

Analisis Koordinasi Proteksi *Recloser* dan *Fuse* pada Jaringan IEEE 34 menggunakan Metode *Fuzzy Mamdani*

Mochammad Nawawi Ulumudin^{1*}, Isti Fauziah¹, Muhammad Hafizd Ibnu Hajar¹

¹Teknik Elektro, Universitas Mercu Buana, Jakarta

*mulumudin1993@gmail.com

Abstrak—Konsumsi listrik perkapita di Indonesia meningkat setiap tahunnya. Peningkatan konsumsi listrik ini mempengaruhi sistem pemasokan kelistrikan, sehingga memberikan dampak yang besar ketika terjadi gangguan. Salah satu permasalahan yang terjadi dari saluran distribusi yaitu gangguan hubung singkat yang mempengaruhi tingkat keandalan. Bertambahnya arus gangguan mempengaruhi kinerja proteksi terutama *fuse cut out* sebagai alat pemutus rangkaian yang sering digunakan ketika terjadi arus lebih. Tentunya, ini memberikan dampak pada *recloser* yang digunakan untuk koordinasi *fuse saving*. Koordinasi proteksi ini tidak lepas dari hubungan penentuan *setting* proteksi. Nilai *setting time dial* pada waktu kerja relai *recloser* yang tepat akan menciptakan keamanan pada *fuse*. Namun, *fuse* yang diamankan memiliki jumlah yang banyak, sehingga timbul ketidakpastian dalam menentukan *setting*. Pendekatan yang memungkinkan adalah dengan menggunakan metode *fuzzy mamdani* untuk menghasilkan *setting* yang tepat. Media yang digunakan dalam penelitian sangat berpengaruh terhadap keberhasilan dalam masukan *setting*. Dengan demikian, jaringan IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 34 node test feeder yang telah divalidasi dengan nilai rata-rata *error* sebesar 2,3% simulasi *load flow analysis* digunakan sebagai media penelitian. Metode *Fuzzy Mamdani* dalam penelitian ini membuktikan bahwa metode ini dapat meningkatkan keandalan proteksi pada jaringan distribusi listrik. Nilai kesalahan waktu kerja operasi proteksi perbandingan perhitungan dengan simulasi dari Matlab sebesar 14,52% untuk *Overcurrent Relay* dan 12,72% untuk *Ground Fault Relay*. Penggunaan metode *fuzzy mamdani* dalam melakukan menentukan nilai *setting time dial* (*Time Multiple Setting*) *recloser* pada koordinasi proteksi *recloser* dan *fuse* menghasilkan koordinasi yang baik saat terjadi gangguan hubung singkat dengan pengamanan kurva koordinasi proteksi pada batasan *pengamanan fuse*.

perkapita di negara Indonesia terus meningkat sejak tahun 2019. Pada tahun 2022 realisasi konsumsi listrik rata-rata setiap orang di Indonesia mencapai 1.173 kWh/kapita di tahun 2022 [1]. Angka ini meningkat sebesar 7,58% dari tahun 2019 dengan realisasi konsumsi listrik hanya sebesar 1.084 kWh/kapita [2]. Perbandingan peningkatan konsumsi listrik ini sangat meningkat pesat bahkan untuk rentang waktu satu tahun.

Peningkatan konsumsi listrik ini akan mempengaruhi keseluruhan sistem secara umum dalam memasok listrik ke tempat-tempat terjauh dari jaringan pembangkit lateral, sehingga memberikan efek domino dan dampak yang besar ketika terjadi gangguan. Salah satu masalah utama yang biasanya terjadi pada saluran distribusi adalah gangguan hubung singkat yang berpengaruh pada level [3]. Gangguan yang sering terjadi disebabkan oleh pohon dan petir, sehingga menyebabkan kerusakan pada peralatan proteksi [4]. Resistensi terhadap gangguan yang mengakibatkan kegagalan pasangan *recloser* dan sekering secara sengaja memperjelas krusialitas dilema dalam keamanan [5]. Peningkatan arus gangguan ini mempengaruhi kinerja proteksi terutama *fuse* putus sebagai perangkat pemutus arus yang sering digunakan ketika terjadi arus lebih atau tegangan lebih di ujung lateral *feeder*. Tentu saja hal ini memberikan efek domino pada *recloser* yang biasa digunakan untuk koordinasi pengamanan *fuse*. Oleh karena itu, diperlukan perancangan *setting* yang baik untuk menciptakan keandalan koordinasi proteksi. Pendekatan yang memungkinkan untuk penentuan *setting* ini adalah dengan menggunakan metode *fuzzy* untuk menghasilkan *setting* yang tepat. Dengan banyaknya *fuse* yang diamankan oleh *recloser*, maka kita dapat mengetahui *setting* paling baik manakah yang bisa diajukan terhadap ketidakpastian area kesalahan gangguan. Penelitian ini mengangkat pendekatan penentuan *setting* dengan menggunakan metode *fuzzy Mamdani* untuk menghasilkan *setting* yang tepat. Pada penelitian ini akan dibahas mengenai analisa penentuan *setting* yang tepat dengan metode *fuzzy* menggunakan perangkat lunak Matlab yang kemudian diaplikasikan pada jaringan IEEE 34 dengan menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6.0.

II. PENELITIAN TERKAIT

Penelitian yang dirancang oleh Amin Yazdanine dengan algoritma perlindungan baru untuk dalam mengatasi dampak kesalahan ketahanan dengan *Cloud Energy Storage System* (CESS) terhadap koordinasi perlindungan *recloser-fuse* menghasilkan kompensasi kegagalan penghematan sekering yang disebabkan oleh pemasangan CESS berbasis sinkronisasi dan masalah resistensi gangguan pada proteksi *recloser* dan

Kata Kunci—*Fuzzy Mamdani*, IEEE 34, *Fuse*, *Recloser*

DOI: 10.22441/jte.2025.v16i2.003

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik pada perkembangan dunia saat ini mengalami peningkatan pesat. Tercatat bahwa konsumsi listrik

fuse di jaringan distribusi *multiple-MG (microgrid)*. Ini berarti bahwa dengan menggunakan algoritma yang diusulkan untuk proteksi *recloser-fuse*, kebutuhan untuk mengganti *fuse* jika terjadi pemasangan CESS dihilangkan. Selain itu, algoritma yang diusulkan meningkatkan operasi *recloser* dan *fuse* pada gangguan resistif dan beban yang hilang berkurang [5]. Penelitian ini tidak menggambarkan *recloser* yang mengamankan banyaknya *fuse*, namun hanya menggambarkan satu koordinasi *recloser-fuse* dilakukan dengan berbagai titik gangguan hubung singkat.

Pereira dalam penelitiannya melakukan pemodelan *recloser* untuk simulasi temporal jaringan distribusi di Simulink/Matlab dan membuktikan bahwa algoritma digital yang dibuat pada *recloser* melalui matlab bekerja sesuai dengan urutan kerja saat terjadi kesalahan dengan pengujian berbagai kasus baik urutan kerja cepat maupun lambat [6]. Algoritma hasil yang ditampilkan dari penelitiannya hanya terkait dengan *sequence* kerja tanpa adanya pembuktian dari penggambaran kurva koordinasi proteksi terhubung.

Peningkatan teknik koordinasi *recloser-fuse* berdasarkan *Modification Factor (MF)* dilakukan dengan memodifikasi karakteristik waktu-arus cepat (*fast time-current characteristics*) dari *recloser* yang disajikan. Faktor modifikasi adalah rasio impedansi $Z_{I_{preset}}$ terhadap $Z_{I_{cal}}$. Telah diamati bahwa nilai $Z_{I_{cal}}$ berubah karena penggabungan DG (*Distributed Generation*) dalam DN (*Distribution Network*), yang pada gilirannya mengubah nilai MF. Hasil yang diperoleh dari simulasi dan prototipe laboratorium menunjukkan bahwa skema yang diusulkan menjunjung tinggi koordinasi yang tepat antara *recloser* dan *fuse* bahkan dalam kasus penetrasi DG yang tinggi dan rendah di DN. Hal ini dicapai dengan mentransfer status DGCB (*Distributed Generation Circuit Breaker*) melalui komunikasi bandwidth rendah/frekuensi rendah antara *recloser* dan DG [7].

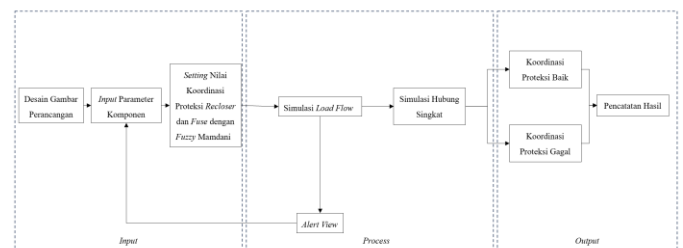
III. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan pada jaringan IEEE 34 *node test feeder* menggunakan software ETAP 12.6.0 dengan objek penelitian koordinasi proteksi *recloser* dan *fuse*. Fuzzy Mamdani akan digunakan sebagai metode untuk menentukan *setting* nilai TMS (*Time Multiple Setting*) *recloser*. Metode ini akan dilakukan dengan dua cara yaitu perhitungan dan simulasi pada perangkat lunak Matlab. Kemudian, kedua nilai *setting* akan divalidasi dengan perbandingan *error* antara perhitungan dan simulasi. Terakhir, koordinasi proteksi yang telah diproyeksikan dengan penentuan *setting* TMS pada komponen *recloser* akan dilakukan pengujian hubung singkat dengan perangkat lunak ETAP 12.6.0 serta akan melihat urutan sistem bekerja secara aktual kerja menggunakan *sequence of operation* dan *star protective device*.

A. Blok Diagram

Blok diagram pada penelitian ini terbagi menjadi 3 proses bagian utama, yaitu *input*, proses dan *output*. blok diagram dimulai dengan melakukan perancangan seluruh komponen pada perangkat lunak ETAP 12.6.0. Selanjutnya, komponen yang telah dirancang diberi nilai *input* sesuai parameter yang telah diperoleh dari tinjauan literasi serta

typical data yang ada. *Input* ini mencakup secara keseluruhan mulai dari parameter komponen satu per satu hingga penentuan *setting* dari proteksi *recloser* dan *fuse* yang nantinya akan diolah terlebih dahulu menggunakan metode fuzzy pada perangkat lunak Matlab. Pada bagian proses, seluruh perancangan jaringan radial dilakukan simulasi *load flow* untuk memastikan tidak adanya *alert view* yang menunjukkan ketidakseimbangan beban serta kinerja sistem. Pengujian dilanjutkan dengan melakukan simulasi hubung singkat pengujian *sequence of operation* guna memastikan urutan kerja aman pada proteksi *recloser* dan *fuse* sebagaimana diperlihatkan pada gambar 1.

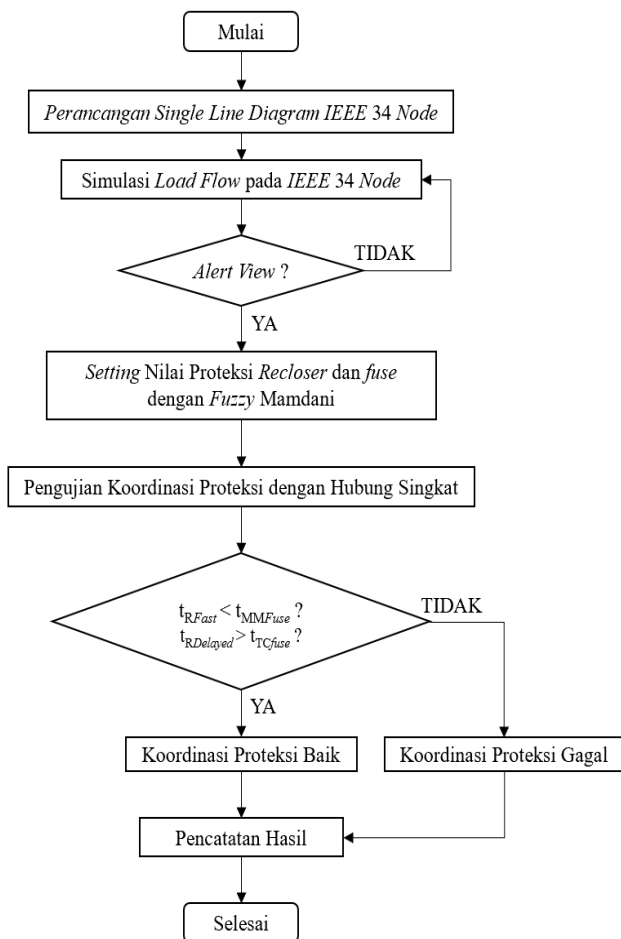


Gambar 1. Blok Diagram

B. Diagram Alir Penelitian

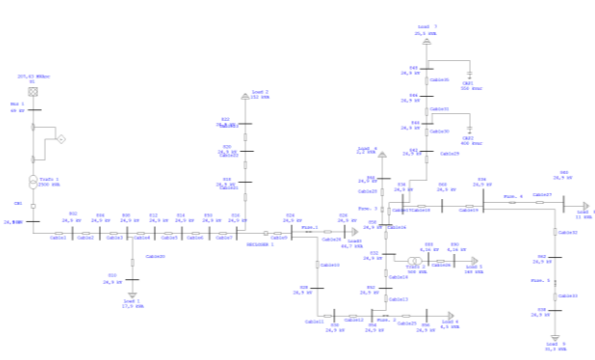
Alur penelitian yang akan dilakukan pada penelitian ini terdapat *input* serta *output* yang ditampilkan dalam langkah-langkah diagram alir pada gambar 2. Tahapan pada penelitian ini dijabarkan sebagai berikut:

1. Tahap pertama, melakukan *input* parameter setiap rangkaian yang digunakan untuk merancang *single line diagram* IEEE 34 *node test feeder*.
2. Tahap kedua yaitu simulasi *load flow* pada IEEE 34 *node test feeder* untuk memastikan bahwa jaringan radial dapat digunakan dengan menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6.0
3. Tahap ketiga yaitu perhitungan menentukan nilai *setting*, khususnya *setting* TMS *recloser* dengan metode fuzzy serta melakukan simulasi perbandingan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB.
4. Tahap keempat yaitu membuktikan pengaruh dari singkat pada kinerja *fuse saving area* (pengamanan *recloser* terhadap *fuse*) dengan simulasi pengujian hubung singkat pada perangkat lunak ETAP 12.6.0.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

C. Perancangan Sistem Single Line Diagram IEEE 34 Node Test Feeder



Gambar 3. Penempatan Koordinasi Proteksi Recloser dan Fuse Pada Single Line Diagram IEEE 34 Node Test Feeder

Perancangan *single line diagram* dilakukan dengan satu persatu dengan mulai melakukan pemasangan pada lembar kerja ETAP 12.6.0 mulai dari pembangkit hingga beban pada setiap ujung lateral. Gambar 3 menunjukkan posisi *recloser* yang ditempatkan diantara *node* 816 (titik 7) dan 824 (titik 8). *Node* tersebut menjadi pemisah antara wilayah *fuse blowing area* dan *fuse saving area*. Selain itu, terpasang 5 buah *fuse*

pada *fuse saving area* yang diantaranya 3 buah *fuse* berdekatan dengan langsung dengan *recloser* sedangkan 2 *fuse* lainnya terletak dititik terjauh jaringan dari *grid*. Pada perancangan ini berisi tentang berbagai macam komponen dengan mulai dari *grid*, *line*, beban, kapasitor, transformator serta komponen yang paling utama adalah proteksi dari *recloser* dan *fuse*.

Pada perancangan ini tentang berisi berbagai macam komponen dengan mulai dari *grid*, *line*, beban, kapasitor, transformator serta komponen yang paling utama adalah proteksi dari *recloser* dan *fuse*. Maka dari itu, *setting* dilakukan sebagai berikut untuk *recloser* dan *fuse* [8].

$$t = \frac{\left[\frac{I_{hs}}{I_{set}}\right]^{\alpha} - 1}{\beta}$$

$$TMS = t \times \left[\frac{\left[\frac{I_{hs}}{I_{set}}\right]^{\alpha} - 1}{\beta}\right]$$

Pada rumus diatas diperlukan I_{set} dengan pengambilan data sebagai berikut [9].

Setting OCR : I_{set} diambil 1,05 s/d $1,3 \times I_n$

Setting GFR : I_{set} diambil $0,4 \times I_n$

Keterangan:

TMS : Time Multiple Setting

t : Waktu Kerja Relai

I_{hs} : Arus Hubung Singkat

I_{set} : Arus Setting Relai

α, β : Konstanta

Koordinasi yang baik tentunya diciptakan dari perhitungan pemilihan *fuse cut out* yang baik. Oleh karena itu, berdasarkan nilai arus beban nominal, penentuan rating yang digunakan sebagai berikut [10].

$$I_{fuse} = k \times I_n$$

Keterangan:

I_{fuse} : Rating Fuse Cut Out

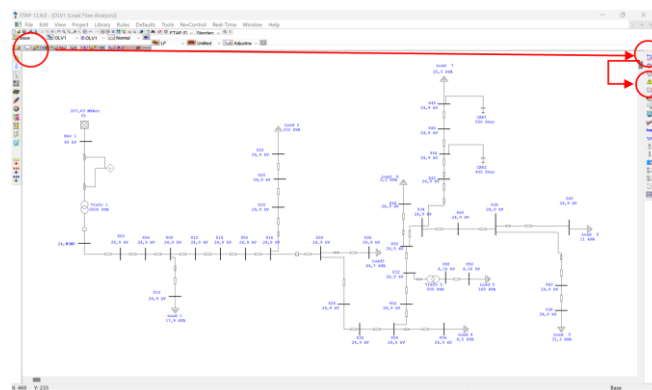
k : Nilai koefisien (1,02 s/d 1,3)

I_n : Arus Beban Nominal

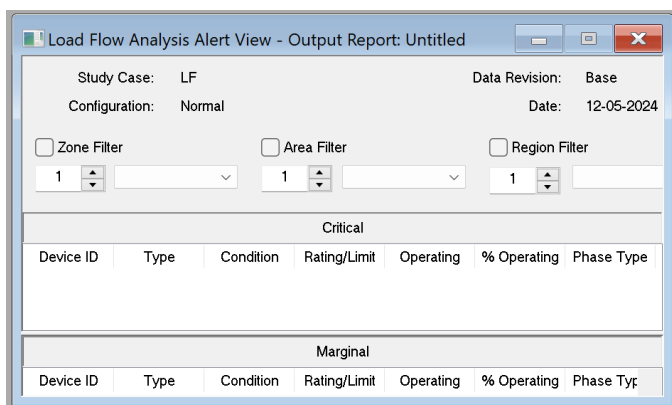
D. Simulasi Load Flow

Simulasi *load flow* dilakukan untuk mengetahui aliran daya sebagai proses dasar dalam studi kasus mengenai penyetelan perangkat. Selain itu, Simulasi ini juga dilakukan sebagai langkah validasi terhadap semua komponen ketika beroperasi secara normal. Peran utama yang paling penting dalam simulasi ini adalah pengoperasian pada *alert view* sebagai pengujian kebenaran bahwa sistem telah dirancang

dengan sesuai. Gambar 4. menunjukkan proses simulasi *load flow* dengan 3 prosesnya yang ditunjukkan oleh anak panah. Pada saat melakukan proses *load flow analysis*, perlu dilakukan *running load flow* dengan *run load flow*. Setelah itu, cek pada *alert view* untuk memastikan keterangan tidak adanya komentar *critical* yang harus diperbaiki.

Gambar 4. Operasi Simulasi *Load Flow*

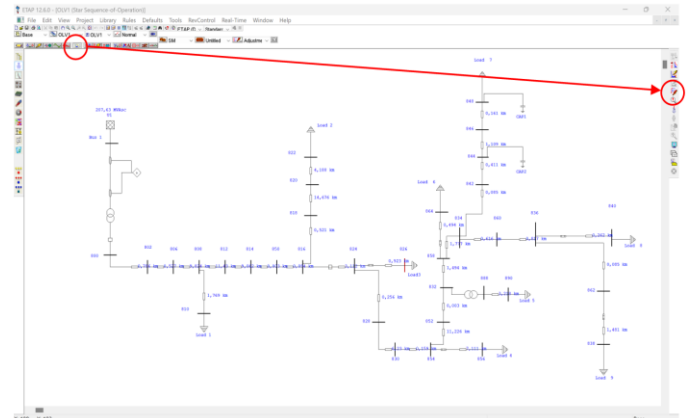
Informasi yang ditampilkan dari *alert view* saat dilakukannya *run load flow*. Gambar 5 menampilkan beberapa informasi seperti *device ID*, tipe komponen, rating komponen yang digunakan, nilai persen operasi, tipe fasa, serta yang paling penting adalah kondisi yang terjadi pada sistem tersebut. Kondisi *undervoltage* ataupun *overvoltage* sangat memungkinkan terjadi pada *critical* saat *load flow* memberikan instruksi bahwa sistem harus segera diperbaiki.

Gambar 5. Operasi Simulasi *Load Flow Analysis Alert View*

E. Simulasi Short Circuit pada Sistem IEEE 34 Node Test Feeder pada Aplikasi ETAP 12.6.0

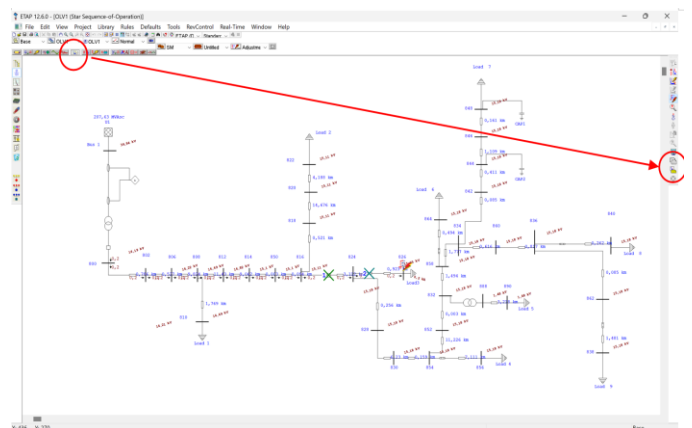
Pengujian hubung singkat dilakukan di titik-titik setelah koordinasi *recloser* dan *fuse* pada bagian *fuse saving*. Gangguan yang diberikan yaitu bentuk gangguan hubung singkat. gambar 6, representasi proses dalam melakukan penyisipan gangguan hubung singkat. *Protective Device Coordination* sebagai langkah awal yang memiliki fungsi menampilkan alat untuk melakukan *Fault Insertion (PD Sequence of Operation)*. Fitur tersebut akan memberikan gangguan terhadap jaringan yang

menyebabkan perangkat proteksi bekerja. Proteksi akan mengamankan gangguan hubung singkat tiga fasa dan akan menampilkan urutan kerja dari proteksi sebagaimana *setting* koordinasi proteksi yang telah ditentukan

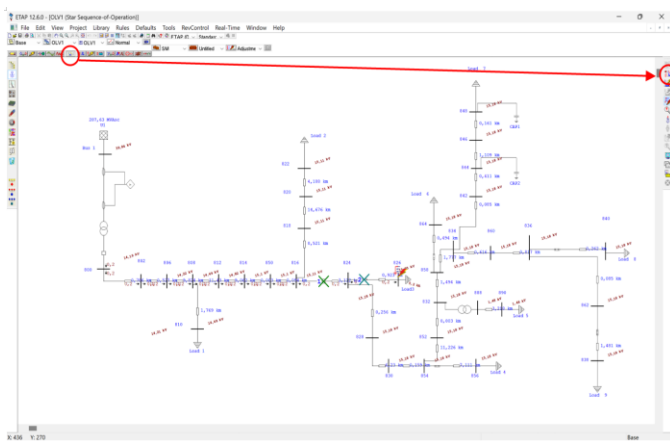
Gambar 6. Pengujian Hubung Singkat Tiga Fasa oleh *Fault Insertion (PD Sequence of Operation)*

F. Simulasi Menampilkan Hasil Keluaran Pengujian Hubung Singkat pada Aplikasi ETAP 12.6.0

Gambar 7 menunjukkan langkah awal untuk menampilkan *Report Manager*. *Star-Protective Device Coordination* pada *toolbar* yang ditunjukkan pada langkah pertama akan mengantarkan pada *tool* selanjutnya yaitu *Report Manager*.

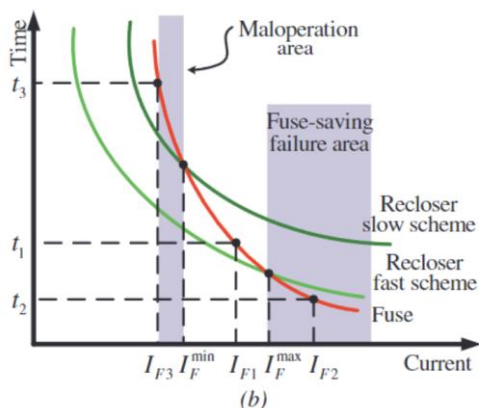
Gambar 7. Langkah menampilkan *Report Manager*

Proses *star view manager* sebagai aksi untuk menampilkan kurva proteksi saat terjadinya hubung singkat. *Star view manager* pada gambar 8 akan memperlihatkan sistem kerja koordinasi *recloser* dan *fuse* dalam bentuk kurva. Pada bagian ini akan terlihat nilai besarnya arus hubung singkat memotong garis dari sistem koordinasi proteksi.



Gambar 8. Star View Manager

Skema proteksi *recloser* dan *fuse* pada gambar 9 berlaku untuk arus gangguan antara I_{Fmin} dan I_{Fmax} [5]. Oleh karena itu, jika terjadi arus gangguan yang sama dengan I_{F1} , skema cepat dari *recloser* mengoperasikan tindakan penutupan untuk membersihkan gangguan transien sebelum waktu pelepasan sekring. Selain itu, jika ini adalah gangguan permanen, *fuse* akan membersihkannya sebelum pengoperasian penutup kembali berdasarkan skema pelambatangannya.

Gambar 9. Kurva Koordinasi *Recloser* dan *Fuse* pada Skema *Fuse Saving* [5]

Kegagalan penghematan *fuse* dan kegagalan pengoperasian *recloser* tidak terjadi untuk kesalahan ini. Perencanaan koordinasi proteksi ditunjukkan persamaan berikut [11].

$$t(I_{Fi}) > t(I_{RA}) \quad \forall \quad I_{Fi} \begin{cases} I_{Fmin} \leq I_{Fi} \leq I_{Fmax} \\ I_{Fmin}, I_{Fmax} > 0 \end{cases}$$

Ket: $t(I_{Fi})$ = waktu operasi *fuse*

$t(I_{RA})$ = waktu operasi pemutusan cepat *recloser*

Setiap arus gangguan yang melalui *fuse* (I_{Fi}), waktu operasi *fuse* ($t(I_{Fi})$) akan lebih besar dari waktu operasi cepat dari *recloser* ($t(I_{RA})$).

$$t(I_{RBB}) > t(I_{Fi}) \quad \forall \quad I_{Fi} \begin{cases} I_{Fmin} \leq I_{Fi} \leq I_{Fmax} \\ I_{Fmin}, I_{Fmax} > 0 \end{cases}$$

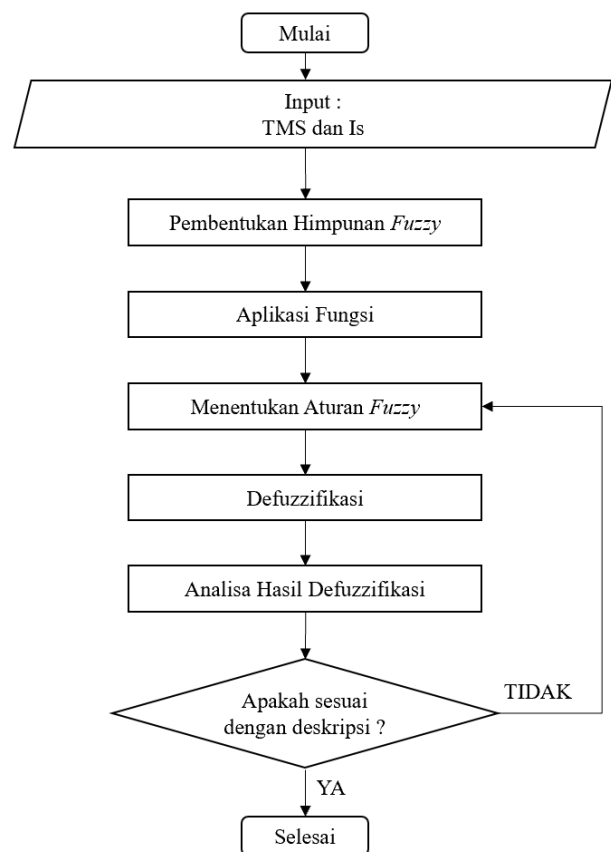
Ket: $t(I_{Fi})$ = waktu operasi *fuse*

$t(I_{RBB})$ = waktu operasi pemutusan lambat *recloser*

Setiap arus gangguan yang melalui *fuse* (I_{Fi}), waktu operasi *fuse* ($t(I_{Fi})$) tidak melampaui waktu operasi lambat dari *recloser* ($t(I_{RBB})$).

G. Perancangan Sistem Fuzzy Mamdani

Berdasarkan gambar 10 bahwa pembentukan sistem *fuzzy* diawali dengan pembentukan himpunan *fuzzy* dari data TMS dan nilai arus hubung singkat. Setelah itu, dilakukan proses fungsi implikasi yang dimana hasil dari himpunan *fuzzy* akan dicari nilai implikasi berdasarkan aturan yang dibuat. Kemudian, nilai implikasi yang terpenuhi akan dilakukan komposisi aturan *fuzzy* dengan fungsi max berbasis defuzzifikasi menggunakan metode *centroid*.



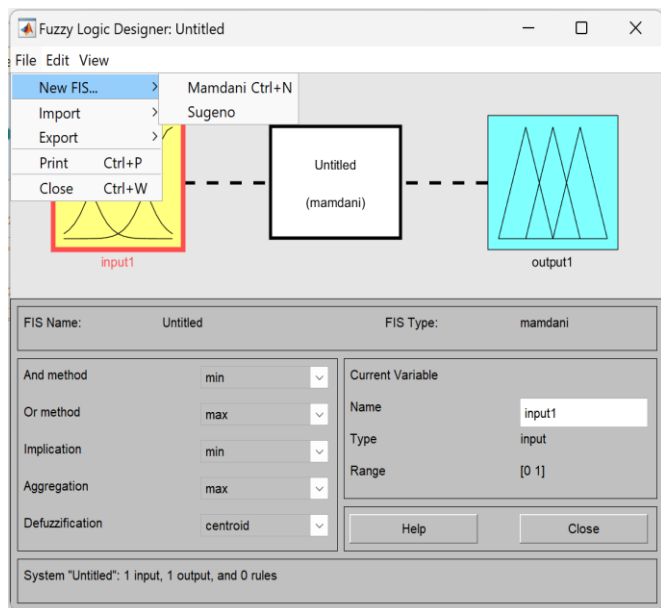
Gambar 10. Diagram Alir Sistem Fuzzy

H. Simulasi Metode Fuzzy Aplikasi Matlab

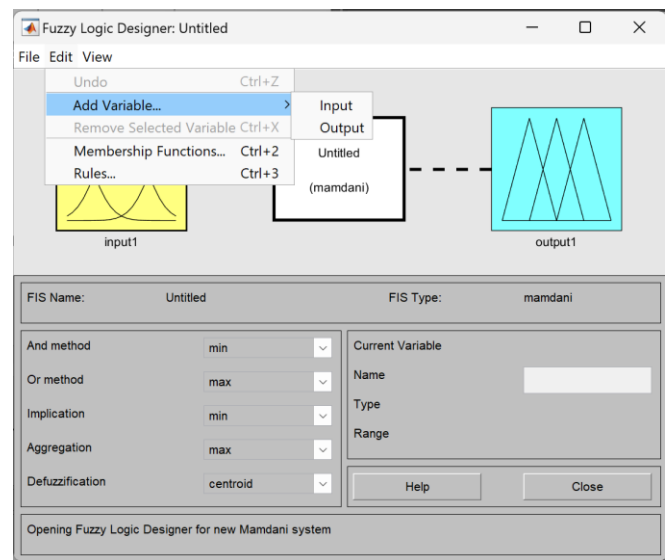
Metode *fuzzy* mamdani akan memberikan pendekatan yang sempurna dalam menentukan pengaturan pada *recloser* karena konsep dari metode ini sangat toleran, sangat sederhana dan mudah dimengerti [12][13]. Logika *fuzzy* dapat membentuk dan mengaplikasikan pengalaman-pengalaman dari para ahli secara langsung tanpa harus melalui proses pelatihan [14]. *Fuzzy* merupakan subkategori logika yang menerapkan derajat keanggotaan pada suatu himpunan sehingga keanggotaannya tidak hanya bernilai benar/salah, yang berarti secara bahasa berarti kabur dan memiliki ketidakpastian dengan rentang nilai

yang masing-masing memiliki derajat keanggotaan antara 0 sampai dengan 1[15]. Sistem *fuzzy* diawali dengan pembentukan himpunan *fuzzy* dari data TMS dan nilai arus hubung singkat. Setelah itu dilakukan proses fungsi implikasi dimana hasil dari himpunan *fuzzy* tersebut akan dicari nilai implikasi berdasarkan aturan yang dibuat. Kemudian, nilai implikasi yang terpenuhi akan dilakukan komposisi aturan *fuzzy* dengan fungsi max berbasis defuzzifikasi menggunakan metode centroid.

Metode *Fuzzy Mamdani* dianalisa pada matlab menggunakan 5 fasilitas *Graphical User Interface* (GUI), yaitu *fuzzy inference system* (FIS) editor dan *membership function editor* sebagai pembacaan dan modifikasi serta tiga sisanya yaitu *rule editor*, *rule viewer*, *surface viewer* sebagai pembacaan tanpa adanya modifikasi. Gambar 11 menunjukkan *fuzzy logic designer* sebagai pilihan *fuzzy inference system* (FIS) terhadap metode yang akan digunakan. Metode ini dapat dipilih dengan melakukan pilihan *file* dengan new FIS metode *mamdani*.

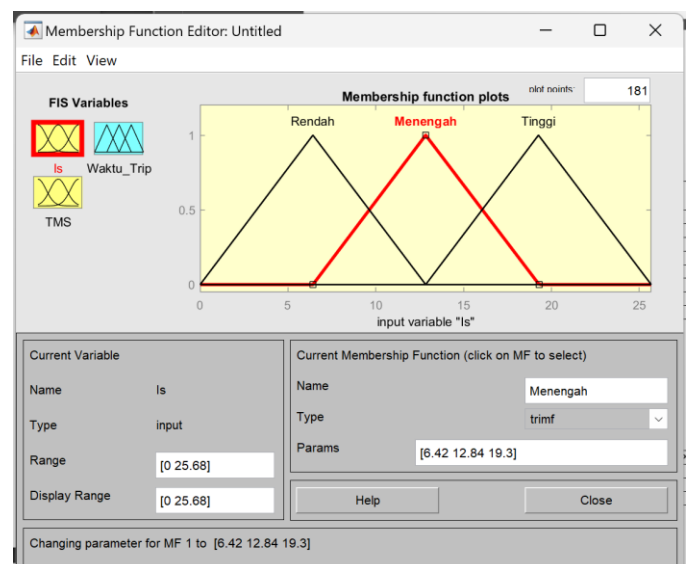
Gambar 11. *Fuzzy Logic Designer*

Penambahan jumlah variabel dilakukan dengan *toolbar edit* yang akan memunculkan *add variabel* untuk melakukan penambahan variabel *input* yang ditunjukkan pada gambar 12.



Gambar 12. Penambahan Variabel

Gambar 13. menampilkan *input* dan *output* variabel yang digunakan dalam pengujian metode *fuzzy mamdani* yang digunakan dalam aplikasi Matlab. Penamaan dari *input* maupun *output* bisa dilakukan perubahan dengan cara mengubah nama di bagan *name*. Terdapat 2 *input* untuk membentuk keluaran *setting recloser Is* dan TMS pada setiap bagian baik OCR maupun GFR serta *ouput* yaitu waktu trip relai.

Gambar 13. *Input dan Output Variabel*

IV. HASIL DAN ANALISA

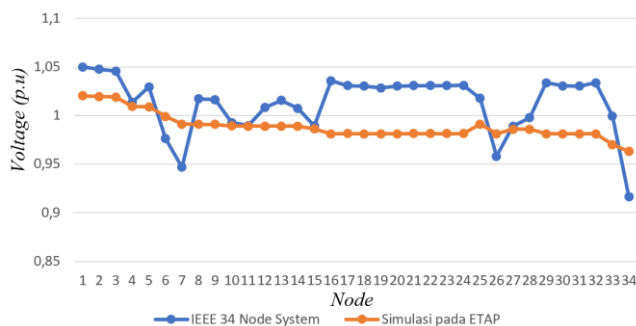
Hasil penelitian disajikan disajikan dari beberapa utama yaitu pengujian *load flow analysis*, pengujian metode *fuzzy mamdani*, dan pengujian gangguan hubung singkat. Simulasi *Short Circuit* pada Sistem IEEE 34 *Node Test Feeder* pada Aplikasi ETAP 12.6.0

A. Hasil Pengujian Load Flow Analysis

Data tegangan p.u yang diperoleh dari simulasi yang dilakukan pada ETAP 12.6.0. Hasil kalkulasi keseluruhan

didapatkan nilai sebesar 2,3%. Tegangan p.u hasil simulasi masih dalam kisaran rentang data yang diberikan atas ketentuan dari IEEE 34 dengan nilai sebesar $0,95 < \text{voltage p.u simulasi} < 1,05$. Simulasi pada ETAP 12.6.0 dengan data IEEE 34 *node* memperlihatkan bahwa hasil dari perancangan IEEE 34 *Node test feeder* pada perangkat lunak ETAP 12.6.0 ini telah disimulasikan dengan baik dan dapat digunakan untuk simulasi berkelanjutan sebagaimana gambar 14.

Grafik (Node System Node) = Simulasi Pada ETAP 12.6.0

Gambar 14. Grafik Perbandingan *Voltage* p.u Data Sistem Node IEEE 34 dengan Simulasi ETAP 12.6.0

B. Hasil Pengujian Simulasi Metode Fuzzy Mamdani

1. Waktu Kerja OCR (Overcurrent Relay) pada Recloser

Perhitungan waktu kerja (t_{kerja}) pada setiap *node* memberikan hasil secara menyeluruh mengenai waktu operasi yang terjadi dengan pembubuhan TMS perhitungan. nilai waktu kerja OCR (t_{kerja}) yang dihasilkan dari perhitungan TMS sebelumnya. Nilai t_{kerja} ini akan menjadi bahan perbandingan dengan *setting* dari metode fuzzy Mamdani di aplikasi matlab. Hasil perhitungan tersebut dinyatakan pada tabel 1.

Tabel 1. Tabel Hasil Perhitungan Nilai Waktu Kerja OCR Recloser pada Fuse Saving Area Hubung Singkat 3 Fasa

Koordinasi Proteksi (Fuse Saving Area)		Node	IHS 3 fasa	ISET	TMS	t_{kerja} (S)
	Fuse					
Recloser	1	826	233	1,05	0,733	0,597
	2	856	180	0,105	1,034	1,230
	3	864	164	0,105	1,018	1,152
	4	840	160	0,315	0,849	0,801
	5	838	156	0,735	0,724	0,582

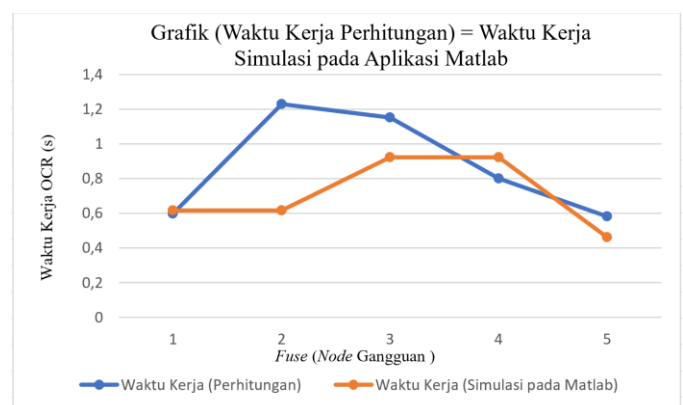
Perbandingan waktu kerja OCR Recloser dari hasil perhitungan konvensional dan waktu kerja dengan metode fuzzy mamdani memiliki hasil yang berbeda setiap koordinasi antara recloser dan lima buah fuse yang terpasang. Kondisi error tertinggi terjadi pada sistem koordinasi recloser dan fuse 2 dengan nilai error 50%. Sedangkan error terendah terjadi pada sistem koordinasi recloser dan fuse 1 sebesar 3,01%. Namun, meskipun terdapat rentang error yang cukup besar antara hasil perhitungan dan hasil metode fuzzy mamdani pada sistem

koordinasi recloser dan fuse 2, nilai rata-rata error pada seluruh sistem koordinasi bernilai 14,5% yang berarti masih tergolong kecil. Kemudian, data yang ditampilkan pada tabel 4.18 dibuat grafik koordinasi waktu kerja relai. Perbandingan waktu kerja operasi OCR pada recloser ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Hasil Waktu Kerja OCR Recloser Perhitungan Konvensional dengan Metode Fuzzy Mamdani pada Aplikasi Matlab

Koordinasi Proteksi Recloser dan 5 Fuse	TMS	t_{kerja} Perhitungan (s)	t_{kerja} Metode Fuzzy (s)	Error (%)
Fuse 1	0,733	0,597	0,615	3,01508
Fuse 2	1,034	1,230	0,615	50
Fuse 3	1,018	1,152	0,922	19,96528
Fuse 4	0,849	0,801	0,922	15,1061
Fuse 5	0,724	0,582	0,461	20,79038
Rata-rata error				14,52689

Berdasarkan gambar 15, koordinasi recloser dengan fuse 2 memiliki perbandingan rentang hasil waktu yang cukup besar dengan perbedaan berkisar 0,6 s, akan tetapi sistem untuk koordinasi fuse 1, 3, 4 dan 5 memiliki rentang perbedaan nilai yang cukup kecil berkisar 0,1 s hingga 0,2 s. Oleh karena itu, perbandingan error yang bernilai kecil ini dapat menjadi acuan serta justifikasi penghitungan *setting* relai yang dilakukan sudah tepat dengan hasil waktu kerja relai OCR yang sensitif dan selektif.



Gambar 15. Grafik Perbandingan Waktu Kerja OCR Recloser Perhitungan Konvensional dan Metode Fuzzy Mamdani

2. Waktu Kerja GFR (Ground Fault Relay) pada Recloser

Perhitungan waktu kerja (t_{kerja}) pada setiap *node* memberikan hasil secara menyeluruh mengenai waktu operasi yang terjadi dengan pembubuhan TMS perhitungan. nilai waktu kerja GFR (t_{kerja}) yang dihasilkan dari perhitungan TMS sebelumnya. Nilai t_{kerja} ini akan menjadi bahan perbandingan dengan *setting* dari metode fuzzy Mamdani di aplikasi matlab. Hasil perhitungan tersebut dinyatakan pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Nilai Waktu Kerja GFR *Recloser* pada *Fuse Saving Area* Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

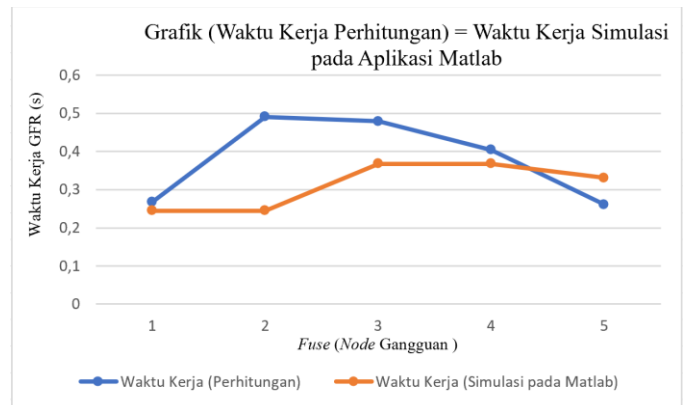
Koordinasi Proteksi (<i>Fuse Saving Area</i>)		<i>Node</i>	I_{HS} fasa- tanah	I_{SET}	TMS	t_{kerja} (S)
Recloser	<i>Fus e</i>					
	1	200	233	0,4	0,283	0,267
	2	152	180	0,04	0,384	0,491
	3	139	164	0,04	0,379	0,479
	4	132	160	0,12	0,322	0,404
	5	129	156	0,28	0,279	0,261

Perbandingan waktu kerja GFR *Recloser* dari hasil perhitungan konvensional dan waktu kerja dengan metode *fuzzy mamdani* memiliki hasil yang berbeda setiap koordinasi antara *recloser* dan lima buah *fuse* yang terpasang. Kondisi *error* tertinggi terjadi pada sistem koordinasi *recloser* dan *fuse* 2 dengan nilai *error* 50,10%. Sedangkan *error* terendah terjadi pada sistem koordinasi *recloser* dan *fuse* 1 sebesar 8,23 %. Nilai rata-rata *error* bernilai 12,72%. Perbandingan waktu kerja operasi OCR pada *recloser* ditampilkan pada tabel 4.

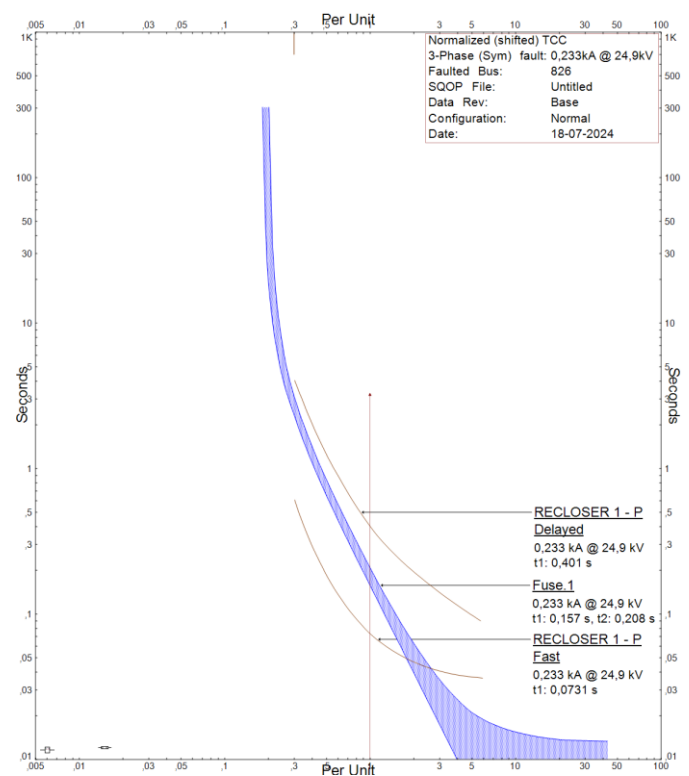
Tabel 4. Perbandingan Hasil Waktu Kerja GFR *Recloser* Perhitungan Konvensional dengan Metode *Fuzzy Mamdani* pada Aplikasi Matlab

Koordinasi Proteksi Recloser dan 5 Fuse	TMS	t _{kerja} Perhitungan (s)	t _{kerja} Metode Fuzzy (s)	Error (%)
Fuse 1	0,283	0,267	0,245	8,2397
Fuse 2	0,384	0,491	0,245	50,10183
Fuse 3	0,379	0,479	0,368	23,17328
Fuse 4	0,322	0,404	0,368	8,910891
Fuse 5	0,279	0,261	0,331	26,8199
Rata-rata error				12,72116

Berdasarkan gambar 16, koordinasi *recloser* dengan *fuse* 2 masih memiliki perbandingan rentang hasil waktu kerja yang cukup besar pada GFR dengan perbedaan berkisar 0,25 s, namun sistem untuk koordinasi *fuse* 1, 3, 4 dan 5 memiliki rentang perbedaan nilai yang cukup kecil berkisar 0,1 s. Oleh karena itu, perbandingan *error* yang bernilai kecil ini dapat menjadi acuan serta justifikasi penghitungan *setting* relai yang di lakukan sudah tepat dengan hasil waktu kerja relai GFR yang sensitif dan selektif.

Gambar 16. Grafik Perbandingan Waktu Kerja GFR *Recloser* Perhitungan Konvensional dan Metode *Fuzzy Mamdani*

C. Hasil Kurva Koordinasi pada Simulasi *Star Protective Device* Hubung Singkat Tiga Fasa

Gambar 17. Kurva Koordinasi Proteksi *Recloser* dan *Fuse* 1 Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa di *Node* 826

Kurva koordinasi yang ditampilkan merupakan kurva hasil dari simulasi *star protective device* pada perangkat lunak ETAP 12.6.0. Kurva ini akan menampilkan seberapa baik koordinasi proteksi setelah *input* nilai TMS pada *recloser* dengan kelima *fuse* yang terpasang pada penelitian ini. Berdasarkan gambar 4.17 menunjukkan kurva koordinasi proteksi *recloser* dan *fuse* 1 saat terjadi gangguan hubung singkat pada titik 826 proteksi berjalan dengan baik. Terlihat titik gangguan gambar 4.16 menyatakan bahwa kurva *recloser* cepat (*A-instantaneous recloser curve*) memotong kurva *fuse* (*fuse curve*) dan

membentuk titik perpotongan *C minimum melting* dengan $t(I_{Fuse\ minimum\ melting}) > t(I_{Recloser\ cepat})$ yang bernilai $0,255\ s > 0,0731\ s$. Selain itu, terdapat perpotongan waktu kurva lambat *recloser* (*B-time delay recloser curve*) dengan kurva *fuse* (*fuse curve*) yang membentuk titik perpotongan *total clearing* dengan $t(I_{Recloser\ lambat}) > t(I_{Fuse\ total\ clearing})$ yang bernilai $0,401\ s > 0,331\ s$. Titik Perpotongan *minimum melting* dengan *total clearing* terbentuk batas limit sebagai interpretasi dari waktu pemutusan dalam koordinasi proteksi *recloser* dan *fuse*.

Seluruh koordinasi *recloser* dengan *fuse* dilakukan dengan 5 pengujian hubung singkat 3 fasa untuk mewakili kelima koordinasi proteksi yang terpasang pada jaringan IEEE 34. Berdasarkan tabel 5, waktu pemutusan koordinasi proteksi *recloser* dan *fuse* dengan TMS *input* yang telah diuji pada analisis *fuzzy mamdani* sebelumnya pada gangguan hubung singkat 3 fasa menampilkan hasil yang baik. Sebagaimana sistem limit pada koordinasi dengan $t(I_{Fuse\ minimum\ melting}) > t(I_{Recloser\ cepat})$ dan $t(I_{Recloser\ lambat}) > t(I_{Fuse\ total\ clearing})$. Dengan demikian, hasil dari TMS pengujian metode *fuzzy mamdani* berhasil menciptakan kondisi koordinasi yang baik antara dua proteksi pada pengujian hubung singkat 3 fasa.

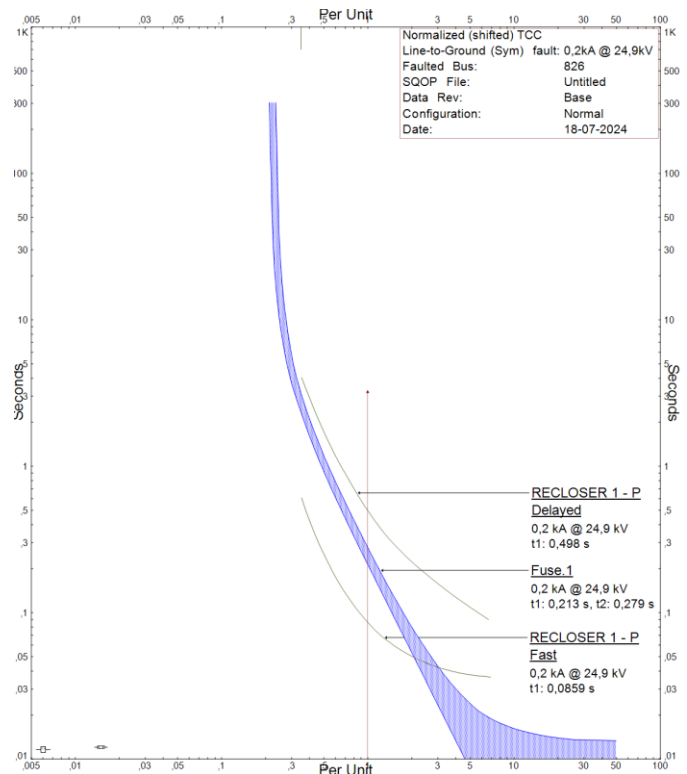
Tabel 5. Hasil Koordinasi Waktu Pemutusan Koordinasi Proteksi *Recloser* dan *Fuse* pada Simulasi *Star Protective Device* Hubung Singkat Tiga Fasa

Device Hubung Singkat Riga Pasa

Fault Node	Waktu pemutusan				Kondisi
	Recloser (s)		Fuse (s)		
	Cepat	Lambat	Minimum Melting	Total Clearing	
826	0,0731	0,401	0,157	0,208	Baik
856	0,0969	0,584	0,263	0,343	Baik
864	0,109	0,678	0,317	0,411	Baik
840	0,117	0,471	0,353	0,456	Baik
388	0,12	0,768	0,368	0,476	Baik

D. Hasil Kurva Koordinasi pada Simulasi *Star Protective Device* Hubung Singkat Fasa ke Tanah

Berdasarkan gambar 18 menunjukkan kurva koordinasi proteksi *recloser* dan *fuse* 1 saat terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah pada titik 826 proteksi berjalan dengan baik. Terlihat titik gangguan gambar 4.16 menyatakan bahwa kurva *recloser* cepat (*A-instantaneous recloser curve*) memotong kurva *fuse* (*fuse curve*) dan membentuk titik perpotongan *C minimum melting* dengan $t(I_{Fuse\ minimum\ melting}) > t(I_{Recloser\ cepat})$ yang bernilai $0,213\ s > 0,0859\ s$. Selain itu, terdapat perpotongan waktu kurva lambat *recloser* (*B-time delay recloser curve*) dengan kurva *fuse* (*fuse curve*) yang membentuk titik perpotongan *total clearing* dengan $t(I_{Recloser\ lambat}) > t(I_{Fuse\ total\ clearing})$ yang bernilai $0,498\ s > 0,279\ s$. Titik Perpotongan *minimum melting* dengan *total clearing* terbentuk batas limit sebagai interpretasi dari waktu pemutusan dalam koordinasi proteksi *recloser* dan *fuse*.



Gambar 18. Kurva Koordinasi Proteksi Recloser dan Fuse 1 Gangguan Hubung Singkat Fasa ke Tanah Fasa di Node 826

Berdasarkan tabel 6, waktu pemutusan koordinasi proteksi *recloser* dan *fuse* dengan TMS *input* yang telah diuji pada analisis *fuzzy mamdani* sebelumnya pada gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah menampilkan hasil yang baik. Sebagaimana sistem limit pada koordinasi dengan $t(I_{Fuse\ minimum\ melting}) > t(I_{Recloser\ cepat})$ dan $t(I_{Recloser\ lambat}) > t(I_{Fuse\ total\ clearing})$. Dengan demikian, hasil dari TMS pengujian metode *fuzzy mamdani* berhasil menciptakan kondisi koordinasi yang baik antara dua proteksi pada pengujian hubung singkat satu fasa ke tanah.

Tabel 8. Hasil Koordinasi Waktu Pemutusan Koordinasi Proteksi *Recloser* dan *Fuse* pada Simulasi *Star Protective Device* Hubung Singkat Fasa ke Tanah

<i>Fault Node</i>	Waktu pemutusan				Kondisi
	<i>Recloser (s)</i>		<i>Fuse (s)</i>		
	Cepat	Lambat	<i>Minimum Melting</i>	<i>Total Clearing</i>	
826	0,0859	0,498	0,213	0,279	Baik
856	0,121	0,772	0,371	0,479	Baik
864	0,137	0,902	0,446	0,575	Baik
840	0,149	0,988	0,501	0,642	Baik
388	0,155	1,03	0,525	0,673	Baik

V. KESIMPULAN

Single line diagram IEEE 34 *node test feeder* pada perangkat lunak ETAP 12.6.0 telah disimulasikan dengan baik serta telah divalidasi dan dapat digunakan untuk simulasi

berkelanjutan dengan nilai rata-rata *error* sebesar 2,3% pada *load flow analysis*. *Fuzzy Mamdani* memberikan nilai justifikasi yang luas serta efisien untuk menentukan nilai TMS pada *recloser* yang akan disetting dengan *error* waktu kerja operasi perbandingan perhitungan konvensional dengan simulasi dari Matlab sebesar 14,52% untuk bagian OCR dan 12,72% untuk bagian GFR. Penggunaan metode *fuzzy mamdani* dalam melakukan menentukan nilai setting TMS *recloser* pada koordinasi proteksi *recloser* dan *fuse* menghasilkan koordinasi yang baik saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa sebagaimana hasil simulasi dari *Star Protective Device ETAP 12.6.0* dengan kurva *recloser* cepat (*A-instantaneous recloser curve*) memotong kurva *fuse* (*fuse curve*) dan membentuk titik perpotongan *C minimum melting* dengan $t(I_{Fuse\ minimum\ melting}) > t(I_{Recloser\ cepat})$ serta perpotongan waktu kurva lambat *recloser* (*B-time delay recloser curve*) dengan kurva *fuse* (*fuse curve*) yang membentuk titik perpotongan *total clearing* dengan $t(I_{Recloser\ lambat}) > t(I_{Fuse\ total\ clearing})$.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. A. Solikah and B. Bramastia, "Systematic Literature Review: Kajian Potensi dan Pemanfaatan Sumber Daya Energi Baru dan Terbarukan Di Indonesia," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 5, no. 1, pp. 27–43, 2024.
- [2] M. Erlangga and others, "Usulan Perencanaan Perawatan Mesin dengan Metode Reliability Centered Maintenance (Rcm) dan Age Replacement pada Mesin Raking Intake (Studi Kasus: Pt. Xyz)," Universitas Islam Indonesia, 2023.
- [3] A. Fernanda, "Implementasi Logika *Fuzzy* Metode Mamdani Pada Sistem Koordinasi Rele Arus Lebih," Universitas Mercu Buana Jakarta, 2021.
- [4] I. Setiwan, "Analisis koordinasi *recloser* dan *fuse* cut out (FCO) pada penyulang apel di PLN rayon Toboali," Universitas Bangka Belitung, 2017.
- [5] A. Yazdaninejadi and H. Ebrahimi, "A new protection algorithm for tackling the impact of fault-resistance and cloud energy storage on coordination of *recloser-fuse* protection," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 17, no. 8, pp. 1827–1835, 2023, doi: 10.1049/gtd2.12691.
- [6] R. Pereira, R. C. D. De Lima, H. D. M. Braz, N. S. D. Brito, P. H. F. Monteiro, and J. P. N. Amoah, "Reclosers Modeling for Temporal Simulation of Distribution Networks in Simulink/ Matlab," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 22, no. 7, pp. 591–600, 2024, doi: 10.1109/TLA.2024.10562260.
- [7] Y. M. Makwana, B. R. Bhalja, and R. Gokaraju, "Improvement in Recloser-Fuse Coordination Technique Based on Modification Factor," *IEEE Syst. J.*, vol. 14, no. 2, pp. 2770–2779, 2020, doi: 10.1109/JSYST.2019.2921840.
- [8] Wijaya Kusuma, Ahmad Hermawan, Aulia Nur Rahma, Muhammad Ilham Rifqi, R. Duanaputri, and R. Duanaputri, "Analisis Perencanaan Pemasangan Recloser pada Penyulang untuk Meminimalisir Pemadaman," *ELPOSYS J. Sist. Kelistrikan*, vol. 8, no. 3, pp. 76–80, 2021, doi: 10.33795/elposys.v8i3.83.
- [9] T. D. Salam and G. Wiyono, "Analisis Koordinasi Proteksi Ocr Dan Gfr Untuk Mengatasi Gangguan Hubungsingkat Pada Transformator Daya Di Gardu Induk ...," *Semin. Nas. Tek. Elektro*, vol. 1, pp. 30–38, 2023, [Online]. Available: <https://snte.fortei.org/list/index.php/snte/article/view/10>
- [10] W. F. Galla, A. S. Sampeallo, J. I. Daris, and others, "Analisis Gangguan Hubung Singkat Pada Saluran Udara 20 Kv Di Penyulang Naioni Pt. Pln (Persero) Ulp Kupang Untuk Menentukan Kapasitas Pemutusan *Fuse* Cut Out Menggunakan Etap 12.6," *J. Media Elektro*, pp. 101–111, 2020.
- [11] W. N. Rumbaman, H. Purnama, and S. Supriyanto, "Studi Koordinasi Proteksi Recloser *Fuse* Pada Jaringan IEEE 34 Node Menggunakan ETAP," in *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 2021, pp. 452–457.
- [12] S. T. Galang Persada Nurani Hakim, I. D. Septiyana, S. T. Ahmad Firdausi, F. R. I. Mariati, I. S. Budiyo, and others, *SISTEM FUZZY: Panduan Lengkap Aplikatif*. Penerbit Andi, 2021.
- [13] A. E. C. Momesso, W. M. S. Bernardes, and E. N. Asada, "Fuzzy adaptive setting for time-current-voltage based overcurrent relays in distribution systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 108, no. August 2018, pp. 135–144, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.12.035.
- [14] I. Sakti, "Methodology of Fuzzy Logic," *2014 1st Int. Conf. Inf. Technol. Comput. Electr. Eng.*, pp. 93–98, 2014.
- [15] A. J. Rindengan and Y. A. R. Langi, "Sistem *Fuzzy*," *Bandung CV. Patra Media Graf.*, 2019.