

Pengaruh Level Penetrasi Pembangkit Skala Kecil Tersebar Terhadap Mitigasi *Fuse* Saluran Udara Tegangan Menengah

Supriyanto[#], Heri Budi Utomo, Hari Purnama, R. Wahyu Tri Hartono

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung
Jalan Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Bandung, 40012, Indonesia
[#]supriyanto_suhono@polban.ac.id

Abstrak

Fuse dan *recloser* secara tradisional digunakan untuk mereduksi gangguan pada saluran udara dimana pada *feeder* utama dipasang *recloser* dan pada *lateral feeder* dipasang *fuse*. *Fuse* adalah alat proteksi murah dan andal yang akan melebur dalam beberapa siklus akibat suatu arus gangguan yang tinggi. Untuk minimalisasi jumlah *fuse* yang putus, dilakukan *back-up* oleh *recloser*. Pada gangguan temporer, *recloser* akan mengkliring gangguan yang menjadi prioritas *fuse*. Skema proteksi ini dikenal sebagai *fuse saving operation*. Mekanisme koordinasi proteksi ini akan berubah ketika dilakukan integrasi unit pembangkit ke jaringan. Hal ini terjadi akibat perubahan arus gangguan akibat kontribusi arus gangguan dari generator. Magnitud perubahan signifikan dipengaruhi oleh lokasi dan kapasitas unit pembangkit. Tujuan penelitian adalah mengembangkan perangkat evaluasi untuk proses mitigasi *fuse* yang terdampak malkoordinasi akibat penempatan lokasi pembangkit dan level penetrasi pembangkit. Metodologi penelitian dilakukan dengan mengembangkan *software* menggunakan MATLAB dengan subjek kajian jaringan IEEE Test 34 *node*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa level penetrasi rendah 20% hanya berdampak kecil terhadap koordinasi proteksi dan level penetrasi tinggi hanya mempertahankan tidak terjadi gagal koordinasi pada pemasangan dekat gardu induk.

Kata kunci: *recloser*, *fuse*, pembangkit tersebar

Abstract

Fuse and *recloser* are traditionally used to reduce interference in the airways where the main *feeder* is installed *recloser* and the *lateral feeder* is installed *fuse*. *Fuses* are inexpensive and reliable protection devices that will fuse over several cycles due to a high fault current. To minimize the number of broken *fuses*, a *back-up* is performed by the *recloser*. In the case of temporary disturbances, the *recloser* will clear the disturbance that is the priority of the *fuse*. This protection scheme is known as *fuse saving operation*. This protection coordination mechanism will change when the generating unit is integrated into the network. This occurs due to changes in the fault current due to the contribution of the fault current from the generator. The magnitude of the significant change is influenced by the location and capacity of the generating unit. The research objective is to develop an evaluation tool for the *fuse* mitigation process that is affected by mal coordination due to the location of the generator and the penetration level of the generator. The research methodology was carried out by developing software using MATLAB with the subject of the 34 node IEEE Test network study. The results showed that a low penetration level of 20% only had a small impact on protection coordination and a high penetration level only prevented mal coordination in installations near substations.

Keywords: *recloser*, *fuse*, distributed generation

I. PENDAHULUAN

Untuk mengantisipasi peningkatan kebutuhan suplai energi listrik baik dalam rangka elektrifikasi nasional maupun pertumbuhan industri, bermacam langkah dilakukan untuk mencukupi kebutuhan

tersebut. Pembangkit listrik skala kecil adalah salah satu diantaranya. Permasalahan geografis dan kebutuhan peningkatan rasio elektrifikasi di Indonesia menunjukkan bahwa mayoritas pembangunan pembangkit tersebar (*distributed generation*) akan terdapat di wilayah pedesaan. Ciri

karakteristik jaringan akan terkait dengan sistem Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) dan dengan topologi jaringan radial. Sehingga permasalahan operasi jaringan dengan sifat gangguannya akan sangat erat terkait dengan lingkungan atau faktor eksternal seperti petir, pohon, dan binatang. Beberapa penelitian menunjukkan gangguan yang terjadi pada jaringan 70-95% adalah gangguan temporer, dengan durasi gangguan antara seperempat siklus sampai beberapa siklus [1]-[6].

Menjawab permasalahan pengembangan integrasi pembangkit tersebar yang ada di Indonesia dan pertimbangan beberapa hasil riset menunjukkan bahwa solusi non-adaptif sampai tahun 2020 masih luas digunakan. Arafa, dkk. mengembangkan teknik non-adaptif yang tidak membutuhkan pengukuran *online* untuk mengendalikan gangguan. Solusi yang ditawarkan adalah dengan melakukan pergantian *fuse* secara selektif pada integrasi pembangkit tersebar baru. Pertimbangan dari pilihan ini adalah temuan dari hasil riset mereka bahwa gangguan paling banyak ditemukan pada *fuse* yang terpasang pada *feeder* lateral. Pertimbangan lainnya adalah ketika terjadi gangguan *feeder* masih akan dipertahankan terhubung dengan unit pembangkit dengan lokasi tertentu dan level penetrasi yang tertentu [1]. Elmitwally, dkk. mendeskripsikan pengaruh *fault current limiters* terhadap koordinasi *recloser-fuse* akibat perubahan dari monopolar (memiliki satu arah) menjadi lebih dari satu arah mengakibatkan terjadinya perubahan arah dan magnitud arus gangguan. Perubahan ini adalah akibat kontribusi arus gangguan hubung singkat yang mengalir dari generator. Kajian ini menunjukkan bahwa magnitud arus gangguan signifikan dipengaruhi oleh pemasangan *fault current limiter* pada jaringan [2].

Naiem, dkk. mengembangkan teknik penyesuaian kondisi relai yang mampu merespon kondisi *real-time* untuk meningkatkan keandalan sistem. Operasi sistem dirancang hanya dengan membutuhkan sedikit atau tanpa intervensi operator [3]. Jamali, dkk. menunjukan hasil penelitian pengaruh pemasangan *Single Pole Auto Recloser* (SPAR) pada operasi unit yang integrasi dengan pembangkit tersebar. Hasil simulasi menunjukan bahwa kestabilan transien masih dapat dipertahankan. Studi lanjutan terhadap kajian ini akan menarik karena pemasangan SPAR dapat meningkatkan keberlangsungan pasokan mengingat bahwa banyak beban pelanggan jaringan distribusi adalah satu fase [4]. Shah, dkk. mengembangkan skema adaptif pada *recloser* untuk melakukan pencegahan gagal koordinasi pada *recloser* [5]. Hussain, dkk. mengembangkan skema *fuse saving*

tidak dengan *recloser* tiang tetapi *recloser* pada relai proteksi arus lebih yang terdapat pada gardu induk [6]. Alam, dkk. mendeskripsikan dengan rinci skema pengembangan karakteristik arus-waktu kombinasi untuk relai proteksi arus lebih yang khusus untuk aplikasi mikrogrid [7]. Zeineldin, dkk. mengembangkan *directional* relai menggunakan *dual setting* dengan relai arah pada proteksi integrasi *feeder* dengan pembangkit tersebar. Dua buah relai arah dikembangkan pada titik lokasi interkoneksi pemasangan unit pembangkit. Dua buah relai memonitor gangguan dan menentukan arah gangguan. Arah gangguan yang termonitor oleh relai akan mengoperasikan *breaker* untuk isolasi unit pembangkit dengan memungkinkan tercapainya minimasi gagal koordinasi *recloser-fuse* [8]. Sa'ed, dkk. menampilkan skema pengaruh integrasi terkait kapasitas pada topologi jaringan radial. Pada paper ini dirinci pola arus gangguan yang berdampak pada *recloser* dan *fuse* fungsi dari lokasi *fuse* dan *recloser* [9]. Abdel-Ghany, dkk. pada tologi jaringan radial mengembangkan sistem untuk mendapatkan representasi optimal ketika dilakukan integrasi dengan generator sinkron [10]. Norshahrani, dkk. menampilkan data perbandingan beberapa metode mitigasi proteksi terkait perkembangan di beberapa unit pembangkit [11]. Pazzini, membuat kajian *review* detail *setting relai* arus lebih ketika integrasi [12]. Norshahrani, dkk. mengembangkan koordinasi proteksi terkait dengan rekonfigurasi jaringan [13].

Penelitian ini adalah penelitian yang fokus untuk mendapatkan model evaluasi yang aplikatif dan praktis. Bentuk yang dihasilkan adalah perangkat lunak yang mampu melakukan evaluasi koordinasi proteksi *fuse-recloser*. Penelitian ini akan menghasilkan kajian pengaruh lokasi dan kapasitas daya unit pembangkit tersebar terhadap mitigasi perangkat *fuse* akibat gagal koordinasi proteksi. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, secara khusus kajian ini fokus untuk mendapatkan metode mitigasi *fuse* pada jaringan tegangan menengah ketika dilakukan integrasi dengan pembangkit tersebar.

II. METODE PENELITIAN

A. Mekanisme Koordinasi Proteksi

Pertama *recloser* harus melepas rangkaian dengan cepat pada gangguan temporer dengan karakteristik pemutusan cepat (*instantaneous*), sebelum arus gangguan mengakibatkan *fuse* beroperasi pada area MM (*minimum melting*), sehingga karakteristik pemutusan cepat dari *recloser* harus berada di bawah karakteristik *fuse* pada range koordinasi. Kedua *recloser* juga

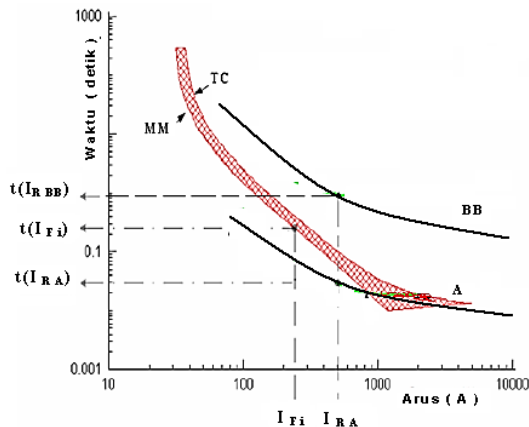
memiliki karakteristik operasi lambat (*delay time*), yang fungsinya sebagai *back up* terhadap karakteristik *fuse TC* (*total clearing*). *Fuse* akan memutuskan rangkaian ketika terjadi gangguan permanen dan tidak akan memutuskan rangkaian pada gangguan temporer, sehingga karakteristik operasi lambat dari *recloser* harus berada di atas karakteristik MM dari *fuse* pada *range* koordinasi. Arus operasi *recloser* akan berada pada *range* diantara I_F minimal dan I_F maksimal.

Konsep koordinasi proteksi ditunjukkan pada Gambar 1. Pada arus gangguan yang melalui *fuse* (I_{Fi}) pada waktu operasi *fuse* t (I_{Fi}), harus melampaui waktu operasi cepat dari *recloser* t (I_{RA}).

$$t(I_{Fi}) > t(I_{RA}) \forall I_{Fi} \begin{cases} I_{F \min} \leq I_{Fi} \leq I_{F \max} \\ I_{F \min}, I_{F \max} > 0 \end{cases} \quad (1)$$

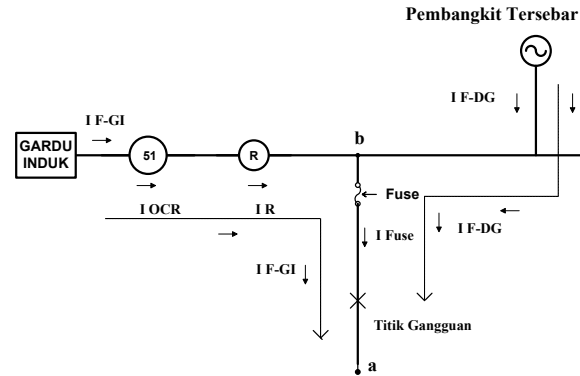
Pada arus gangguan yang melalui *fuse* (I_{Fi}) waktu operasi *fuse* $t(I_{Fi})$, tidak boleh melampaui waktu operasi *delay time* dari *recloser* $t(I_{RB})$.

$$t(I_{RBi}) > t(I_{Fi}) \forall I_{Fi} \begin{cases} I_{F \min} \leq I_{Fi} \leq I_{F \max} \\ I_{F \min}, I_{F \max} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

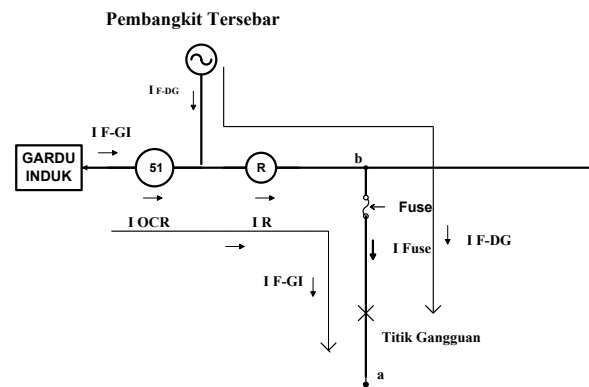


Gambar 1. Konsep koordinasi proteksi

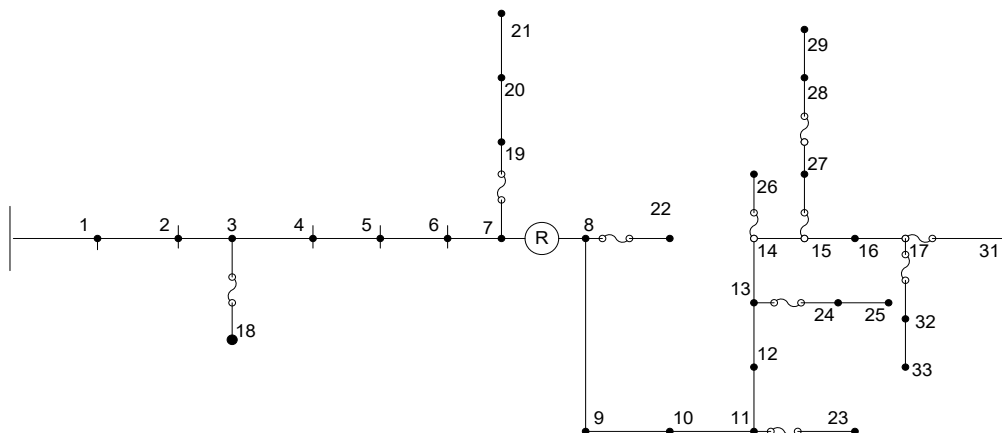
Titik gangguan berada diantara *recloser* dan gardu induk seperti ditunjukkan pada Gambar 2, sedangkan titik gangguan berada sebelum gardu induk dan *recloser* seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Arus gangguan yang mengalir pada *fuse* dan *recloser* ketika terjadi gangguan pada titik di lateral feeder. Arus yang melauai *recloser* (I_R) adalah $I_{F,GI}$ dan arus yang melauai *fuse* (I_{Fuse}) adalah sebesar $I_{F,GI} + I_{F,DG}$.



Gambar 2. Titik gangguan diantara GI dan *recloser*



Gambar 3. Titik gangguan sebelum GI dan *recloser*



Gambar 4. Recloser dan fuse pada feeder uji IEEE 34-node

B. Feeder Uji IEEE 34-Node

Model jaringan distribusi tegangan menengah menggunakan *feeder* uji IEEE 34-node. Karakteristik *feeder* adalah radial dengan mayoritas jaringan adalah SUTM. Total permintaan daya adalah 1770 kW dan 72% dari beban yang berada 56 km. Titik *node* paling jauh adalah 59 km dari gardu induk. Rasio X/R adalah 0,91 sampai 2,25. Pada penelitian ini jaringan disederhanakan dengan melepas transformator 24,9 kV/4,16 kV dari *feeder* uji yang asli, sehingga jaringan hanya dimodelkan dengan satu level tegangan. Begitu pula AVR pada jaringan dilepas, sehingga model jaringan dapat dilihat pada Gambar 4. Terdapat 8 buah *fuse* yang dilindungi oleh *recloser* jaringan.

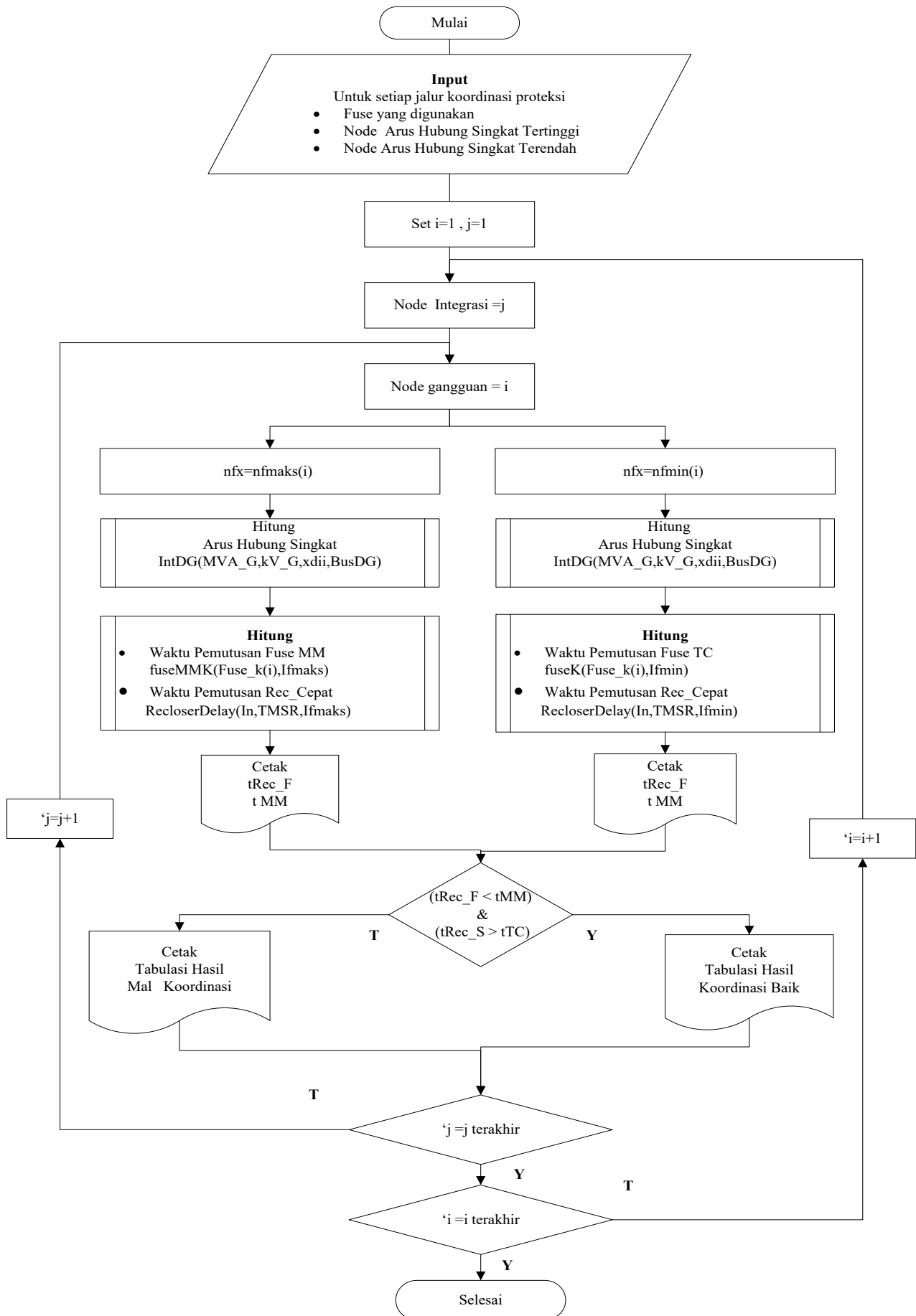
C. Perancangan Pengujian

Sesuai *feeder* uji pada Gambar 4 mekanisme koordinasi proteksi yang dikembangkan yaitu *recloser* dirancang untuk melindungi 8 buah *fuse*. Pengaruh secara umum integrasi unit pembangkit ke jaringan distribusi. Akibat perubahan dari yang semula monopolar (memiliki satu arah) menjadi lebih dari satu arah mengakibatkan terjadinya perubahan arah dan magnitud arus gangguan. Perubahan ini adalah akibat kontribusi arus gangguan hubung singkat yang mengalir dari generator, magnitud, dan arah gangguan ini signifikan dipengaruhi oleh lokasi dan ukuran unit pembangkit.

Satu buah *recloser* dirancang untuk melindungi kedelapan *fuse* dengan mekanisme *fuse saving operation*. Mekanisme ini dilakukan dengan membuat subprogram perhitungan hubung singkat untuk menentukan arus maksimum dan minimum pada setiap *node* gangguan. Pada seluruh jalur koordinasi masukan data *input rating fuse* dilakukan untuk menentukan titik gangguan maksimum dan minimum pada setiap zona perlindungan.

Pengaruh lokasi penempatan unit pembangkit diuji dengan menempatkan pembangkit pada *node* 1 sampai *node* 17. Level penetrasi yang akan diuji meliputi pembangkit generator sinkron dengan level penetrasi 20%, 30%, 40%, 50%, dan 60%. *Fuse* yang diuji secara berurutan adalah *fuse* tipe K dengan *rating* K15, K12, K20, K10, K25, K15, K10, dan K15 yang berada pada *node* 8, *node* 11, *node* 13, *node* 14, *node* 15, *node* 17, *node* 17, dan *node* 28. Diagram alir program ditunjukkan pada Gambar 5. Proses ini meliputi pemrograman *fitting* kurva waktu pemutusan *recloser* cepat $t(I_{RA})$ dan *recloser* lambat $t(I_{RB})$ yang bersamaan melalui *fuse* (I_{Fi}).

Mekanisme koordinasi proteksi dengan kriteria persamaan (1) dan (2) digunakan untuk mengevaluasi penempatan unit pembangkit dan pengaruh level penetrasi kapasitas unit pembangkit. Sistem koordinasi proteksi pada jaringan distribusi radial dikembangkan berdasarkan konsep *grading* berbasis arus dan waktu. Oleh karena itu, pertimbangan pemilihan *rating* dan penentuan *setting* dari peralatan proteksi menggunakan nilai arus hubung singkat sesuai lokasi tempat peralatan dipasang. Model persamaan karakteristik setiap tipe *fuse* diperoleh dari data pabrikan. Nilai a dan b digunakan untuk proses pembuatan kurva *fitting*. Pendekatan yang digunakan adalah menggunakan persamaan regresi polinomial menggunakan persamaan garis lurus logaritmis $\log(t) = a \cdot \log(I) + b$. Penggunaan persamaan ini artinya menggunakan pendekatan polinomial orde 1. Perhitungan hubung singkat dengan memastikan data impedansi sistem mengambil data sekunder menggunakan pada parameter impedansi gardu induk $Z_{sys0} = j10.7 \text{ Ohm}$, $Z_{sys1} = 2.9 + j2.7 \text{ Ohm}$, memasukan impedansi antar *node*, memasukan data ke dalam format *toolbox* Zbuild dari menguji program sesuai diagram alir Gambar 5 untuk menguji arus hubung singkat yang terjadi pada semua *node*.



Gambar 5. Diagram alir program evaluasi koordinasi proteksi

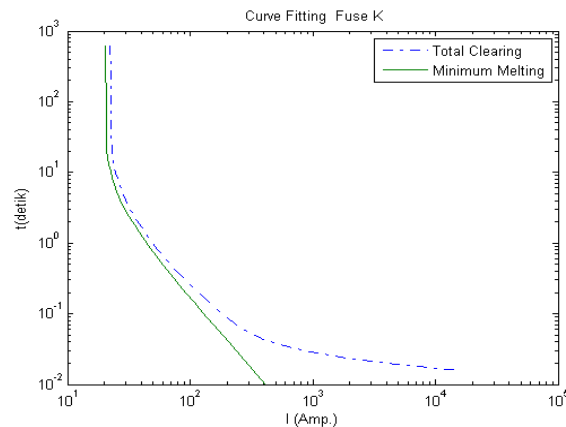
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil *running* program detail koordinasi ditampilkan pada Gambar 6. Kurva karakteristik *fuse* ditampilkan pada Gambar 7, sedangkan kurva koordinasi proteksi ditampilkan pada Gambar 8 dan Gambar 9. Mekanisme koordinasi proteksi berjalan baik, sesuai persamaan (1) dan (2) pada arus

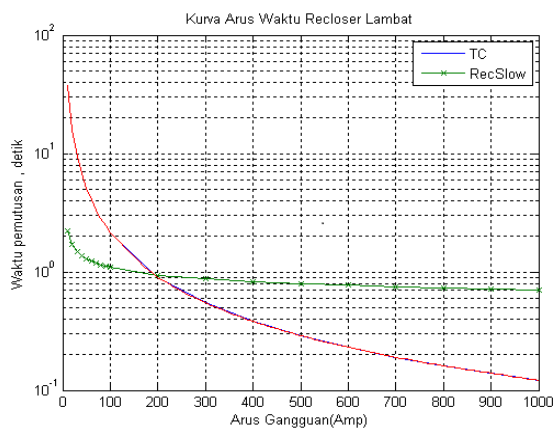
gangguan yang melalui fuse (I_{Fi}) waktu operasi *fuse* $t(I_{Fi})$, harus melampaui waktu operasi cepat dari *recloser* $t(I_{RA})$. Pada arus gangguan yang melalui fuse (I_{Fi}) waktu operasi fuse $t(I_{Fi})$, tidak boleh melampaui waktu operasi *delay time* dari *recloser* $t(I_{RB})$.

EVALUASI KOORDINASI PROTEKSI RECLOSER FUSE						
Titik Gangguan Maks	Recl. lambat	Fuse TC	Recl. Cepat	Fuse MM	Hasil Koordinasi	
Min	(detik)	(detik)	(detik)	(detik)		
8	22	2.5707	1.1820	0.0490	0.2967	Baik
11	23	2.6808	1.0533	0.0511	0.2449	Baik
13	24	2.7450	2.5251	0.0523	1.6303	Baik
14	26	2.7721	1.0631	0.0528	0.2884	Baik
15	27	2.7807	2.7668	0.0530	1.9264	Baik
17	31	2.8042	2.2390	0.0534	1.2424	Baik
17	32	2.8042	1.1384	0.0534	0.3315	Baik
28	29	2.7890	1.1027	0.0531	0.3111	Baik

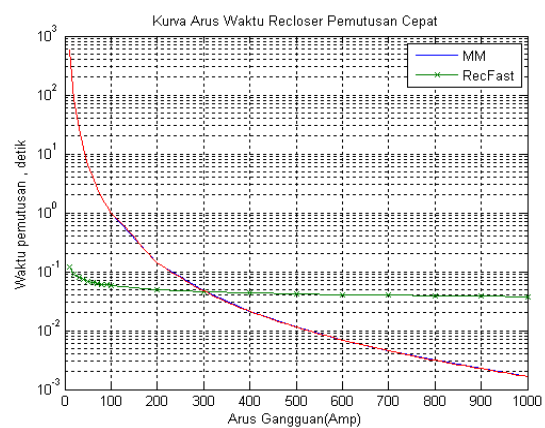
Gambar 6. *Running* evaluasi koordinasi proteksi recloser *fuse feeder test* IEEE 34-node



Gambar 7. Kurva waktu arus untuk *fuse rating* 10 K



Gambar 8. Kurva TC dan *recloser* lambat



Gambar 9. Kurva MM dan *recloser* cepat

Koordinasi proteksi pada integrasi 0,406 MVA dengan penempatan unit pembangkit pada *node* 10 sampai dengan 17 pada integrasi unit sebesar 0,406 MVA berakibat kegagalan koordinasi pada *fuse* F.6 dan F.9. Pada pemasangan unit pembangkit pada lokasi *node* 10 sampai *node* 17. Dengan menaikkan *rating fuse* satu level *rating* akan menormalkan koordinasi proteksi sistem. Integrasi unit pembangkit dengan penetrasi kecil (20%) berdampak kecil terhadap koordinasi proteksi. penggantian *fuse* secara terbatas masih memungkinkan.

Pada integrasi 0,6 MVA, *fuse* F.3, F.6, dan F.9 menjadi kritis terhadap kegagalan koordinasi pada lokasi pemasangan pada *node* 5 sampai *node* 17. Pada integrasi unit pembangkit besar 1,075 MVA (60%) seperti ditunjukkan Gambar 10, peluang pemasangan yang memiliki dampak kecil terhadap koordinasi berbasis *fuse saving operation* adalah pemasangan unit pembangkit dekat dengan gardu

gardu induk. Menaikan *rating fuse* satu tingkat pada jalur koordinasi yang mengalami kegagalan koordinasi akan mengembalikan ke kondisi koordinasi proteksi yang baik. Pada pengujian *range* integrasi antara 10% sampai 60% terdapat 4 buah *fuse* yang mengalami gagal koordinasi proteksi. Pada integrasi 20%, *fuse* F.6 dan F.9 adalah *fuse* yang mengalami gagal koordinasi untuk pemasangan unit pada *node* 10 sampai *node* 17. Pada integrasi 30%, *fuse* F.3, F.6, dan F.9 akan gagal koordinasi. Untuk pemasangan unit pada *node* 5 sampai *node* 17. Pada integrasi dari 40% sampai 60%, *fuse* F.3, F.4, F.6, dan F.9 akan mal koordinasi Untuk pemasangan pada unit *node* 10 sampai *node* 17.

Pada Tabel 1 ditunjukkan hasil pengujian kegagalan mekanisme koordinasi terhadap penetrasi unit pembangkit pada *feeder test* IEEE 34-*node*.

EVALUASI KOORDINASI PROTEKSI RECLOSER FUSE KAPASITAS 1.075 MVA								
Lokasi	Fuse	Titik		RecL	Fuse	RecL	Fuse	Hasil
Node	No.	Gangguan		lambat	TC	Cepat	MM	Koordinasi
DG		Maks	Min	(detik)	(detik)	(detik)	(detik)	
3	3	8	22	2.5463	0.7512	0.0485	0.1025	Baik
4	3	8	22	2.4774	0.6262	0.0472	0.0686	Baik
5	3	8	22	2.3986	0.4999	0.0457	0.0397	Mal Koord.
6	3	8	22	2.3985	0.4999	0.0457	0.0397	Mal Koord.
7	3	8	22	2.3976	0.4986	0.0457	0.0395	Mal Koord.
8	3	8	22	2.3908	0.4895	0.0455	0.0380	Mal Koord.
9	3	8	22	2.3908	0.4896	0.0455	0.0380	Mal Koord.
10	3	8	22	2.3986	0.4999	0.0457	0.0397	Mal Koord.
11	3	8	22	2.3988	0.5002	0.0457	0.0397	Mal Koord.
12	3	8	22	2.4009	0.5030	0.0457	0.0401	Mal Koord.
13	3	8	22	2.4009	0.5030	0.0457	0.0401	Mal Koord.
14	3	8	22	2.4027	0.5055	0.0458	0.0405	Mal Koord.
15	3	8	22	2.4031	0.5059	0.0458	0.0406	Mal Koord.
16	3	8	22	2.4039	0.5070	0.0458	0.0408	Mal Koord.
17	3	8	22	2.4049	0.5083	0.0458	0.0410	Mal Koord.
3	4	11	23	2.6463	0.7682	0.0504	0.1193	Baik
4	4	11	23	2.5932	0.6766	0.0494	0.0851	Baik
5	4	11	23	2.5323	0.5881	0.0482	0.0649	Baik
6	4	11	23	2.5323	0.5881	0.0482	0.0649	Baik
7	4	11	23	2.5314	0.5868	0.0482	0.0646	Baik
8	4	11	23	2.5245	0.5768	0.0481	0.0623	Baik
9	4	11	23	2.5239	0.5760	0.0481	0.0621	Baik
10	4	11	23	2.4507	0.4697	0.0467	0.0377	Mal Koord.
11	4	11	23	2.4485	0.4665	0.0466	0.0370	Mal Koord.
12	4	11	23	2.4515	0.4708	0.0467	0.0380	Mal Koord.
13	4	11	23	2.4515	0.4708	0.0467	0.0380	Mal Koord.
14	4	11	23	2.4547	0.4755	0.0468	0.0391	Mal Koord.
15	4	11	23	2.4553	0.4763	0.0468	0.0392	Mal Koord.
16	4	11	23	2.4566	0.4783	0.0468	0.0397	Mal Koord.
17	4	11	23	2.4584	0.4808	0.0468	0.0403	Mal Koord.

Gambar 10 . Hasil pengujian evaluasi pengaruh pada kapasitas 1,075 MVA (60%)

Tabel 1. Hasil pengujian kegagalan mekanisme koordinasi terhadap penetrasi unit pembangkit pada *feeder test IEEE 34-node*

Titik Instalasi	Kapabilitas unit pembangkit				
	0,406 MVA 20%	0,600 MVA 30%	0,700 MVA 40%	0,900 MVA 50%	1,075 MVA 60%
Node 3	NO	NO	NO	NO	NO
Node 4	NO	NO	NO	NO	NO
Node 5	NO	F3,F6,F9	F3,F6,F9	F3,F6,F9	F3,F6,F9
Node 6	NO	F3,F6,F9	F3,F6,F9	F3,F6,F9	F3,F6,F9
Node 7	NO	F3,F6,F9	F3,F6,F9	F3,F6,F9	F3,F6,F9
Node 8	NO	F3,F6,F9	F3,F6,F9	F3,F6,F9	F3,F6,F9
Node 9	NO	F3,F6,F9	F3,F6,F9	F3,F6,F9	F3,F6,F9
Node 10	F6,F9	F3,F6,F9	F3,F4,F6,F9	F3,F4,F6,F9	F3,F4,F6,F9
Node 11	F6,F9	F3,F6,F9	F3,F4,F6,F9	F3,F4,F6,F9	F3,F4,F6,F9
Node 12	F6,F9	F3,F6,F9	F3,F4,F6,F9	F3,F4,F6,F9	F3,F4,F6,F9
Node 13	F6,F9	F3,F6,F9	F3,F4,F6,F9	F3,F4,F6,F9	F3,F4,F6,F9
Node 14	F6,F9	F3,F6,F9	F3,F4,F6,F9	F3,F4,F6,F9	F3,F4,F6,F9
Node 15	F6,F9	F3,F6,F9	F3,F4,F6,F9	F3,F4,F6,F9	F3,F4,F6,F9
Node 16	F6,F9	F3,F6,F9	F3,F4,F6,F9	F3,F4,F6,F9	F3,F4,F6,F9
Node 17	F6,F9	F3,F6,F9	F3,F4,F6,F9	F3,F4,F6,F9	F3,F4,F6,F9

IV. KESIMPULAN

Level penetrasi signifikan berpengaruh terhadap mekanisme koordinasi proteksi *fuse recloser* berbasis *fuse saving operation*. Level penetrasi 20% lokasi penempatan unit pembangkit hanya berdampak kecil terhadap koordinasi proteksi. Penggantian *fuse* pada lokasi yang terbatas sudah dapat memulihkan koordinasi proteksi. Level penetrasi yang lebih dari 40% menunjukkan bahwa untuk mempertahankan mekanisme koordinasi proteksi mengharuskan penggantian sampai 50% jumlah *fuse*. Pada level penetrasi tinggi sampai 60% hanya pada pemasangan di lokasi *node 3* dan *node 4* saja yang tidak tidak berdampak pada koordinasi proteksi, artinya membutuhkan penggantian semua *fuse* terpasang. Hal ini terjadi karena lokasi dan posisi antara titik gangguan, gardu induk, dan unit pembangkit tersebar yang berbeda sehingga menyebabkan arus yang mengalir pada *recloser* dan *fuse* berbeda. Antisipasi yang dapat dilakukan diantara adalah dengan menggunakan *recloser directional*, menambahkan diferensial tegangan, dan menerapkan skema adaptif. Penelitian selanjutnya yang dapat dilakukan adalah mengoptimasi lokasi penempatan pembangkit tersebar agar meminimalisasi mal koordinasi proteksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung atas dukungan biaya penelitian melalui Skema Penelitian Peningkatan Kapasitas Laboratorium,

sesuai Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian No.B/74.8/PL1.R7/PG.00.03/2021

REFERENSI

- [1] A. Arafa, M. M. Aly and S. Kamel, "Impact of Distributed Generation on Recloser-Fuse Coordination of Radial Distribution Networks," *2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, 2019, pp. 505-509.
- [2] A. Elmitwally, E. Gouda, and S. Eladawy, "Restoring recloser-fuse coordination by optimal fault current limiters planning in DG integrated distribution systems," *International Journal Electric Power*, vol. 77, pp. 9–18, 2016.
- [3] A. F. Naiem, A. Y. Abdelaziz, M. Elsharkawy, and Y. Hegazy, "A classification technique for recloser-fuse coordination in distribution systems with distributed generation," *IEEE Trans Power Delivery*, vol. 27, pp. 176-185, 2012.
- [4] S. Jamali and H. Borhani, "Recloser time-current-voltage characteristic for fuse saving in distribution networks with DG," *Journals IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 1, pp. 272–279, 2017.
- [5] P. H. Shah and B. R. Bhalja, "New adaptive digital relaying scheme to tackle recloser-fuse miscoordination during distributed generation interconnections," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 4, pp. 682–688, 2014.
- [6] B. Hussain, S. M. Sharkh, and S. Hussain, "An adaptive relaying scheme for fuse saving in distribution networks with distributed generation," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 2, pp. 669–677, 2018.

- [7] M. N. Alam, "Overcurrent protection of AC microgrids using mixed characteristic curves of relays," *Computers and Electrical Engineering, Elsevier*, vol. 74, pp. 74–88, 2019.
- [8] H. H. Zeineldin, H. M. Sharaf, D. K. Ibrahim, and E. E. El-Zahab, "Optimal protection coordination for meshed distribution systems with DG using dual setting directional over-current relays," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 6, no. 1, pp.115–123, 2015.
- [9] J. A. Sa'ed, S. Favuzza, M. G. Ippolito, and F. Massaro, "An investigation of protection devices coordination effects on distributed generators capacity in radial distribution systems," *International Conference on Clean Electrical*, 2013, pp. 686-692.
- [10] H. A. Abdel-Ghany, A. M. Azmy, N. I. Elkalashy, and E. M. Rashad, "Optimizing DG penetration in distribution networks concerning protection schemes and technical impact," *EPSR Electric Power Systems Research*, vol. 128, pp. 113-122, 2015.
- [11] A. M. Norshahrani, H. Mokhlis, and Sukumar, "Progress on Protection Strategies to Mitigate the Impact of Renewable Distributed Generation on Distribution Systems," *Journal Energies*, vol. 10, no. 11, 2017.
- [12] S. Pazzini, E. L. Frizera, and C. B. Donadel, "Technical review of protection settings considering the influence of distributed generation," *2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2017.
- [13] N. Norshahrani, M. Mokhlis, H. Bakar, A. Rahman, M. Badran, O. Mansor, and Nurulafiqah, "Protection Coordination Toward Optimal Network Reconfiguration and DG Sizing," *IEEE Access*, vol. 7, 2019.

