang paling ekstrem terjadi pada parameter *breaking* (Icu), di mana arus gangguan

sebesar 19,908 kA menghantam perangkat yang memiliki limit kapasitas hanya 10,262 kA. Hal ini mengakibatkan lonjakan beban operasi hingga 194,0%, yang secara teknis mengindikasikan kegagalan total perangkat dalam memadamkan busur api (*arc flash*) saat terjadi gangguan.



Gambar 4. Kondisi *Over-Duty* pada Pemutus Tenaga Cabang LVMDB

Kondisi *over-duty* yang bisa dilihat pada Gambar 4 (ditandai dengan warna indikator kritis merah) memastikan bahwa pemutus tenaga cabang tersebut dipastikan gagal memadamkan busur api (*arc flash*) dan berisiko meledak secara termal maupun mekanis. Hal ini membuktikan bahwa ketika perlindungan dari redaman impedansi kabel hilang, spesifikasi *Molded Case Circuit Breaker* (MCCB) cabang eksisting tidak memiliki rentang toleransi yang cukup untuk menahan hantaman energi murni dari utilitas 280 MVAsc dan transformator 500 kVA. Sebaliknya, kelayakan operasi hanya divalidasi pada *Main Breaker* (CB10) yang bertindak sebagai pintu utama aliran daya. Dengan kapasitas *breaking* bawaan yang jauh lebih superior (36 kA), CB10 terbukti mampu menahan arus gangguan 19,542 kA dengan persentase pembebanan hanya sebesar 54,28%, sehingga terhindar dari status gagal.

Analisis Kegagalan Termal dan Mekanis pada Pemutus Cabang

Berdasarkan standar IEC 60909, evaluasi kegagalan pada pemutus tenaga tidak hanya ditinjau dari satu sisi, melainkan dari dua aspek ketahanan kritis: mekanis dan termal. Pada Tabel 1, terlihat bahwa seluruh *Circuit Breaker* cabang (CB3 hingga CB9) mengalami kegagalan ganda.

Pertama, pada siklus saat hubung singkat baru saja terjadi, arus puncak (*peak current*)

melonjak hingga menembus 32,2 kA. Hantaman energi pertama ini membebani *Making Capacity* pada alat hingga 146,6% (22 kA). Lonjakan pada siklus ini akan menghasilkan gaya magnetik yang sangat masif di sisi pemutus, yang berpotensi membengkokkan, mematahkan, atau menghancurkan kontak mekanis dari MCCB sebelum alat tersebut sempat *trip*.

Kedua, pada fase *steady-state* atau saat pemutus mencoba membuka kontak (*Breaking/Icu*), arus RMS yang harus dipadamkan berada di angka 19,9 kA, melampaui batas desain termal pabrikan (10 kA) hingga 194%. Ketidakmampuan memutus arus sebesar ini akan mengakibatkan busur api (*arc flash*) tidak dapat dipadamkan di dalam *arc chute*, yang berujung pada pelelehan material isolator dan memicu ledakan termal di dalam panel LVMDB.

Dampak Eskalasi Gangguan terhadap Keandalan Sistem PT XYZ

Kegagalan pemutus tenaga cabang dalam mengisolir gangguan hubung singkat membawa risiko eskalasi yang fatal bagi kontinuitas operasi PT XYZ. Karena CB cabang (seperti CB3) gagal memutus arus 19,9 kA, maka arus gangguan tersebut akan terus mengalir dan terakumulasi menuju *Main Breaker* (CB10). Meskipun CB10 tervalidasi aman dengan persentase *operating* 54,2%, kegagalan CB cabang akan memaksa CB10 untuk mengambil alih tugas pemutusan (*back-up tripping*).

Konsekuensi dari *tripping* pada CB10 adalah padamnya seluruh sistem kelistrikan (*total blackout*) pada panel LVMDDB. Hal ini berarti area produksi atau beban lain yang tidak mengalami gangguan (misalnya area yang disuplai oleh CB4 hingga CB9) akan ikut kehilangan suplai daya. Kondisi ini secara nyata melanggar prinsip dasar proteksi kelistrikan, yaitu selektivitas, dan akan mengakibatkan kerugian finansial akibat berhentinya seluruh proses operasional pabrik.

Mitigasi dan Rekayasa Spesifikasi Perangkat

Untuk menghilangkan kerentanan pada panel LVMDDB PT XYZ tanpa harus melakukan perombakan topologi jaringan secara besar-besaran, solusi engineering yang paling rasional adalah melakukan upsizing kapasitas hubung singkat pada sisi *circuit breaker* cabang.

Penentuan spesifikasi MCCB pengganti tidak boleh dilakukan secara acak, melainkan harus memenuhi standar *safety margin* operasional. Berdasarkan standar NFPA 70 (NEC) 2023 pada Pasal 210.20(A) dan Pasal 215.3, ukuran kapasitas perangkat proteksi arus lebih (MCB/MCCB) untuk melayani beban kontinu tidak boleh kurang dari 125% (dilebihkan 25%) dari beban yang dilayaninya. (National Fire Protection Association, 2023). Perhitungan spesifikasi $I_{cu(bar)}$ didasarkan pada persamaan 2 tentang batas toleransi keamanan berikut:

$$I_{cu(bar)} \geq I_{sc} \times (1 + \text{Safety Margin}) \quad (2)$$

$$I_{cu(bar)} \geq 19,908 \times (1 + 0,25)$$

$$I_{cu(bar)} \geq 24,885 \text{ kA}$$

Berdasarkan kalkulasi di atas, spesifikasi MCCB pada jalur cabang (CB3-CB9) yang semula memiliki I_{cu} 10 kA harus diganti dengan perangkat yang memiliki spesifikasi I_{cu} minimal 25 kA. Untuk membuktikan efektivitas penggantian ini, persentase pembebanan (*% Operating*) pada kondisi *breaking* dapat dievaluasi kembali menggunakan persamaan 1 tentang rasio beban operasi:

$$\% \text{ Operating} = \left(\frac{I_{sc}}{I_{cu}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$\% \text{ Operating} = \left(\frac{19,908}{25} \right) \times 100\%$$

$$\% \text{ Operating} = 79,632\%$$

Dengan spesifikasi baru sebesar 25 kA tersebut, dapat dibuktikan secara matematis bahwa persentase pembebanan *breaking* akan turun drastis menjadi sekitar 79,6%. Angka ini memvalidasi bahwa perangkat kini berada jauh di bawah ambang batas kritis (kondisi aman < 100%). Secara otomatis, nilai *Making Capacity*-nya juga akan

meningkat mengikuti kurva desain pabrikan, sehingga keandalan perlindungan mekanis dan termal sistem dapat terjamin sepenuhnya saat menghadapi *Worst-Case Scenario*.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil analisis keandalan sistem proteksi pada LVMDDB PT XYZ menggunakan pendekatan *Worst-Case Scenario*, penelitian ini menyimpulkan bahwa kondisi sistem tanpa redaman impedansi kabel mengungkapkan risiko kegagalan yang fatal pada jajaran pemutus tenaga cabang. Hasil simulasi menunjukkan bahwa arus gangguan hubung singkat tiga fasa murni mencapai angka 19,908 kA pada sisi percabangan, yang mengakibatkan seluruh pemutus tenaga eksisting (CB3-CB9) mengalami kondisi *over-duty* yang sangat kritis. Kegagalan tersebut mencakup aspek termal pada parameter *breaking* hingga mencapai 194% dan aspek mekanis pada parameter *making* sebesar 146,6%. Sebaliknya, pemutus tenaga utama (CB10) tervalidasi tetap aman dengan persentase pembebanan hanya sebesar 54,28% karena spesifikasi kapasitasnya yang jauh lebih tinggi. Melalui perhitungan rekayasa, ditemukan bahwa peningkatan kapasitas (*upsizing*) MCCB cabang menjadi minimal 25 kA secara matematis mampu menekan beban operasi hingga ke level aman sebesar 79,6%, sehingga sistem distribusi dapat memenuhi standar keandalan sesuai regulasi IEC 60909 (International Electrotechnical Commission, 2016).

Saran

Sebagai tindak lanjut praktis dari temuan penelitian ini, manajemen PT XYZ disarankan untuk segera memprioritaskan penggantian fisik unit MCCB pada jalur percabangan (CB3-CB9) dengan spesifikasi kapasitas pemutus nominal minimal 25 kA guna memitigasi risiko ledakan panel dan *total blackout*. Selain itu, mengingat sifat beban industri yang dinamis, perusahaan perlu melakukan audit energi dan simulasi kelistrikan secara berkala setiap kali terdapat penambahan mesin atau peningkatan kapasitas daya dari sumber utilitas. Untuk pengembangan penelitian di masa depan, sangat direkomendasikan untuk melakukan studi koordinasi proteksi yang lebih mendalam melalui kurva *Time Current Characteristic* (TCC). Hal ini krusial untuk memastikan bahwa setelah dilakukan *upsizing* komponen, selektivitas antara *main breaker* dan *branch breaker* tetap terjaga sehingga isolasi

gangguan dapat terjadi secara terlokalisasi tanpa mengganggu operasional keseluruhan pabrik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulrazak, W., Jasim, R. S., & Qahtan, H. (2023). Optimal Load Flow and Short Circuit Analysis for IEEE-14 Bus Power System using ETAP. *University of Thi-Qar Journal for Engineering Sciences*, 12(2), 81–87.
- Agustian, D., Damayanti, J., Septiani, M., Pratiwi, A. N., Khaerunnisa, P., Sumiyati, A., Saepullah, M. Z., Adnyano, I. K. D., Melkior, G. D. A., Hidayat, J., Samata, & Aribowo, D. (2025). Peran Keandalan Sistem Proteksi Sebagai Strategi Optimalisasi Distribusi Listrik Pada Jaringan Tegangan Menengah. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Komputer Dan Sains*, 3(1), 9–14. <https://prosiding.seminars.id/sainteks>
- Das, J. C. (2017). *Short-Circuit Load Flow and Harmonics*. CRC Press.
- Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J. (2012). *Power System Analysis and Design* (5th ed.). Cengage Learning.
- International Electrotechnical Commission. (2016). *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents* (Issue IEC 60909-0:2016).
- Marbun, R. R., Ridwan, R., Sangi, N. M., & Ticoh, J. D. (2024). Evaluasi Spesifikasi Pemutus Tenaga (Circuit Breaker) Dengan Analisa Hubung Singkat Menggunakan Etab Di Gardu Induk Tomohon 150 kV. *JUPITER (Jurnal Pendidikan Teknik Elektro)*, 9(2).
- National Fire Protection Association. (2023). *NFPA 70: National Electrical Code (NEC)*.
- Schlabbach, J. (2005). *Short-Circuit Currents*. Institution of Engineering and Technology (IET).

