

PENERAPAN METODE LOGIKA FUZZY UNTUK PERLINDUNGAN SISTEM TENAGA LISTRIK

Rofi Hariadi¹⁾, Azriyenni Azhari Zakri²⁾

^{1,2)} Program Studi Teknik Elektro S1, Fakultas Teknik Universitas Riau
Kampus Bina Widya, Jl. H. R. Soebrantas Km. 12,5 Simpang Baru, Panam
Pekanbaru 28293

Email: rofi.hariadi@student.unri.ac.id; azriyenni@eng.unri.ac.id

ABSTRACT

The fault occurs in electric power systems is a critical problem that can affect system reliability. In this study, the protection of power system using the Fuzzy Relation (FR method). The FR method is designed to implement Artificial Intelligent (AI) to predict the work of protective equipment in electrical power systems, namely, state relay status and Circuit Breaker (CB) utilizing the sequence of protective equipment operating time. The logic operating time of this protective device is built on the sagittal diagram. Furthermore, there is a three-dimensional matrix also used to represent the circuit topology in the protection system. Operating time of the protective devices utilizes by the power circuit topology matrix that will be generated every CB status when operating. The test data for the system model have been run on five bus systems in Riau, which is conducted with five fault scenarios. Simulation results found are the fault of each line L1 and L2 with membership degrees of values 0.9419 and 0.9310. The application of the FR method is very suitable to be given a prediction in the protection of the electric power system because it can anticipate more faster the fault that occurs in the electric power system.

Keywords: circuit breaker, Fuzzy Relation, protection system, relay, sagittal diagram

1. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik terdiri dari pembangkit tenaga listrik dan saluran transmisi memiliki suatu sistem kompleks yang karakteristiknya berubah – ubah secara dinamis sesuai keadaan sistem tersebut, karena memiliki rentangan jaringan cukup jauh.

Saat ini, listrik merupakan komoditas yang sangat penting untuk keberlangsungan roda ekonomi, baik bidang industri, masyarakat umum, kesehatan dan lain-lain. Hanya karena padam sesaat akan merugikan semua pihak terutama industri dan bidang kesehatan. Kebutuhan yang meningkat mendorong perusahaan listrik untuk lebih efisien dalam pengoperasian sistem tenaga. Maka masalah untuk mengurangi durasi padam dari sistem tenaga perlu ditingkatkan. Pada masalah ini, gangguan pada sistem transmisi tenaga listrik merupakan poin kritis karena dapat

mempengaruhi area yang luas dan bisa memadamkan banyak tempat.

Analisis bagian yang terganggu memiliki tujuan akhir yaitu untuk mengidentifikasi bagian yang terganggu pada sistem tenaga listrik menggunakan status arus dari peralatan perlindungan atau relai perlindungan dan *circuit breaker* (CB) setelah gangguan muncul pada sistem tenaga (Min, et al., 2004). Sangat sulit untuk menentukan bagian yang terganggu hanya menggunakan metode analisis karena jaringan transmisi sangat kompleks dan penuh ketidakpastian seperti kegagalan peralatan perlindungan, kesalahan akuisisi data lokal dan pengiriman data, dan waktu gangguan yang tidak akurat. Terutama saat terjadi kegagalan peralatan perlindungan, akan menyebabkan area pemadaman akan semakin luas. Hal ini akan menyebabkan

ketidakpastian bagian yang terganggu semakin bertambah.

Pada studi ini metode logika *Fuzzy* yaitu *Fuzzy Relation* (FR) digunakan untuk menganalisis saluran dan bus yang mengalami gangguan pada sistem tenaga listrik. Masukan yang digunakan adalah perubahan status relai dan CB yang dengan keluaran yang diharapkan adalah saluran atau bus yang mengalami gangguan.

Studi yang dilakukan oleh Tao Wang dkk pada tahun 2015, menerapkan pendekatan pemodelan grafis untuk mendiagnosis gangguan berdasarkan *Fuzzy Reasoning Spiking Neural System P* (FDSNP) pada jaringan transmisi sistem tenaga. FDSNP dengan angka trapezoidal *Fuzzy* digunakan untuk memodelkan kandidat gangguan dan algoritma aljabar *Fuzzy Reasoning* digunakan untuk mendapatkan kandidat gangguan. Untuk menguji validitas dari model FDSNP, digunakan 7 kasus pada subsistem daya listrik. Hasil studi kasus menunjukkan bahwa FDSNP efektif dalam diagnosis gangguan pada jaringan transmisi daya untuk situasi kesalah tunggal dan ganda dengan ketidakpastian data SCADA (Wang, et al., 2015).

Studi yang dilakukan oleh Azriyenni dan M.W. Mustafa tahun 2013, menerapkan metode *Neuro-Fuzzy* (NF) untuk mendeteksi lokasi gangguan pada sistem tenaga. Sistem NF dibentuk dari *Neural Network* (NN) dan himpunan *Fuzzy*. Pada studi ini NN berfungsi untuk mendeteksi gangguan melibatkan jumlah komponen yang terbatas. Himpunan *Fuzzy* direpresentasikan kedalam diagram dengan 3 simpul, yaitu simpul 1 untuk komponen, simpul 2 untuk relai dan simpul 3 untuk CB. Studi ini menggunakan informasi peralatan perlindungan utama dan cadangan untuk melakukan perlindungan dan data latihan. Hasilnya menunjukkan bahwa penerapan NF sangat efektif dalam mendeteksi lokasi gangguan (Zakri & Mustafa, 2013).

Lalu penelitian yang dilakukan oleh Wael M. Soliman dkk., 2013 menerapkan *Fuzzy Relation* untuk mendeteksi bagian yang terganggu pada pembangkit, gardu induk dan sistem transmisi. Sistem yang dikembangkan juga dapat mendeteksi gagal fungsi dari peralatan perlindungan. Masukan yang digunakan dari model *Fuzzy Relation* dalam studi tersebut adalah informasi dari status relai dan CB. Studi tersebut menghasilkan model yang dapat mendiagnosis gangguan yang memiliki ketidakpastian dan dapat menolong pusat kontrol untuk membuat keputusan yang kuat (Soliman, et al., 2013).

Berdasarkan studi terdahulu mengenai mendeteksi bagian yang terganggu dalam sistem tenaga listrik menggunakan berbagai metode yang sudah dijelaskan diatas, metode FR dengan kesederhanaannya akan diterapkan pada sistem kelistrikan Riau yang memiliki 4 tahap perlindungan untuk mendeteksi saluran dan bus yang terganggu. Dalam studi ini urutan kerja relai dan perubahan topologi diperhitungkan.

Sistem Perlindungan Daya Listrik

Relai merupakan peralatan yang berfungsi untuk mendeteksi gangguan pada sistem tenaga dan mentriapkan CB untuk mengisolasi gangguan (Soliman, et al., 2013). Perlindungan sistem bertujuan untuk tetap menjaga kestabilan sistem tenaga dalam mengalirkan listrik kepada konsumen. Adapun fungsi dari sistem perlindungan dijelaskan sebagai berikut (Firdaus & Zakri, 2018):

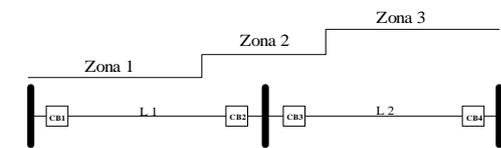
1. Untuk menghindari ataupun mengurangi kerusakan peralatan listrik akibat adanya gangguan (kondisi abnormal).
2. Untuk melokalisir daerah yang terganggu menjadi sekecil mungkin, sehingga efek dari gangguan tidak meluas.
3. Untuk dapat memberikan pelayanan listrik dengan kehandalan yang tinggi.
4. Untuk mengamankan manusia terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh listrik.

Saat gangguan muncul pada sistem tenaga listrik, relai akan bekerja mentriapkan CB. Kegagalan operasi relai perlindungan menyebabkan gangguan meluas dan lebih banyak relai yang bekerja. Perubahan status relai dan CB akibat gangguan pada sistem akan menjadi masukan untuk model FR, sehingga memudahkan operator dalam mendeteksi saluran dan bus yang mengalami gangguan dan mengurangi durasi pemadaman.

Relai Jarak

Pada studi ini diterapkan relai jarak sebagai relai utama pengaman saluran. Relai yang diterapkan merupakan relai jarak digital dengan karakteristik M_{ho} yang dikembangkan dalam studi (Allas & Mohammed, 2016). Relai jarak memiliki 3 zona, yaitu zona 1 melindungi 80% panjang saluran dengan waktu tunda instan, zona 2 memiliki 120% yaitu hingga 1 bus didepannya dengan waktu tunda 0,4 s hingga 0,8 s, sedangkan zona 3 memiliki jangkauan perlindungan 220% yaitu hingga 2 bus didepannya dengan waktu tunda

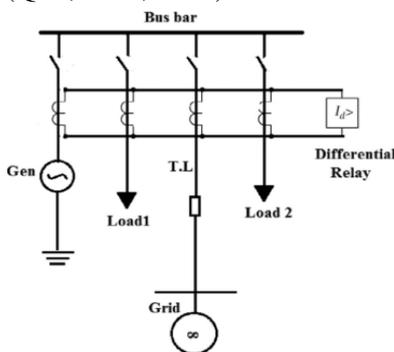
0,8 s hingga 1,6 s (Masri & Rosma, 2018). Skema perlindungan relai jarak dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema perlindungan relai jarak

Relai Diferensial

Relai diferensial merupakan relai utama perlindungan bus bar yang bekerja berdasarkan hukum kirchoff arus, yang menyebutkan penjumlahan arus yang memasuki sebuah bus sama dengan penjumlahan arus yang keluar dari bus tersebut (Qais, et al., 2016).



Gambar 2. Skema perlindungan relai diferensial bus bar (Qais, et al., 2016)

Relai diferensial hanya bekerja jika terjadi gangguan di bus atau disebut gangguan internal, sedangkan jika terjadi gangguan eksternal relai diferensial tidak akan bekerja. Skema perlindungan dari relai diferensial dapat dilihat pada Gambar 2.

Relai Gangguan Tanah

Relai gangguan tanah adalah relai yang bekerja berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai penyetelan pengaman tertentu dan dalam jangka waktu tertentu bekerja apabila terjadi gangguan hubung singkat fasa ke tanah. Arus residu yang mengalir melalui tanah juga bisa timbul pada sistem yang tidak seimbang akibat pembebanan yang tidak seimbang, maka relai gangguan tanah tidak boleh tanggap terhadap perubahan beban yang mungkin menimbulkan terjadinya arus residu yang mengalir ke tanah (Azmi & Hamdani, 2016). Relai gangguan tanah berfungsi sebagai pengaman lokal yang bekerja paling akhir jika semua zona relai jarak gagal mengisolasi gangguan.

Sistem Perlindungan

Busbar, saluran transmisi, dan peralatan lainnya membutuhkan operasi stabil dan perlindungan sistem tenaga. Beberapa peralatan perlindungan secara langsung dihubungkan kepada rangkaian disebut *switchgear*. Peralatan tersebut ialah trafo instrument, CB, saklar pemutus, dan *lightning arrester*. Peralatan tersebut sangat penting untuk memadamkan sistem baik dalam kondisi operasi normal maupun kondisi gangguan. Peralatan kontrol dan relai perlindungan ditempatkan pada panel kontrol di gendong kontrol (Sadaat, 1999).

Fuzzy Relation dan Sagittal Diagram

Salah satu pengembangan dari himpunan *Fuzzy* adalah FR yang memetakan unsur-unsur dari satu himpunan, katakan X, ke himpunan lain katakan Y, melalui koordinat kartesian dari dua semesta pembicaraan. Kekuatan hubungan antara dua himpunan ditentukan menggunakan fungsi keanggotaan yang mengekspresikan kekuatan dari hubungan pada interval 0 hingga 1. Karenanya, FR R adalah pemetaan dari X x Y ke interval 0 hingga 1, dimana kekuatan dari pemetaan diekspresikan oleh fungsi keanggotaan dari hubungan untuk pasangan dari dua himpunan (Ross, 2010).

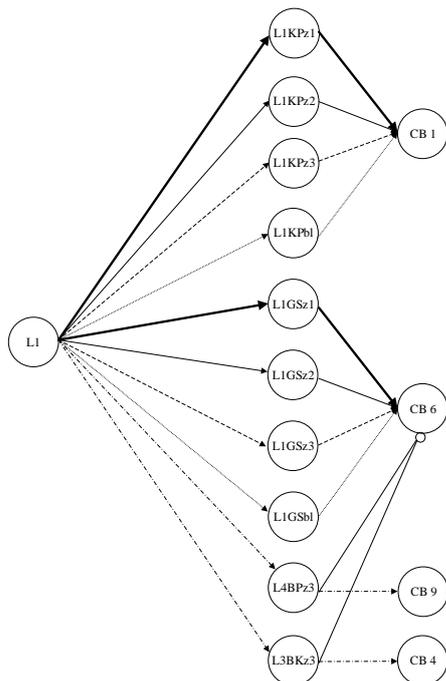
Menentukan Derajat Keanggotaan Fuzzy

Salah satu kelas *Fuzzy* adalah fungsi Yager yang mendefinisikan *Fuzzy Intersection* (FI) dan *Fuzzy Union* (FU) dengan fungsi sebagai berikut (Zimmermann, 2001).

$$I_w(I_a, I_b) = 1 - \min \left[1, ((1 - I_a)^w + (1 - I_b)^w)^{\frac{1}{w}} \right] \quad (1)$$

$$U_w(I_a, I_b) = \min \left[1, (I_a^w + I_b^w)^{\frac{1}{w}} \right] \quad (2)$$

I_w pada Persamaan 1 merupakan FI dan U_w pada Persamaan 2 merupakan FU. Sedangkan I_a dan I_b merupakan derajat keanggotaan dari relai. Nilai w yang dipilih adalah 3, nilai 3 dipilih karena relatif menghasilkan kemungkinan gangguan saat banyak relai yang bekerja. Jika w terlalu besar, sistem mudah salah menilai saluran yang terganggu sebagai saluran yang tidak terganggu. Jika w terlalu kecil, sistem mudah salah menilai saluran yang sehat sebagai saluran yang terganggu. Sistem perlindungan dibagi atas 4 tahapan, masing tahapan akan dijelaskan pada seksi selanjutnya. Pada studi ini untuk menentukan FI antara relai pada suatu tahap perlindungan adalah sebagai berikut (Min, et al., 2004).



Gambar 5. Sagittal Diagram Saluran 1

- > = Perlindungan tahap 1
- > = Perlindungan tahap 2
- - - -> = Perlindungan tahap 3
-> = Perlindungan tahap 4
- · - ·> = Perlindungan tahap 3 relai jarak terdekat
- ——— = Garis penahan

Berdasarkan tahapan perlindungan, kemudian akan ditetapkan derajat keanggotaan masing-masing relai terhadap saluran dan bus yang dilindungi, derajat keanggotaan ini berfungsi untuk mengukur kemungkinan gangguan pada tiap saluran dan bus saat peralatan perlindungan bekerja. Derajat keanggotaan tiap tahap dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Derajat keanggotaan relai pada setiap tahapan perlindungan

Tingkat Perlindungan (i,j)	1	2	2,1 Bus	3,1 1 Bus di Depan	3,3 2 Bus di Depan	3,2 Saluran Sendiri	3,3 Saluran Terdekat	4
Derajat keanggotaan (Si)	0,995	0,85	0,8	0,7	0,7	0,7	0,68	0,65

Semakin besar tahapan maka derajat keanggotaan akan semakin kecil, hal ini dikarenakan ketidakpastian yang meningkat.

Pada Gambar 5, simpul L4BPz3 dan L3BKz3 terhubung ke CB6 dengan garis penahan, hal ini menyatakan bahwa, jika CB6 telah terbuka menyebabkan derajat keanggotaan L4BPz3 dan

L3BKz3 akan diabaikan dalam perhitungan analisis, dikarenakan gangguan sudah diisolasi oleh CB6.

Representasi Sistem Tenaga kedalam Matriks 3 Dimensi

Topologi pada Gambar 4 dapat direpresentasikan dalam matriks dengan perosedur sebagai berikut:

- Berdasarkan Gambar 4, saluran yang menghubungkan antar bus akan diset 1. Kemudian diagonal dari matriks yang merepresentasikan bus akan diset 0. Sedangkan sisanya akan diset 0. Matriks topologi sistem dapat dilihat pada Gambar 6.
- Pembentukan matriks CB, akan disesuaikan dengan pemasangan CB pada saluran, sehingga posisi elemen dari matriks CB akan sama dengan posisi elemen saluran pada matriks topologi, dan nilainya diset 1. Matriks CB dapat dilihat pada Gambar 7.

$$\begin{array}{c|ccccc}
 & KP & BK & GS & BP & DI \\
 \hline
 KP & KP & L2 & L1 & 0 & 0 \\
 BK & L2 & BK & L3 & 0 & 0 \\
 GS & L1 & L3 & GS & L4 & 0 \\
 BP & 0 & 0 & L4 & BP & L5 \\
 DI & 0 & 0 & 0 & L5 & DI
 \end{array}
 \Rightarrow
 \begin{array}{c|ccccc}
 & KP & BK & GS & BP & DI \\
 \hline
 KP & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 BK & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 GS & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 BP & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 DI & 0 & 0 & 0 & 1 & 0
 \end{array}$$

Gambar 6. Matriks topologi sistem tenaga

$$\begin{array}{c|ccccc}
 & KP & BK & GS & BP & DI \\
 \hline
 KP & 0 & CB2 & CB1 & 0 & 0 \\
 BK & CB3 & 0 & CB4 & 0 & 0 \\
 GS & CB6 & CB5 & 0 & CB7 & 0 \\
 BP & 0 & 0 & CB8 & 0 & CB9 \\
 DI & 0 & 0 & 0 & CB10 & 0
 \end{array}$$

Gambar 7. Matriks CB

- Akan dibentuk 4 relai matriks, karena sistem dilindungi menggunakan 4 tahap perlindungan. Gambar 8 hingga Gambar 11 menunjukkan matriks relai perlindungan tiap tahap. Pada Gambar 8 menunjukkan perlindungan tahap 1 yang merupakan perlindungan utama, pada diagonal matriks relai utama merupakan perlindungan utama busbar.

$$\begin{array}{c|ccccc}
 & KP & BK & GS & BP & DI \\
 \hline
 KP & KPm & L2KPz1 & L1KPz1 & 0 & 0 \\
 BK & L2BKz1 & BKm & L3BKz1 & 0 & 0 \\
 GS & L1GSz1 & L3GSz1 & GSm & L4GSz1 & 0 \\
 BP & 0 & 0 & L4BPz1 & BPm & L5BPz1 \\
 DI & 0 & 0 & 0 & L5DRz1 & DRm
 \end{array}$$

Gambar 8. Matriks relai perlindungan tahap 1

	KP	BK	GS	BP	DI
KP	0	L2KPz2	L1KPz2	0	0
BK	L2BKz2	0	L3BKz2	0	0
GS	L1GSz2	L3GSz2	0	L4GSz2	0
BP	0	0	L4BPz2	0	L5BPz2
DI	0	0	0	L5DRz2	0

Gambar 9. Matriks relai perlindungan tahap 2

	KP	BK	GS	BP	DI
KP	0	L2KPz3	L1KPz3	0	0
BK	L2BKz3	0	L3BKz3	0	0
GS	L1GSz3	L3GSz3	0	L4GSz3	0
BP	0	0	L4BPz3	0	L5BPz3
DI	0	0	0	L5DRz3	0

Gambar 10. Matriks relai perlindungan tahap 3

	KP	BK	GS	BP	DI
KP	0	L2KPbl	L1KPbl	0	0
BK	L2BKbl	0	L3BKbl	0	0
GS	L1GSbl	L3GSbl	0	L4GSbl	0
BP	0	0	L4BPbl	0	L5BPbl
DI	0	0	0	L5DRbl	0

Gambar 11. Matriks relai perlindungan tahap 4

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

FR akan diuji dengan 5 skenario gangguan, lokasi dan jumlah gangguan dalam 1 skenario akan bervariasi, skenario gangguan dapat dilihat pada Tabel 2. Sistem yang telah dimodelkan via Matlab/Simulink kemudian disimulasikan dengan skenario gangguan yang telah ditetapkan. Perubahan status relai, CB dan urutan kerja relai didapatkan dari simulasi gangguan menggunakan Matlab/Simulink tersebut. Kemudian Relai diurutkan berdasarkan waktu kerjanya.

Perubahan status relai dan CB ini akan menjadi masukan pada FR. FR diprogram menggunakan bahasa pemrograman Matlab menggunakan metode matriks 3 dimensi untuk merepresentasikan perubahan topologi.

Tabel 2. Skenario gangguan untuk pengujian FR pada sistem 5 bus sistem kelistrikan Riau

No.	Skenario Gangguan	Relai yang bekerja	Waktu Trip	CB Trip
1	Gangguan di dua titik L1 dan L2 dalam waktu bersamaan,	L1KPz1	0,107	CB1
		L2KPz1	0,116	CB2
		L1GSz3	0,883	CB6
		L4BPz3	0,883	CB9
		L3GSz3	0,892	CB5

No.	Skenario Gangguan	Relai yang bekerja	Waktu Trip	CB Trip
	dengan L1GSz1 dan L1GSz2 gagal operasi, dan CB 3 gagal terbuka			
2	Gangguan di dua titik L1 dan bus KP dalam bersamaan dengan relai L1KPz1, L1KPz2, L1KPz3, KPM gagal operasi.	L1GSz2	0,486	CB6
		L2BKz2	0,495	CB3
		L1KPbl	1,176	CB1
3	Gangguan di dua titik bus KP dan bus BK dalam waktu yang bersamaan, dengan CB2 gagal terbuka	BK _m	0,1197	CB3
		KP _m	0,2	CB1
		KP _m	0,2002	CB2
4	Gangguan pada L4, CB9 gagal terbuka.	L4GSz1	0,119	CB7
		L5GSz3	0,846	CB8
		L7DRz3	1,68	CB14
		L6DRz3	1,76	CB13
5	Gangguan pada bus GS, dengan CB6 dan CB7 gagal terbuka	GS _m	0,1611	CB5
		GS _m	0,1612	CB8
		L1KPz2	0,496	CB1
		L4BPz2	0,568	CB9

Perangkat lunak Matlab digunakan untuk membangun dan menjalankan program FR untuk analisis gangguan. Pengujian terhadap 5 kasus dilakukan secara bergantian. Topologi jaringan akan di set ulang setiap kali pergantian skenario agar tidak mempengaruhi hasil analisis gangguan menggunakan FR. Hasil pengujian FR analisis gangguan dapat dilihat pada Tabel 3 untuk saluran dan Tabel 4 untuk bus bar.

Berdasarkan Tabel 3, terdapat 7 kandidat gangguan untuk saluran dan pada Tabel 4 terdapat 5 kandidat gangguan bus bar yang masing-masing memiliki derajat keanggotaan FR. Derajat keanggotaan ini merepresentasikan probabilitas

dari kandidat gangguan atau saluran dan bus pada sistem tenaga mengalami gangguan.

Tabel 3. Analisis gangguan oleh FR terhadap 5 skenario gangguan pada saluran transmisi

Skenario	Saluran Transmisi						
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
1	0,9419	0,9310	0,5556	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,8348	0,6746	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,6746	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,4715	0,9879	0,5556	0,6513	0,5556
5	0,6746	0,0000	0,0000	0,6746	0,0000	0,0000	0,0000

Tabel 4. Analisis gangguan oleh FR terhadap 5 skenario gangguan pada bus bar sistem kelistrikan Riau

Skenario	Bus Bar				
	KP	BK	GS	BP	DR
1	0,0000	0,7000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,9674	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,8013	0,0000
5	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000

Pada Tabel 3 dan Tabel 4 derajat keanggotaan kurang dari 0,8189 akan diabaikan, sehingga hasil analisis pada skenario 1, gangguan terjadi pada L1 dan L2 dengan derajat keanggotaan 0,9419 dan 0,9310. Pada skenario 2 gangguan terjadi pada L1 dan bus KP dengan derajat keanggotaan 0,8348 dan 0,9674. Pada skenario 3 gangguan terjadi pada bus KP dan bus BK dengan derajat keanggotaan 1 dan 1. Pada skenario 4 gangguan terjadi pada L4 dengan derajat keanggotaan 0,9879. Pada skenario 5 gangguan terjadi pada bus GS dengan derajat keanggotaan 1.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dengan 5 skenario gangguan pada sistem tenaga bus sederhana sistem kelistrikan Riau, FR dapat mendeteksi gangguan dengan akurat setiap skenarionya. Hasil pengujian sama dengan asumsi awal yang telah dibuat pada skenario gangguan. Penerapan metode FR untuk menganalisis bagian yang terganggu pada sistem tidak perlu pelatihan seperti jaringan saraf tiruan dan sistem cerdas lainnya. Matriks 3 dimensi membantu dalam merepresentasikan sistem tenaga dalam bentuk matriks, dan tanggap terhadap perubahan topologi, sehingga mempermudah pemrogram FR. Penerapan FR untuk perlindungan sistem tenaga listrik terbukti efektif dalam menentukan saluran dan bus yang terganggu dengan cara mengukur kemungkinan dari ketidakpastian suatu derajat

keanggotaan. Pada 5 skenario gangguan yang dilakukan FR mampu mendeteksi saluran dan bus yang terganggu dengan akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Allas, Q. M. & Mohammed, A. A., 2016. Phasor Based Numerical Mho Distance Relay: Model Development. *IJCCCE*, Volume 16.
- Azmi, A. & Hamdani, E., 2016. Koordinasi Rele Pada Jaringan Transmisi 150 kV. *jom FTEKNIK*, 3(2).
- Firdaus, H. & Zakri, A. A., 2018. *Pemodelan Relai Diferensial Pada Transformator Daya 25 Mva Dengan Anfis*, Pekanbaru: Fakultas Teknik Universitas Riau.
- Masri, R. & Rosma, I. H., 2018. Penyetelan Relai Jarak Pada Saluran Transmisi 150 kV Menggunakan Software DigSilent. *JOM FTEKNIK*, 5(1).
- Min, S.-W., Sohn, J.-M., Park, J.-K. & Kim, K.-H., 2004. Adaptive Faut Section Estimation Using Matrix Representation With Fuzzy Relations. *IEEE*.
- Qais, M., Khaled, U. & Alghuwainem, S., 2016. Improved Differential Relay for Bus Bar Protection Scheme With Saturated Current Tranformers Based on Second Order Harmonics. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*.
- Ross, T. J., 2010. *Fuzzy Logic With Engineering Applications*. 3rd ed. United Kingdom: A John Wiley and Sons, Ltd..
- Sadaat, H., 1999. *Power System Analysis*. New York: The McGraw-Hill Companies.
- Soliman, W. M., Soudy, B. E. D. H., Wahab, M. A. A. & Mansour, M. M., 2013. Power Generation Station Faults Diagnosis Based on Fuzzy Relations Using Information of Protective Relays and Circuit Breakers. *IEEE*.
- Wang, T. et al., 2015. Fault Diagnosis of Electric Power Systems Based on Fuzzy Reasoning Spiking Neural P Systems. *IEEE*, Volume 30.
- Zakri, A. A. & Mustafa, M. W., 2013. Performance Neuro-Fuzzy for Power System Fault Location. *International Journal of Engineering and Technology*.
- Zimmermann, 2001. *Fuzzy Set Theory and Its Applications, Fourth Edition*. New York: Springer Science Business Media, LLC.