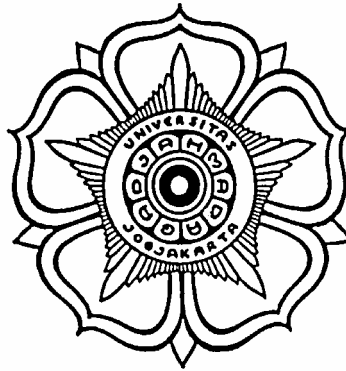


FUZI ADAPTIF
DENGAN PENALAAAN FUNGSI KEANGGOTAAN
(Adaptive Fuzzy with Membership Function Tuning)
PADA PENGENDALI KECEPATAN MOTOR DC
BERBASIS MIKROKONTROLER AT89C52

MAKALAH
TUGAS AKHIR



Disusun Oleh:
DWI ASTA
96/108919/TK/20870

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS GADJAH MADA

2002

Judul: Fuzi Adaptif dengan Penalaan Fungsi Keanggotaan (*Adaptive Fuzzy with Membership Function Tuning*) pada Pengendali Kecepatan Motor DC Berbasis Mikrokontroler 89C52

Author: Dwi Asta; Ir. Bambang Sutopo, M.Phil; Ir. Oyas Wahyunggoro, M.T.

Abstract

At speed control of DC motor, proven that integral fuzzy algorithm has performance better than proportional fuzzy algorithm. This research is used to find the way to increase performance of proportional fuzzy algorithm so it can be equaled with integral fuzzy algorithm. In this research, it's used adaptation method for both input and output membership function.

Changing the scale of the membership function twice is the adaptation of input membership function, so the resolution increases twice. For the output membership function, tuning the values of the membership function is the method of adaptation. It also use fuzzy algorithm, thus there are 2 fuzzy algorithm in this controller (cascade fuzzy algorithm).

The result of this research shows that using the adaptation can increase the performance of the proportional fuzzy controller. Rise time become faster and also the steady state error become much smaller than without adaptation.

Intisari

Pada pengendalian kecepatan motor DC, terbukti bahwa algoritma fuzi integral mempunyai unjuk kerja yang lebih baik dibandingkan dengan algoritma fuzi proporsional biasa. Penelitian ini dilakukan untuk mencari cara meningkatkan kemampuan algoritma fuzi proporsional sehingga setara dengan algoritma fuzi integral. Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah adaptasi terhadap fungsi keanggotaan baik untuk masukan maupun keluaran.

Pengadaptasian fungsi keanggotaan masukan dilakukan dengan mengubah skala fungsi keanggotaan masukan menjadi 2 kali lipat, sehingga resolusi meningkat 2 kali lipat. Adaptasi fungsi keanggotaan keluaran dilakukan dengan penalaan terhadap nilai-nilai fungsi keanggotaan keluaran. Algoritma yang digunakan adalah algoritma fuzi, sehingga terdapat 2 algoritma fuzi dalam pengendali ini (fuzi bertingkat).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan adaptasi dapat meningkatkan unjuk kerja pengendali fuzi proporsional. Waktu bangkit lebih cepat ditambah pula tanggapan steady state dengan galat yang dapat ditekan menjadi jauh lebih kecil dari saat tanpa adaptasi.

Pendahuluan

Perkembangan sistem fuzi semakin meningkat dengan semakin beragamnya algoritma fuzi yang ditawarkan baik yang masih murni maupun yang telah dikombinasikan dengan algoritma dan sistem yang lain. Perkembangan ini tidak lepas dari keinginan untuk memperoleh pengendali dengan keandalan yang lebih tinggi namun dengan peralatan yang lebih minimal dibandingkan dengan pengendali sebelumnya (mis. PID). Pengendali ini biasa juga disebut *Fuzzy Logic Controller* (FLC).

FLC dapat digolongkan ke dalam tipe proporsional dan integral sesuai hubungan sistem dan keluarannya. Dalam beberapa artikel dijelaskan bahwa tipe integral memiliki unjuk kerja yang lebih baik dari tipe proporsional. Penelitian ini ditujukan untuk meningkatkan unjuk kerja FLC tipe proporsional dengan pengadaptasian khususnya penalaan terhadap nilai dari fungsi-fungsi keanggotaan yang dimilikinya.

Penelitian ini menggunakan motor DC sebagai *plant* dengan mengatur kecepatan putarnya. Hal ini tidak lepas dari kemudahan dan bervariasinya motor DC dalam pengendaliannya serta torsi yang dimilikinya cukup besar.

Tinjauan Pustaka

Teori himpunan individu dapat memiliki derajat keanggotaan dengan nilai yang kontinyu, bukan hanya 0 dan 1 (Zadeh, 1965).

Sistem fuzi (*fuzzy system*) merupakan sistem berdasar pengetahuan (*knowledge-based system*) atau berdasar aturan (*rule-based system*). Bagian utama sistem fuzi adalah dasar pengetahuan yang terdiri atas aturan-aturan JIKA-MAKA fuzi (Wang, 1997).

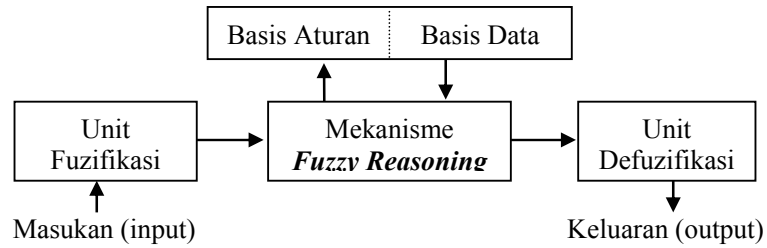
Prosedur operasional pengendali logika fuzi mengecek peubah-peubah masukan e dan Δe pada proses pengaburan sehingga keluaran logika fuzi (*actuating signal*) dibentuk untuk menentukan besarnya masukan kendali sistem (u) agar dapat tercapai tujuan pengendalian (Man, 1997).

Suatu design FLC sering tidak memberikan unjuk kerja yang memuaskan disebabkan perubahan-perubahan proses secara dinamis, sehingga parameter design inisial seperti himpunan fuzi, fungsi keanggotaan, semesta wacana dan aturan kendali perlu dimodifikasi dan diatur untuk mendapatkan hasil yang diharapkan (Yan, 1994).

Dasar Teori

A. Pengendali Logika Fuzi

Pengendali fuzi secara umum merupakan pengendali kalang tertutup. Struktur dasar pengendali logika fuzi terdiri dari unit fuzifikasi, mekanisme penentuan keputusan dan basis aturan (*inference system*), dan unit defuzifikasi.



Gambar 1. Struktur dasar pengendali logika fuzi.

Fuzifikasi adalah proses pemetaan dari variabel masukan ke dalam himpunan fuzi dalam suatu semesta wacana.

$$\text{Persamaan: } X = \text{fuzifier}(X_0) \quad (1)$$

X_0 merupakan vektor masukan himpunan tegas, x adalah vektor himpunan fuzi hasil proses fuzifikasi, dan *fuzifier* adalah operator fuzifikasi.

Inferensi fuzi digunakan untuk merumuskan pemetaan himpunan input ke himpunan output dengan prinsip logika fuzi (aturan Jika-Maka). Teknik *reasoning* untuk menentukan nilai yang akan digunakan sebagai masukan aksi kendali yang tepat.

$$\text{MAX-MIN : } \mu_{B'}(y) = \max_{i=1}^M \left[\sup_{x \in U} \min \left(\mu_{A'}(x), \mu_{A_1'}(x_1), \dots, \mu_{A_n'}(x_n), \mu_{B'}(y) \right) \right] \quad (2)$$

$$\text{MAX-DOT : } \mu_{B'}(y) = \max_{i=1}^M \left[\sup_{x \in U} \left(\mu_{A'}(x), \prod_{i=1}^n \mu_{A_i'}(x_i) \mu_{B'}(y) \right) \right] \quad (3)$$

Defuzifikasi didefinisikan sebagai proses pemetaan dari himpunan fuzi hasil inferensi ke dalam aksi kendali non fuzi. Metode yang sering digunakan dalam defuzifikasi adalah metode rerata maksimum (*mean of maximum/MOM*), metode rerata pusat (*center of average/COA*), metode rerata grafitasi (*center of gravity/COG*).

B. Sistem Mikrokontroler

Mikrokontroler merupakan sistem mikroprosesor untuk tujuan khusus dalam rangkaian terintegrasi (*chip*), yang terdiri dari *Central Processing Unit* (CPU), dan *Register* sebagai pemroses utama, sedangkan *Read only Memory* (ROM), *Random Access Memory* (RAM), *Timer*, dan *Input/Output* (I/O).

Mikrokontroler AT89C52 diproduksi oleh ATMEL dan kompatibel dengan mikrokontroler standar industri MCS-52™. Mikrokontroler AT89C52 merupakan mikrokontroler CMOS dengan 8-bit yang berdaya rendah dan

dilengkapi dengan *Programmable and Erasable Read Only Memory* (PEROM) 8 K byte. Bagian lain dalam mikrokontroler AT89C52 adalah RAM 256 bytes, port I/O, *timer/counter* 16 bit, pengendali interupsi, pengendali bus, port serial *full duplex* dan *on-chip oscillator*.

C. Motor Arus Searah (DC)

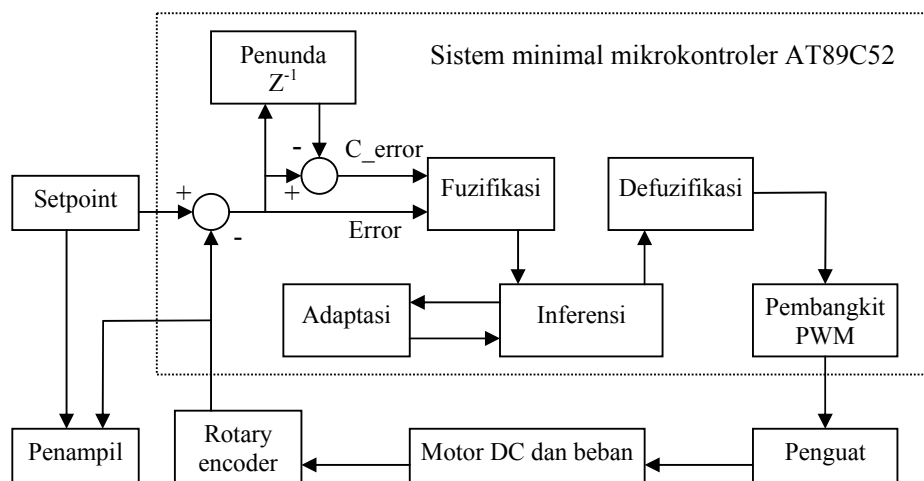
Motor arus searah (DC) berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, dalam hal ini energi listrik yang diubah adalah listrik arus searah atau DC (*Direct Current*). Prinsip kerja motor arus searah berdasarkan pada penghantar yang membawa arus dan ditempatkan pada suatu medan magnet maka penghantar tersebut akan mengalami gaya. Gaya tsb menimbulkan torsi yang akan menghasilkan rotasi mekanik, sehingga motor akan berputar.

Kecepatan putaran motor DC (N) dijelaskan melalui persamaan:

$$N = \frac{V_{TM} - I_A R_A}{K\Phi} \quad (4)$$

V_{TM} merupakan tegangan terminal, I_A arus jangkar motor, R_A adalah hambatan jangkar motor, K adalah konstanta motor, dan Φ merupakan fluks magnet yang terbentuk pada motor.

Implementasi



Gambar 2. Diagram kotak sistem pengendali kecepatan putaran motor DC

A. Perangkat Keras

Pada penelitian ini perangkat yang digunakan berbasis mikrokontroler AT89C52 didukung perlengkapan lain seperti unit penampil dan *keypad*, motor DC dan *rotary encoder*, serta pensuplai daya dan penguat.

Unit mikrokontroler AT89C52 merupakan sebuah sistem minimal mikrokontroler AT89C52 yang terdiri atas *chip* AT89C52, RAM eksternal 8 Kbyte (6264), PPI 8255 untuk perluasan port masukan/keluaran, dan IC MAX232 untuk kebutuhan komunikasi serial.

Tampilan menggunakan 4 buah tujuh segmen yang dilengkapi dengan *driver* berupa IC CMOS 4511 dengan masukan BCD. Masukan IC driver ini berasal dari port A PPI 8255 pada papan sistem minimal mikrokontroler

Plant adalah dua buah motor arus searah (10 – 105 volt dc; 1,25 A; 1000 – 8000 rpm) eksitasi sendiri dengan magnet tetap dan sebuah *rotary encoder*. Sebuah motor difungsikan sebagai penggerak (motor DC) dan sebuah motor difungsikan sebagai generator DC. Kedua motor dihubungkan melalui poros tunggal. Beban berupa gabungan dari generator DC dan rangkaian beban sebagai beban arus konstan. Beban arus konstan berfungsi sebagai beban terkuantisasi dari sistem pengendali kecepatan motor DC. *Rotary encoder* adalah rangkaian pengkonversi putaran ke frekuensi dalam bentuk pulsa.

Rotary encoder digunakan sebagai penghitung kecepatan motor DC yang menjadi masukan umpan balik bagi pengendali. *Rotary encoder* yang digunakan tipe OEW-02-2MHT dengan resolusi 200ppr.

Pensuplai daya untuk papan mikrokontroler berupa trafo dengan pengatur tegangan berupa IC 7805 dengan sebuah penguat transistor NPN 3055 yang juga akan mensuplai daya untuk unit penampil dan *keypad*.

Penguat dengan masukan tegangan dari luar untuk mencatu motor DC dengan sebuah *optocoupler* sebagai masukan dari papan mikrokontroler (PWM) dan dua buah transistor NPN 3055. Kedua transistor NPN 3055 dirangkai menjadi rangkaian darlington untuk *switching* tegangan catu untuk motor DC.

B. Perancangan Algoritma Fuzi

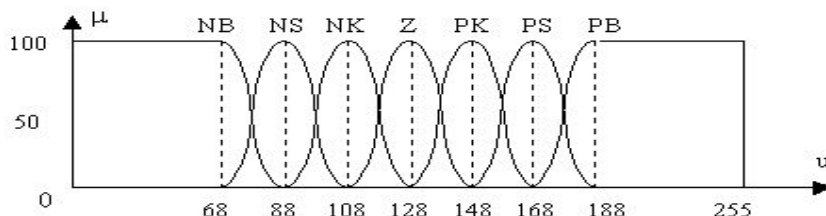
1. Perancangan Pengendali Logika Fuzi Fuzi

Pengendali logika fuzi dalam penelitian ini memiliki 2 buah masukan yaitu masukan yang berupa galat kecepatan (error) dan perubahan galat kecepatan (c_error). Semesta wacana untuk galat dan perubahan galat terbatas dalam 8 bit atau 0 sampai 255 dengan nilai 128 yang merepresentasikan 0 rpm.

Fungsi keanggotaan galat kecepatan dibentuk dari 7 himpunan keanggotaan (PB, PS, PK, Z, NK, NS, NB) yang berbentuk fungsi ' π '.

Tabel 1. Batas-batas fungsi keanggotaan galat kecepatan

Batas Keanggotaan (rpm)			Transformasi Fuzi			Kategori Keanggotaan
-2550	s.d.	-400	0	s.d.	88	NB
-600	s.d.	-200	68	s.d.	108	NS
-400	s.d.	0	88	s.d.	128	NK
-200	s.d.	200	108	s.d.	148	Z
0	s.d.	400	128	s.d.	168	PK
200	s.d.	600	148	s.d.	188	PS
400	s.d.	2550	168	s.d.	255	PB

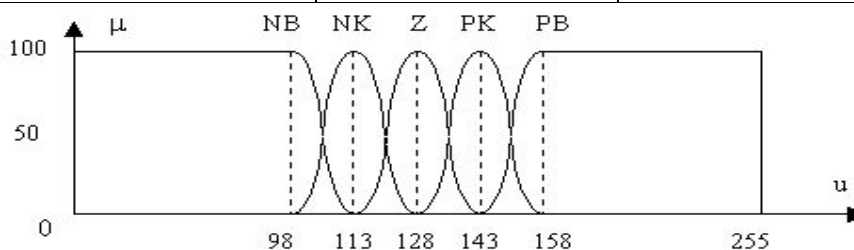


Gambar 3. Fungsi keanggotaan galat kecepatan

Fungsi keanggotaan perubahan galat kecepatan dibentuk dari 5 himpunan keanggotaan (PB, PK, Z, NK, NB) yang berbentuk fungsi ' π '.

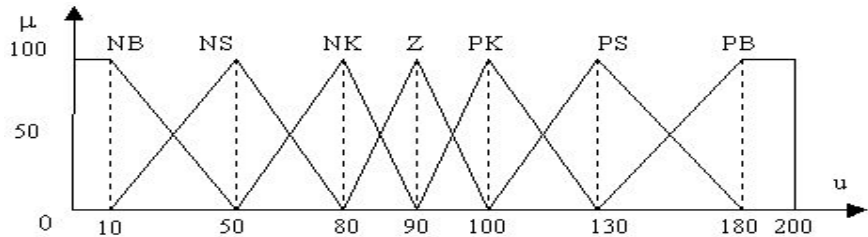
Tabel 2. Batas-batas fungsi keanggotaan perubahan galat kecepatan

Batas Keanggotaan (rpm)			Transformasi Fuzi		Kategori Keanggotaan	
...	s.d.	-750	0	s.d.	88	NB
-1500	s.d.	0	48	s.d.	128	NK
-750	s.d.	750	88	s.d.	168	Z
0	s.d.	1500	128	s.d.	208	PK
750	s.d.	...	168	s.d.	255	PB



Gambar 4. Fungsi keanggotaan perubahan galat kecepatan

Fungsi keanggotaan keluaran hanya menggunakan semesta wacana dari 0 (0 volt) sampai 200 (20 volt). Fungsi keanggotaan keluaran dibentuk dari 7 himpunan keanggotaan berbentuk fungsi 'T'.



Gambar 5. Fungsi keanggotaan keluaran

Basis aturan fuzi (fuzzy rule base) menggunakan aturan Jika-Maka (*If-Then*).

Tabel 3. Basis aturan fuzi

No	Error	C_error	Keluaran	Fungsi
1	PB	Z	PB	Memperpendek <i>rise time</i>
2	PS	Z	PB	
3	PK	Z	PK	
4	PB	NB	PS	
5	PB	NK	PB	
6	PS	NB	PK	
7	PS	NK	PS	
8	Z	NB	NS	Mengurangi <i>overshoot</i>
9	Z	NK	NK	
10	NB	Z	NB	
11	NS	Z	NS	
12	NK	Z	NK	
13	NB	PB	NS	
14	NB	PK	NB	
15	Z	PB	PS	Mengurangi osilasi
16	Z	PK	PK	
17	Z	Z	Z	Menghentikan sistem
18	PK	NB	Z	Menurunkan akselerasi
19	NK	PB	Z	
20	PK	NK	PK	Menepatkan pada <i>setpoint</i>
21	NK	PK	NK	
22	NS	PB	NK	Mempertinggi akselerasi
23	NS	PK	NS	
24	PK	PK	PS	Meredam <i>overshoot</i>
25	NK	NK	NS	
26	PK	PB	PB	
27	NK	NB	NB	
28	PB / PS	PB / PK	PB	Kompensasi pembebanan
29	NB / NS	NB / NK	NB	

Teknik reasoning yang digunakan untuk menentukan kuat penyulutan α (*fire strength*) dalam penelitian ini digunakan metode MAX-MIN. Sedangkan teknik defuzifikasi yang digunakan adalah rerata maksimum (*Mean of Maximum /MOM*).

$$y^* = \frac{\sum_{j=1}^n \alpha_j H_j W_j}{\sum_{j=1}^n \alpha_j H_j} \quad (6)$$

y^* adalah hasil defuzifikasi, H_j adalah ketinggian maksimum fungsi keanggotaan keluaran untuk aturan ke- j , W_j merupakan titik berat keanggotaan keluaran aturan ke- j , sedangkan α_j adalah kuat penyulutan (*fire strength*) pada aturan ke- j , dan n menunjukkan jumlah aturan kendali.

Keluaran yang akan mengaktifkan motor DC merupakan modulasi lebar pulsa (PWM) dengan periode penyaklaran sebesar 2,5 ms (frek. 400 Hz) dengan nilai kuantisasi 0 sampai 200 untuk duty cycle antara 0 sampai 1 dengan perubahan minimal 0,005 atau 0,5%.

2. Perancangan Adaptasi

Adaptasi yang dilakukan pada fungsi keanggotaan masukan yaitu dengan melakukan pengakuratan tanggapan sistem dengan masukan yang diharapkan. Caranya dengan melipatkan batas keanggotaan menjadi 2 kali lipat batas keanggotaan sebelumnya sehingga resolusi menurun dan lebih akurat 2 kalinya.

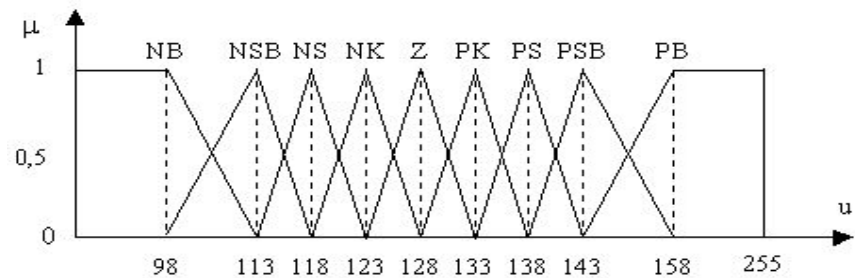
Tabel 4. Perubahan batas fungsi keanggotaan masukan saat adaptasi

Keanggotaan Fuzi			Adaptasi			Kategori
0	s.d.	88	0	s.d.	48	NB
68	s.d.	108	08	s.d.	88	NS
88	s.d.	128	48	s.d.	128	NK
108	s.d.	148	88	s.d.	168	Z
128	s.d.	168	128	s.d.	188	PK
148	s.d.	188	168	s.d.	248	PS
168	s.d.	255	188	s.d.	255	PB

Adaptasi terhadap fungsi keanggotaan keluaran dilakukan dengan penalaan terhadap fungsi keanggotaannya, atau berupa pergeseran pusat dari setiap himpunan keanggotaan. Tujuan dari adaptasi ini adalah untuk

mempercepat *rise time* tanggapan pada keadaan transiennya menuju ke keadaan *steady state*, juga diharapkan untuk memperbaiki kinerja sistem fuzi proporsional.

Pergeseran atau adaptasi dilakukan dengan algoritma fuzi pula dengan komponen masukan yaitu galat dan selisih perubahan galat kecepatan.



Gambar 6. Fungsi keanggotaan selisih perubahan galat kecepatan

Keluaran berupa perubahan nilai pusat himpunan keanggotaan dengan fungsi keanggotaan singleton..

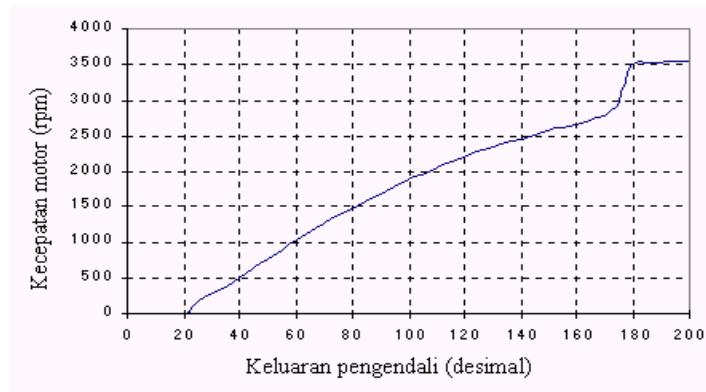
Proses reasoning dan defuzifikasi menggunakan teknik *windowing*.

Tabel 5. Teknik *windowing* untuk proses *reasoning* dan defuzifikasi

Perubahan		Selisih perubahan galat kecepatan								
Pusat Fuzi		PB	PSB	PS	PK	Z	NK	NS	NSB	NB
Galat kecepatan	PB	+6	+4	+2	+1	0	0	-1	-2	-4
	PS	+6	+4	+2	+1	0	0	-1	-2	-4
	PK	+6	+4	+2	+1	0	0	-1	-2	-4
	Z	+6	+4	+2	+1	0	-1	-2	-4	-6
	NK	+4	+2	+1	0	0	-1	-2	-4	-6
	NS	+4	+2	+1	0	0	-1	-2	-4	-6
	NB	+4	+2	+1	0	0	-1	-2	-4	-6

Pembahasan

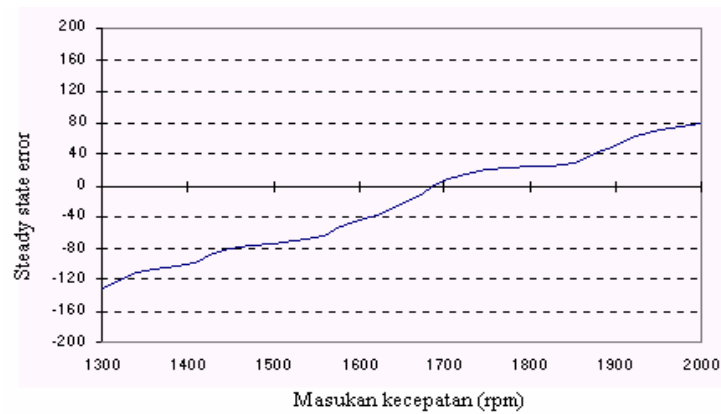
Pengujian pada *plant* yang berupa motor DC menunjukkan karakteristik motor yang ditunjukkan grafik dibawah mengenai hubungan kecepatan motor dengan keluaran mikrokontroler. Kecepatan motor DC berbanding lurus dengan keluaran pengendali (PWM). Motor mulai bergerak pada keluaran 20 atau *duty cycle* 10% dan meningkat drastis pada keluaran 170 (85%). Keadaan jenuh pada keluaran mulai 180 (90%) pada kecepatan 3500 rpm.



Gambar 7. Karakteristik motor DC

1. Pengendali Fuzi Proporsional tanpa Adaptasi

Pengendali tipe ini memberikan *steady state error* yang berfluktuasi yang ditunjukkan grafik :

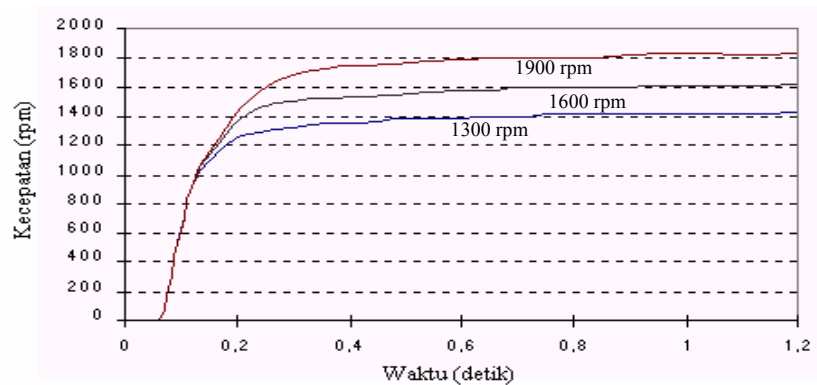


Gambar 8. *Steady state error* pada pengendali fuzi proporsional tanpa adaptasi

Steady state error sangat dipengaruhi oleh fungsi keanggotaan keluaran yang dimilikinya. Galat akan semakin besar bila kecepatan masukan semakin besar dibandingkan kecepatan *Zero*-nya dan semakin kecil bila masukan semakin kecil dari kecepatan *Zero*-nya.

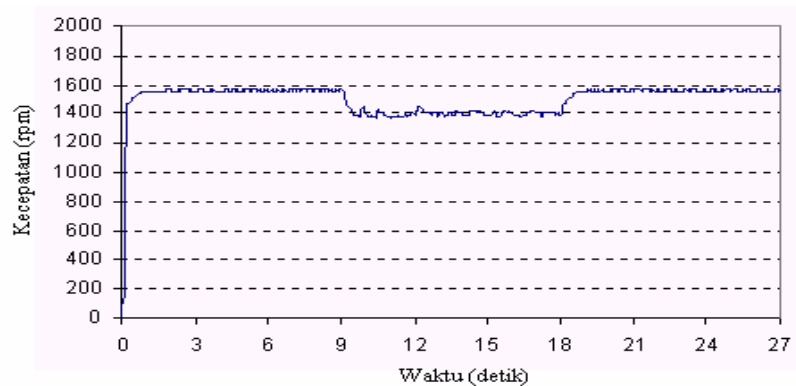
Tanggapan transien motor dengan pengendali ini memberikan hasil sesuai dengan gambar 9. yang ditunjukkan melalui beberapa masukan yaitu 1300, 1600, dan 1900 rpm.

Dari grafik terlihat tanggapan memiliki *settling time* 0,5 detik dan *rise time* berkisar dari 0,3 – 0,4 detik tanpa *overshoot*. Hanya saja keadaan *steady statenya* memiliki galat bervariasi dan cukup besar.



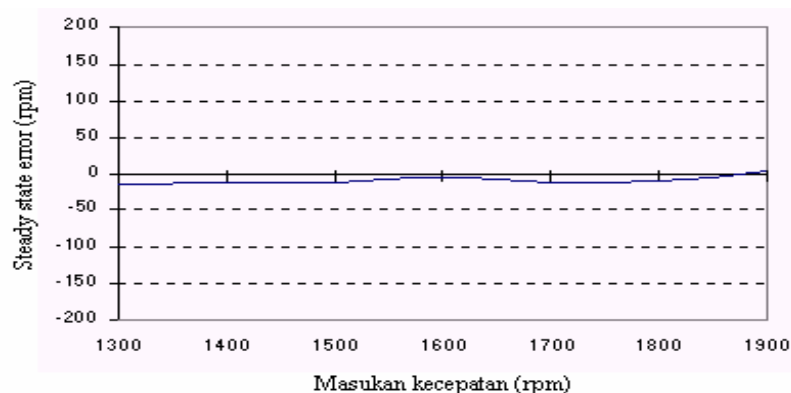
Gambar 9. Tanggapan transien motor DC untuk 3 masukan (1300, 1600, 1900 rpm)
Pada pengendali fuзи proporsional tanpa adaptasi

Pada keadaan dengan pembebanan pengendali tidak mampu menstabilkan kecepatannya sehingga *steady state error* semakin membesar. Pada keadaan ini kecepatan motor DC turun cukup besar seperti ditunjukkan grafik dengan masukan pengendali 1500 rpm.



Gambar 10. Tanggapan motor DC saat pembebanan dengan masukan 1500 rpm
Pada pengendali fuзи proporsional tanpa adaptasi

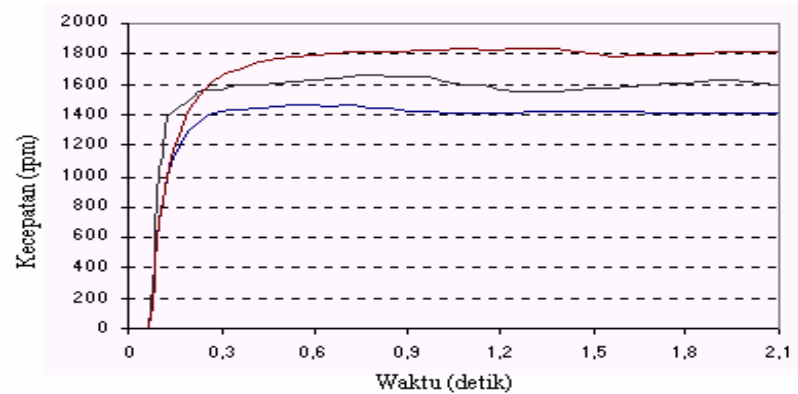
2. Pengendali Fuзи Proporsional dengan Adaptasi



Gambar 11. *Steady state error* pada pengendali fuзи proporsional teradaptasi

Pengendali ini mampu menekan keadaan *steady state error* pada tanggapan mendekati nol rpm. Keadaan ini disebabkan faktor adaptasi yang dimilikinya yang mengakibatkan perubahan letak nilai fungsi keanggotaan terutama nilai *Zero*-nya.

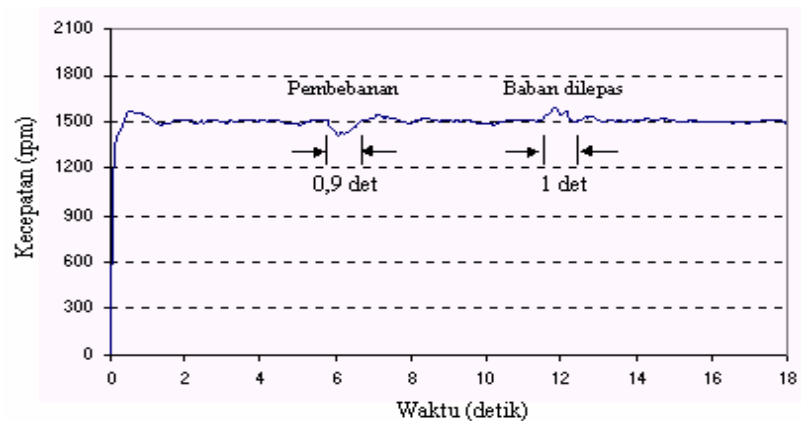
Keadaan diatas didukung tanggapan transien yang dimiliki, yang menunjukkan bahwa *settling time* dan *rise time* yang semakin meningkat walaupun keadaan *steady state*-nya bergelombang dengan sedikit *overshoot*.



Gambar 12. Tanggapan transien motor DC untuk 3 masukan (1400, 1600, 1800 rpm)
Pada pengendali fuзи proporsional teradaptasi

Rise time tanggapan sekitar 0,2 – 0,3 detik dan *settling time* bervariasi mulai 1 detik sampai 1,5 detik. *Overshoot* maksimal sampai 70 rpm.

Pada keadaan dengan pembebanan, pengendali tipe ini lebih dapat mengkompensasi pembebanan hingga mendekati masukan yang diharapkan. Hal ini ditunjukkan melalui grafik tanggapan motor untuk masukan 1500 rpm di bawah ini.



Gambar 13. Tanggapan motor DC saat pembebanan dengan masukan 1500 rpm
Pada pengendali fuзи proporsional teradaptasi

Pengujian dengan masukan 1500 rpm, saat beban diberikan pengendali mampu memperbaiki kestabilan dalam waktu sekitar 0,9 detik. Sedangkan pada saat beban dilepas tanggapan kembali pada kestabilannya dalam waktu berkisar 1 detik dengan *overshoot* maksimal 60 rpm.

Kesimpulan

1. Modulasi lebar pulsa (PWM) dengan perioda penyaklaran (*chopping*) sebesar 2,5 ms (400 Hz) dalam tegangan 20 volt dapat menggerakkan motor DC dengan rentang kecepatan 156 rpm sampai 3550 rpm jika diberi pulsa penyaklaran dengan rentang 11% sampai 99%. Pulsa penyaklaran dengan *duty cycle* 11% sampai 85% menghasilkan kecepatan linear dalam kisaran 156 rpm sampai 2700 rpm, dan meningkat tajam setelah 85%.
2. Pengendalian kecepatan putaran motor menggunakan algoritma fuzi dengan penalaan fungsi keanggotaan dapat diterapkan dengan hasil *rise time* 0,2 – 0,3 detik, *settling time* bervariasi 0,9 sampai 1,5 detik, *steady state error* $\pm 3\%$, dalam pengendalian tanpa beban.
3. Algoritma fuzi proporsional memberikan hasil pengendalian dengan *steady state error* yang besarnya sangat tergantung letak fungsi keanggotaan *Zero/nol* dalam keanggotaan fuzi-nya.
4. Adaptasi pada algoritma fuzi berupa penalaan fungsi keanggotaan dimaksudkan untuk menempatkan fungsi keanggotaan pada tempat yang tepat khususnya fungsi keanggotaan *Zero/nol* dengan beban komputasi yang cukup rendah.

Daftar Pustaka

Djarmiko, W., 2001, *Pengaturan Kecepatan Motor DC dengan Pengendali Chopper Berbasis FPGA*, Thesis S2 di TE UGM, Yogyakarta.

Elektuur, 1992, *Data Sheet Book 1, Data IC Linier, TTL dan CMOS*, Elex Media Komputindo, Jakarta.

Fitzgerald, A. E., Kingsley, C. Jr., Umans, S. D., 1986, *Mesin-mesin Listrik*, Erlangga, Jakarta.

MacKenzie, I. S., 1995, *The 8051 Microcontroller*, Prentice Hall, New Jersey.

Malik, I. M., Anistardi, 1997, *Bereksperimen Dengan Mikrokontroller 8031*, Elex Media Komputindo, Jakarta.

Steeman, J. P. M., 1989, *Data Sheet Book 2*, Elex media Komputindo, Jakarta.

Wahyunggoro, O., 2000, *Peningkatan Kinerja Penghendali Fuzi Integral terhadap Fuzi Proporsional untuk Mengendalikan Kecepatan Motor DC Berbasis PLC*, artikel dalam Media Elektro, UGM, Yogyakarta.

Wang, L. X., 1997, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice Hall, New Jersey.

Yan, J., Ryan, M., Power, J., 1994, *Using Fuzzy Logic: Toward Intelligent System*, Prentise Hall, London.

Data-data dari internet antara lain dari web site:

1. <http://www.pjrp.com>
2. <http://www.mitra.net.id/~wan/89C51.html> dan <http://www.mitra.net.id/~wan/89C52.html>