

Analisis *Coordination Time Interval* Over Current Relay Distribusi Pengolahan Air Minum Berbasis *IEEE STD. 242*

Muhammad Al Faatih¹, Joko², Tri Rijanto³

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Kota Surabaya, Indonesia^{1,2,3}

*Email :

muhammadal.22041@mhs.unesa.ac.id, joko@unesa.ac.id, tririjanto@unesa.ac.id

Sejarah Artikel:

Diterima 15-05-2026
Disetujui 23-05-2026
Diterbitkan 25-05-2026

ABSTRACT

Electrical systems in Water Treatment Plants require reliable protection systems to ensure the continuity of equipment operation, particularly pump motors. Short-circuit faults can produce large fault currents that may damage equipment and disrupt operational processes. This study aims to analyze short-circuit currents and evaluate the coordination of Over Current Relays (OCR) in the electrical distribution system of IPAM based on the IEEE Std. 242 standard. The research was conducted by modeling the electrical system using ETAP software based on the single line diagram, transformer data, motor data, and existing relay settings. The analysis results show that the maximum short-circuit current on the 0.4 kV side ranges from 32,270–35,850 A, while on the 20 kV side it is approximately 3,128 A. The Time Current Characteristic (TCC) curve indicates that the feeder relay operating time ranges from 0.02 to 0.07 seconds, with a Coordination Time Interval (CTI) of approximately 0.2–0.3 seconds, which complies with the IEEE 242 standard (0.2-0.4 seconds). These results indicate that the protection coordination system operates selectively and reliably.

Keywords: short circuit; protection coordination; over current relay

ABSTRAK

Sistem kelistrikan pada Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) memerlukan sistem proteksi yang andal untuk menjaga kontinuitas operasi peralatan, khususnya motor pompa. Gangguan hubung singkat dapat menghasilkan arus gangguan yang besar, berpotensi merusak peralatan dan mengganggu proses operasional. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis arus hubung singkat dan mengevaluasi koordinasi *Over Current Relay (OCR)* pada sistem distribusi listrik IPAM berdasarkan standar IEEE Std. 242. Penelitian dilakukan melalui pemodelan sistem menggunakan perangkat lunak ETAP berdasarkan data *single line diagram*, transformator, motor, dan setting relai eksisting. Hasil analisis menunjukkan bahwa arus hubung singkat maksimum pada sisi 0,4 kV berada pada kisaran 32.270–35.850 A, sedangkan pada sisi 20 kV sekitar 3.128 A. Kurva *Time Current Characteristic (TCC)* menunjukkan bahwa waktu operasi relai feeder berkisar 0,02–0,07 detik, dengan nilai *Coordination Time Interval (CTI)* sekitar 0,2–0,3 detik, sehingga memenuhi standar IEEE 242 (0,2-0,4 detik). Hasil ini menunjukkan bahwa koordinasi sistem proteksi telah bekerja secara selektif dan andal.

Katakunci: hubung singkat ; koordinasi proteksi ; *over current relay*

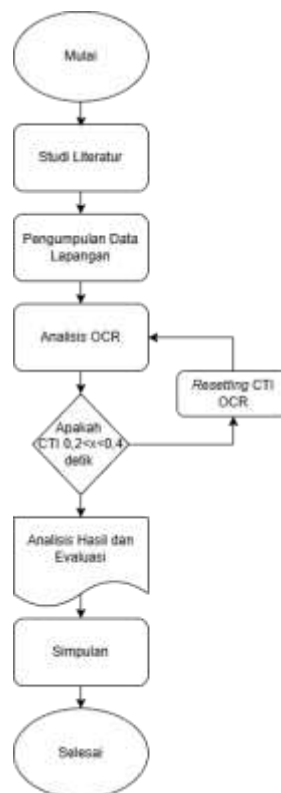
PENDAHULUAN

Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) merupakan infrastruktur kritis perkotaan yang operasionalnya bergantung mutlak pada suplai energi listrik yang kontinu dan andal. Karakteristik beban listrik di IPAM didominasi oleh motor-motor induksi tiga fasa berdaya besar untuk menggerakkan pompa utama dari unit intake hingga jaringan distribusi. Karakteristik beban yang dominan ini menuntut sistem proteksi kelistrikan yang kokoh guna menghindari interupsi proses pengolahan air bersih. Namun, sistem tenaga listrik secara alami rentan terhadap gangguan hubung singkat maupun beban lebih bersifat stokastik yang dipicu penuaan isolasi kabel ataupun kerusakan mekanis belitan. Sebagai manifestasi dari kompleksitas sistem kelistrikan tersebut, insiden kebakaran panel utama telah terjadi di IPAM objek studi pada 29 November 2024 yang berdampak pada terhentinya layanan air bersih darurat dan kerusakan fisik material secara signifikan. Peristiwa katastrofik tersebut memicu urgensi untuk melakukan analisis menyeluruh terhadap parameter pengaturan sistem proteksi eksisting guna memastikan apakah skema pengamanan yang diterapkan secara teoritis masih memadai atau memerlukan tindakan korektif. Guna memitigasi meluasnya dampak gangguan, penggunaan relai arus lebih (Over Current Relay / OCR) yang terkoordinasi secara hierarkis menjadi prioritas utama. Keandalan skema ini ditentukan oleh ketepatan penentuan nilai arus pickup dan penundaan waktu operasi yang sengaja diberikan antar perangkat pengaman, atau disebut Coordination Time Interval (CTI). Analisis koordinasi proteksi industri harus merujuk pada standar global IEEE Std. 242 (Buff Book) yang merekomendasikan batas aman nilai CTI ideal antar-relai pada jaringan industri berada dalam rentang 0,2 hingga 0,4 detik. Rentang tersebut diperlukan untuk mengakomodasi akumulasi waktu buka fisik circuit breaker, waktu overtravel relai, dan faktor toleransi keamanan di lapangan. Beberapa literatur terdahulu telah mengkaji keandalan sistem proteksi pada instalasi industri. Gumilang dkk. (2023) membuktikan efektivitas pemodelan digital dengan perangkat lunak rekayasa tenaga listrik untuk menentukan parameter setelan relai secara akurat pada industri beban kontinu. Syah dkk. (2021) menegaskan bahwa kegagalan mengidentifikasi magnitudo arus hubung singkat akan memicu kerusakan isolasi kabel permanen. Sementara itu, Filani (2016) mengevaluasi koordinasi proteksi di IPAM dan menyimpulkan bahwa integrasi sistem kelistrikan sekecil apa pun mewajibkan adanya evaluasi berkala pada kurva Time Current Characteristic (TCC) demi menghindari kegagalan operasi (nuisance trip) pompa vital. Meskipun efektivitas simulasi digital telah divalidasi oleh kajian-kajian sebelumnya, terdapat kesenjangan riset (research gap) yang mendasar. Penelitian terdahulu mayoritas berfokus pada rancangan sistem kelistrikan baru atau integrasi pembangkit makro. Sebaliknya, penelitian ini memposisikan diri sebagai analisis pasca-gangguan (post-fault investigation) untuk memverifikasi kelayakan teoritis dari parameter setting aktual kelistrikan yang tercatat di atas kertas. Analisis ini sangat krusial untuk membuktikan secara saintifik apakah insiden kebakaran di lapangan disebabkan oleh kesalahan kalkulasi parameter penjenjangan arus-waktu (miscoordination) atau justru dipicu oleh faktor eksternal di luar kendali relai, seperti perlambatan respons mekanis akibat penuaan komponen (circuit breaker aging). Kebaruan lain terletak pada kedalaman analisis subjek yang menguji karakteristik penjenjangan waktu tiga level proteksi sekaligus (sisi hulu feeder, sekunder trafo, dan primer trafo 20 kV) pada tiga unit penyulang pompa berdaya besar dengan kapasitas beban kontras, yaitu Distribusi Utara 3 (315 kW), Distribusi Utara 5 (200 kW), dan Air Baku Utara 3 (75 kW). Berdasarkan kesenjangan tersebut, rumusan masalah penelitian ini diarahkan untuk mengetahui karakteristik kurva TCC dan nilai CTI sistem proteksi OCR eksisting pada unit Distribusi Utara 3, Distribusi Utara 5, dan Air Baku Utara 3 saat terjadi hubung singkat tiga fasa, serta bagaimana tingkat kesesuaiannya terhadap batasan standar IEEE Std. 242. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara kuantitatif kinerja koordinasi proteksi tersebut melalui pemodelan simulasi digital guna

menghasilkan dokumen evaluasi teknis yang tervalidasi. Hasil analisis ini diharapkan dapat menjadi landasan ilmiah yang kuat bagi manajemen untuk memetakan akar masalah riil di lapangan, sekaligus mengonfirmasi bahwa keandalan data penyetelan eksisting di atas kertas telah memenuhi target selektivitas demi menjaga kontinuitas suplai air bersih perkotaan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis studi kasus investigatif dan simulasi digital makro untuk menguji keandalan sistem proteksi kelistrikan. Wilayah sasaran penelitian dan seluruh pengumpulan data teknis dilaksanakan secara total di Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM). Fokus pengamatan utama diarahkan pada jaringan distribusi internal tegangan menengah 20 kV hingga tegangan rendah 0,4 kV. Tahapan rancangan penelitian dilaksanakan secara berjenjang dan sistematis, diawali dari pelaksanaan studi literatur mendalam, dilanjutkan dengan pengumpulan data parameter fisik lapangan, pemodelan sistem, simulasi uji hubung singkat, hingga analisis komparatif kurva karakteristik waktu-arus *Time Current Characteristic (TCC)*. Dikarenakan penelitian rekayasa ini menggunakan data total dari satu kesatuan sistem kelistrikan yang spesifik dan terisolasi pada objek infrastruktur kritis tersebut, studi ini tidak menerapkan konsep populasi dan sampling statistik, melainkan menganalisis seluruh subjek parameter teknis secara utuh. Rancangan penelitian ini disusun secara sistematis untuk memastikan setiap tahapan analisis koordinasi proteksi dilakukan secara terukur dan terarah. Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Rancangan Penelitian

Teknik analisis data dijalankan melalui tiga tahapan simulasi deterministik menggunakan perangkat lunak *Electrical Transient Analyzer Program* (ETAP) sebagai instrumen uji rekayasa utama. Tahap pertama adalah studi gangguan hubung singkat (*short-circuit analysis*) untuk memetakan magnitudo arus gangguan terbesar dan terkecil pada sistem distribusi kelistrikan IPAM. Skenario gangguan disimulasikan untuk hubung singkat tiga fasa simetris durasi 4 siklus (*interrupting*) guna mendapatkan nilai arus maksimum ($I_{sc_{max}}$) sebagai batas atas penyetelan elemen *instantaneous*. Perhitungan teoritis arus hubung singkat tiga fasa (I_{sc_3}) dievaluasi menggunakan Persamaan 1, di mana V_{LN} merepresentasikan tegangan fasa ke netral (Volt) dan X_1 merepresentasikan nilai reaktansi urutan positif (Ω).

$$I_{sc_3} = \frac{V_{LN}}{X_1} \quad (1)$$

Keterangan:

I_{sc_3} = Arus hubung singkat 3 fasa (Ampere)

V_{LN} = Tegangan fasa ke netral (Volt)

X_1 = Reaktansi urutan positif (Ω)

Sebaliknya, untuk menguji batas bawah sensitivitas relai terhadap gangguan terkecil antar-fasa pada durasi 30 siklus (*steady-state*), dilakukan kalkulasi arus hubung singkat minimum ($I_{sc_{min}}$). Jika reaktansi urutan positif (X_1) sama dengan reaktansi urutan negatif (X_2), maka besar nilai arus hubung singkat dua fasa (I_{sc_2}) ditentukan berdasarkan fungsi konversi Persamaan 2.

$$I_{sc_2} = \frac{V_{LL}}{X_1+X_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{sc_3} \approx 0,86 I_{sc_3} \quad (2)$$

Keterangan:

I_{sc_2} = Arus hubung singkat 2 fasa (Ampere)

V_{LL} = Tegangan antar fasa (Volt)

X_1 = Reaktansi urutan positif (Ω)

X_2 = Reaktansi urutan negatif (Ω)

Tahap kedua melibatkan evaluasi komparatif-kuantitatif terhadap keandalan skema koordinasi proteksi eksisting. Parameter pengaturan riil dari lapangan diinput ke dalam modul *Star Protective Device Coordination* pada ETAP untuk menghasilkan plot kurva grafik karakteristik waktu-arus atau *Time Current Characteristic (TCC)*. Indikator kelayakan koordinasi dinilai dari tiga pilar utama standar internasional IEEE Std. 242 (Buff Book), yaitu selektivitas (*selectivity*), sensitivitas (*sensitivity*), dan kecepatan (*speed*). Margin tunda waktu yang memisahkan kurva operasi antara relai utama sisi hilir (*downstream*) dan relai cadangan sisi hulu (*upstream*) didefinisikan sebagai *Coordination Time Interval (CTI)*. Berdasarkan instrumen evaluasi standar IEEE Std. 242, rentang nilai batas aman CTI yang ideal dan diizinkan untuk instalasi industri wajib berada pada rentang 0,2 detik hingga 0,4 detik guna mengeliminasi risiko tumpang tindih kurva grafis (*crossing*) yang dapat memicu kegagalan sistem (*miscoordination*).

Tahap ketiga adalah proses simulasi iteratif (*iterative simulation*) berupa perancangan dan perhitungan ulang (*resetting*) parameter OCR apabila pengujian tahap kedua menunjukkan adanya pelanggaran batas aman CTI ($CTI < 0,2$ detik) atau terjadi perpotongan kurva grafis. Penyetelan arus pickup primer (I_{set}) ditentukan dengan memastikan relai tidak trip saat beban mencapai kondisi puncak maksimum, di mana penentuan nilai tap pada sisi sekunder CT dihitung dengan Persamaan 3.

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT_{primary}} \quad (3)$$

Keterangan:

Tap = *Setting* arus pada sisi sekunder

I_{set} = Setting arus pickup primer

$CT_{primary}$ = Rasio transformator arus pada sisi primer

Batas penyetelan arus pickup diuji sensitivitasnya berdasarkan acuan British Standard. Batas *setting* menurut British BS 142 adalah $1.05-1.3 I_{set}$. Sedangkan untuk elemen tunda waktu invers (*time over current*), perhitungan matematis waktu operasi relai (td) ditentukan berdasarkan rumusan standar IEC 60255 melalui Persamaan 4.

$$td = \frac{k \times T}{\beta \times \left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^\alpha - 1 \right]} \quad (4)$$

Keterangan:

td = waktu operasi (detik)

T = *time dial*

I = nilai arus (Ampere)

I_{set} = arus *pickup* (Ampere)

k = koefisien invers 1

α = koefisien invers 2

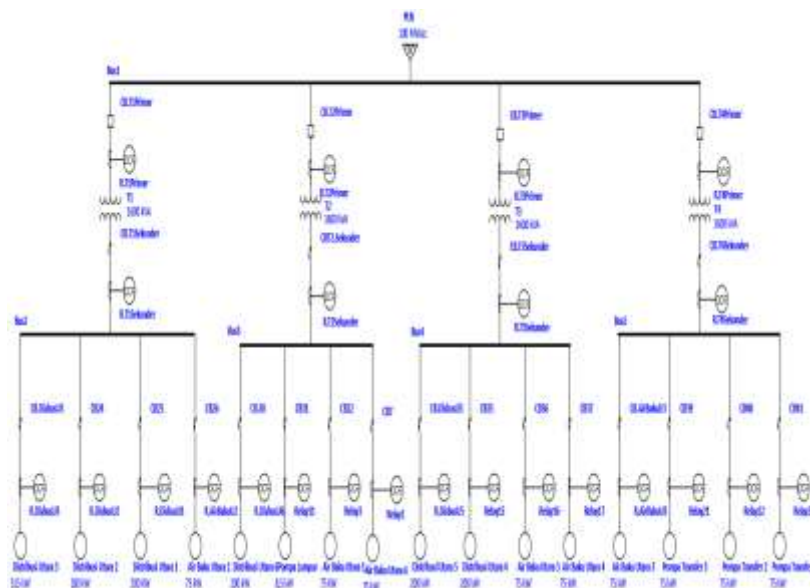
β = koefisien invers 3

Karakteristik relai pengaman kelistrikan IPAM ini diposisikan pada kurva Extremely Inverse dengan ketetapan nilai koefisien kelistrikan yang mengacu pada standar manufaktur, yaitu nilai $k = 80$, $\alpha = 2$, dan $\beta = 0,808$. Penyesuaian nilai parameter dilakukan secara iteratif pada simulasi komputer hingga seluruh pasangan relai seri (level penyulang hilir, sisi sekunder transformator, hingga sisi primer transformator 20 kV) menghasilkan kurva TCC yang berjenjang secara selektif, andal, dan bebas dari risiko pemadaman meluas (*nuisance trip*). Tabel 1 merupakan tabel koefisien standar *inverse time dial* yang digunakan untuk perhitungan matematis waktu operasi relai arus lebih berdasarkan tiga tipe kurva *inverse* yang umum digunakan.

Tabel 1 Koefisien Invers Time Dial (sumber M. B. Atsever, 2021)

Tipe Kurva	Koefisien		
	k	α	β
<i>Standard Inverse</i>	0,14	0,02	2,970
<i>Very Inverse</i>	13,50	1,00	1,500
<i>Extremely Inverse</i>	80,00	2,00	0,808

Data terdiri dari pengaturan jaringan, spesifikasi transformator, serta kapasitas motor pompa untuk pengolahan air. Sebagai gambaran visual, berikut adalah diagram garis tunggal (*single line diagram*) yang menunjukkan hubungan antar komponen utama, mulai dari sumber listrik PLN hingga ke titik beban di setiap busbar. Gambar 2 *single line diagram* dan *over current relay* yang dianalisis



Gambar 2. single line diagram

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian hasil dan pembahasan bisa dibagi ke dalam beberapa sub bahasan. Pemaparan hasil dan pembahasan harus memberikan deskripsi yang jelas dan tepat mengenai temuan penelitian, interpretasi penulis terhadap temuan tersebut, dan kesimpulan yang dapat ditarik.

Analisis sistem distribusi kelistrikan pada objek studi dilakukan dengan membangun model digital twin sirkuit menggunakan perangkat lunak ETAP berdasarkan diagram garis tunggal (*single line diagram*) riil jaringan distribusi. Sistem kelistrikan utama disuplai oleh jaringan PLN 20 kV dengan kapasitas hubung singkat sebesar 100 MVAsc. Parameter suplai tersebut diturunkan menuju busbar tegangan rendah 0,4 kV melalui empat unit transformator distribusi yang terpasang paralel dengan rating masing-masing sebesar 1600 kVA dan nilai impedansi persen sebesar 6%. Beban utama yang terinterkoneksi pada bus distribusi didominasi oleh motor-motor induksi tiga fasa berdaya besar untuk penggerak unit pompa, dengan rincian beban meliputi Starter Distribusi Utara 1 hingga 6 (rating daya bervariasi antara 200 kW hingga 315 kW) serta unit Starter Air Baku Utara 1 hingga 6 dengan kapasitas masing-masing sebesar 75 kW.

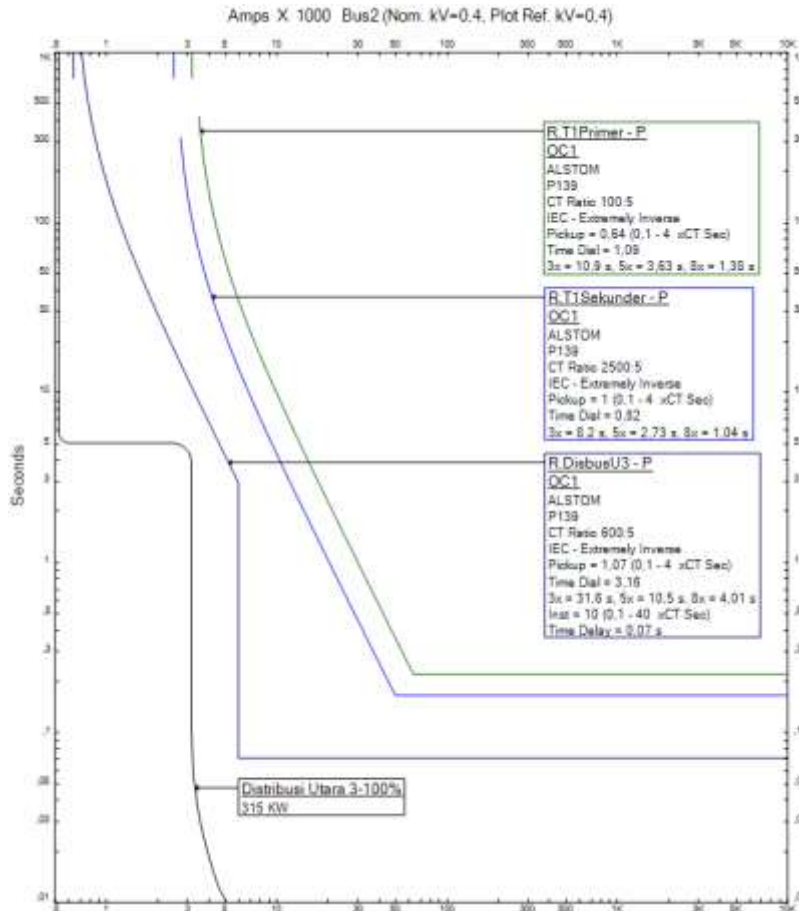
Simulasi studi hubung singkat dilaksanakan deterministik mengacu pada panduan regulasi IEEE untuk memetakan magnitudo arus gangguan simetris durasi 4 siklus (*interrupting current*) sebagai penentu batas atas selemen *instantaneous*, serta gangguan asimetris antar-fasa durasi 30 siklus (*steady-state current*) untuk menguji sensitivitas batas bawah pickup relai. Hasil pemetaan magnitudo arus gangguan pada seluruh busbar distribusi utama disajikan secara terintegrasi pada Tabel 2.

Tabel 2 Hubung singkat minimum

No	BUS ID	Tegangan (kV)	Isc min (A)	Isc max (A)
1	Bus 1	20	2.500	3.128
2	Bus 2	0,4	26.310	35.850
3	Bus 3	0,4	26.310	32.630
4	Bus 4	0,4	26.310	33.850
5	Bus 5	0,4	26.310	32.270

Starter Distribusi Utara 3 315 kW

Sistem pengamanan pada unit penyulang pompa Distribusi Utara 3 (315 kW) dengan arus beban penuh (FLA) sebesar 535 A menggunakan relai OCR ALSTOM dengan karakteristik kurva *Extremely Inverse* dan rasio trafo arus (CT) 600/5 A. Arus pickup primer (*Iset*) disetel menggunakan batas pengetukan Tap 1,07 In yang menghasilkan nilai aktual sebesar 640 A. Penyetelan tunda waktu (*time dial*) relai ditetapkan sebesar T = 3,16 detik untuk mencapai target waktu operasi teoritis. Untuk mengamankan sistem dari arus hubung singkat masif, elemen *instantaneous* pickup dikonfigurasi pada Tap 10 In atau setara dengan *Iset* aktual sebesar 6000 A. Pada sisi hulu transformator, relai T1 Sekunder (karakteristik *Extremely Inverse*, rasio CT 2500/5 A) disetel dengan arus pickup Tap 1 In (*Iset* = 2500 A) dan *time dial* sebesar 0,82 detik. Penyetelan tingkat akhir pada relai T1 Primer di sisi 20 kV (rasio CT 100/5 A) dikonfigurasi menggunakan pengetukan Tap 0,64 In (*Iset* = 64 A) dengan parameter *time dial* bernilai 1,09 detik untuk target operasi backup secepat 0,87 detik. Visualisasi kurva karakteristik waktu-arus *Time Current Characteristic (TCC)* hasil plot sirkuit proteksi ditunjukkan pada Gambar 3.



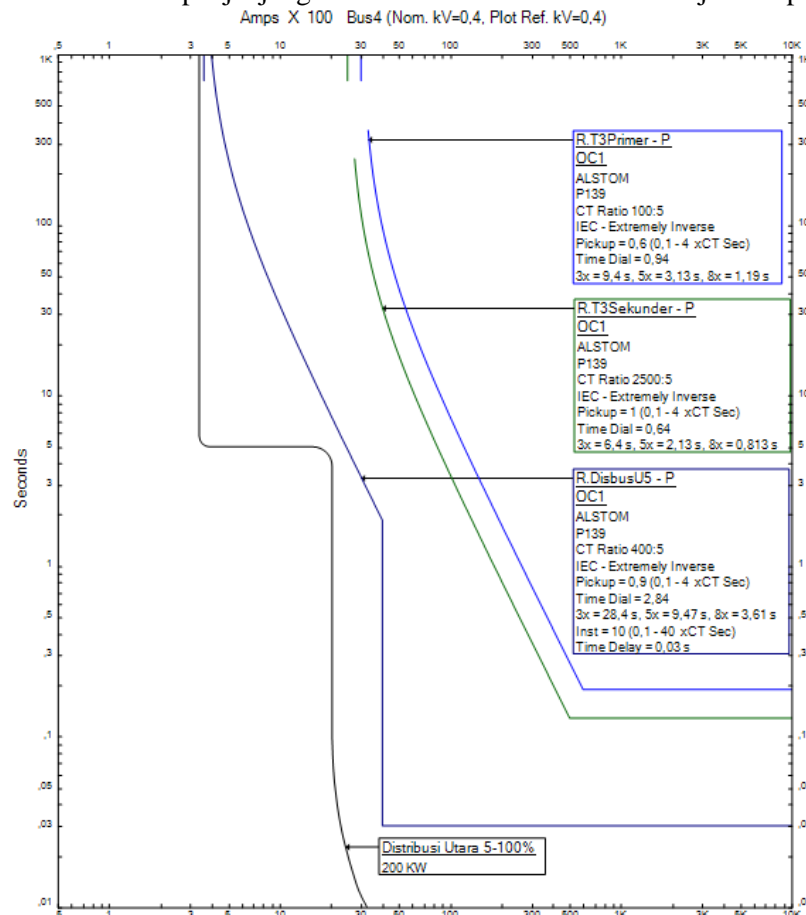
Gambar 3. Kurva TCC Distribusi Utara 3

Berdasarkan grafik kurva TCC pada Gambar 3, apabila terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa maksimum pada Bus 2 sebesar 35.850 A, relai pengamanan feeder (R.DisbusU3) akan bekerja paling cepat mengisolasi titik gangguan melalui elemen *instantaneous* dengan waktu tunda riil hanya 0,07 detik.

Keandalan skema koordinasi dinilai sangat baik karena kurva TCC dari ketiga tingkatan relay (R.DisbusU3, R.T1Sekunder, dan R.T1Primer) berjenjang secara hierarkis tanpa adanya indikasi garis kurva yang saling memotong (crossing). Nilai selisih interval waktu penjenjangan *Coordination Time Interval (CTI)* antar-relai terukur konsisten pada kisaran 0,3 detik, yang berarti sepenuhnya patuh terhadap rekomendasi batas aman standar internasional IEEE Std. 242 ($0,2 \text{ detik} \leq \text{CTI} \leq 0,4 \text{ detik}$). Jika terjadi kegagalan operasi mekanis pada relai penyulang hilir, fungsi backup protection berjenjang akan diambil alih oleh relai T1 Sekunder, diikuti oleh relai T1 Primer sebagai proteksi hulu tingkat akhir.

Starter Distribusi Utara 5 200 kW

Penyulang Distribusi Utara 5 beroperasi mendistribusikan daya menuju beban elektro motor 200 kW dengan nilai (FLA) sebesar 340 A. Unit proteksi OCR hilir menggunakan relai ALSTOM dengan tipe kurva Extremely Inverse (rasio CT 400/5 A) yang disetel pada nilai pengetukan arus pickup primer Tap 0,9 *In* (*Iset* = 450A) dan indeks time dial sebesar 2,84. Proteksi arus hubung singkat tinggi dikendalikan melalui penyetelan instantaneous pickup Tap 10 *In* yang setara dengan nilai aktual 5000 A. Untuk sisi hulu transformator, relai T3 Sekunder dikonfigurasi dengan arus pickup *Iset* = 2500 A (time dial = 0,64) dan relai T3 Primer di sisi tegangan menengah disetel pada nilai *Iset* = 60 A dengan parameter time dial bernilai 0,94. Visualisasi kurva karakteristik penjenjangan arus-waktu TCC unit ini ditunjukkan pada Gambar 4.

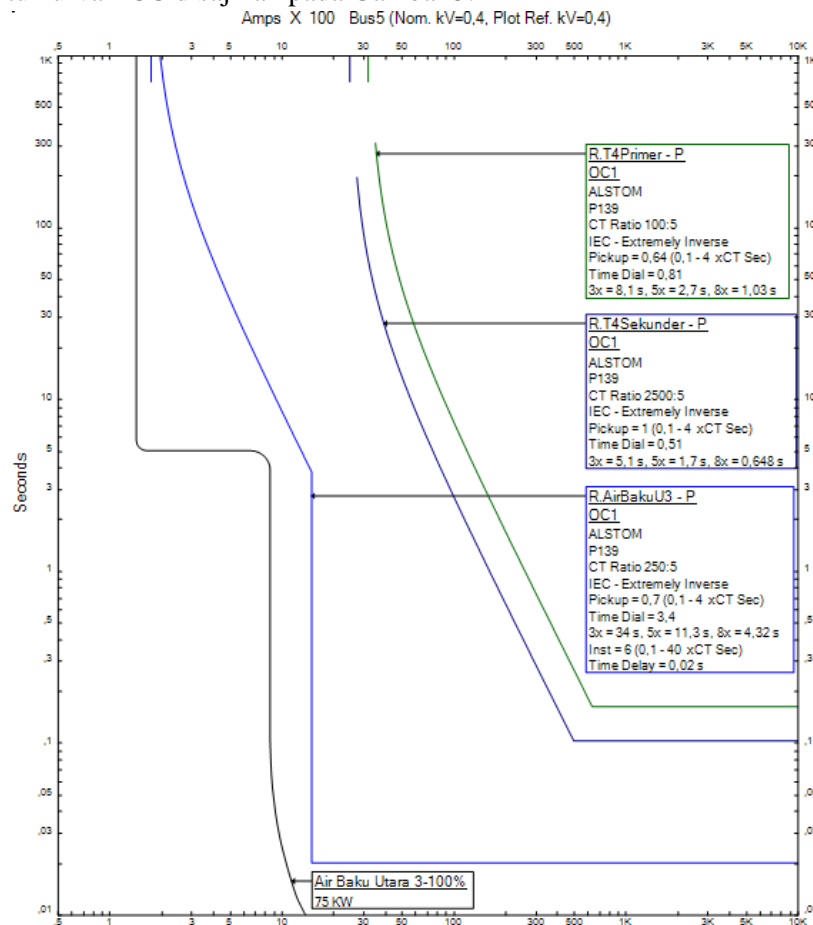


Gambar 4. Kurva TCC Distribusi Utara 5

Analisis kurva TCC pada Gambar 4 mengonfirmasi bahwa jika terjadi fenomena gangguan hubung singkat maksimum tiga fasa di Bus 4 (33.850 A), relai pengaman penyulang (R.DisbusU5) akan trip seketika dalam durasi waktu 0,03 detik via elemen instantaneous. Skema proteksi ini membuktikan tingkat selektivitas yang tinggi, di mana gangguan lokal di sisi beban dapat diputus secara mandiri sebelum sempat merambat menuju komponen transformator hulu. Selisih tunda penjenjangan waktu operasi (CTI) menuju relai pengaman transformator hulu (T3 Sekunder) berada pada nilai stabil 0,3 detik, memenuhi kriteria toleransi waktu operasi mekanik pemutus daya yang disyaratkan oleh regulasi standar IEEE Std. 242.

Air Baku Utara 3 75 kW

Unit penyulang Air Baku Utara 3 menyuplai beban elektro motor pompa dengan kapasitas daya sebesar 75 kW dan nilai arus nominal $I_{FLA} = 127,3$ A. Pengaman OCR hilir (rasio CT 250/5 A) menggunakan karakteristik kurva tunda Extremely Inverse dengan arus pickup primer disetel pada Tap 0,7 In ($I_{set} = 175$ A). Indeks time dial relai hilir ini sengaja dikonfigurasi pada nilai tinggi, yaitu T = 3,4 detik. Di sisi hulu, relai T4 Sekunder diatur pada parameter arus pickup $I_{set} = 2500$ A (time dial = 0,51 detik) dan relai primer T4 Primer disetel pada Tap 0,64 In ($I_{set} = 64$ A, time dial = 0,81 detik). Konstruksi grafik penjenjangan waktu kurva TCC disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Kurva TCC Air Baku Utara 3

Melalui analisis kurva TCC pada Gambar 5, dapat diidentifikasi bahwa penentuan indeks time dial yang besar ($T = 3,4$ detik) pada relai penyulang hilir (R.AirBakuU3) sangat krusial untuk mencegah terjadinya trip palsu (nuisance trip) akibat lonjakan arus inrush trafo atau fenomena transien saat awalan starting motor pompa. Meskipun kurva tunda invers sengaja diperlambat untuk menahan arus start, keandalan proteksi kecepatan tinggi saat terjadi gangguan besar hubung singkat maksimum di Bus 5 (32.270 A) tetap dijamin penuh oleh elemen instantaneous (Tap 6 In , $Iset = 1500$ A) yang bekerja sangat responsif memotong sirkuit kelistrikan dalam waktu 0,02 detik. Pengukuran kuantitatif nilai jarak antar-kurva (CTI) terhadap relai pengaman transformator hulu berada pada rentang penjenjangan 0,2 hingga 0,3 detik, yang menegaskan bahwa seluruh skema koordinasi penyulang pengolahan air baku ini telah bekerja secara selektif, andal, dan patuh terhadap batas toleransi IEEE Std. 242.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis koordinasi Over Current Relay (OCR) dan evaluasi karakteristik kurva TCC yang dilakukan menggunakan simulasi perangkat lunak ETAP dengan mengacu pada regulasi standar IEEE Std. 242, maka dapat disimpulkan bahwa skema proteksi eksisting secara teoritis pada ketiga unit penyulang pompa utama IPAM Ngagel 1 telah bekerja secara selektif, responsif, dan andal. Pada unit Distribusi Utara 3 (315 kW), relai feeder mampu mengisolasi gangguan hubung singkat maksimum dalam waktu 0,07 detik dengan margin penjenjangan waktu atau Coordination Time Interval (CTI) sebesar 0,3 detik. Performa pengamanan pada penyulang Distribusi Utara 5 (200 kW) juga telah memenuhi prinsip selektivitas dengan kecepatan pemutusan elemen instantaneous mencapai 0,03 detik dan nilai CTI konsisten pada angka 0,3 detik. Sementara itu, unit proteksi pada Air Baku Utara 3 (75 kW) terbukti sangat responsif dengan waktu clearing fault tercepat yaitu 0,02 detik serta nilai penjenjangan CTI berkisar antara 0,2 hingga 0,3 detik.

Seluruh visualisasi grafik karakteristik kurva TCC dari ketiga jalur beban tersebut membuktikan tidak adanya tumpang tindih maupun perpotongan garis (crossing) antar-relai berjenjang (hilir-sekunder-primer), di mana nilai CTI yang dihasilkan sepenuhnya memenuhi batas toleransi aman yang direkomendasikan dalam standar IEEE Std. 242 (0,2–0,4 detik) sehingga skema backup protection kelistrikan dapat terpenuhi secara ideal. Hasil analisis kuantitatif ini memberikan konfirmasi saintifik penting bahwa data pengaturan parameter proteksi eksisting di atas kertas sebenarnya sudah sangat layak dan andal. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa insiden kebakaran ruang panel utama yang terjadi bukan dipicu oleh kegagalan sistem kalkulasi koordinasi waktu-arus (miscoordination), melainkan akibat degradasi performa fisik sirkuit di lapangan seperti fenomena penuaan komponen mekanis pemutus daya (circuit breaker aging) yang mengalami perlambatan respons mekanik.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Natasya. (2024). Studi koordinasi proteksi gangguan pada substation 7 yang mengakibatkan blackout. *Jurnal TEKTRONIK - Politeknik Negeri Lhokseumawe*, vol. 8, no.1, pp. 68-75, doi: <http://dx.doi.org/10.30811/tektro.v8i1.5672>.
- S. Barikiyah, T. T. Utama, S. Nengse, and R. D. N. Setyowati. (2023). Evaluasi sistem jaringan distribusi air minum pdam kota Mojokerto instalasi pengolahan air (ipa) wates zona pelayanan pengolahan air prajurit kulon. *Jurnal Reka Lingkungan*, vol. 11, no. 2, pp. 152–161, doi:

- 10.26760/rekalingkungan.v11i2.152-161.
- I. Rais, A. Rahardjo, and F. Husnayain. (2021). Evaluasi perancangan instalasi listrik tenaga di perusahaan air minum. *Jetri Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 18, no. 1, pp. 91–106, doi: 10.25105/jetri.v18i1.7404.
- F. Gumilang, B. P. Purnomo, and I. T. Prakoso. (2023). Analisis koordinasi sistem proteksi menggunakan software etap untuk meningkatkan keandalan jaringan distribusi listrik 20 kv pada perusahaan yang bergerak di bidang pengolahan makanan. *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 7, no. 2, pp. 74-85, doi: 10.31000/jte.v7i2.9808.
- C. P. Juwono, J. Joko, B. Suprianto, & Endryansyah. (2022). Simulasi sistem proteksi motor induksi tiga fasa terhadap gangguan menggunakan Programmable Logic Controller (PLC) Omron CP1H berbasis Cx-Programmer 9.6. *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 11, no.3, pp. 409-415, doi: <https://doi.org/10.26740/jte.v11n3.p409-415>.
- Syah, F. R., Haryudo, S. I., Kartini, U. T., & Kholis, N., (2021). Analisis hubung singkat pada sistem distribusi 20 kv PT. Pertamina ep asset 4 field Cepu distrik ledok menggunakan ETAP 12.6.0. *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, no. 3, pp. 699-706, doi: <https://doi.org/10.26740/jte.v10n3.p699-706>.
- Saad. M. Saad, F. Alasali, N. E. Nailly, A. Elhaffar, T. Hussein, and F. A. Mohamed. (2021). Coordination of mixed overcurrent and voltage-restrained overcurrent relays to avoid miscoordination problems considering iec time-current curve limitations. 12th International Renewable Energy Congress (IREC), pp. 1–6, doi: 10.1109/IREC52758.2021.9624932.
- L. Hong, M. Rizwan, M. Wasif, S. Ahmad, M. Zaindin, and M. Firdausi. (2021). User-defined dual setting directional overcurrent relays with hybrid time current-voltage characteristics-based protection coordination for active distribution network. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 62752–62769, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3074426.
- IEEE std C37.230. (2020). IEEE guide for protective relay applications to distribution lines, pp. 1-106, link: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9382208>
- S. P. Ramli et al. (2021). Optimal directional overcurrent relay coordination based on computational intelligence technique: a review. *Turkish Journal Electrical Engineering Computation Sciences*, vol. 29, no. 3, pp. 1284–1307, doi: 10.3906/elk-2012-98.
- A. Alamshah et al. (2025). Recent developments of directional overcurrent relay coordination in ring distribution network based on hybrid optimization techniques. *IEEE Access*, vol. 13, pp. 14961–14982, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3524589.
- IEEE std. 242. (2001). IEEE Recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems, pp. 1-751, link: <https://ieeexplore.ieee.org/document/974402>
- A. Draz, M. M. Elkholy, and A. A. El-Fergany. (2021). Slime mould algorithm constrained by the relay operating time for optimal coordination of directional overcurrent relays using multiple standardized tripping curves. *Neural Computing Applications*, vol. 33, no. 18, pp. 11875–11887, doi: 10.1007/s00521-021-05879-x.
- F. Aminifar, M. Abedini, T. Amraee, P. Jafarian, M. H. Samimi, and M. Shahidehpour. (2022). A review of power system protection and asset management with machine learning techniques. *Energy System*, vol. 13, no. 4, pp. 855–892, doi: 10.1007/s12667-021-00448-6.
- G. A. Ibrahimusa, J. Joko, T. Wrahatnolo, and A. I. Agung, (2023). Analisis Koordinasi Setting Relay Proteksi Pada Jaringan Distribusi 20 kV di PT. PLN UP3 Kediri Gardu Induk Pare. *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 12, no. 1, pp. 28–36, doi: 10.26740/jte.v12n1.p28-36.
- D. E. Prasetyawan. (2021). Design of electrical setting protection system Indarung VI cement plant (Case study new cement plant construction at PT Semen Padang). *Jurnal Amplifier, Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 11, no. 1, pp. 43–49, doi: 10.33369/jamplifier.v11i1.15038.
- M. Ghanbari, M. Gandomkar, and J. Nikoukar. (2021). Protection coordination of bidirectional overcurrent

- relays using developed particle swarm optimization approach considering distribution generation penetration and fault current limiter placement. *IEEE Canadian Journal Electrical Computer Engineering*, vol. 44, no. 2, pp. 143–155, doi: 10.1109/ICJECE.2020.3018876.
- Y. Siregar, W. Tjumar, N. Mubarakah, and R. Dinzi. (2023). Protection coordination analysis applied at biogas power generation plant. *Indonesia Journal Electrical Engineering Computer Science*, vol. 30, no. 1, pp. 1-13, doi: 10.11591/ijeecs.v30.i1.pp1-13.
- H. Y. Lubis, D. Rahmadani, L. E. Br Sembiring, M. Sitorus, & D. J. Sinaga. (2025). Analisis Sistem Proteksi dan Koordinasi Relay Overcurrent pada Jaringan Distribusi Menggunakan ETAP. *Jurnal Ilmiah Penelitian Mahasiswa*, vol. 3, no. 6, pp. 490–501. doi:<https://doi.org/10.61722/jipm.v3i6.1689>
- B. Kumar Saha Roy, D. Saha, M. Mukherjee, and N. R. (2024). Performance comparison of PSO, HGSO, and DE optimization techniques for computation of directional overcurrent relay coordination in power systems. *Engineering Review*, vol. 44, no. 2, pp. 69–86, doi: 10.30765/er.2429.
- M. B. Atsever, O. Karacasu, and M. H. Hocaoglu. (2021) “Performance Analysis of Different Optimization Algorithms on Overcurrent Relay Coordination Problem in Distribution Systems,” in 2021 11th Smart Grid Conference (SGC), Tabriz, Iran, Islamic Republic of: IEEE, Dec. 2021, pp. 1–6, doi: 10.1109/SGC54087.2021.9664218.
- Muhammad I. K, Kevin M, B. Nahor, N. Hariyanto. (2022). Desain koordinasi sistem proteksi untuk microgrid berbasis inverter. *Jurnal Electrics, Electronics, Communications, Controls, Informatics, Systems (EECCIS)*, vol. 16, no. 3, pp. 79-84, doi: 10.21776/jeccis.v16i3.1615.
- T. Napitupulu, S. Handoko, and T. Andromeda. (2022). Perancangan koordinasi proteksi relay feeder dan trafo pada lb substation di PT. Pertamina Hulu Rokan. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 33, no. 4, pp. 139-147, doi: <https://doi.org/10.14710/transient.v13i4.%25p>.
- R. Alrohmanyah. (2024). Analisa gangguan hubung singkat pada generator 3 fasa di sar sadewa 231 (kapal basarnas Semarang). link: <https://eskripsi.usm.ac.id/detail-C41A-947.html>.
- H. N. Muflih. (2023). Analisis evaluasi koordinasi sistem proteksi arus lebih pada switchgear Pltp PT. Geo Dipa Energi (Persero). vol. 9, no. 1, pp. 1131-1139, 2023, link:<https://proceeding.isas.or.id/index.php/sentrinov/article/view/1555/917>.
- P. Paradva, Prof. A. M. Patel, and Ms. K. Chavada. (2022). Power system analysis and relay coordination for an industrial distribution system. *IJIREEICE*, vol. 10, no. 4, pp. 237-242, doi: 10.17148/IJIREEICE.2022.10440.
- H. Filani. (2016). Evaluasi koordinasi proteksi di Instalasi Penjernihan Air Minum Karang Pilang 1 PDAM Surabaya akibat integrasi dengan Karang Pilang 2, link: <https://share.google/4VyohSpXASPIK9Pax>.
- Firdaus, Fatma S, S. Kasim, and A. Imran. (2023). Studi koordinasi rele pengaman (over current relay dan ground fault relay) pada sistem kelistrikan pltu, PT. Rekind daya mamuju dengan menggunakan program ETAP 12.6. *JEEE-U Journal of Electrical and Electronic Engineering UMSIDA*, vol. 7, no. 1, pp. 94-106, doi: <https://doi.org/10.21070/jeeeu.v7i1.1651>.
- IEC std 60255. (2009). Overcurrent protection for phase and earth faults International Standard. International Electrotechnical Commission 60255, pp. 1-63, link: archive.org/md5/43a42795fdc572c9fca418342fa7bd4e.