

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Telaah Pustaka Hasil Penelitian

Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) telah diterima sebagai metode yang andal dan diyakini akan terus berkembang guna menjawab kebutuhan akan sistem yang cerdas. ANFIS merupakan sistem inferensi logika fuzzy yang diimplementasikan pada suatu sistem jaringan adaptif (Wang dan Lee, 2002).

Pemahaman tentang ANFIS dapat dimulai dari prinsip dasar sistem logika fuzzy (Kartalopoulos, 1996), jaringan neural artifisial (Fausett, 1994; Syahputra, 2003), jaringan neuro fuzzy (Brown, 1994; Kartalopoulos, 1996), hingga konsep ANFIS beserta aplikasinya (Gorzalczany dan Gluszek, 2000; Li dkk, 2000; Brok dkk, 2000; Henriques dkk, 2002; Barton, 2002; Wang dan Lee, 2002; Madkour dkk, 2004).

Sistem neuro fuzzy merupakan jaringan koneksi berlapis jamak yang merealisasikan elemen-elemen dasar dan fungsi-fungsi sistem kendali/keputusan logika fuzzy tradisional. Karena sistem neuro fuzzy adalah aproksimator semesta maka sistem kendali neuro fuzzy juga merupakan aproksimator semesta, karena fungsi-fungsinya merupakan satu bentuk (*isomorphic*) dengan sistem kendali logika fuzzy tradisional. Terdapat beberapa macam jaringan neuro fuzzy diantaranya FALCON, GARIC, dan variasi-variasi lainnya (Wang dan Lee, 2002).

Dengan memanfaatkan arsitektur jaringan dan algoritma pembelajaran terasosiasi, sistem neuro fuzzy telah berhasil diterapkan pada berbagai keperluan

(Gorzalczany dan Gluszek, 2000; Li dkk, 2000; Brok dkk, 2000; Henriques dkk, 2002; Barton, 2002). Akan tetapi, sebagian besar sistem neuro fuzzy memperlihatkan beberapa kekurangan utama yaitu munculnya penurunan unjuk kerja. Kekurangan-kekurangan tersebut akibat kedimensionalan (banyaknya aturan fuzzy) dan kekurangmampuan menggali pengetahuan dari himpunan data pelatihan yang diberikan. Madkour dkk (2004) mengembangkan berhasil mengembangkan metode ANFIS untuk identifikasi sistem secara waktu-nyata yang dapat digunakan untuk keperluan kendali adaptif. Teknik yang dikemukakannya yaitu prosedur pemodelan fuzzy guna melatih informasi tentang himpunan data masukan-keluaran dalam rangka menghitung parameter fungsi keanggotaan yang paling memenuhi sistem inferensi fuzzy terasosiasi. Metode pelatihan ini bekerja seperti halnya jaringan neural artifisial. Dengan keberhasilan dalam identifikasi sistem, metode ANFIS menarik untuk diterapkan sebagai estimator cerdas.

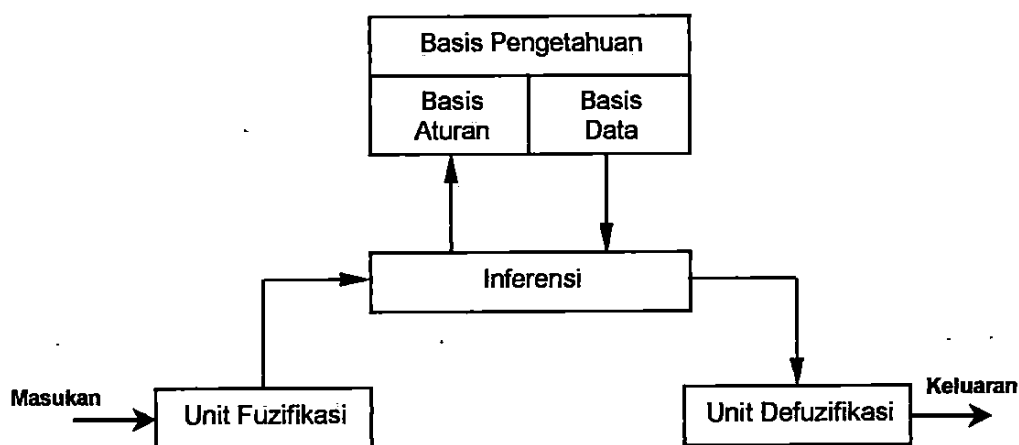
2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem inferensi fuzzy

Pada sistem kendali konvensional analisis sistem dilakukan secara kuantitatif, sedang kendali berbasis logika fuzzy analisis dilakukan secara kualitatif. Sistem analisis teknik kuantitatif konvensional tidak sesuai untuk menangani sistem humanistik, sehingga dalam merumuskan kendali berbasis fuzzy dilakukan berdasarkan prinsip ketidakserasian (*incomtability*) (Brown dan Harris, 1984).

Struktur dasar sistem inferensi fuzzy yang dapat digunakan dalam sistem kendali (Gambar 2.1) terdiri atas :

1. Basis aturan yang berisi sejumlah aturan fuzzy yang memetakan nilai masukan fuzzy ke nilai keluaran fuzzy. Aturan ini sering dinyatakan dengan format *if-then*.
2. Basis data yang berisi fungsi keanggotaan dari himpunan fuzzy yang digunakan sebagai nilai bagi setiap variabel sistem.
3. Mekanisme penalaran fuzzy yang melakukan prosedur inferensi.



Gambar 2.1. Struktur dasar sistem inferensi fuzzy.

Unit fuzifikasi melakukan proses fuzifikasi dari data masukan tegas (*crisp*) dengan cara memetakan nilai tegas variabel masukan ke semesta wacana yang sesuai dan konversi dari data yang terpetakan tersebut ke istilah linguistik yang sesuai. Sedang unit defuzifikasi melakukan pemetaan keluaran fuzzy ke nilai tegas.

2.2.2 ANFIS

Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) merupakan jaringan adaptif berbasis pada sistem inferensi logika fuzzy (Jang, 1993). Dengan adanya

implementasi sistem inferensi logika fuzzy pada jaringan adaptif maka sifat-sifat jaringan adaptif dapat digunakan untuk mengadaptasi sistem inferensi tersebut. Dalam hal ini tergabung dua metode untuk mendapatkan hasil yang diinginkan yaitu metode adaptif yang biasa dipakai pada sistem jaringan neural artifisial dan fuzifikasi yang biasa dipakai pada pengendali fuzzy. Dua metode ini dalam pemakaiannya menggunakan dua sumber informasi yang berbeda yakni metode adaptif bekerja menggunakan data numerik dan metode fuzifikasi menggunakan data linguistik. Kedua jenis informasi inilah yang bisa didapatkan dalam sistem kendali, sehingga diharapkan dapat dibuat sistem kendali yang optimal.

Parameter ANFIS dipisahkan menjadi dua yaitu parameter premis (*antecedent*) dan parameter konsekuensi (*consequent*). Proses adaptasi dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan parameter-parameter tersebut agar terbentuk suatu jaringan adaptif yang merepresentasikan sistem inferensi yang diinginkan. Proses pencarian parameter premis dan parameter konsekuensi sering dikenal dengan proses pembelajaran atau proses pelatihan. Proses pelatihan untuk ANFIS yang digunakan dalam penelitian ini yaitu propagasi-balik (*backpropagation*).

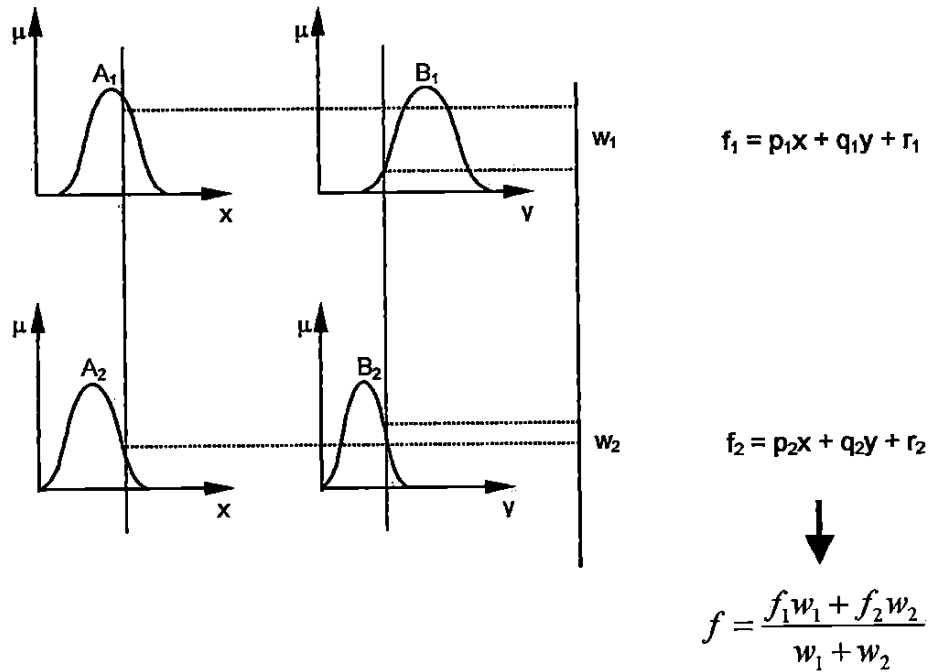
Arsitektur ANFIS tergantung pada jenis sistem inferensi yang akan diimplementasikan. Sebagai contoh sistem inferensi logika fuzzy orde pertama tipe Sugeno dengan dua masukan dan dua aturan sebagai berikut, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.

Jika x adalah A_1 dan y adalah B_1 maka $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

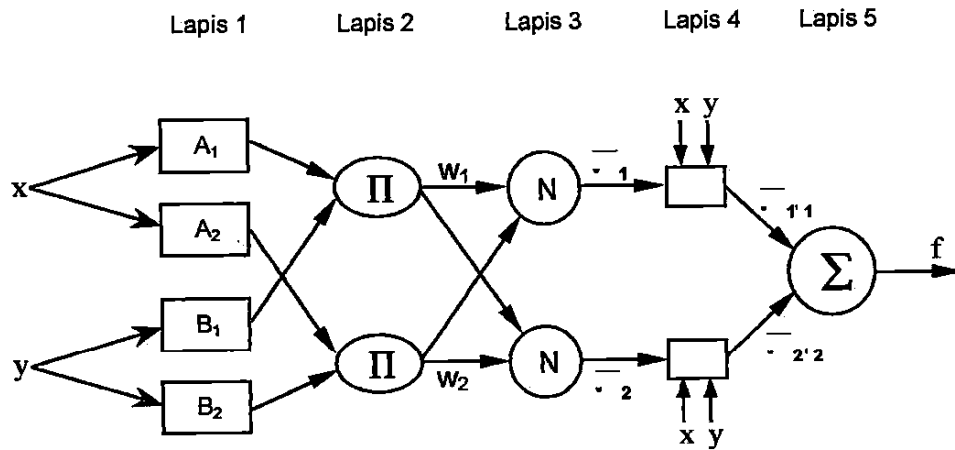
Jika x adalah A_2 dan y adalah B_2 maka $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

Model logika fuzzy Sugeno seperti pada Gambar 2.2 dapat diimplementasikan pada jaringan adaptif yang terdiri dari lima lapis seperti terlihat

pada Gambar 2.3. Jika O_i^k menunjukkan keluaran simpul ke-i pada lapis ke-k, maka masing-masing lapis dapat dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 2.2. Model logika fuzzy Sugeno



Gambar 2.3. Arsitektur ANFIS model Sugeno orde satu dengan dua masukan dan dua aturan.

Lapis 1. Setiap simpul i dalam lapis ini merupakan simpul adaptif yang menunjukkan bahwa keluaran yang dihasilkan tergantung dari parameter yang menyusun simpul ini. Fungsi simpulnya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x), \text{ untuk } i = 1, 2, \quad \dots\dots(2.1)$$

atau,

$$O_i^1 = \mu_{B_{i-2}}(y), \text{ untuk } i = 3, 4 \quad \dots\dots(2.2)$$

dengan x dan y masing-masing merupakan masukan pada suatu simpul adaptif A_i dan B_i . Nilai O_i^1 adalah nilai keanggotaan himpunan fuzzy (A_1, A_2, B_1, B_2). Fungsi keanggotaan pada simpul-simpul adaptif masukan memiliki parameter-parameter yang sesuai dengan jenis fungsi keanggotaan yang dipakai. Biasanya digunakan fungsi bel umum (*generalized bell function*):

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left[\frac{x - c_i}{a_i} \right]^{2b_i}} \quad \dots\dots(2.3)$$

Himpunan parameter yang membentuk fungsi keanggotaan ini dikenal sebagai parameter premis.

Lapis 2. Pada simpul-simpul di lapis ini proses perkalian nilai keanggotaan yang masuk masing-masing simpul tanpa memiliki parameter seperti pada lapis 1. Keluaran simpul ini dinyatakan:

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), \quad i = 1, 2. \quad \dots\dots(2.4)$$

Setiap simpul memiliki keluaran yang dikenal dengan kuat penyulutan (*firing strength*).

Lapis 3. Simpul-simpul lapis ini merupakan simpul biasa yang melakukan proses normalisasi yaitu membandingkan kuat penyulutan ke-i dengan kuat penyulutan total yang masuk pada masing-masing simpul, yang dapat dinyatakan sebagai:

$$O_i^3 = \bar{w} = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2. \quad \dots\dots(2.5)$$

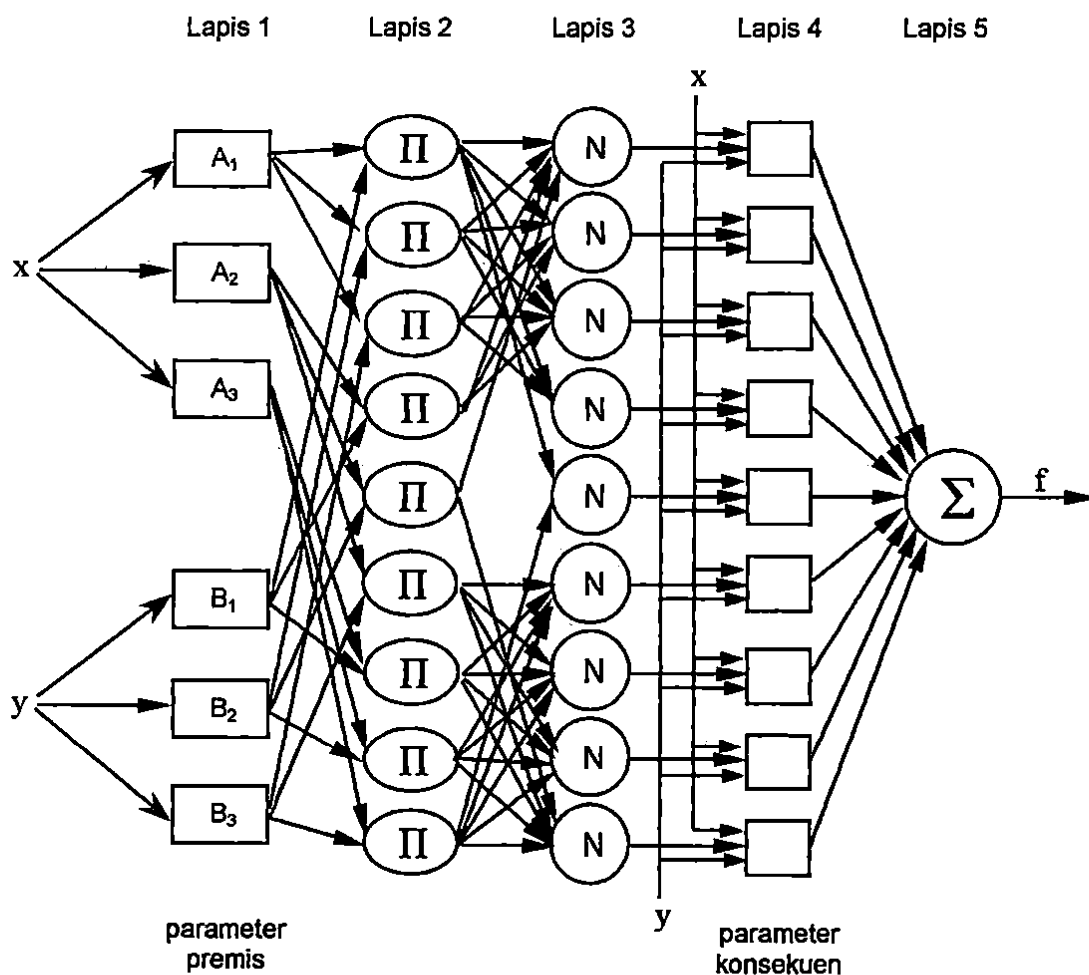
Lapis 4. Simpul-simpul pada lapis ini merupakan simpul adaptif yang terparameterisasi. Keluaran dari simpul-simpul tersebut adalah perkalian dari kuat penyulutan ternormalisasi dengan fungsi konsekuensi yang merupakan kombinasi linier dari variabel masukan. Parameter-parameter yang berhubungan dengan simpul-simpul pada lapis ini dikenal sebagai parameter konsekuensi. Keluaran dari simpul-simpul pada lapis ini dapat dinyatakan sebagai:

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad \dots\dots(2.6)$$

dengan \bar{w}_i adalah kuat penyulutan ternormalisasi dan $(p_i, q_i, \text{ dan } r_i)$ adalah parameter konsekuensi dari simpul ke-i.

Lapis 5. Keluaran dari simpul ini merupakan jumlah dari seluruh masukan yang memasuki simpul keluaran dengan parameter sebagai berikut:

Arsitektur ANFIS model Sugeno dapat dikembangkan menjadi seperti yang terlihat pada Gambar 2.4, yaitu terdiri dari dua masukan, tiga fungsi keanggotaan setiap masukan dan sembilan aturan.



Gambar 2.4. Arsitektur ANFIS model Sugeno orde satu dengan dua masukan, tiga fungsi keanggotaan setiap masukan dan sembilan aturan.

2.2.3 Algoritma pembelajaran ANFIS

Pembelajaran pada ANFIS dilakukan untuk mendapatkan parameter-parameter jaringan yang terdiri atas parameter premis dan parameter konsekuen

Algoritma pembelajaran ANFIS yang sering digunakan adalah metode propagasi-balik dan metode hibrid.

2.2.3.1 Algoritma Propagasi-balik

Pembelajaran ANFIS dengan metode propagasi-balik didasarkan pada penurunan gradien (*gradient descent*). Algoritma pembelajaran ANFIS propagasi-balik dengan dua masukan dan dua fungsi keanggotaan tiap masukan dapat dijelaskan sebagai berikut:

Pelatihan perambatan maju:

1. Inisialisasi parameter premis dan konsekuen.

Semua parameter premisnya diinisialisasi sesuai dengan masukan yang bersesuaian. Parameter fungsi keanggotaan ke- j dari masukan ke- i yang diperbaharui adalah a_{ij} , b_{ij} , dan c_{ij} untuk fungsi keanggotaan jenis bell (*gbellmf*) atau σ_{ij} dan c_{ij} untuk fungsi keanggotaan gaussian (*gaussmf*). Parameter konsekuen (p_L , q_L , r_L) juga diinisialisasi dengan nilai awal nol.

2. Menghitung nilai keanggotaan.

Setelah parameter premis diinisialisasi, maka diperoleh fungsi keanggotaan yang bersesuaian dengan data masukan. Masukan fungsi keanggotaan ditentukan kemudian dengan data masukan. Setelah fungsi keanggotaan ditentukan, lalu data masukan dimasukkan ke dalam fungsi keanggotaan tersebut untuk mendapatkan nilai keanggotaannya. Jika keanggotaan yang dipakai adalah jenis *gbellmf*, maka:

$$\mu_{ipj}(x_i) = \frac{1}{1 + \left[\frac{x_{ip} - c_{ij}}{a_{ij}} \right]^{2b_{ij}}} \quad \text{.....(2.8)}$$

dan jika yang digunakan gaussmf, maka:

$$\mu_{ipj}(x_i) = \exp \left(- \left[\frac{x_{ip} - c_{ij}}{\sigma_{ij}} \right]^2 \right) \quad \text{.....(2.9)}$$

dengan, x_i = masukan ke-i.

x_{pi} = data ke-p untuk masukan ke-i.

μ_{pij} = nilai keanggotaan data ke-p untuk fungsi keanggotaan ke-j pada masukan ke-i.

$\{a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}\}$ = parameter fungsi keanggotaan ke-j pada masukan ke-i.

3. Menghitung kuat penyulutan (*firing strength*).

Kuat penyulutan dapat diperoleh dengan cara melakukan operasi T-norm pada nilai keanggotaan setiap masukan yang membentuk suatu aturan.

$$w_L = \prod_i \mu_i \quad \text{.....(2.10)}$$

4. Normalisasi kuat penyulutan (*firing strength*).

Kuat penyulutan yang diperoleh pada langkah ke-3 dinormalisasi dengan cara membagi kuat penyulutan dengan penyulutan total.

$$\bar{w}_L = \frac{w}{w_1 + w_2} \quad \text{.....(2.11)}$$

5. Inisialisasi parameter konsekuen.

Inisialisasi ini dilakukan untuk mendapatkan parameter linier ANFIS, yaitu p_L , q_L , r_L , sehingga diperoleh konsekuennya yang dapat dinyatakan sebagai:

$$f_L = p_L x + q_L y + r_L \quad \text{.....(2.12)}$$

6. Mengalikan setiap kuat penyulutan ternormalisasi setiap aturan dengan bagian konsekuensi yang telah diinisialisasi.

$$O^4 = \bar{w}_L f_L \quad \dots(2.13)$$

Hasil ini dikenal dengan keluaran tiap aturan.

7. Menghitung keluaran ANFIS.

$$f = \sum_L \bar{w}_L f_L \quad \dots(2.14)$$

Keluaran ANFIS diperoleh dengan cara menjumlahkan setiap keluaran aturan.

8. Menghitung galat.

Galat diperoleh dengan mengurangkan keluaran ANFIS terhadap data target.

Kuadrat galat pasangan data pelatihan ke-p dapat dinyatakan sebagai:

$$E_p = (T_p - f_p)^2 \quad \dots(2.15)$$

Pelatihan perambatan mundur:

Pembelajaran rambat mundur dilakukan jika kuadrat galat belum mencapai kurang atau sama dengan kriteria galat yang ditentukan.

9. Pembaharuan parameter konsekuen.

Dicari nilai p_L , q_L , dan r_L yang baru berdasarkan kuadrat galat yang diperoleh pada proses pembelajaran rambat maju, yang dinyatakan sebagai berikut:

$$p_L(k+1) = p_L(k) - \eta \left. \frac{dE}{dp_L} \right|_k \quad \dots(2.17)$$

$$q_L(k+1) = q_L(k) - \eta \left. \frac{dE}{dq_L} \right|_k \quad \dots(2.18)$$

$$r_L(k+1) = r_L(k) - \eta \left. \frac{dE}{dr_L} \right|_k \quad \dots(2.19)$$

dengan, k = epoch

10. Pembaharuan parameter premis.

Dalam hal ini dilakukan pembaharuan parameter dari fungsi keanggotaan yang bersesuaian dengan setiap jenis masukan ke-i, yang dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$a_{ij}(k+1) = a_{ij}(k) - \eta \left. \frac{dE}{da_{ij}} \right|_k \quad \dots(2.20)$$

$$b_{ij}(k+1) = b_{ij}(k) - \eta \left. \frac{dE}{db_{ij}} \right|_k \quad \dots(2.21)$$

$$c_{ij}(k+1) = c_{ij}(k) - \eta \left. \frac{dE}{dc_{ij}} \right|_k \quad \dots(2.22)$$

dengan, $k = \text{epoch}$

11. Membentuk fungsi keanggotaan baru.

Setelah seluruh parameter fungsi keanggotaan yang baru diperoleh, selanjutnya dibuat fungsi keanggotaan dengan parameter yang baru, kemudian pasangan data masukan digunakan lagi untuk mendapatkan nilai keanggotaan yang baru guna proses pembelajaran epoch selanjutnya.

2.2.3.2 Algoritma Hibrid

Algoritma ini merupakan penggabungan dua metode pembelajaran yakni propagasi-balik dan least square estimation (LSE). Berdasarkan arsitektur ANFIS pada Gambar 2.3 terlihat bahwa keluarannya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} f &= \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2 \\ &= \bar{w}_1 (p_1 x + q_1 y + r_1) + \bar{w}_2 (p_2 x + q_2 y + r_2) \\ &= (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + (\bar{w}_1) r_1 + (\bar{w}_2 x) p_2 + (\bar{w}_2 y) q_2 + (\bar{w}_2) r_2 \quad \dots(2.23) \end{aligned}$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa keluaran secara keseluruhan merupakan kombinasi linier dari parameter-parameter konsekuen setiap aturan, sehingga nilai parameter tersebut bisa diestimasi menggunakan regresi linier yang dikenal dengan *least square estimation* (LSE).

Selain dipengaruhi oleh parameter konsekuen yang merupakan parameter linier, ANFIS juga dipengaruhi oleh parameter premis (parameter nonlinier). Untuk menyesuaikan parameter tidak hanya parameter konsekuen saja tetapi juga parameter premisnya. Pembaharuan parameter premis dilakukan dengan metode propagasi-balik. Sehingga secara keseluruhan pelatihan ANFIS menggunakan penggabungan metode least square estimation untuk perambatan maju dan propagasi-balik untuk perambatan mundur.

Pelatihan perambatan maju:

1. Inisialisasi parameter premis.

Semua parameter premisnya diinisialisasi sesuai dengan masukan yang bersesuaian. Parameter fungsi keanggotaan ke- j dari masukan ke- i yang diperbaharui adalah a_{ij} , b_{ij} , dan c_{ij} untuk fungsi keanggotaan jenis bell (*gbellmf*) atau σ_{ij} dan c_{ij} untuk fungsi keanggotaan gaussian (*gaussmf*).

2. Menghitung nilai keanggotaan.

Setelah parameter premis diinisialisasi, maka diperoleh fungsi keanggotaan yang bersesuaian dengan data masukan. Masukan fungsi keanggotaan ditentukan kemudian dengan data masukan. Setelah fungsi keanggotaan ditentukan, lalu data masukan dimasukkan ke dalam fungsi keanggotaan tersebut untuk

mendapatkan nilai keanggotaannya. Jika keanggotaan yang dipakai adalah jenis gbellmf, maka:

$$\mu_{ipj}(x_i) = \frac{1}{1 + \left[\frac{x_{ip} - c_{ij}}{a_{ij}} \right]^{2b_{ij}}} \quad \dots(2.24)$$

dan jika yang digunakan gaussmf, maka:

$$\mu_{ipj}(x_i) = \exp \left(- \left[\frac{x_{ip} - c_{ij}}{\sigma_{ij}} \right]^2 \right) \quad \dots(2.25)$$

3. Menghitung kuat penyulutan (*firing strength*).

Kuat penyulutan dapat diperoleh dengan cara melakukan operasi T-norm pada nilai keanggotaan setiap masukan yang membentuk suatu aturan.

$$w_L = \prod_i \mu_i \quad \dots(2.26)$$

4. Normalisasi kuat penyulutan (*firing strength*).

Kuat penyulutan yang diperoleh pada langkah ke-3 dinormalisasi dengan cara membagi kuat penyulutan dengan penyulutan total.

$$\bar{w}_L = \frac{w}{w_1 + w_2} \quad \dots(2.27)$$

5. Estimasi parameter konsekuen.

Estimasi dilakukan menggunakan metode least square estimation (LSE).

6. Menghitung keluaran masing-masing aturan, yaitu dengan cara mengalikan setiap kuat penyulutan ternormalisasi setiap aturan dengan bagian konsekuensi yang telah diinisialisasi.

$$O^4 = \bar{w}_L f_L \quad \dots(2.28)$$

7. Menghitung keluaran ANFIS untuk pasangan data tertentu.

Keluaran ANFIS diperoleh dengan cara menjumlahkan setiap keluaran aturan.

$$f = \sum_L \bar{w}_L f_L \quad \dots\dots(2.29)$$

8. Menghitung galat.

Galat diperoleh dengan mengurangkan keluaran ANFIS terhadap data target.

Kuadrat galat pasangan data pelatihan ke-p dapat dinyatakan sebagai:

$$E_p = (T_p - f_p)^2 \quad \dots\dots(2.30)$$

Pelatihan perambatan mundur:

Pembelajaran rambat mundur dilakukan jika kuadrat galat belum mencapai kurang atau sama dengan kriteria galat yang ditentukan.

9. Pembaharuan parameter premis.

Pembaharuan parameter premis dilakukan menggunakan metode propagasi-balik yang berbasis gradient descent.

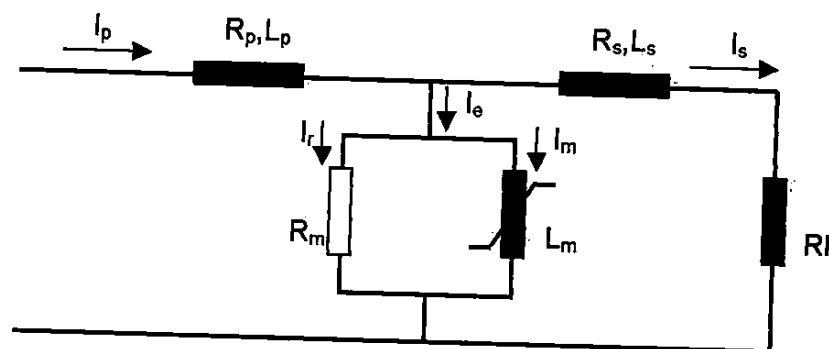
10. Membentuk fungsi keanggotaan baru.

Setelah seluruh parameter fungsi keanggotaan yang baru diperoleh, selanjutnya dibuat fungsi keanggotaan dengan parameter yang baru, kemudian pasangan data masukan digunakan lagi untuk mendapatkan nilai keanggotaan yang baru guna proses pembelajaran epoch selanjutnya.

2.2.4 Transformator Arus

Transformator arus (*current transformer, CT*) adalah sebuah transformator instrumen dengan belitan primer yang terhubung secara seri dengan konduktor yang membawa arus untuk diukur atau untuk dikendalikan (IEEE, 1993). Transformator

arus dengan inti-besi toroidal secara luas dipergunakan pada industri daya listrik untuk pengukuran arus saluran guna tujuan proteksi dan pengukuran. Keuntungannya adalah biaya yang rendah, isolasi galvanis (*galvanic isolation*), keandalan yang baik, dan mudah penerapannya. Kerugiannya adalah penjenuhan (*saturation*) dan magnet sisa (*remanensi*).



keterangan :

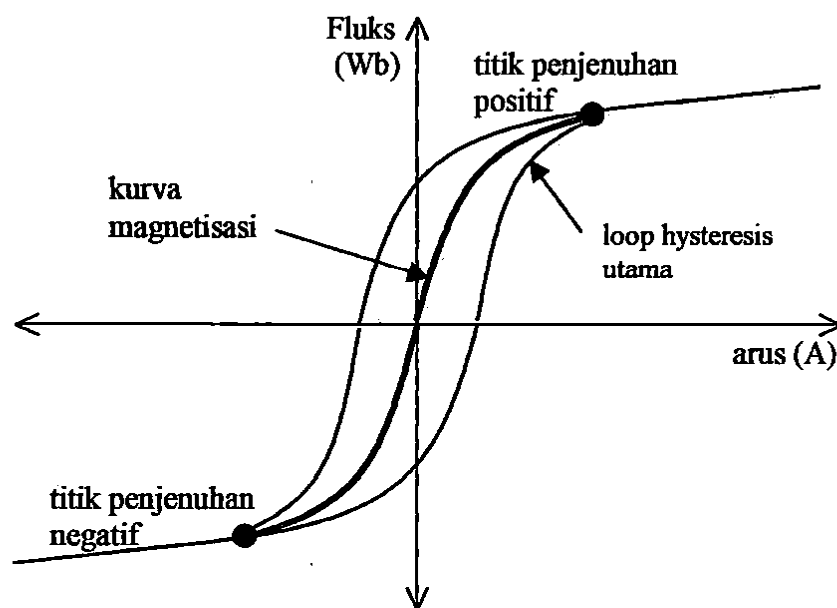
- I_p, I_s - arus primer dan arus sekunder
- I_e - arus pemagnetan
- I_m - arus pemagnetan, komponen reaktif
- I_r - arus pemagnetan, komponen aktif
- R_p, L_p - resistans belitan primer dan induktans bocor
- R_s, L_s - resistans belitan sekunder dan induktans bocor
- L_m - induktans non-linear pemagnetan
- RI - beban CT
- R_m - resistans ekivalen rugi besi

Gambar 2.5. Diagram rangkaian transformator arus.

Perilaku CT pada kondisi steady state dan gangguan simetris dicakup dalam standar ANSI/IEEE C57.13-1993. Standar ini menegaskan kondisi untuk desain CT yang menyebutkan: ... "Rating tegangan terminal sekunder CT adalah tegangan dimana CT akan memberikan kepada sebuah beban standar pada 20 kali *rating* arus sekunder tanpa melampaui koreksi rasio 10%. Selanjutnya, koreksi rasio akan dibatasi untuk 10% pada arus dari 1 sampai 20 kali *rating* arus sekunder pada beban

standar yang digunakan untuk *rating* tegangan terminal sekunder”... . Gangguan-gangguan dalam sistem tenaga yang meliputi komponen-komponen insutan dc (*dc offset*) dapat meningkatkan arus simetris (arus gangguan tak simetris) yang dapat membuat jenuh CT pada arus yang jauh lebih kecil dari arus simetris tanpa insutan dc. Statistik menunjukkan bahwa banyak gangguan dengan arus tak simetris dimana penjenahan CT menjadi perhatian.

Guna menghindarkan penjenahan CT, solusi yang mungkin adalah dengan memperbesar ukuran inti CT. Selain itu adalah dengan menggunakan sebuah bahan inti yang mendukung bagi kerapatan fluks besar. Kedua pilihan tersebut dapat mempengaruhi biaya dan mengurangi penggunaan CT.

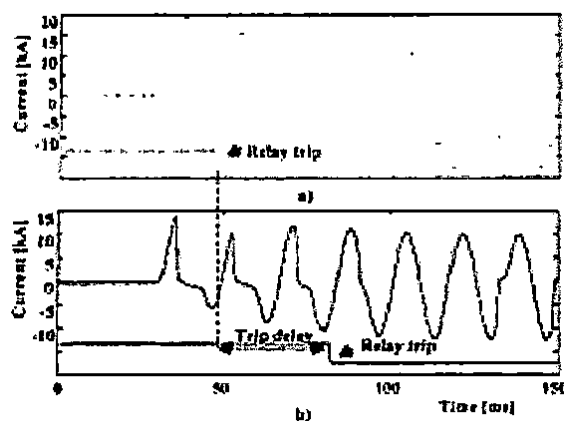


Gambar 2.6 Kurva hysteresis dan kurva magnetisasi.

Dalam banyak bentuk hal itu diinginkan untuk memasukkan CT sebagai sebuah bagian utuh dari peralatan proteksi. Memperluas inti berarti menambah

diameter bagian luar yang dapat menimbulkan kesulitan mekanis, atau mengurangi diameter bagian dalam yang dapat mempengaruhi isolasi. Bilamana CT berinti besi digunakan dalam perlengkapan proteksi, masalah penjuhan dapat menjadi persoalan yang krusial.

Sebagian besar peralatan proteksi, baik elektromekanik maupun elektronik, pengoperasiannya berdasarkan pada nilai RMS dari arus gangguan. Jika sinyal yang disuplai oleh CT ke perlengkapan proteksi terdistorsi oleh penjuhan, nilai RMS yang dirasakan akan jauh lebih kecil dari arus gangguan yang sebenarnya. Gambar 2.7 menunjukkan sebuah relay yang tertunda tripnya disebabkan penjuhan CT. Bilamana CT tidak jenuh, arus sekunder sama dengan arus primer (Gambar 2.7a). Gambar 2.7b menunjukkan tertundanya relay trip disebabkan oleh penjuhan CT yang diuji pada relay yang sama pada kondisi pengujian yang sama. Dalam aplikasi yang sebenarnya hal ini dapat menyebabkan kesalahan koordinasi dengan relay yang lain.



Gambar 2.7. Perbandingan operasi sebuah relay:

(a) transformator arus tanpa penjuhan, (b) transformator arus dengan penjuhan

Bilamana penjenahan CT semakin tinggi, hal ini dapat menghalangi relay trip. Bentuk masalah ini telah sedang didiskusikan secara luas dalam literatur sebagaimana digunakan untuk berbagai skema proteksi.

2.2.5 ANFIS dalam Matlab

ANFIS yang akan disimulasikan menggunakan perangkat lunak Matlab. Arsitektur ANFIS yang dipakai adalah model Sugeno orde satu dengan jumlah keluaran tunggal. Sebelum dilakukan pelatihan terhadap ANFIS, dilakukan penentuan parameter premis awal menggunakan fungsi *genfis1*, dengan persamaan berikut:

$$a_i = \frac{\text{rentang data masukan ke } -i}{2((\text{jumlah MF masukan ke } -i) - 1)} \quad \dots(2.37)$$

$$b_i = 2 \quad \dots(2.38)$$

$$c_{ij} = \frac{\text{rentang data masukan ke } -i}{(\text{jumlah MF masukan ke } -i) - 1} + c_{i1}, \quad j = 2, 3, \dots \quad \dots(2.39)$$

$$c_{i1} = \text{data terkecil} \quad \dots(2.40)$$

Parameter di atas adalah parameter untuk fungsi keanggotaan jenis bell (*gbellmf*), sedang untuk fungsi keanggotaan jenis gauss (*gaussmf*), parameter premis awal yang dipakai adalah:

$$\sigma_i = \frac{\text{rentang data masukan ke } -i}{2((\text{jumlah MF masukan ke } -i) - 1)\sqrt{2\ln 2}} \quad \dots(2.41)$$

$$c_{ij} = \frac{\text{rentang data masukan ke } -i}{(\text{jumlah MF masukan ke } -i) - 1} + c_{i1}, \quad j = 2, 3, \dots \quad \dots(2.42)$$

$$c_{i1} = \text{data terkecil} \quad \dots(2.43)$$

Jumlah aturan yang dibuat adalah hasil kali jumlah fungsi keanggotaan tiap masukan dengan bobot masing-masing aturannya satu. Perintah pelatihan dilakukan menggunakan fungsi `anfis` dengan argumen sebagai berikut:

```
[fismat1,error1,stepsize,fismat2,error2] = ...
```

```
anfis(trnData,fismat,trnOpt,dispOpt,chkData,optMethod)
```

1. Argumen `trnData`: merupakan kumpulan data pembelajaran yang berisi data masukan dan kolom terakhir berisi data keluaran yang merupakan vektor tunggal.
2. Argumen `fismat`: nama sebuah FIS (fuzzy inference system) yang digunakan untuk memperoleh arsitektur ANFIS dengan fungsi keanggotaan awal untuk pembelajaran. Tanpa masukan pilihan ini `anfis` akan menggunakan `genfis1` untuk membuat FIS awal (default) guna pembelajaran. FIS default ini memiliki dua fungsi keanggotaan jenis gaussian. Jika `fismat` yang dipakai merupakan bilangan tunggal atau sebuah vektor, bilangan ini diambil sebagai jumlah fungsi keanggotaan.
3. Argumen `trnOpt`: argumen ini merupakan vektor pilihan pembelajaran. Jika argumen yang dimasukkan adalah NaN maka `anfis` akan memakai pilihan-pilihan defaultnya. Pilihan-pilihan tersebut diantaranya:
 - pilihan `trnOpt(1)`: jumlah epoch pelatihan (default = 10)
 - pilihan `trnOpt(2)`: galat pelatihan target (default = 0)
 - pilihan `trnOpt(3)`: ukuran langkah pelatihan (default = 0,01)
 - pilihan `trnOpt(4)`: tingkat ukuran langkah pelatihan (default = 0,9)
 - pilihan `trnOpt(5)`: tingkat kenaikan ukuran langkah pelatihan (default = 1,1)

4. Argumen `dispOpt`: merupakan vektor pilihan penampil yang menentukan apa yang ditampilkan dalam jendela perintah Matlab (command window) selama pelatihan. Pilihan 1 (*default*) berarti data yang dimaksudkan ditampilkan dalam layar, dan 0 berarti data yang dimaksudkan tidak ditampilkan dalam layar. Argumen NaN dimaksudkan untuk memilih nilai-nilai *default*nya yaitu:
 - pilihan `dispOpt(1)`: informasi ANFIS seperti jumlah masukan, jumlah aturan, jumlah parameter premis, jumlah parameter konsekuen, dan sebagainya (default = 1)
 - pilihan `dispOpt(2)`: penampilan nilai galat pelatihan (default = 1)
 - pilihan `dispOpt(3)`: ukuran langkah pelatihan (default = 1)
 - pilihan `dispOpt(4)`: hasil akhir (default = 1)
5. Argumen `chkData`: merupakan matrik kumpulan data pemeriksaan yang formatnya sama dengan data pelatihan, yang dipakai untuk validasi model.
6. Argumen `optMethod`: metode optimasi optional yang digunakan dalam pelatihan untuk penentuan parameter-parameter fungsi keanggotaan. Pilihan 1 (*default*) untuk metode optimasi hybrid dan pilihan 0 untuk metode optimasi propagasi-balik.

Proses pelatihan akan berhenti jika epoch yang didisain telah tercapai atau galat pelatihan target telah tercapai. Daerah-daerah hasil untuk ANFIS dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Argumen `fismat1` merupakan struktur FIS yang mempunyai parameter-
parameter yang ditentukan sesuai dengan hasil pelatihan

2. Argumen *error1* dan *error2* adalah array dari akar kuadrat rata-rata galat yang mewakili sinyal galat data pelatihan dan sinyal galat pemeriksaan.
3. Argumen *stepsize* adalah array ukuran langkah. Ukuran langkah menurun (dengan mengalikannya dengan komponen pilihan pelatihan yang berhubungan dengan pesat penurunan ukuran langkah) jika ukuran galat menjalani dua kombinasi *consecutive* kenaikan dan penurunan. Ukuran langkah naik (dengan mengalikannya dengan pesat kenaikan) jika ukuran galat menjalani empat penurunan bertalian.
4. Argumen *fismat2* merupakan struktur FIS yang mempunyai parameter-parameter yang ditentukan sesuai dengan kriteria galat pemeriksaan.

2.3 Hipotesis

Kesimpulan sementara yang dapat diambil berdasarkan landasan teori dan tinjauan pustaka adalah,

- 1) Metode ANFIS dapat memberikan unjuk kerja koreksi penjenjahan transformator arus dengan baik.
- 2) Metode ANFIS dengan algoritma pelatihan hibrid dapat memberikan hasil koreksi penjenjahan transformator arus yang lebih baik dibanding algoritma