

PENERAPAN ATURAN FUZZY MENGGUNAKAN ALGORITMA TABU SEARCH UNTUK PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI

A.A N.M. Narottama

Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Bali
Bukit Jimbaran, P.O. Box 1064 Tuban Badung – Bali
Phone : 0361-701981, Fax : 0361 – 701128
e-mail : rahde@yahoo.com

I Gde Nyoman Sangka

Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Bali
Bukit Jimbaran, P.O. Box 1064 Tuban Badung – Bali
Phone : 0361-701981, Fax : 0361 – 701128
e-mail : komangsangka@yahoo.com

Abstrak :Kontroler logika *fuzzy* telah banyak dikembangkan untuk mengatasi masalah pengaturan kecepatan pada motor induksi. Ada beberapa kendala yang dihadapi kalau menggunakan kontroler logika *fuzzy* konvensional yakni dalam menentukan fungsi keanggotaannya dan aturan dasar (*rule base*) yang sesuai dengan sistem kontrol yang diinginkan.

Teknik optimasi Penelusuran Tabu (*Tabu Search*) dapat digunakan untuk mengatasi kendala pada kontroler logika *fuzzy* tersebut supaya *rule base* kontroler logika *fuzzy* dapat mengatur dirinya sendiri secara otomatis ketika terjadi perubahan beban pada motor induksi

Metode *Tabu Search* bisa membuat *rule base* kontroler logika *fuzzy* mengatur dirinya sendiri yang digunakan pada pengaturan kecepatan motor induksi, dan hasil performansi sistem ini menunjukkan *maximum overshoot* kurang dari 2%, *settling time* kurang dari 2 detik, *rise time* kurang dari 2 detik dan *error steady state* kurang dari 2%

Kata kunci : *kontroler logika fuzzy, rule base, penelusuran tabu*

Implementation of Fuzzy Rules Using Tabu Search Algorithm for Induction Motor Speed Control

Abstract : *Fuzzy logic controller has been developed to overcome speed control problem for induction motor. Some of these problems are to determine membership function and appropriate rule base to desired control.*

Tabu Search optimization technique can be used to overcome the problems on fuzzy logic controller in order for its rule base to tune it automatically when a change in load on motor induction occur.

Tabu search method can force rule based fuzzy logic controller to tune itself which is used on tuning the speed of induction motor and the performance result for the system shows maximum overshoot less than 2%, settling time less than 2 seconds, rise time less than 2 seconds and error steady state less than 2 %

Key words : Fuzzy logic controller, Rule Base, Tabu Search.

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada penelitian sebelumnya, penulis telah mencoba mengembangkan suatu metode kontrol pada motor induksi menggunakan teknologi logika *fuzzy*. Sistem yang telah dikembangkan tersebut memiliki kelemahan di dalam menentukan aturan dasar *fuzzy* (*rule base*) dan parameternya, yakni masih menggunakan metode coba-coba (*heuristic*). Respon sistem kurang *smooth* ketika mengalami perubahan kondisi dinamik .

Untuk maksud mendapatkan sistem pengaturan motor induksi sesuai dengan harapan (*ideal*), maka para peneliti terus berupaya mengembangkan suatu metode kontrol yang berbasis pada teknologi logika *fuzzy*. Untuk dapat menghadapi kendala-kendala tersebut di atas, para peneliti mengembangkan teknik-teknik optimasi supaya sistem logika *fuzzy* mampu menentukan sendiri fungsi keanggotaannya maupun aturan dasar *fuzzy* (*rule base*). Teknik optimasi yang sudah kita kenal dengan baik antara lain algoritma genetika dan *simulated annealing*.

Pada penelitian ini dikembangkan suatu model pembelajaran aturan *fuzzy* dengan Penelusuran Tabu (*tabu search*). *Tabu search* digunakan untuk mengontrol kecepatan motor induksi secara *on-line* pada beban dinamis (berubah-ubah). Sasaran dari penelitian ini adalah memperbaiki kekurangan dari kontroler logika *fuzzy* konvensional. Teknik optimasi ini diharapkan agar aturan dasar (*rule base*) kontroler logika *fuzzy* dapat mengatur dirinya sendiri secara otomatis ketika terjadi perubahan parameter beban sehingga kecepatan motor induksi tetap konstan.

Hasil simulasi yang telah dicapai dalam bentuk grafik dan analisis menunjukkan bahwa penggunaan *tabu search algorithm* pada kontroler logika *fuzzy* untuk pengaturan kecepatan motor induksi mampu memberikan kriteria performansi yang tinggi. Respon dari kinerja motor induksi yang ditampilkan cukup bagus, seperti *rise-time* dan *settling-time* cepat, serta *overshoot*, *undershoot* dan *steady state error* mendekati nol.

1.2. Rumusan Masalah

- Bagaimana kinerja sistem kontrol motor induksi yang dirancang setelah menggunakan teknik optimasi *Tabu Search* pada kondisi sistem yang dinamis.
- Seberapa efektifnya metode yang dikembangkan dalam penelitian ini dalam memperbaiki kelemahan sistem kontroler logika *fuzzy* secara konvensional.

1.3. Tujuan Penelitian

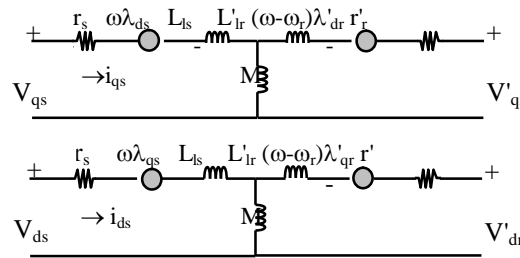
Penelitian ini bertujuan untuk :

- mengembangkan suatu metode pembelajaran aturan *fuzzy* dengan metode yang lebih adaptif terhadap perubahan dinamika sistem.
- memperbaiki performansi hasil kontrol motor induksi agar respon sistem terlihat lebih *smooth*.

II. LANDASAN TEORI

2.1. Pemodelan Motor Induksi

Menurut Krause P.C., rangkaian ekivalen motor induksi tiga fasa pada koordinat D-Q adalah seperti terlihat pada gambar 1 di bawah.



Gambar 1. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Tiga Fasa Pada Koordinat D-Q

Menurut Ion Boldea bahwa persamaan tegangan stator dan rotor motor induksi tiga fasa dalam koordinat A-B-C dengan $p=d/dt$, dapat dinyatakan dengan:

$$V_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad (1) \quad p \lambda_{abcs} = L_s i_{abcs} + L_m i_{abcr} \quad (3)$$

$$V_{abcr} = r_r i_{abcr} + p \lambda_{abcr} \quad (2) \quad p \lambda_{abcr} = L_r i_{abcr} + L_m i_{abcs} \quad (4)$$

Dengan transformasi dari sistem koordinat A-B-C ke sistem koordinat D-Q, maka persamaan tegangan untuk motor induksi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + p \lambda_{qs} + \omega \lambda_{ds} \quad (5) \quad V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + p \lambda'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} \quad (7)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + p \lambda_{ds} - \omega \lambda_{qs} \quad (6) \quad V'_{dr} = r'_r i'_{dr} + p \lambda'_{dr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} \quad (8)$$

Persamaan untuk fluksi adalah :

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (9) \quad \lambda'_{qr} = L'_{lr} i'_{qr} + L'_m (i'_{qr} + i_{qs}) \quad (11)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (10) \quad \lambda'_{dr} = L'_{lr} i'_{dr} + L'_m (i'_{dr} + i_{ds}) \quad (12)$$

Kopel elektromagnetik dari motor induksi dinyatakan dengan:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \bar{\lambda}_m \bar{i}_{qds} \quad (13) \quad T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\lambda_{md} i_{qs} - \lambda_{mq} i_{ds}) \quad (14)$$

Bentuk lain yang dapat dipakai adalah:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} L_m (i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}) \quad (15) \quad T_e - T_l = \frac{2J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \frac{2}{p} \omega_r \quad (16)$$

di mana T_l adalah torsi beban, p adalah jumlah kutub, J adalah momen inersia dan B_m adalah koefisien gesekan.

2.2. Teknologi Logika Fuzzy

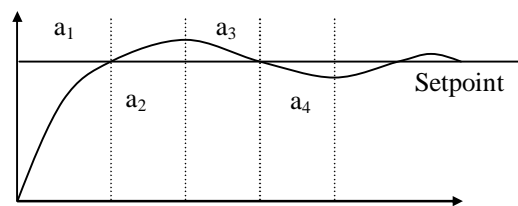
Konsep himpunan *fuzzy* sejak diperkenalkan oleh Prof. Lotfi Zadeh telah banyak menarik minat peneliti untuk diterapkan diberbagai bidang, seperti pengendalian proses, pengenalan pola, manajemen, pembuat keputusan. Penerapan teori himpunan *fuzzy* dalam bidang pengendalian (*Fuzzy Logic Controller*) telah terbukti banyak menyelesaikan masalah-masalah yang ditemui dalam bidang pengendalian..

2.3. Pembelajaran Aturan Fuzzy

Aturan dasar kontrol *fuzzy* (*rule base*) suatu kontroler logika *fuzzy* merupakan kumpulan aturan-aturan kontrol sebagai acuan untuk menyatakan aksi kontroler. Aturan tersebut disusun berdasarkan pengamatan atau perkiraan terhadap respon dinamik sistem. Untuk menentukan *rule base* digunakan metode pendekatan secara heuristik dengan melakukan pengamatan respon terhadap masukan, kemudian dengan naluri keteknikan (*engineering science*) ditentukan *rule base* kontroler logika *fuzzy* yang sesuai.

Respon sistem dibagi menjadi 4 area seperti ditunjukkan pada gambar 2 (a,b,c). Indeks digunakan untuk menganalisa respon area dengan tujuan meningkatkan resolusi dari tingkah laku sistem, identifikasi kecepatan dari respon sistem disekitar *setpoint* yang ditunjukkan pada gambar 2 (a) didefinisikan sebagai berikut:

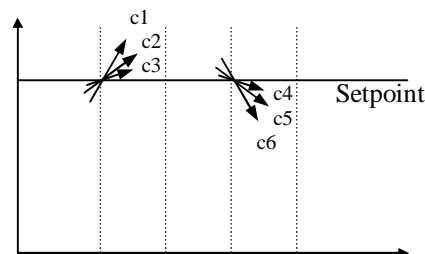
- a_1 : $e > 0$ dan $\Delta e < 0$
- a_2 : $e < 0$ dan $\Delta e < 0$
- a_3 : $e < 0$ dan $\Delta e > 0$
- a_4 : $e > 0$ dan $\Delta e > 0$



Gambar 2 (a). Identifikasi Kecepatan Dari Respon Sistem

Indeks *crossover* untuk mengidentifikasi slope dari respon sistem disekitar *setpoint* seperti ditunjukkan pada gambar 2 (b) didefinisikan dengan :

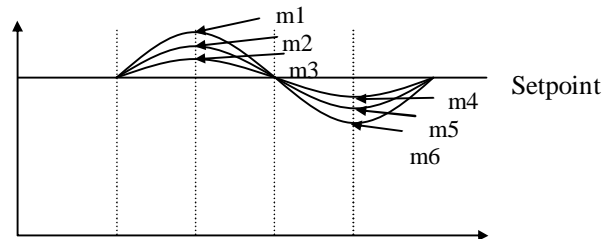
- $c1$: ($e > 0$ atau $e < 0$) dan $\Delta e \lll 0$
- $c2$: ($e > 0$ atau $e < 0$) dan $\Delta e \ll 0$
- $c3$: ($e > 0$ atau $e < 0$) dan $\Delta e < 0$
- $c4$: ($e < 0$ atau $e > 0$) dan $\Delta e > 0$
- $c5$: ($e < 0$ atau $e > 0$) dan $\Delta e \gg 0$
- $c6$: ($e < 0$ atau $e > 0$) dan $\Delta e \ggg 0$



Gambar 2 (b) Identifikasi Slope Dari Respon Sistem

Sedangkan indeks yang menyatakan perluasan *overshoot* dan *undershoot* seperti terlihat pada gambar 2 (c) didefinisikan dengan :

- m1 : $\Delta e \cong 0$ dan $e \lll 0$
- m2 : $\Delta e \cong 0$ dan $e \ll 0$
- m3 : $\Delta e \cong 0$ dan $e < 0$
- m4 : $\Delta e \cong 0$ dan $e > 0$
- m5 : $\Delta e \cong 0$ dan $e \gg 0$
- m6 : $\Delta e \cong 0$ dan $e \ggg 0$



Gambar 2 (c). Identifikasi *Overshoot* dan *Undershoot* Dari Respon Sistem

2.4. Struktur Dasar Kontroler Logika Fuzzy

Kontroler logika *fuzzy* dikategorikan dalam kontrol cerdas (*intelligent control*). Berbeda dengan sistem kontrol biasa, di mana harga yang dihasilkan diolah dan didefinisikan secara pasti, atau dengan istilah lain hanya mengenal logika ‘0’ dan ‘1’ atau bekerja pada daerah ON dan OFF, sehingga didapatkan perubahan yang kasar. Pada sistem logika *fuzzy*, nilai yang berada antara ‘0’ dan ‘1’ dapat didefinisikan, sehingga kontroler dapat bekerja seperti sistem syaraf manusia yang bisa merasakan lingkungan eksternalnya, yakni “kurang”, “agak”, “biasa”, dan “sangat” atau bahkan pengaburannya bisa lebih dari kategori tersebut.

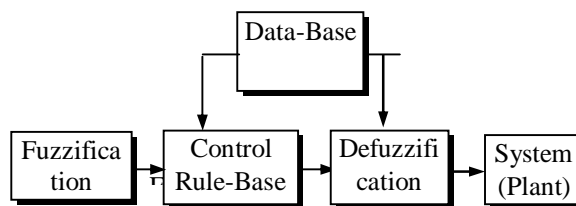
IF (A_1) THEN (B_1)

 IF (A_n) THEN (B_n)

A_1, \dots, A_n adalah *antecedent*, yaitu masukan yang telah difuzzyfikasi, sedangkan B_1, \dots, B_n adalah *consequent*, yaitu aksi kontrol (keluaran). Hubungan antara *antecedent* dan *consequent* disebut aturan (*rule*).

Kontroler yang berbasis logika *fuzzy* harus melalui beberapa tahapan sebelum sampai ke *plant*. Tahapan-tahapan tersebut antara lain : Kuantisasi, Fuzzifikasi, Penentuan rule base dan *Inference (reasoning)*, kemudian Defuzzifikasi.

Struktur dasar kontroler logika *fuzzy* ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Struktur Dasar Kontroler Logika Fuzzy

2.5. Tabu Search Algorithm

Teknik pembelajaran dengan metode *tabu search* (penelusuran tabu) adalah salah satu teknik optimasi yang telah dikembangkan oleh para ahli ilmu rekayasa, seperti teknik optimasi yang sudah kita kenal dengan baik antara lain algoritma genetika. *Tabu Search* (TS) memberikan suatu pendekatan berbeda, masalah dapat dipecahkan sebagai suatu masalah optimasi kombinatorial yang didefinisikan oleh suatu pasangan (F, E) di mana F adalah *finite set* dari *point admissible* (konfigurasi) dan E adalah fungsi *cost* untuk minimisasi (juga dikenal error).

Untuk menjelaskan algoritma, kita akan pertimbangkan suatu penelitian bidang F yang berisi semua deretan biner dari panjang L dan suatu set dari *elementary moves* $\{\mu_i | i = 1..L\}$ di mana pengaruh dari masing-masing *move* μ_i ini untuk komplemen ke *i* deret biner $f = [f_1, \dots, f_i, \dots, f_L]$ dan $\mu_i([f_1, \dots, f_i, \dots, f_L]) = [f_1, \dots, \bar{f}_i, \dots, f_L]$

Algoritma TS diusulkan pertama kali oleh Glover pada tahun 1989. Algoritma ini didasari oleh dua komponen utama :

- suatu penelitian dengan banyak perubahan
- suatu *meta-strategy* untuk menghindari batas putaran/lintasan (*limit cycles*).

Pada masing-masing langkah dalam proses penelitian, dipilih langkah algoritma terbaik diantara kumpulan dari langkah dasar. Langkah terbaik adalah langkah yang menunjukkan nilai E terkecil. Perbedaan dengan suatu standar penelitian yang lainnya adalah bahwa langkah terbaik juga dipergunakan jika suatu konfigurasi menunjukkan *error* lebih besar pada arus tersebut.

III. METODELOGI PENELITIAN

3.1. Pemodelan Kontroler Logika Fuzzy

Di dalam merancang kontroler logika *fuzzy*, yang perlu diperhatikan adalah variabel input (masukan) *error* (e) dan perubahan / *delta error* (Δe), dinyatakan dalam persamaan berikut

$$e(k) = sp - y(k) \quad (17) \quad \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (18)$$

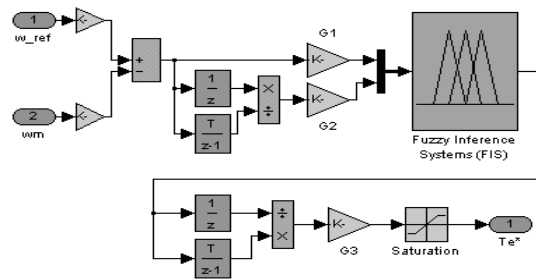
di mana sp adalah *Set Point* (kecepatan referensi 'ω-ref') dan y adalah keluaran (*output*) sistem, sedangkan k dan k-1 adalah kejadian urutan dari pencuplikan data sistem.

Pada kasus pengaturan kecepatan motor induksi, himpunan semesta pembicaraan meliputi *error* kecepatan dan perubahan atau *delta error* kecepatan, yang dinyatakan dalam persamaan (17) dan (18). Sedangkan semesta pembicaraan dari aksi kontrol adalah torsi referensi yang didefinisikan sebagai berikut :

$$\Delta Te^*(k) = Te^*(k) - Te^*(k-1) \quad (19)$$

di mana $Te^*(k)$ adalah torsi referensi, dan ΔTe^* adalah perubahan torsi referensi pada urutan sampling ke-k.

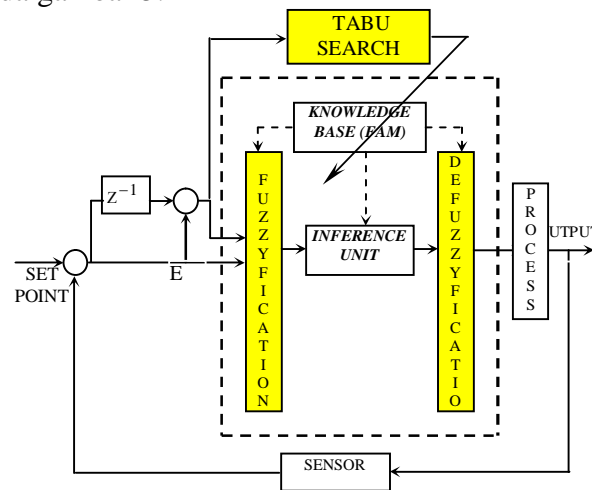
Secara keseluruhan blok kontroler logika *fuzzy* dapat dimodelkan seperti gambar 4.



Gambar 4. Pemodelan Kontroler Logika Fuzzy

3.2. Rancangan Pembelajaran Aturan Fuzzy menggunakan Tabu Search

Blok diagram pembelajaran aturan fuzzy dengan menggunakan teknik optimasi tabu search ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Proses Pembelajaran Aturan Fuzzy Dengan Metode Tabu Search

Fungsi keanggotaan (*membership function*) yang digunakan dalam penelitian ini adalah fungsi keanggotaan *gaussian*, *product inference rule* dan *center average defuzzification*, maka persamaan sinyal keluarannya adalah sebagai berikut :

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l \left[\prod_{i=1}^N a_i^l \exp \left(- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l} \right)^2 \right) \right]}{\sum_{l=1}^M \left[\prod_{i=1}^N a_i^l \exp \left(- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l} \right)^2 \right) \right]} \quad (20)$$

di mana,

M : banyaknya aturan fuzzy

σ_i^l : lebar fungsi keanggotaan

N : banyaknya masukan

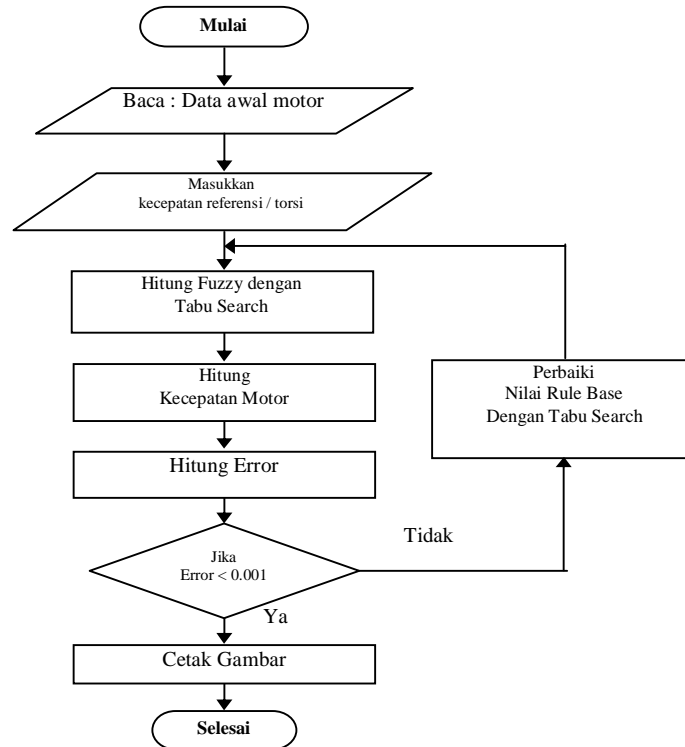
\bar{y}^l : titik tengah fungsi keanggotaan dikeluarkan

\bar{x}_i^l : titik tengah fungsi keanggotaan

a_i^l diasumsikan sama dengan 1

3.3. Proses Pembelajaran Aturan Dasar *Fuzzy* Menggunakan Metode *Tabu Search*

Diagram alir proses pembelajaran aturan dasar *fuzzy* dengan menggunakan metode *tabu search* yang dikembangkan oleh Adiarta Agus, 2002 adalah sebagai berikut :



Gambar 6. Diagram alir metode *Tabu Search*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

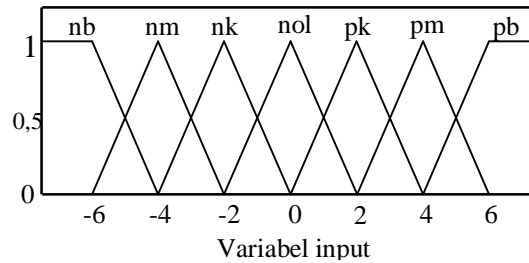
4.1. Rancangan Aturan Dasar *Fuzzy*

Untuk menentukan aturan dasar (*rule base*) *fuzzy* digunakan metode pendekatan secara heuristic. Dengan melakukan pengamatan respon terhadap masukan kemudian dengan naluri keteknikan (*engineering science*) ditentukan *rule base* kontroler logika *fuzzy* yang sesuai seperti ditunjukkan pada tabel 1.

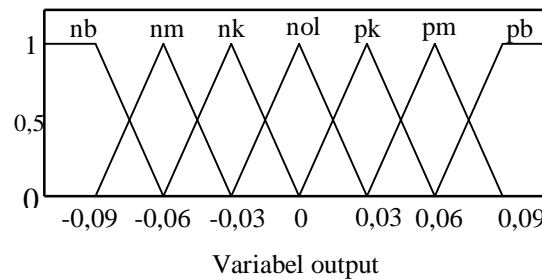
Tabel 1. Rule Base Kontroler Logika *Fuzzy*

$E \setminus \Delta E$	nb	nm	nk	nol	pk	Pm	pb
nb	Nb	nb	nb	nb	nm	Nk	nol
nm	nb	nb	nm	nm	nk	Nol	pk
nk	nb	nm	nk	nk	nol	Pk	pm
nol	nb	nk	nk	nol	pk	Pk	Pm
pk	nm	Nk	nol	pk	pk	pm	pb
pm	nk	nol	Pk	pm	pm	pb	pb
pb	nol	Pk	Pm	pb	pb	pb	pb

Metode yang digunakan pada kontroler logika *fuzzy* ini adalah metode statik, artinya sifat fungsi keanggotaan (*membership function*) bekerja dengan rentang kerja (*range*) tetap, yaitu antara -6 sampai dengan 6 untuk variabel input, dan antara $-0,09$ sampai dengan $0,09$ untuk variabel output.



Gb 6-1 Fungsi keanggotaan variabel input



Gb. 6-2 Fungsi keanggotaan variabel output

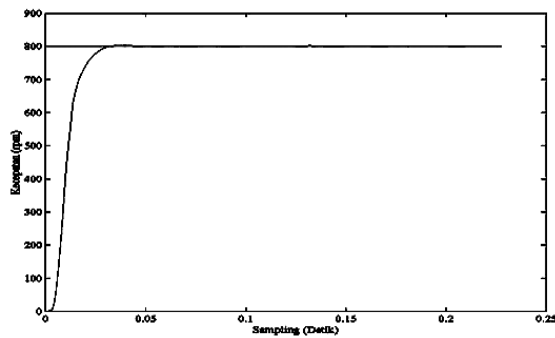
Error dan *delta error* yang terjadi selama sistem dioperasikan, terlebih dahulu dikuantisasi atau dipetakan melalui interpolasi biasa menjadi *error* terkuantisasi (Q_e) dan *delta error* terkuantisasi (dQ_e). Pengkuantisasian melalui interpolasi bertujuan untuk memetakan *error* dan *delta error* ke dalam semesta pembicaraan. Rentang kerja yang telah ditetapkan tersebut dibagi menjadi tujuh tingkat kuantisasi dengan variabel linguistik, yaitu negatif besar (nb), negatif menengah (nm), negatif kecil (nk), nol (nol), positif kecil (pk), positif menengah (pm), positif besar (pb). Penentuan rentang kerja tersebut harus sefleksibel mungkin agar sistem mampu melakukan *tracking setpoint* dengan baik.

4.2 Hasil Simulasi

Ketangguhan (*robust*) model yang dirancang diuji pada 3 (tiga) kondisi dinamik, yaitu simulasi kecepatan (*setpoint*) tetap 800 rpm, perubahan *setpoint* dari 800 rpm ke 1000 rpm, dan simulasi dengan pemberian torsi beban ($T = 0,5$ Nm). Pada masing-masing kondisi tersebut diamati dan dianalisis kinerja motor induksi seperti : *settling time*, *maximum overshoot*, *rise time* dan *steady state error*.

4.2.1. Analisa Kondisi *Setpoint* Tetap

Pada kondisi ini, model yang dirancang diuji dalam kondisi *setpoint* tetap 800 rpm. Respon system seperti pada gambar 7.



Gambar 7. Respon kecepatan motor induksi kondisi *setpoint* tetap

Hasil pengujian dan respon seperti terlihat pada gambar 7 menunjukkan bahwa :

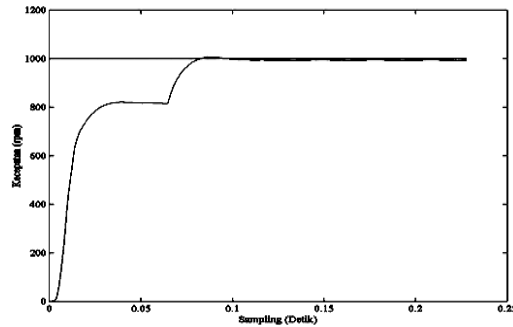
- Kecepatan (RPM) = 800 rpm
- *Settling Time* = 0.02605 detik
- *Rise Time* = 0.01815 detik
- Mov = 0.46892 %
- *Error* = 0.10291 rpm
- *Error Steady State* = 0.012864%

4.2.2. Analisa Kondisi Perubahan *Setpoint*

Pada kondisi ini, model yang dirancang diuji melalui perubahan *setpoint* dari 800 rpm ke 1000 rpm pada posisi *sampling time* 0,06 detik. Respon sistem seperti pada gambar 8.

Hasil pengujian dan respon seperti terlihat pada gambar 8 menunjukkan bahwa:

- Kecepatan I (RPM) = 800 rpm
- Kecepatan II(RPM) = 1000 rpm
- *Settling Time* = 0.07715 detik
- *Rise Time* = 0.06865 detik
- Mov1 = 0.70226 %
- Mov2 = 0.40868 %
- *Error* = 5.9903 rpm
- *Error Steady State* = 0.59903



Gambar 8. Respon Kecepatan Motor Induksi Kondisi *Perubahan Setpoint*

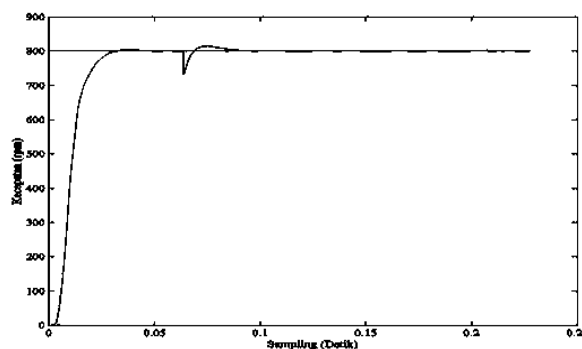
Sistem yang dikembangkan ini memiliki kemampuan mengontrol kecepatan terhadap perubahan kecepatan atau perubahan *setpoint* dengan baik, dengan waktu pencapaian *setpoint* dan *settling time relatif cepat*, *overshoot* dan *undershoot* kurang dari 1 % , serta *steady state error* mendekati nol.

4.2.3. Analisa Kondisi Berbeban

Pada kondisi ini, model yang dirancang diuji dengan memasukkan torsi beban 0,5 Nm pada posisi *sampling time* 0,07 detik. Respon sistem seperti ditunjukkan pada gambar 9.

Hasil pengujian dan respon seperti terlihat pada gambar 9 menunjukkan bahwa :

- Kecepatan (RPM) = 800 rpm
- *Settling Time* = 0.0668 detik
- *Rise Time* = 0.0182 detik
- *Mov* = 1.8548 %
- *Error* = -1.5316 rpm
- *Error Steady State* = 0.19145 %



Gambar 9. Respon Kecepatan Motor Induksi Kondisi Berbeban

Respon sistem yang dirancang memiliki kemampuan mengatasi perubahan torsi beban secara tiba-tiba, dengan waktu pemulihan (*restore time*) kembali ke posisi *setpoint* relatif cepat, serta *error* kecepatan mendekati nol.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan terhadap penggunaan kontroler logika *fuzzy* dengan aturan dasar menggunakan metode *tabu search* di dalam pengaturan kecepatan motor induksi, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari simulasi kondisi *setpoint* tetap terlihat bahwa model kontroler yang dikembangkan mampu memberikan kriteria performansi sistem kontrol yang tinggi. *Rise time* dan *settling time* relatif cepat, *overshoot* relatif kecil dan *steady state error* mendekati nol.
2. Untuk kondisi perubahan *setpoint* dari 800-1000 rpm *rise time* dan *settling time* yang ditunjukkan relatif cepat, *overshoot* dan *steady state error* masih perlu ditekan.
3. Pada kondisi berbeban, kontroler *Neuro Fuzzy* mampu mengatasi perubahan *plant* dengan kembali ke posisi *setpoint* dengan cepat.

5.2. Saran

Maximum overshoot untuk model yang dikembangkan ini perlu ditekan lagi melalui pembenahan pada proses *learning* (pembelajaran) aturan *fuzzy*. Untuk mengatasi kelemahan ini maka proses *learning* pada model yang dikembangkan ini perlu disempurnakan.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Adiarta Agus, “ Pengaturan Kecepatan Motor Induksi menggunakan Pembelajaran Aturan *Fuzzy* dengan Penelusuran Tabu” *Master Thesis*, ITS Surabaya, 2002
- [2] Chang-Ming Liaw and Jin-Biaw Wang, “Design and Implementation of *Fuzzy* Controller for a High Performance Induction Motor Drive”, *IEEE Transaction on System. Man and Cybernetics*. Vol. 21. No. 4, 1991
- [3] Ion Boldea and syed A. Nasar, “ *Vector Control of AC Driver*”, CRC Press. Inc, 1993
- [4] J. Lee, “On Methods for Improving Performance of PI-Type *Fuzzy* Logic Controller”, *IEEE Transaction Fuzzy Sets Systems*. Vol 1. pp 298-301, 1993
- [5] Krause.P.C ” *Analysis of Electrical Machinery*”, Mc. Graw Hill 1987
- [6] Maurizio Denna, Giancarlo Mauri, and Anna Maria Zanaboni, ”Learning *Fuzzy* Rules with Tabu Search An Application to Control,” *IEEE, Transactions On Fuzzy Systems*, Vol. 7, No. 2, April 1999, pp. 295-318.
- [7] Ramon A. Gallego, Ruben Romero, and Alcir J. Monticelli, “Tabu Search Algorithm for Network Synthesis,” *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol. 15, No. 2, May 2000, pp. 490-495.
- [8] Sugeno and T. Yasukawa, “A *Fuzzy*-Logic Approach to Qualitative Modeling”, *IEEE Transaction Fuzzy Systems*. vol. 1. pp 7-31, 1991
- [9] Sutawinaya, I Putu, ” *Simulasi Penggunaan Kontroler Logika Fuzzy Untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi*”, LOGIC, volume 6 no. 1. PNB, Denpasar, Mei 2006