

IDENTIFIKASI KEGAGALAN PERALATAN PROTEKSI PADA JARINGAN DISTRIBUSI PT. PLN GARDU INDUK GARUDA SAKTI MENGGUNAKAN ANFIS (ADAPTIVE NEURAL FUZZY INFERENCE SYSTEM)

Devi Juliana*, Eddy Hamdani, Edy Ervianto****

*Alumni Teknik Elektro Universitas Riau **Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau
Kampus Binawidya Km 12,5 Simpang Baru Panam, Pekanbaru, 28293, Indonesia
Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau
E-mail: devijuliana.dj@gmail.com

ABSTRACT

The purpose of research is to identification process of faulty protection devices using operating status of circuit breaker. Technique used for the identification process is Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). ANFIS is a method that combines fuzzy logic and neural network. Design ANFIS needs input data in form of voltage, current and operating status of circuit breaker (1 and 0) for training process. Input data produces by output of distribution system simulation in ETAP, meanwhile operating status of circuit breakers in binary numbers, one and zeros are interpreted as operating and non-operating devices, respectively. The training result gives worth accuracy so that can be use for predicting operating status of circuit breaker. If faulty device has been identified so system restoration can be done immediately.

Keywords: ANFIS; distribution system; faulty protection devices; circuit breaker

1. PENDAHULUAN

Sistem daya listrik terdiri dari berbagai komponen, antara lain sumber energi, pembangkit energi, sistem transmisi, sistem distribusi dan pusat beban. Sumber energi listrik misalnya air, uap, gas dan lain sebagainya. Sumber energi ini kemudian diubah oleh sistem pembangkit menjadi energi listrik yang ditransmisikan melalui jaringan distribusi^[1]. Jaringan distribusi ini akan membagi

energi listrik ke beban sesuai dengan kebutuhan konsumen. Karena langsung berhubungan dengan konsumen, tentunya jaringan distribusi sangat menentukan kontinuitas aliran tenaga listrik kepada konsumen. Untuk itu, kebutuhan akan daya listrik ini harus dirancang secara maksimal baik mengenai kualitas maupun keandalannya dalam mendistribusikan energi listrik untuk menjamin tingginya kepuasan konsumen.

Jaringan distribusi merupakan bagian yang tak terhindarkan dari berbagai gangguan, baik secara teknis maupun non-teknis. Tentunya gangguan ini harus secepat mungkin diatasi sehingga tidak mengganggu kinerja distribusi listrik, yakni dengan menggunakan alat pengaman dan alat pemutus tegangan di setiap wilayah beban. Sistem proteksi pada jaringan distribusi harus bekerja cepat dan segera mengisolasi kondisi abnormal yang terjadi untuk mencegah kerusakan lebih lanjut dan meminimalkan pemadaman. Namun jika terjadi gangguan pada jaringan sementara peralatan pengaman tidak dapat mengatasi gangguan, hal ini akan berdampak sangat besar dan dapat mengakibatkan kerusakan jaringan. Salah satu cara untuk mengatasi hal ini adalah dengan mengembangkan sistem diagnosa pintar pada jaringan distribusi.

Umumnya, diagnosa kegagalan meliputi klasifikasi tipe kegagalan, penentuan lokasi kegagalan, identifikasi kegagalan peralatan proteksi dan pemulihan daya listrik. Dengan adanya bantuan seperti sistem diagnosa pintar, kegagalan peralatan proteksi ini dapat diisolasi segera untuk memulihkan daya listrik. Kegagalan peralatan ini lebih kepada adanya mal-fungsi peralatan proteksi yang terpasang pada jaringan distribusi. Biasanya, peralatan identifikasi kegagalan peralatan proteksi pada jaringan distribusi berupa alarm dan sinyal rele proteksi. Tapi dengan bantuan teknologi komputerisasi terkini, kegagalan peralatan ini dapat diidentifikasi secara otomatis dengan meningkatkan keakuratan yang meliputi status operasi dari peralatan proteksi yang direpresentasikan dalam bilangan biner 1 dan 0. Teknologi ini adalah dasar dalam perbaikan kualitas daya dan keandalan dari sistem distribusi kelistrikan^[2].

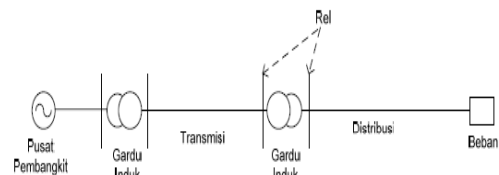
Penulis menggunakan metode ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) sebagai sistem diagnosa pintar untuk proses identifikasi gangguan.

ANFIS merupakan gabungan dari dua metode yakni *fuzzy logic* dan *neural network*. Kombinasi ini menggunakan prinsip pembelajaran dari *neural network* dengan fungsi keanggotaan dari *fuzzy*. *Fuzzy* pertama kali diperkenalkan oleh Takagi dan Sugeno pada 1985, kemudian dikembangkan oleh Jang pada 1993.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik^[3]

Sistem Distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang bertugas untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah untuk menyalurkan tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan) dan merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi.



Gambar 2.1 Diagram Garis Sistem Tenaga Listrik

2.2 Adaptive Neural Fuzzy Inference System (ANFIS)^[4]

ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*) Merupakan gabungan antara prinsip belajar dari jaringan syaraf tiruan untuk adaptasi fungsi keanggotaan *fuzzy*. Kombinasi dari kedua jenis kontroler ini dilakukan untuk saling melengkapi kelebihan dan mengurangi kekurangan masing-masing kontroler. Secara fungsional, arsitektur ANFIS sama dengan *fuzzy rule base* dengan model Sugeno. Dapat dikatakan bahwa ANFIS adalah suatu metode yang menggunakan algoritma pembelajaran terhadap

sekumpulan data untuk melakukan penyetelan aturan.

2.2.1 Arsitektur ANFIS^[4]

Misalkan terdapat 2 *input* x dan y dengan masing-masing *input* memiliki 2 buah fungsi keanggotaan. *Output* jaringan yang dihasilkan yaitu f dengan 2 buah fungsi keanggotaan. Jika dalam suatu sistem hanya membutuhkan 2 buah aturan sebagai berikut:

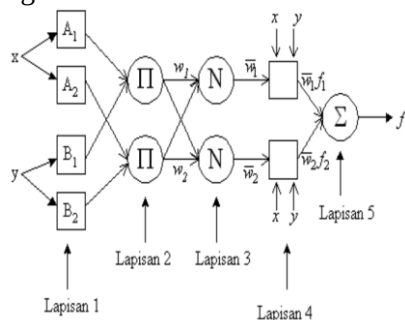
If x is A_1 and y is B_1 then $f_1 = p_{11}x_1 + q_{12}x_2 + r_{10}$

If x is A_2 and y is B_2 then $f_2 = p_{21}x_1 + q_{22}x_2 + r_{20}$

Maka dapat dihitung nilai rata-rata terbobot sebagai keluaran jaringan (f) dengan nilai *firing strength* untuk kedua aturan adalah w_1 dan w_2 :

$$f = \frac{w_1 f_1 + w_2 f_2}{w_1 + w_2} = \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2 \quad (1)$$

ANFIS dibentuk dengan arsitektur jaringan seperti *neural network* yang memiliki beberapa lapisan terdiri dari lapisan *input*, Lapisan tersembunyi, serta lapisan *output*. Pada setiap lapisan terdapat proses perhitungan yang pada akhirnya akan menghasilkan *output* jaringan ANFIS. Arsitektur jaringan ANFIS dengan 5 lapisan ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 2.2 Arsitektur Jaringan ANFIS

Jaringan ANFIS pada gambar 2.2 terdiri dari lapisan-lapisan sebagai berikut:

- **Lapisan 1:** Tiap-tiap neuron i pada lapisan pertama adaptif terhadap

parameter suatu fungsi aktivasi. *Output* dari tiap neuron berupa derajat keanggotaan yang diberikan oleh fungsi keanggotaan *input*, yaitu $\mu_{A1}(x)$, $\mu_{B1}(y)$, $\mu_{A2}(x)$, atau $\mu_{B2}(y)$. Fungsi simpul pada lapisan ini adalah:
 $O_{1,i} = \mu_{Ai}(x)$ untuk $i = 1,2$ (2)
 $O_{1,i} = \mu_{Bi}(y)$ untuk $i = 1,2$ (3)
 Sebagai contoh, misalkan fungsi keanggotaan yang digunakan adalah *generalized bell* berikut:

$$O_{1,i} = \mu_{Ai}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (4)$$

$\{a,b,c\}$ adalah parameter-parameter, biasanya $b=1$. Jika nilai parameter-parameter ini berubah, maka bentuk kurva yang terjadi pun akan ikut berubah. Parameter-parameter pada lapisan ini biasanya dikenal dengan nama *premise parameters*.

- **Lapisan 2:** Pada tahap ini berlaku operasi perkalian (AND) antara nilai fuzzifikasi dari titik yang ada sebelumnya sebagai proses implikasi fuzzy. Persamaan keluaran pada simpul tetap ini adalah:

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{Ai}(x) \cdot \mu_{Bi}(y) \text{ untuk } i = 1,2 \quad (5)$$

- **Lapisan 3:** Setiap neuron pada lapisan ini adalah simpul tetap yang merupakan hasil perhitungan rasio dari aturan derajat keanggotaan ke- i dengan jumlah dari seluruh aturan derajat keanggotaan, sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1,2 \quad (6)$$

Hasil ini dikenal dengan nama *normalized firing strength*.

- **Lapisan 4:** Setiap Neuron pada lapisan ini merupakan simpul adaptif terhadap suatu *output*:

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i) \quad (7)$$

Dengan $\bar{w}_i$ adalah *normalized firing strength* pada lapisan ke-3 dan (p_i, q_i, r_i) adalah parameter-parameter pada neuron tersebut. Parameter-parameter pada lapisan 4 disebut dengan nama *consequent parameters*.

- **Lapisan 5: Output Layer.** Setiap neuron lapisan ini merupakan simpul tunggal tetap yang menghitung keluaran dengan cara menjumlahkan semua masukan.

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i f_i} \quad (8)$$

2.2.2 Algoritma Pembelajaran Hybrid^[4]

Proses adaptasi yang terjadi dalam sistem ANFIS dikenal juga dengan proses pembelajaran, yaitu parameter-parameter ANFIS (baik *premise* maupun *consequent*) akan diperbaharui selama proses pembelajaran. Pada saat parameter-parameter tersebut ditemukan, *output* yang terjadi merupakan kombinasi linier dari *consequent parameters*, yaitu:

$$f = \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2 \quad (9)$$

$$= \bar{w}_1(p_{11}x_1 + q_{12}x_2 + r_{10}) + \bar{w}_2(p_{21}x_1 + q_{22}x_2 + r_{20}); \quad (10)$$

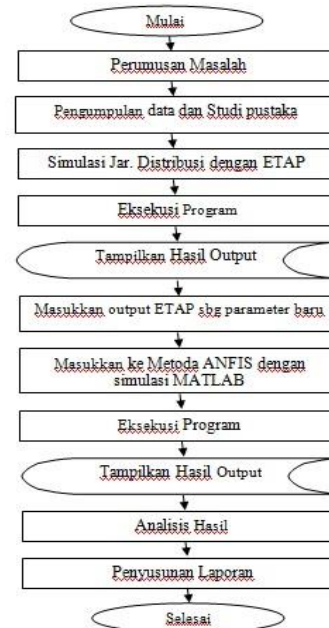
$$= (\bar{w}_1x_1)p_{11} + (\bar{w}_1x_2)q_{12} + \bar{w}_1r_{10} + (\bar{w}_2x_1)p_{21} + (\bar{w}_2x_2)q_{22} + \bar{w}_2r_{20} \quad (11)$$

Algoritma pembelajaran *hybrid* akan mengatur parameter-parameter *output* p_{ij} , q_{ij} , dan r_{ij} secara maju (*forward*) dan akan mengatur parameter-parameter himpunan *fuzzy* (a_i , b_i , c_i) secara mundur (*backward*). Pada langkah maju (*forward*), *input* jaringan akan merambat maju sampai pada lapisan ke empat, di mana parameter-parameter p_{ij} akan diidentifikasi menggunakan metode *least square*. Sedangkan pada langkah mundur (*backward*), *error* sinyal akan merambat mundur dan parameter-parameter (a_i , b_i , c_i) akan diperbaiki dengan menggunakan metode *backpropagation gradient-descent*.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

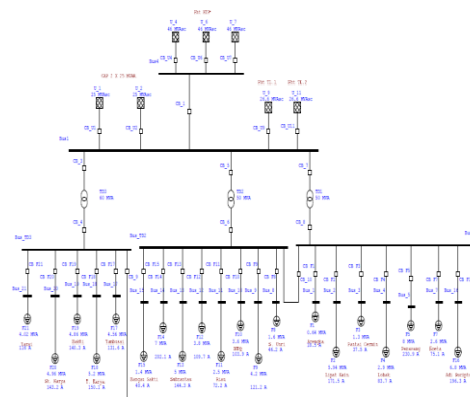
Gambar dibawah ini merupakan tahapan-tahapan yang dilakukan untuk mempermudah proses penelitian ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Pemodelan Jaringan Distribusi Menggunakan ETAP 12.6

Pemodelan jaringan distribusi menggunakan ETAP 12.6 dengan memasukkan parameter-parameter MVAsc, MVA, %PF, Nominal Bus, dan Rating CB. Jaringan distribusi yang dimodelkan adalah jaringan distribusi gardu induk (GI) Garuda sakti.

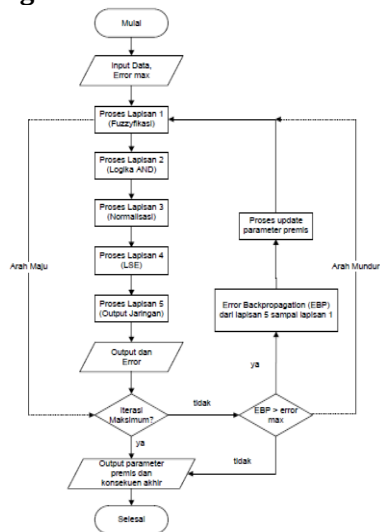


Gambar 3.2 one line diagram jaringan distribusi GI Garuda Sakti

Gambar 3.2 merupakan simulasi ETAP untuk memperoleh masukan data pelatihan ANFIS, yakni berupa tegangan dan arus. Simulasi dilakukan dalam 2 kondisi, yakni saat sistem normal maupun

ada gangguan (*short circuit*). Dari simulasi ini didapat nilai tegangan dan arus saat beroperasi normal dan saat gangguan (*short circuit*), dari sini pula didapat status operasi CB dalam biner yakni 1 untuk beroperasi (saat terjadi gangguan atau *short circuit*) dan 0 untuk status tidak beroperasi (kondisi normal).

3.3 Algoritma ANFIS



Gambar 3.3 Flowchart training ANFIS

Proses pembelajaran dimulai dengan me-load data *training* dari *workspace*, kemudian membangkitkan *fuzzy*. fis hasil inialisasi awal dengan memilih *grid partition*. Proses *training* FIS dilakukan dengan memilih algoritma pembelajaran *hybrid*, lalu menentukan target *learning error* serta jumlah iterasi/ *epoch* yang diinginkan. Setelah target *error* ataupun jumlah iterasi terpenuhi, proses *training* akan berhenti.

4. ANALISIS DAN HASIL

4.1 Desain ANFIS

Desain ANFIS yang digunakan terdiri dari 23 ANFIS blok, Pada penelitian ini dirancang ANFIS01 hingga ANFIS23 untuk merepresentasikan setiap *circuit breaker* pada jaringan distribusi yang dipilih. Yakni CB_4, CB_6, CB_8, F1, F2, F3, F4, F5, F7, F8, F9, F10, F11, F12, F13, F14, F15, F16, F17, F18, F19, F20, F21, CB_9 dan CB_10.

Dimana CB_4 merupakan CB yang merespon untuk membuka ketika F17, F18, F19, F20, F21 mengalami kegagalan operasi. Sementara itu, jika F8, F9, F10, F11, F12, F13, F14, dan F15 mengalami gangguan, CB_6 akan merespon untuk membuka. Untuk F1, F2, F3, F4, F5, dan F7, maka CB_8 akan merespon jika mengalami kegagalan operasi.

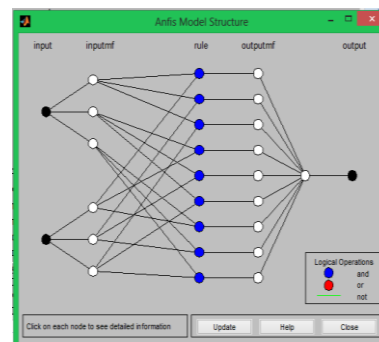
CB_9 dan CB_10 merupakan *tie* CB yakni CB yang bekerja ketika terjadi gangguan akan melepas untuk menghindari meluasnya gangguan ke *feeder* atau pun *bus* lain. Satu dan nol menjadi interpretasi sebagai tanda CB beroperasi dan tidak beroperasi.



Gambar 4.1 Desain ANFIS untuk proses identifikasi kegagalan *circuit breaker*

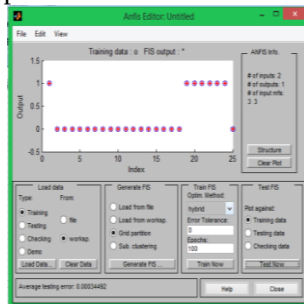
Pada penelitian ini, perancangan ANFIS dilakukan sebagai berikut:

- Arsitektur jaringan yang digunakan adalah ANFIS tipe Sugeno
- 1.725 data yang ditetapkan untuk proses *training*
- Tipe fungsi keanggotaan yang digunakan adalah tipe *generalized bell* dengan *output constant*
- Jumlah fungsi keanggotaan masing-masing adalah 3 buah serta 9 buah fungsi keanggotaan *output*.
- Jumlah *rules* yang dibangkitkan berjumlah 9 buah.



Gambar 4.2 Arsitektur jaringan dari perancangan ANFIS

Gambar 4.2 merupakan arsitektur jaringan ANFIS berdasarkan perancangan yang dilakukan yaitu terdiri dari 2 input (tegangan dan arus), masing-masing *input* memiliki 3 buah fungsi keanggotaan, 9 buah fungsi keanggotaan untuk *output*, serta 9 buah *rules*. Jaringan ANFIS ini adalah model Sugeno orde-1 yang terdiri dari 5 lapisan.



Gambar 4.3 Tampilan GUI ANFIS

Proses pembelajaran dimulai dengan *me-load* data *training* dari *workspace*, kemudian membangkitkan *fuzzy*. *fis* hasil inisialisasi awal dengan memilih *grid partition*. Proses *training* FIS dilakukan dengan memilih algoritma pembelajaran *hybrid*, lalu menentukan target *learning error* serta jumlah iterasi/ *epoch* yang diinginkan. Setelah target *error* ataupun jumlah iterasi terpenuhi, proses *training* akan berhenti. Hasil dari proses *training* serta nilai *average testing error* dapat ditampilkan seperti pada Gambar 4.3

Setelah proses pembelajaran selesai, didapat hasil *training* yang menunjukkan akurasi dari proses *training*, serta hasil nilai aktual dan nilai prediksi dari ANFIS.

Tabel 4.1 Akurasi *training*

Models	Epoch	Error
ANFIS01	100	0.000348
ANFIS02	100	0.000246754
ANFIS03	100	0.000308682
ANFIS04	50	2.34361E-07
ANFIS05	50	2.3396E-07
ANFIS06	50	2.341E-07
ANFIS07	50	2.33976E-07
ANFIS08	50	2.34058E-07
ANFIS09	50	2.36801E-07
ANFIS10	50	2.34143E-07
ANFIS11	50	2.33929E-07
ANFIS12	50	2.33954E-07
ANFIS13	50	2.34021E-07
ANFIS14	150	2.13480E-07
ANFIS15	75	2.13497E-07
ANFIS16	250	2.14203E-07
ANFIS17	300	2.15059E-07
ANFIS18	200	2.15249E-07
ANFIS19	100	2.13480E-07
ANFIS20	50	2.33887E-07
ANFIS21	50	2.33885E-07
ANFIS22	50	2.33908E-07
ANFIS23	50	2.33922E-07

Tabel 4.2 Hasil Training ANFIS01 (CB_4 beroperasi)

ID CB	target aktual	nilai prediksi	Nilai error
CB_4	1	0.9999	0.0001
CB_6	0	0.0001	0.0001
CB_8	0	0.0001	0.0001
F1	0	0.0006	0.0006
F2	0	0.0004	0.0004
F3	0	0.0004	0.0004
F4	0	0.0002	0.0002
F5	0	0.0008	0.0008
F7	0	0.0002	0.0002
F8	0	0.0004	0.0004
F9	0	0.0001	0.0001
F10	0	0	0.0000
F11	0	0.0002	0.0002
F12	0	0	0.0000
F13	0	0.0002	0.0002
F14	0	0.0006	0.0006
F15	0	0.0004	0.0004
F16	0	0.0006	0.0006
F17	1	0.9999	0.0001
F18	1	1.0004	0.0004
F19	1	1.0001	0.0001
F20	1	1.0002	0.0002
F21	1	0.9994	0.0006
CB_9	1	1	0.0000
CB_10	0	0	0.0000
nilai rata-rata error			0.0003

Tabel 4.3 Hasil Training ANFIS01 (CB_6 beroperasi)

ID CB	target aktual	nilai prediksi	Nilai error
CB_4	0	0	0
CB_6	1	1.0164	0.0164
CB_8	0	-0.0001	0.0001
F1	0	-0.0006	0.0006
F2	0	0.0004	0.0004
F3	0	-0.0004	0.0004
F4	0	-0.0002	0.0002
F5	0	0.0008	0.0008
F7	0	-0.0002	0.0002
F8	1	0.9978	0.0022
F9	1	0.9996	0.0004
F10	1	0.9991	0.0009
F11	1	0.9984	0.0016
F12	1	0.9993	0.0007
F13	1	1.0002	0.0002
F14	1	1.0021	0.0021
F15	1	0.9977	0.0023
F16	0	0.0006	0.0006
F17	0	0.0001	0.0001
F18	0	0.0003	0.0003
F19	0	0.0002	0.0002
F20	0	0.0002	0.0002
F21	0	0	0
CB_9	0	0.0005	0.0005
CB_10	1	1.1799	0.1799
nilai rata-rata error			0.008452

Tabel 4.3 Hasil Training ANFIS01 (CB_8 beroperasi)

ID CB	target aktual	nilai prediksi	Nilai error
CB_4	0	0	0
CB_6	0	0.0002	0.0002
CB_8	1	0.9999	1E-04
F1	1	1	0
F2	1	1	0
F3	1	1	0
F4	1	1	0
F5	1	1	0
F7	1	1	0
F8	0	0.0007	0.0007
F9	0	0.0001	0.0001
F10	0	0.0001	0.0001
F11	0	0.0004	0.0004
F12	0	0.0001	0.0001
F13	0	0.0003	0.0003
F14	0	0.0009	0.0009
F15	0	0.0007	0.0007
F16	1	1	0
F17	0	0.0002	0.0002
F18	0	0.0003	0.0003
F19	0	0.0002	0.0002
F20	0	0.0003	0.0003
F21	0	0	0
CB_9	1	1	0
CB_10	1	1	0
nilai rata-rata error			0.000184

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Metode ANFIS cukup akurat dalam mengidentifikasi kegagalan peralatan proteksi yakni CB, ketika dirancang dengan benar pada jaringan distribusi yang dipilih. Dengan nilai *error* dari target aktual dengan nilai prediksi sebesar 0.0003 untuk kondisi CB_4 beroperasi, 0.008452 untuk kondisi CB_6 beroperasi dan 0.000184 untuk kondisi CB_8 beroperasi.

5.2 Saran

Untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal dan *real* dapat ditambahkan parameter lainnya seperti daya aktif (P), daya nyata (Q), daya semu/reaktif (S), faktor daya dan dapat juga dikombinasikan dengan rele proteksi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Missi Ebta Dame. 2013. *Pemodelan Backpropagation Neural Network Untuk Mendeteksi Gangguan di Saluran Transmisi Sistem Daya Listrik*. Skripsi S-1. Pekanbaru: Universitas Riau.
- [2] Rasli A Ghani., Azah Mohamed & Hussain Shareef. 2010. An Approach for Identifying Faulty Protection Devices in a Distribution System Using ANFIS. In 27-29 Oct 2010 Conference Proceedings IPEC. Singapore, 2010. pp.368-372.
- [3] Suswanto, Daman. 2010. *Diklat Kuliah: Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Teknik Elektro Universitas Negeri Padang, Padang.
- [4] Fatimah Avtur Alifia. 2012. *Desain Sistem Kontrol Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) Studi Kasus: Pengontrolan Ketinggian Air dan Temperatur Uap Steam Drum Boiler*. Skripsi S-1. Semarang: Universitas Diponegoro.
- [5] M. Aldion Rinaldi. 2013. *Sistem Transformator Daya PT. PLN Gardu Induk Garuda Sakti*. Laporan Kerja Praktek Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau. Pekanbaru.
- [6] Rahman, Achmad Zaki. 2014. *ANFIS Tugas Otomasi*. [Online] Available at: [www.academia.edu/7341563/ANFIS tugas Otomasi](http://www.academia.edu/7341563/ANFIS_tugas_Otomasi) [Akses 25 Oktober 2014]
- [7] Muhammad Soleh. 2014. *Desain Sistem SCADA Untuk Peningkatan Pelayanan Pelanggan Dan Efisiensi Operasional Sistem Tenaga Listrik di APJ Cirebon*. *Jurnal Telekomunikasi dan Komputer Incomtech*, 5(1), pp.26-44.
- [8] Bagus Fatkhurrozi., M Aziz Muslim & Didik R Santoso. 2012. Penggunaan *Artificial Neuro Fuzzy Inference Sistem (ANFIS)* dalam Penentuan Status Aktivitas Gunung Merapi. *Jurnal EECCIS*, 6(2), pp.113-118.
- [9] Jhy-Shing Roger Jang, 1993. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transaction on systems, man, and cybernatics* 23(3), pp.665-684