

PEMODELAN SISTEM KONTROLER LOGIKA FUZZY PADA PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI MENGUNAKAN PERANGKAT LUNAK MATLAB / SIMULINK

I Wayan Raka Ardana¹, I Putu Sutawinaya²

^{1,2}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bali

¹rakawyn@pnb.ac.id

Abstrak: Salah satu kelemahan penggunaan kontroler konvensional PID pada pengaturan kecepatan motor induksi adalah kesulitan di dalam menentukan nilai parameter (*gain*) yang sesuai. Untuk menutupi kelemahan itu, pada riset ini peneliti mengembangkan suatu sistem kontrol yang berbasis teknologi logika fuzzy. Kontroler logika fuzzy ditengarai dapat bekerja dengan respon yang cepat dan performansi yang cukup bagus. Dari simulasi yang dibuat menggunakan Simulink, diperoleh hasil bahwa sistem kontroler logika fuzzy mampu memperbaiki kinerja pengaturan kecepatan motor induksi dengan memperkecil lonjakan dan waktu pemulihan untuk mencapai *setpoint*.

Kata kunci: Motor Induksi, Kontroler Logika Fuzzy, Matlab, Simulink.

Abstract: One disadvantage of using conventional PID controllers in the induction motor speed adjustment is the difficulty in determining the appropriate parameter (*gain*) values. To cover this weakness, in this research we develop a control system based on fuzzy logic technology. The fuzzy logic controller is considered to work with fast response and good performance. From the simulation that has been made using Simulink, it achieved that fuzzy logic controller system can improve the performance of induction motor speed regulation by minimizing spikes and recovery time to reach the *setpoint*.

Keywords: Induction Motor, Fuzzy Logic Controller, Matlab, Simulink.

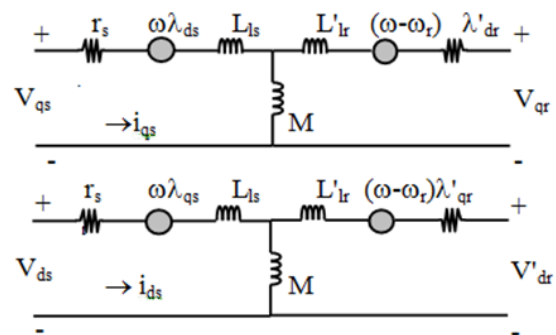
I. PENDAHULUAN

Motor induksi banyak digunakan di industri-industri karena kokoh, relatif murah, perawatannya mudah serta handal. Namun bila bebannya berubah-ubah maka kecepatan motor menjadi tidak konstan, hal ini menjadi kelemahan motor induksi bila dibandingkan dengan motor dc yang memiliki kecepatan relatif konstan terhadap perubahan beban. Untuk mengatasi kelemahan itu dibutuhkan suatu rangkaian kontroler.

Kontroler PID (Proportional-Integral-Derivative) merupakan kontroler konvensional yang umum digunakan di dalam pengaturan kecepatan motor induksi. Kelemahan kontroler ini adalah sulit menentukan (menala) nilai gain K_p , K_i dan K_d yang sesuai agar diperoleh kinerja motor yang bagus. Untuk mengatasi kelemahan kontroler tersebut, serta memperbaiki kinerja rangkaian pengaturan kecepatan motor induksi, maka dikembangkan suatu metode kontrol menggunakan teknologi logika fuzzy.

Beberapa studi tentang pengendalian motor induksi telah dikembangkan pada referensi [1-7] yang menjadi acuan pada penelitian ini. Pada penelitian ini dirancang suatu pemodelan pengaturan kecepatan motor induksi menggunakan kontroler logika fuzzy. Model diaplikasikan melalui suatu simulasi pemodelan perangkat lunak (*software*) menggunakan fasilitas Simulink dan *Power System Blockset* dari MATLAB. Adapun model matematis motor induksi dan struktur kontroler logika fuzzy yang dikembangkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Menurut Krause P.C., rangkaian ekuivalen motor induksi tiga fasa pada koordinat D-Q adalah seperti terlihat pada Gambar 1 berikut [4].



Gambar 1. Rangkaian ekuivalen 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 Persamaan [2].

$$V_{abc} = r_s i_{abc} + p \lambda_{abc} \quad (1)$$

$$V_{abr} = r_s i_{abr} + p \lambda_{abr} \quad (2)$$

dengan :

$$p \lambda_{abc} = L_s i_{abc} + L_s i_{abc} \quad (3)$$

$$p \lambda_{abr} = L_r i_{abc} + L_r i_{abr} \quad (4)$$

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

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + p \lambda_{qs} + \omega \lambda_{ds} \quad (5)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + p \lambda_{ds} - \omega \lambda_{qs} \quad (6)$$

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + p \lambda'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} \quad (7)$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} + p \lambda'_{dr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} \quad (8)$$

Persamaan untuk fluksi adalah :

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

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

$$\lambda'_{qr} = L'_{lr} i'_{qr} + L'_m (i'_{qs} + i'_{qr}) \quad (11)$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{lr} i'_{dr} + L'_m (i'_{ds} + i'_{dr}) \quad (12)$$

Kopel elektromagnetik dari motor induksi dinyatakan dengan:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \bar{\lambda}_m \bar{i}'_{qds} \quad (13)$$

Dalam komponen D-Q dinyatakan dengan:

$$T_e = \frac{3p}{2} (\lambda_{md} i_{qs} - \lambda_{mq} i_{ds}) \quad (14)$$

Bentuk lain yang dapat dipakai adalah:

$$T_e = \frac{3p}{2} L_m (i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}) \quad (15)$$

Persamaan gerak elektromekanis dari motor induksi adalah:

$$T_e - T_l = \frac{2J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \frac{2}{p} \omega_r \quad (16)$$

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

p = Jumlah pasang kutub

M = Induktansi gandeng (H)

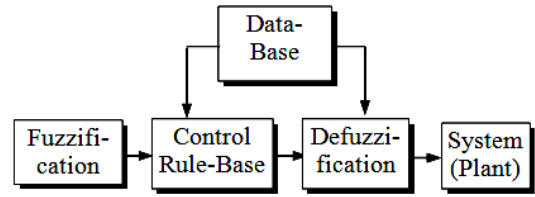
i_{dr} = Arus rotor pada sumbu d (A)

i_{qs} = Arus stator pada sumbu q (A)

i_{qr} = Arus rotor pada sumbu q (A)

i_{ds} = Arus stator pada sumbu d (A)

Kontroler logika fuzzy dikategorikan dalam kontrol cerdas (*intelligent control*). Unit logika fuzzy memiliki kemampuan menyelesaikan masalah perilaku sistem yang kompleks, yang tidak dimiliki oleh kontroler konvensional. Struktur dasar kontroler logika fuzzy ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur dasar logika fuzzy

a. Fuzzifikasi

Di dalam proses fuzzifikasi, terjadi konversi variabel *crisp* ke dalam variabel fuzzy melalui teknik fungsi keanggotaan, dengan *error* dan *delta error* dipetakan ke dalam rentang kerja semesta pembicaraan melalui persamaan berikut:

$$Qe(k) = G_1 * e(k) \quad (17)$$

$$\Delta Qe(k) = G_2 * \Delta e(k) \quad (18)$$

b. Membership Function

Membership Function (fungsi keanggotaan) himpunan fuzzy merupakan fungsi untuk menyatakan keanggotaan dari suatu nilai-nilai. Ada beberapa bentuk fungsi keanggotaan antara lain bentuk segitiga (*Triangular function*), trapesium (*Trapezoidal function*).

c. Fuzzy Implication

Pada umumnya aturan-aturan fuzzy dinyatakan dalam bentuk logika *IF-THEN* yang merupakan dasar relasi fuzzy. Relasi fuzzy (R) dalam basis pengetahuan fuzzy didefinisikan sebagai fungsi implikasi fuzzy (*fuzzy implication*). Beberapa fungsi implikasi fuzzy ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Beberapa tipe fungsi implikasi fuzzy

Nama	Operator Implikasi $\phi[\mu_A(x), \mu_B(y)] =$
Zadeh Max-Min	$(\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)) \vee (1 - \mu_A(x))$
Mamdani Min	$\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)$
Larsen Product	$\mu_A(x) \cdot \mu_B(y)$
Arithmetic	$1 \wedge (1 - \mu_A(x) + \mu_B(y))$
Boolean	$(1 - \mu_A(x)) \vee \mu_B(y)$

d. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan kebalikan dari proses transformasi sebuah himpunan fuzzy ke dalam himpunan tugas. Metode defuzzifikasi yang umum digunakan adalah *Centre of Gravity (COG)* *defuzzification* yang didefinisikan sebagai berikut :

$$y = \frac{\sum_{j=1}^R c^j \int \mu_{\hat{U}^j}(u) du}{\sum_{j=1}^R \int \mu_{\hat{U}^j}(u) du} \quad (19)$$

dengan:

- y = nilai keluaran (*output*)
- c^j = nilai tengah dari keluaran fungsi keanggotaan ke-j
- $\mu_{\hat{c}^j}(u)$ = keluaran fungsi keanggotaan
- \hat{U}^j = fuzzy set
- R = jumlah aturan (*rule*)

Hasil simulasi yang telah dicapai menunjukkan bahwa dengan kontroler logika fuzzy mampu menekan penurunan kinerja motor terhadap perubahan beban maupun kecepatan di bawah 1 % bila dibandingkan dengan penggunaan kontroler konvensional (PID). Sistem kontrol yang dikembangkan ini mampu memenuhi kriteria performansi sistem yang tinggi.

II. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, peneliti membuat simulasi sistem kontrol dengan membuat rancangan sistem kontrol logika fuzzy menggunakan fasilitas fuzzy logic Simulink pada perangkat lunak Matlab. Sedangkan pemodelan motor induksi tiga fasa diambil dari fasilitas *power system blockset* perangkat lunak Matlab tersebut sebagai *tools* dalam rancangan yang dikembangkan ini.

Adapun rancangan sistem kontrol logika fuzzy diawali dengan membuat rancangan aturan dasar fuzzy kemudian mem-set ke dalam pemodelan sistem kontrol logika fuzzy yang dikembangkan sebagai berikut:

2.1. Proses Aturan Dasar Fuzzy

Aturan dasar (*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 ditentukan *rule base* kontroler logika fuzzy yang sesuai.

2.2. Pemodelan Kontroler Logika Fuzzy

Dalam merancang kontroler logika fuzzy, perlu diperhatikan variabel input (masukan) *error* (e) dan *delta error* (Δe) yang dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$e(k) = sp - y(k) \tag{20}$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \tag{21}$$

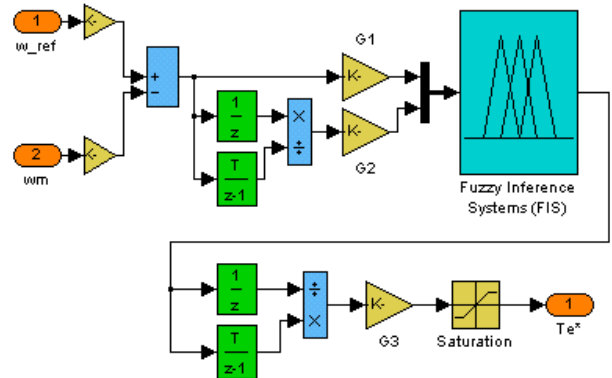
di mana sp adalah *setpoint* (kecepatan referensi ‘ ω -ref’) dan y adalah keluaran (*output*) sistem, sedangkan k dan $k-1$ adalah kejadian urutan dari pencuplikan data sistem.

Pada kasus pengaturan kecepatan motor induksi, himpunan semesta pembicaraan meliputi *error* kecepatan dan perubahan atau *delta error* kecepatan,

yang dinyatakan dalam Persamaan (20) dan (21). Sedangkan semesta pembicaraan dari aksi kontrol adalah torsi referensi yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\Delta Te^*(k) = Te^*(k) - Te^*(k-1) \tag{22}$$

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 3.



Gambar 3. Pemodelan kontroler logika fuzzy

Dalam penelitian ini, peneliti mengamati beberapa parameter dari hasil atau respon simulasi yang ditunjukkan sistem kontrol yang dikembangkan ini, antara lain : *overshoot*, *undershoot*, *rise time* dan *settling time* dari kondisi perubahan kecepatan (*setpoint*) dan kondisi penambahan beban sesaat.

Hasil simulasi dari beberapa parameter yang ditunjukkan dilakukan analisis dan dibandingkan dengan hasil simulasi (respon) sistem kontrol PID yang telah dikembangkan pada penelitian sebelumnya [8-10].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

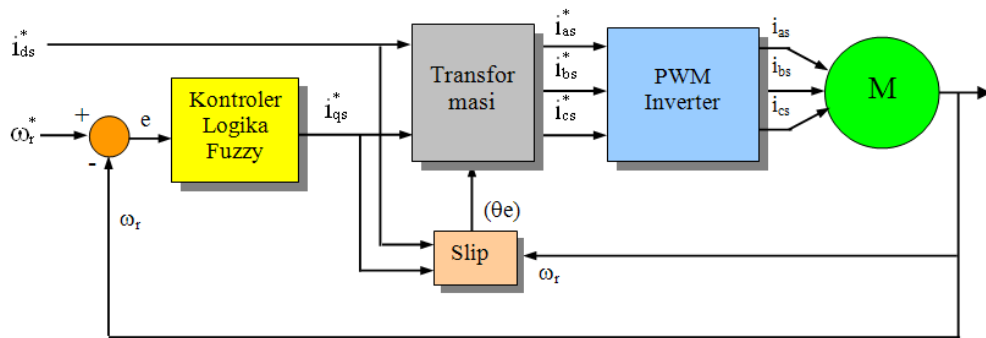
3.1. Simulasi Kontroler Logika Fuzzy

Untuk menentukan *rule base* digunakan metode pendekatan secara heuristik dengan melakukan pengamatan respon terhadap masukan, kemudian dengan naluri keteknikan ditentukan *rule base* kontroler logika fuzzy yang sesuai. Secara lengkap *rule base* kontroler logika fuzzy yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. *Rule base* kontroler logika fuzzy

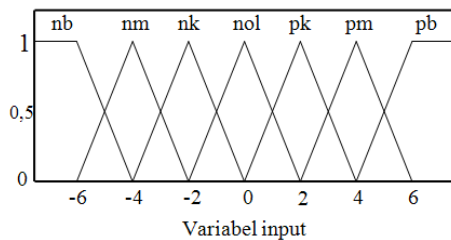
$E \backslash \Delta E$	<i>nb</i>	<i>nm</i>	<i>nk</i>	<i>nol</i>	<i>pk</i>	<i>pm</i>	<i>pb</i>
<i>Nb</i>	<i>nb</i>	<i>Nb</i>	<i>nb</i>	<i>nb</i>	<i>Nm</i>	<i>nk</i>	<i>nol</i>
<i>Nm</i>	<i>nb</i>	<i>Nb</i>	<i>nm</i>	<i>nm</i>	<i>Nk</i>	<i>nol</i>	<i>pk</i>
<i>Nk</i>	<i>nb</i>	<i>Nm</i>	<i>nk</i>	<i>nk</i>	<i>nol</i>	<i>pk</i>	<i>pm</i>
<i>nol</i>	<i>nb</i>	<i>Nk</i>	<i>nk</i>	<i>nol</i>	<i>pk</i>	<i>pk</i>	<i>pm</i>
<i>pk</i>	<i>nm</i>	<i>Nk</i>	<i>nol</i>	<i>pk</i>	<i>pk</i>	<i>pm</i>	<i>pb</i>
<i>pm</i>	<i>nk</i>	<i>Nol</i>	<i>pk</i>	<i>pm</i>	<i>pm</i>	<i>pb</i>	<i>pb</i>
<i>pb</i>	<i>nol</i>	<i>Pk</i>	<i>pm</i>	<i>pb</i>	<i>pb</i>	<i>pb</i>	<i>pb</i>

Blok diagram sistem pengaturan kecepatan motor induksi ditentukan menggunakan kontroler logika fuzzy sesuai dengan Gambar 4.

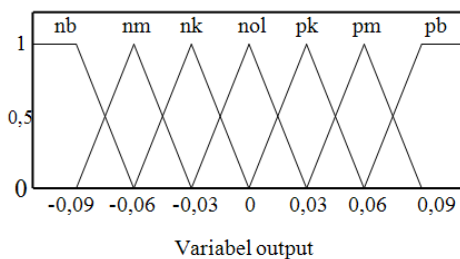


Gambar 4. Blok sistem kontrol motor induksi menggunakan logika fuzzy

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 masukannya (variabel input), dan antara $-0,09$ sampai dengan $0,09$ untuk keluarannya (variabel output) [6]. Penentuan rentang kerja tersebut harus fleksibel agar sistem mampu melakukan *tracking setpoint* dengan baik. Variabel input dan output *membership* ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6.



Gambar 5. Fungsi keanggotaan variabel input



Gambar 6. Fungsi keanggotaan variabel output

$$i_T = \frac{L_r}{pM^2 i_M} T_r^* \quad (23)$$

dengan: i_T = arus torsi (A), dan
 i_M = arus medan (A)

Error dan *delta error* yang terjadi selama sistem dioperasikan, terlebih dahulu dikuantisasi atau dipetakan melalui interpolasi biasa menjadi *error* terkuantisasi (Qe) dan *delta error* terkuantisasi (dQe).

Pengkuantisasian melalui interpolasi bertujuan untuk memetakan *error* dan *delta error* ke dalam semesta pembicaraan, dengan rentang kerja yang telah ditetapkan tersebut yang 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).

Adapun data motor induksi tiga fasa yang digunakan pada simulasi sistem kontrol ini adalah sesuai blok parameter pada *power system blockset* dari Simulink Matlab sebagai berikut :

- Jenis motor : induksi 3 fasa
- Tipe rotor : squirrel cage
- Daya nominal : 5×746 VA
- Tegangan nominal : 220 Volt
- Frekuensi nominal : 60 Hz
- Kumparan stator : $(0,6 + j1,9 \times 10^{-3}) \Omega$
- Rotor sangkar : $(0,412 + j1,9 \times 10^{-3}) \Omega$
- *Mutual inductance* : $41,5 \times 10^{-3} \Omega$
- Faktor gesekan : 0,058/0,0032
- Jumlah kutub : 2 pasang

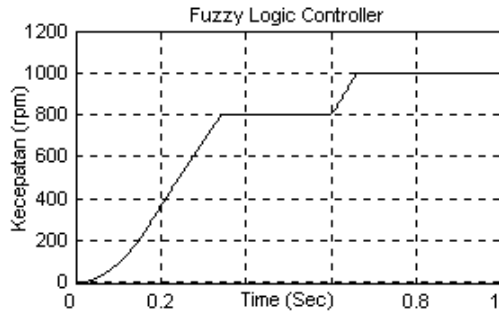
3.2. Respon Kecepatan dan Analisa

Simulasi program dilakukan pada dua kondisi dinamik, yaitu simulasi perubahan kecepatan (*setpoint*), dan simulasi dengan pemberian torsi beban (berbeban). Pada masing-masing kondisi tersebut, diamati dan dianalisis kinerja motor induksi seperti *overshoot*, *undershoot*, *rise time*, *settling time* dan *steady state error* melalui tampilan karakteristik kecepatan motor induksi pada blok "Scope [rpm]".

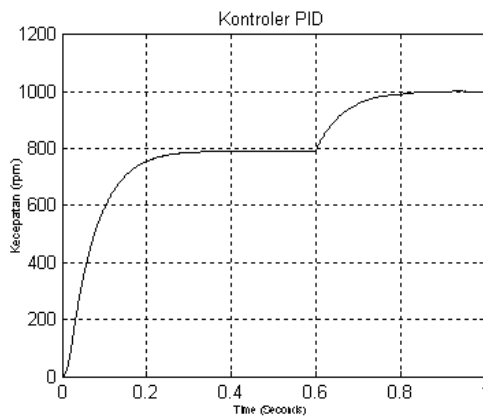
Untuk menguji kemampuan dan keterandalan (*reliable*) model yang dikembangkan, maka respon sistem untuk penggunaan kontroler logika fuzzy yang dirancang, dibandingkan dengan kontroler konvensional (kontroler PID) seperti yang telah dikembangkan pada penelitian sebelumnya. Dimana respon sistem pada seting kedudukan set point tetap 1000 rpm hampir tidak terjadi penurunan pencapaian *setpoint* [7].

3.2.1. Simulasi Perubahan Kecepatan

Pada kondisi ini, model yang dibuat diuji melalui perubahan kecepatan (*setpoint*), yaitu dari kecepatan 800 rpm ke 1000 rpm setelah simulasi berjalan 0,6 detik (dalam kondisi *steady state*) tanpa beban (beban nol). Hasil unjuk kerja dari pengaturan kecepatan motor induksi untuk perubahan kecepatan dari 800 rpm menjadi 1000 rpm adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



(a) Menggunakan Kontroler Logika Fuzzy



(b) Menggunakan Kontroler PID

Gambar 7. Simulasi Perubahan Kecepatan

Pada penelitian ini, respon sistem yang diamati dan dianalisis hanya saat *setpoint* 1000 rpm. Adapun performa sistem yang ditunjukkan adalah sebagai berikut:

- a) Menggunakan kontroler logika fuzzy (Gambar 7.a)
- *Overshoot* : 0,014 %
 - *Rise time* : 0,32 detik
 - *Settling time* : 0,34 detik
 - *Error* kecepatan : ≈ 0
- b) Menggunakan kontroler PID (Gambar 7.b)
- *undershoot* : 0,25 %
 - *Rise time* : 0,39 detik
 - *Settling time* : 0,42 detik
 - *Error* kecepatan : 1,1 rpm

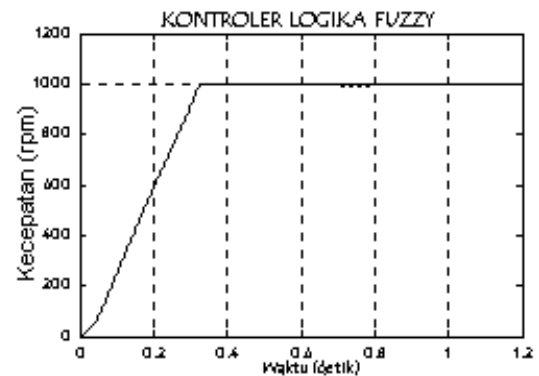
Berdasarkan hasil pengujian dari respon kecepatan motor induksi tersebut dapat kita analisis bahwa kontroler logika fuzzy yang dikembangkan ini memiliki kemampuan mengontrol kecepatan terhadap

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.

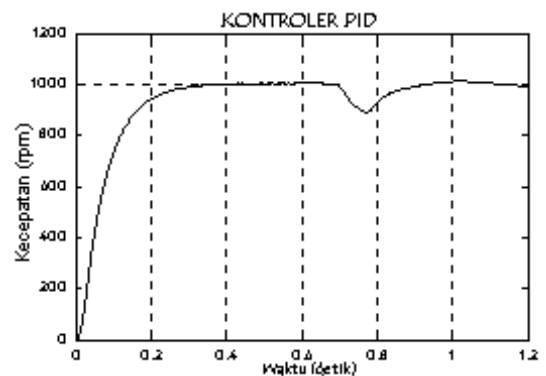
3.2.2. Simulasi Berbeban

Pada kondisi ini, model yang dibuat diuji dengan memasukkan torsi beban maksimum (19,8 N.m) sesaat selama $t = 0,07$ detik setelah sistem dalam keadaan mantap (*steady state*) pada kedudukan *setpoint* 1000 rpm. Simulasi dimulai dari kecepatan awal motor 0 rpm hingga mencapai kedudukan *setpoint*, dengan waktu sampling mulai dari 0 sampai 1,2 detik.

Hasil unjuk kerja dari pengaturan kecepatan motor induksi untuk kondisi berbeban sesaat adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Dalam hal ini, kondisi yang diamati dan dianalisis adalah respon sistem pada saat torsi beban maksimum (TL = 19,8 N.m) mulai dimasukkan, yaitu pada $t = 0,7$ detik hingga sistem kembali ke kedudukan *setpoint* (stabil). Adapun performa sistem yang ditunjukkan pada Gambar 8.



a) Menggunakan Kontroler Logika Fuzzy



a) Menggunakan Kontroler PID

Gambar 8. Simulasi Kondisi Berbeban

- a) Menggunakan kontroler logika fuzzy (Gambar 8.a)
- *Undershoot* (995,3 rpm) : 0,47 %
 - *Rise time* : 0,01 detik
 - *Settling time* : 0,08 detik

- *Steady state error* : 0,8 rpm
- b). Menggunakan kontroler PID (Gambar 8.b)
- *Undershoot* (890,2 rpm) : 10,98 %
 - *Rise time* : 0,30 detik
 - *Settling time* : 0,45 detik
 - *Steady state error* : 1,1 rpm

Berdasarkan hasil pengujian dari respon kecepatan motor induksi pada kondisi pembebanan sesaat dapat kita analisis bahwa respon kecepatan yang diperoleh dengan menggunakan kontroler logika fuzzy lebih baik dibandingkan dengan respon kecepatan bila rangkaian simulasi menggunakan kontroler PID. Terlihat bahwa kontroler logika fuzzy memiliki kemampuan mengatasi perubahan torsi beban secara tiba-tiba dengan waktu pemulihan (*recovery time*) kembali ke posisi *setpoint* relatif cepat, serta *error* kecepatan mendekati nol.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian sistem dan analisis terhadap penggunaan kontroler logika fuzzy untuk mengontrol kecepatan motor induksi yang dikembangkan dalam penelitian ini, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pada kondisi sistem yang diuji melalui perubahan kecepatan (*setpoint*) dari 800 rpm ke 1000 rpm, respon sistem kontroler logika fuzzy yang dikembangkan ini menunjukkan bahwa sistem mampu menekan *overshoot* dan *steady state error* mendekati nol, serta *rise time* dan *settling time* relatif cepat.
2. Pada kondisi sistem yang diuji melalui pemberian beban (torsi beban) sesaat pada kondisi sistem stabil (*steady state*) terlihat bahwa sistem kontroler logika fuzzy yang dikembangkan ini menunjukkan bahwa sistem relatif stabil dengan kembali pada kedudukan (*setpoint*) semula dalam waktu relatif cepat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada staf Lab. Mikroprosesor & Sistem Kontrol, Politeknik Negeri Bali serta editor Jurnal Matrix.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ba-Razzouk, A., Cheriti, A., Olivier, G. & Sicard, P. (1997). Field-oriented control of induction motors using neural-network decouplers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 12(4), 752-763.
- [2] Heber, B., Xu, L. & Tang, Y. (1997). Fuzzy logic enhanced speed control of an indirect field-oriented induction machine drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 12(5), 772-778.
- [3] Zhen, L. I. & Xu, L. (1996). On-line fuzzy tuning of indirect field oriented induction machine drives. *Applied Power Electronics Conference and Exposition 1996*, 369-374.
- [4] Zhen, L. & Xu, L. (2000). Fuzzy learning enhanced speed control of an indirect field-oriented induction machine drive. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(2), 270-278.
- [5] Rose, T.J. (2010). *Fuzzy logic with engineering application*. New York: John Wiley & Sons Ltd.
- [6] Ardana, I W. R. (2013). Simulasi sistem kontroler PID untuk motor induksi menggunakan perangkat lunak matlab/simulink. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 7(2).
- [7] Wahjono, E. (2016). Pengaturan kecepatan motor induksi sebagai penggerak mobil listrik dengan kontroler fuzzy logic berbasis direct torque control. *Jurnal Ilmiah Mikrotek*, 1(3), 136-144.
- [8] Nirali, R. & Shah, S. K. (2011). Fuzzy decision based soft multi agent controller for speed control of three phase induction motor. *Transformation*, 2(3).
- [9] Tianur, T., Happyanto, D. C., Gunawan, A. I. & Widodo, R. T. (2011). Kontrol kecepatan motor induksi menggunakan metode PID-fuzzy. *EEPIS Final Project*.
- [10] Putri, R. I. & Fauziyah, M. (2010). Implementasi kontroler neural fuzzy pada pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa. *Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi (SNATI)*.