

## PENDETEKSIAN GANGGUAN KUMPARAN STATOR MOTOR SEREMPAK MAGNET PERMANEN MENGGUNAKAN METODE MODIFIED ANFIS

I Wayan Arta Wijaya  
email: [igungarta@yahoo.com](mailto:igungarta@yahoo.com)  
Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro Universitas Udayana  
Kampus Bukit Jimbaran Bali

### Abstrak

Gangguan yang dapat terjadi pada motor ada 2 jenis yaitu gangguan external dan internal. Gangguan external adalah gangguan phase, ketidakseimbangan suplai, beban lebih, rotor terkunci, dan sebagainya. Gangguan internal adalah hubung singkat pada belitan dalam kumparan motor, gangguan ke tanah (*ground*), kerusakan bearing, keretakan rotor, dan lainnya). Beberapa penelitian telah dilakukan dan dikembangkan untuk mendeteksi gangguan. Namun pada penelitian tersebut membutuhkan perhitungan matematika yang rumit dan memerlukan alat sensor yang mahal. Pada penelitian ini diusulkan suatu metode untuk mendeteksi gangguan pada motor serempak magnet permanen (PMSM). Sasaran yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah untuk mengembangkan suatu metode pendeteksian gangguan hubung singkat belitan dalam kumparan stator motor serempak magnet permanen. Metode yang diusulkan pada penelitian ini adalah pengembangan *adaptive neuro-fuzzy inference system* (ANFIS) yang dimodifikasi dengan *Least Squares Estimator* (LSE) pada pembelajaran maju dan metode *Steepest Descent* (SD) pada pembelajaran mundur. Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan maka ditarik kesimpulan bahwa Modified ANFIS dapat digunakan sebagai piranti untuk mengidentifikasi gangguan belitan stator motor serempak magnet permanen (PMSM)

**Kata kunci:** Modified ANFIS, Deteksi gangguan belitan, Motor Serempak Magnet Permanen.

### 1. PENDAHULUAN

Gangguan yang dapat terjadi pada motor ada 2 jenis yaitu gangguan external dan internal. Gangguan external adalah gangguan phase, ketidakseimbangan suplai, beban lebih, rotor terkunci, dan sebagainya. Gangguan internal adalah hubung singkat pada belitan dalam kumparan motor, gangguan ke tanah (*ground*), kerusakan bearing, keretakan rotor, dan lainnya. Perbedaan dari kedua jenis gangguan tersebut adalah bahwa gangguan external dapat segera diketahui dan gangguan internal tidak segera diketahui. Hubung singkat antar belitan yang berdekatan pada kumparan stator motor serempak magnet permanen merupakan gangguan internal, dan gangguan ini sangat sulit dideteksi. Terjadi gangguan pada belitan stator motor pada umumnya dimulai dari terjadinya kegagalan isolasi antara dua belitan yang bersebelahan, kemudian berkembang menjadi hubung singkat pada sejumlah belitan. Dalam beberapa hal, kesalahan terjadi sebagai hasil dari suatu busur cahaya (*arc*) yang menghubungkan dua titik pada lilitan stator motor tersebut. Pada saat gangguan terjadi perubahan fluks bocor di sekitar rotor. Perubahan flux ini bisa meramalkan gangguan hubung singkat pada belitan stator motor [1].

Beberapa penelitian telah dilakukan dan dikembangkan untuk mendeteksi gangguan. Namun pada penelitian tersebut membutuhkan perhitungan matematika yang rumit dan memerlukan alat sensor yang mahal. Dengan perkembangan metode pendeteksian gangguan motor yang berbasis AI

(*Artificial Intellegent*) seperti *Fuzzy Logic*, *Neural Network*, dan kombinasinya dapat mengurangi perhitungan matematika yang rumit.

Pada penelitian ini akan membahas suatu metode untuk mendeteksi gangguan pada motor listrik khususnya motor serempak magnet permanen (*Permanent Magnet Synchronous Motor*, PMSM). Unjuk kerja motor pada kecepatan tetap dengan menggunakan *discrete-time* model yang kwantitatif diperkenalkan pada [2]. Bentuk gelombang elektromagnetik (EM) dari torka motor dimonitor dan diproses menggunakan Transformasi Fourier untuk memperoleh indeks diagnostik yang sesuai. *Adaptive neuro-fuzzy inference system* (ANFIS) dikembangkan untuk mengotomatiskan hasil diagnosis gangguan.

Sasaran yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah untuk mengembangkan suatu metode pendeteksian gangguan hubung singkat belitan dalam kumparan stator motor serempak magnet permanen. Metode yang diusulkan pada penelitian ini adalah pengembangan *adaptive neuro-fuzzy inference system* (ANFIS) yang dimodifikasi dengan *Least Squares Estimator* (LSE) pada pembelajaran maju dan metode *Steepest Descent* (SD) pada pembelajaran mundur. Pada penelitian ini masalah dibatasi hanya pada perancangan dan pemakaian metode Modified ANFIS untuk analisis dan mendeteksi gangguan belitan dalam kumparan stator motor serempak. Plant motor tidak secara detail dijelaskan dan hanya ditinjau dari bentuk gelombang elektromagnetik torka, arus, tegangan dan kecepatan.

**2. TINJAUAN PUSTAKA**

Beberapa industri yang menggunakan motor mengharapkan penggunaan pemantauan arus fasa dapat mendeteksi gangguan yang terjadi pada rotor motor induksi jenis sangkar bajing [3]. Pada kejadian ini stator dapat dipergunakan untuk mencari gangguan pada rotor. Kebalikan dari konsep ini yaitu kemungkinan kejadian pada rotor dapat dipergunakan untuk mencari kesalahan yang terjadi pada belitan stator. Pemonitoran *axial leakage flux* adalah merupakan teknik yang mirip, tetapi deteksi dari perubahan arus harmonisa *line* tidak langsung tetapi melalui spektrum *axial flux*.

Penman at. Al [1] mengatakan bahwa tek-niknya baik untuk mendeteksi kerusakan pada bar rotor, *short circuit* pada belitan dalam kumparan stator, *short circuit* pada rotor terbelit, kesalahan fasa, dan adanya *negatif sequence* pada sumber. Pada motor ideal *axial leakage flux*-nya adalah 0 (nol), ini disebabkan karena motor pada kondisi bebas gangguan, arus rotor dan arus stator selalu seimbang.

Deteksi gangguan pada motor dc tanpa sikat menggunakan teknik estimasi parameter motor telah dikembangkan. Dengan membandingkan parameter-parameter nominal dan parameter hasil perhitungan (*computed*) dari motor dapat mendeteksi gangguan pada motor [4].

Penggunaan AI (*Artificial Intellegence*) untuk mendeteksi dan mendiagnose gangguan pada mesin listrik telah dikembangkan [5]. AI (ANN, fuzzy, dan Adaptif Fuzzy System) dapat dengan baik mengidentifikasi gangguan pada mesin listrik dan telah diaplikasikan.

Teknik penggabungan *Fuzzy Logic* dengan *Neural Network* telah dilakukan [6] untuk mendeteksi gangguan pada motor listrik. Hasil dari penelitian yang dilakukan mengatakan bahwa pendeteksian dengan metode ANFIS mendapatkan hasil yang lebih akurat dibanding-kan dengan *Fuzzy Logic* atau *Neural Network*.

Pendeteksian gangguan belitan motor listrik menggunakan ANFIS menghasilkan diagnosis yang otomatis dan cepat serta hasil yang optimum. Metode ini dapat mendeteksi baik hubung singkat antar belitan dalam kumparan stator maupun terjadi gangguan dari masing-masing fasa belitan stator motor tersebut [7]

**2.1. Motor Serempak Magnet Permanen (PMSM)**

Persamaan model *state-space* PMSM koordinat abc (*abc frame of reference*) adalah<sup>[15]</sup>:

$$\underline{V} = \underline{R}I + \frac{d}{dt}(\underline{\Lambda})$$

Dengan,

$$\underline{\Lambda} = \underline{L}I$$

$\underline{V}$  = vektor tegangan terminal motor

$\underline{R}$  = matrik resistasi belitan motor

$\underline{I}$  = vektor arus belitan motor

$\underline{L}$  = matrik induktansi belitan motor

Persamaan matrik tegangan, arus, fluksi gandeng (*flux linkage*) belitan stator a, b, c, dan f mempresentasikan pengaruh magnet perma-nen. Ekvivalen arus medan (fiktif),  $i_f$  adalah konstan untuk ekxitasi magnet permanen. Arus  $i_f$  dipertahankan konstan walaupun terjadi peru-bahan state, maka:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 \\ 0 & 0 & r_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + w \left\{ \frac{d}{dq} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

dengan  $e_a, e_b,$  dan  $e_c$  adalah emf induksi dari belitan stator motor.

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = w \left\{ \frac{d}{dq} \begin{bmatrix} L_{af} \\ L_{bf} \\ L_{cf} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} i_f \end{bmatrix} = w \frac{d}{dq} \begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix}$$

dengan,  $\lambda_{af}, \lambda_{bf}, \lambda_{cf}$  magnetud fluksi gandeng stator Torka motor adalah:

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{w_m} = (e_a' i_a + e_b' i_b + e_c' i_c) / w_m$$

**2.2 Persamaan Matematis PMSM dalam Sistem Koordinat d-q**

Model PMSM koordinat dq diberikan oleh persamaan :

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p w_r i_d - \frac{I p w_r}{L_q}$$

$$T_e = 1.5 p [I i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]$$

Dengan,

- $L_q, L_d$  = induktansi sunbu q dan d
- $R$  = Resistasi belitan stator per phase
- $i_q, i_d$  = Arus dalam sumbu q dan d
- $v_q, v_d$  = Tegangan dalam sumbu q dan d
- $\omega_r$  = kecepatan sudut rotor (rad/dt)
- $I$  = Amplitudo induksi flux magnet permanen dari rotor ke stator
- $P$  = jumlah pasang kutub
- $T_e$  = torka Elektromagnetik

Persamaan dinamik PMSM

$$\frac{d}{dt} w_r = \frac{1}{J} (T_e - F w_r - T_m)$$

$$\frac{dq}{dt} = w_r$$

- $J$  = Inersia gabungan dari rotor dan beban
- $F$  = koefisien gesekan dari rotor dan beban
- $\theta$  = Posisi sudut rotor
- $T_m$  = Torka mekanik dari poros

**2.3 Pendeteksian Gangguan Belitan Stator Motor Serempak**

Motor yang digunakan dalam analisis adalah Motor PMAC 4 pasang kutub permukaan menonjol. Motor dioperasikan dengan inverter menggunakan kontrol putaran PI Gangguan ditetapkan bekerja tidak periodik. Interval waktu selama terjadi gangguan adalah acak sama dengan durasi gangguan. Gangguan yang diinisiasikan sebagai arus fasa yang meningkat sampai 95% dari magnetude. Pengujian selama gangguan 5 ms dan 10 ms telah dibuat untuk mencari variasi hasil dengan masing-masing parameter.

Konstanta waktu kontroler lebih lama dari waktu transien yang terjadi pada gangguan yang dieksplorasi dalam kegiatan ini. Pemilihan gain kontroler mempunyai efek yang signifikan pada arus selama dan setelah terjadi gangguan. Efek transien kontroler koreksi arus diabaikan.

**2.4 FFT (Fast Fourier Transform)**

Deret Fourier digunakan untuk menguraikan suatu gelombang menjadi komponen harmonisa atau, mengubah dari acuan waktu ke acuan frekuensi  
 Persamaan FFT :

$$f(t) = \sum_{n=0}^1 c_n \cos(n\omega t + q_n)$$

**2.5 Adaptif Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)**

ANFIS merupakan sekumpulan aturan dan suatu metode inferensi yang dikombinasikan dalam suatu struktur terhubung kemudian dilakukan suatu pelatihan dan adaptasi (Kasabov, 2002). Pada kebanyakan sistem *neurofuzzy*, digunakan algoritma pembelajaran *backpropagation* untuk membangkitkan aturan-aturan fuzzy dengan fungsi keanggotaan menggunakan model Gauss yang diberikan secara terpisah. Hal ini mengakibatkan, jika jumlah variabel input ditambah, maka bertambah banyak pula parameter-parameter yang harus dibangkitkan.

Untuk mengefisienkan algoritma pembelajaran *backpropagation*, maka dalam pembahasan ini akan dilakukan modifikasi dengan algoritma pembelajaran hybrid (gabungan antara LSE dengan algoritma steepest descent).

**2.6 Metoda Least Squares Estimator (LSE)**

Jika diketahui keluaran dari model linier y yang diekspresikan melalui persamaan:

$$y = \theta_1 f_1(u) + \theta_2 f_2(u) + \dots + \theta_n f_n(u)$$

dengan

$y = [y_1, \dots, y_m]^T$  model vector output  $u = [u_1, \dots, u_p]^T$  model vector input,  $f_1, \dots, f_n$  merupakan fungsi u yang diketahui dan  $\theta_1, \dots, \theta_n$  merupakan parameter yang diestimasi.

Dengan menggunakan notasi matrik didapatkan:

$$A\theta = y$$

Penyelesaian terbaik untuk  $\theta$ , yang meminimalkan  $\|Aq - y\|^2$  adalah least squares estimator (LSE)  $\theta^*$ :

$$\theta^* = (A^T A)^{-1} A^T y$$

dan  $A^T$  adalah transpose dari A

**2.7 Metoda Steepest Descent (SD)**

Metoda Steepest Descent dikenal sebagai metoda gradient dan merupakan teknik mini-malisasi tertua untuk fungsi yang mempunyai ruang input multidimensional. Walaupun meto-de ini memerlukan waktu yang lama untuk mencapai konvergen namun karena kesederhanaannya sehingga sering digunakan sebagai teknik optimalisasi fungsi yang tidak linier. Persamaan metoda steepest descent adalah :

$$q_{next} = q_{now} - hg$$

Ketika  $G = \eta I$  dengan  $\eta$  mempunyai nilai yang positif dan I adalah matrik identitas

**2.8 Modified ANFIS**

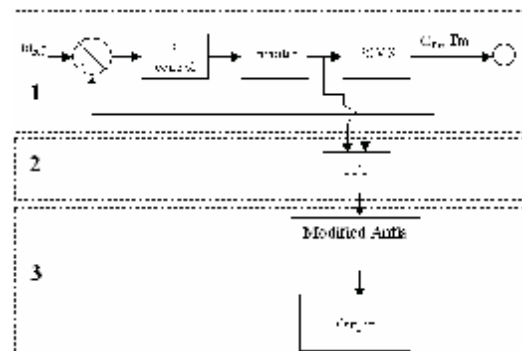
Metode Adaptive yang digunakan pada penelitian ini merupakan penggabungan antara ANFIS dengan LSE Rekursif yang digunakan untuk memperbarui parameter konsekuen dan SD untuk memperbarui parameter premis. Tabel 2.1 memperlihatkan alur pembelajaran untuk modified ANFIS.

Tabel 2.1 Pembelajaran Modified ANFIS

	Alur Maju	Alur Mundur
Parameter Premis	Ditentukan	Steepest Descent
Parameter Konsekuen	Least Squares Estimator	Ditentukan
Sinyal	Node output	Sinyal error

**2.9 Pendeteksian Gangguan Pada Belitan Stator Motor Dengan Modified Anfis**

Blok diagram sistem yang dikembangkan pada penelitian ini adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 1



Gambar 1 Sistem pendeteksian gangguan belitan stator PMSM

Blok diagram pada Gambar 1 terdiri dari 3 sub blok, sub blok 1 merupakan blok diagram motor serempak magnet permanen (PMSM) beserta sistem

pengendaliannya, blok 2 merupakan FFT untuk menunjukkan harmonisa torka, arus, tegangan motor dan blok 3 merupakan blok analisis keluaran dari blok 2 sehingga didapatkan output yang berupa pengkodean dari keadaan PMSM saat beroperasi. Output didapat dengan membandingkan keluaran dari modified Anfis dengan data parameter PMSM pada berbagai kondisi pengoperasian (operasi normal dan gangguan belitan stator pada kecepatan motor yang berbeda).

**3. SIMULASI DAN ANALISIS**

**3.1 Simulasi**

Pada penelitian ini dilakukan 3 tahapan simulasi yaitu:

**Tahap I :** Sistem dalam keadaan normal tanpa gangguan

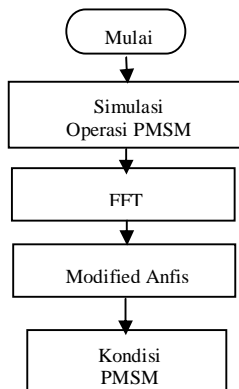
Pada tahap I putaran motor diatur dari 600 rpm sampai 1000 rpm dengan ring 100 rpm. Torka beban diatur 1.1 N-m. Dengan FFT akan didapatkan harmonisa Torka, Arus, dan Tegangan Stator PMSM.

**Tahap II :** Sistem dioperasikan dalam keadaan gangguan

Pada tahap II dilakukan sama seperti tahap I, tetapi pada rangkaian sistem ditambahkan R seri yang dipasang antara sumber tegangan (output Inverter) dengan terminal input PMSM. Rseri diparalel dengan sakelar *normlly close* yang bertujuan untuk mengekspresikan terjadinya gangguan antar belitan dalam kumparan stator PMSM .

Untuk gangguan hubung singkat antar fase pada belitan dam kumparan stator PMSM dilakukan dengan pemasangan sakelar normally open antar fase pada terminal input PMSM. Dengan FFT akan didapatkan harmonisa Torka, Arus, dan Tegangan Stator PMSM pada kondisi operasi ini.

**Tahap III :** memasukan data dari parameter-parameter motor yang didapat dari simulasi untuk dilakukan pembelajaran oleh Modified Anfis.



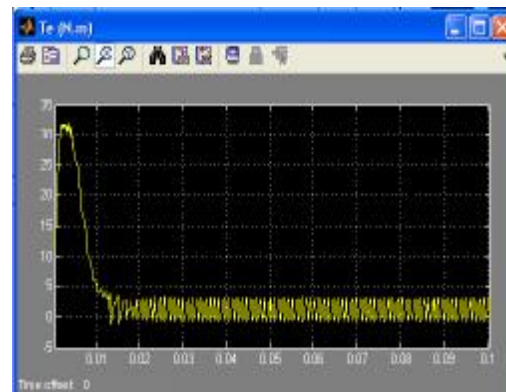
Gambar 2 Alur simulasi pendeteksian gangguan belitan dalam kumparan stator PMSM

Hasil pembelajar ini disimpan yang selanjutnya akan dipergunakan sebagai pemban-ding dari hasil Modified Anfis saat melakukan identifikasi gangguan belitan dalam kumparan PMSM. Alur simulasi pendeteksian gangguan belitan dalam kumparan stator PMSM seperti gambar 2

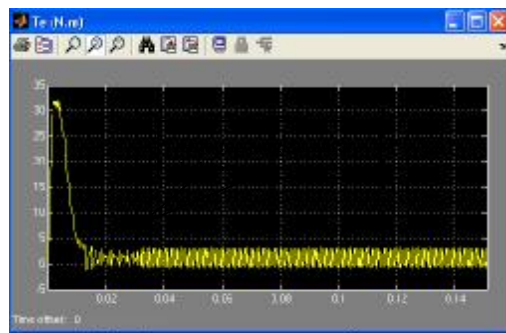
**3.2 Pembelajaran Off-Line Modified ANFIS**

Metode pembelajaran untuk mengidentifi-kasi gangguan belitan stator PMSM mengguna-kan Modified ANFIS yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan 2 blok Modified ANFIS. Blok pertama untuk pembelajaran data dari parameter PMSM untuk bernagai kondisi pengoperasian, yang selanjutnya akan disimpan sebagai data pembanding dari output Modified Anfis blok kedua. Blok kedua Modified Anfis merupakan blok pendeteksian gangguan belitan dalam kumparan stator PMSM.

**Hasil Simulasi**



Gambar 3 Bentuk gelombang Torka elektromagnetik Motor normal



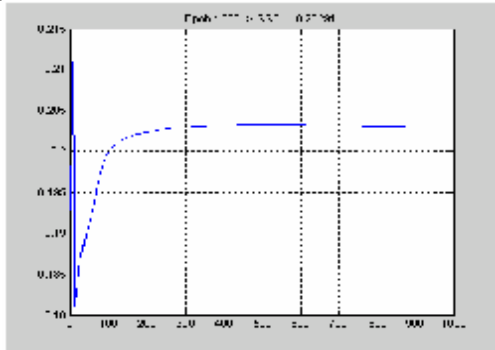
Gambar 4 Bentuk gelombang Torka elektromagnetik Motor dalam keadaan gangguan

Terlihat perbedaan bentuk gelombang antara gambar 3(kondisi normal) dengan gambar 4 (kondisi hubung singkat antar belitan). Pada saat setelah 0.02 detik dari pengopersaian motor sampai dengan 0.03 detik terjadi penurunan amplitudo gelombang elektro-magnetik torka motor.



### 3.3 Analisis Pembelajaran Anfis Modifikasi

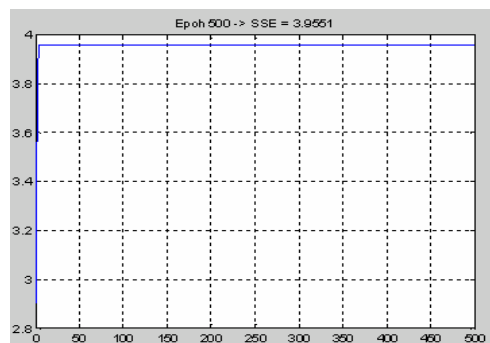
Hasil pembelajaran Anfis modifikasi seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.1 sampai dengan tabel 4.2 menunjukkan nilai SSE dibawah 1. Bila nilai SSE diatas 1 berarti dapat diprediksikan terjadi gangguan pada belitan motor. Pada gambar 5.2 ditunjukkan gambar grafik SSE untuk 108 data pembelajar didapatkan nilai SSE = 0,20291 pada berbagai kon-disi operasi.



Gambar 5 Grafik SSE untuk 108 data pembelajar

### 3.4 Deteksi Gangguan

Bila data input merupakan data dari pemodelan motor dalam simuling pada kondisi gangguan maka SSE yang diperoleh lebih besar dari 1, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik SSE untuk 36 data input

Pada gambar 4.6 terlihat nilai SSE adalah 3,9 yang berarti pada kondisi ini dapat diprediksi adanya gangguan belitan stator motor serempak magnet permanen.

Memperhatikan hasil-hasil yang didapat dari keseluruhan sistem, bahwa dengan menggunakan Modified Anfis dapat mendeteksi gangguan yang terjadi pada belitan stator motor serempak magnet permanen.

## 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan terhadap modified ANFIS maka ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Simulasi identifikasi gangguan belitan modified ANFIS diperoleh nilai SSE = 0 pada kondisi operasi motor tanpa gangguan.
2. Simulasi identifikasi gangguan belitan modified ANFIS diperoleh nilai SSE = 3,9, lebih besar dari 1, maka pada kondisi ini terjadi gangguan antar belitan pada stator motor serempak magnet permanen.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Penman, H. G. Sedding, B. A. Lloyd, and W. T. Fink, "Detection and Location of Interturn Short Circuit in the Stator Windings of Operating Motor", IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 9, pp. 652-658, Dec. 1994.
- [2] S. Nandi and H. A. Toliyat, "Novel frequency domain based technique to detect incipient stator interturn faults in induction machines", IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu. Netting, 2000, pp 367-374.
- [3] Heikki Kaivo, ANFIS (Adaptive Neuro-fuzzy Inference System), School of Engineering University of Tasmania, 2000.
- [4] Suka Handaja Budi, "Metode Adaptive Neuro Fuzzy Inferency System (ANFIS) untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Phase", Tesis, Program Studi Tek-nik Elektro ITS, Surabaya, 2003.
- [5] M. A. Awadallah, ANFIS-Based Diagnosis and Location of Stator Interturn Faults in PM Brushless DC Motors, IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 19, No. 4, December 2004
- [6] Hasti Afianti, "Perancangan Modified ANFIS Observer Untuk Identifikasi Kecepatan Motor Induksi", Tesis, Program Studi Teknik Elektro ITS, Surabaya, 2005.
- [7] Humberto Henao, Cristion Demion, and Gerard-Andre Capolino, A frequency-Domain Detection of Stator Winding Faults in Induction Machines Using an External Flux Sensor, IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 39, No. 5, September/October 2003.
- [8] Olaf Moseler and Rolf Isermann, Application of Model-Based Fault Detection to a Brushless DC Motor, IEEE Transactions On Industry Electronics, Vol. 47, No. 5, October 2000.
- [9] M. A. Awadallah, and Medhat M. Morces, Application of AI Tools in Fault Diagnosis of Electrical Machins and Drives-An Overview, IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 18, No. 2, June 2003.
- [10] Sinan Altug, Mo-Yuen Chow, and H. Joel Trussell, Fuzzy Inference System Implemented on Neural Architectures for Motor Fault Detection and Diagnosis, IEEE Transactions On Industry Electronics, Vol. 46, No. 6, December 1999.