

Sistem Pengaturan Posisi *Spindle* Pada Mesin *Cnc Milling* Menggunakan Kontroler *Fuzzy-Pd*

Ahdiyat Darda', Moch. Rameli, dan Imam Arifin
 Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
 Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
 E-mail: rameli@ee.its.ac.id, arifin-i@ee.its.ac.id

Abstrak— Penentuan posisi *spindle* merupakan hal yang penting dalam penggunaan mesin *Computerized Numerical Control* (CNC). Hal ini disebabkan karena pada *spindle* terdapat mata bor yang merupakan komponen utama dalam pembentukan benda kerja. Penentuan posisi *spindle* memerlukan kecepatan, kestabilan dan keakuratan yang tinggi. Namun, kemampuan CNC untuk memenuhi kebutuhan tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor yang dapat mengurangi kualitas dari hasil mesin CNC. Faktor-faktor tersebut antara lain pembebanan akibat benda kerja, keausan mata bor, dan rancangan mekanik dari mesin CNC. Tugas akhir ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas mesin CNC. Hal tersebut dilakukan dengan meningkatkan keakuratan dan kecepatan respon servo motor pada CNC, karena servo motor memiliki peran untuk mengatur posisi dari mata bor yang sangat vital terhadap hasil dari mesin CNC. Metode yang digunakan adalah *Fuzzy-PD*. Kontroler *Fuzzy-PD* memiliki fleksibilitas dalam menghadapi kondisi mesin CNC yang dinamis. Selain itu, kontroler *Fuzzy-PD* memiliki kemampuan untuk beradaptasi dengan kesalahan yang terjadi dan tahan terhadap gangguan. Kontroler *Fuzzy-PD* terbukti dapat mengurangi *overshoot* hingga nol serta meningkatkan kecepatan respon hingga 8,27 detik.

Kata Kunci—posisi, *spindle*, CNC *milling*, servo motor, *Fuzzy-PD*

I. PENDAHULUAN

Pada awal perkembangannya, mesin CNC merupakan mesin yang tergolong langka dan sangat mahal harganya, akan tetapi saat ini penggunaan mesin CNC dalam dunia industri manufaktur cenderung semakin meluas. Hal ini disebabkan karena tuntutan produktivitas serta tuntutan kualitas produksi yang semakin meningkat dan harga mesin yang semakin murah.

Mesin CNC mempunyai beberapa kelebihan apabila dibandingkan dengan mesin perkakas konvensional yang digerakkan secara manual semi otomatis, antara lain ;Teliti (*Accurate*),mesin CNC memiliki ketelitian sampai 0,01 mm sedangkan mesin *Milling* konvensional memiliki ketelitian 0,1 mm. Cepat (*Productive*),mesin *Milling* CNC mampu memproduksi banyak dengan waktu singkat karena hanya sekali membuat program dapat menghasilkan banyak produk. Fleksibilitas, dapat mengerjakan berbagai bentuk benda kerja. Tepat (*Precision*), benda kerja yang dihasilkan mesin *Milling* CNC dimensinya mendekati dengan desain dari pada konvensional.

Saat ini pengaturan mesin CNC dilakukan secara otomatis. Sudah banyak diadakan penelitian tentang kontroler yang akan

diterapkan pada sistem servo yang terdapat pada CNC. Penelitian tersebut mengembangkan kontroler kecerdasan buatan, salah satunya adalah jaringan syaraf tiruan. Kontroler kecerdasan buatan mampu menyesuaikan parameternya dengan mesin yang diatur, mengoptimalkan performansi, dan mengurangi kesalahan *tracking*. Namun kontroler kecerdasan buatan membutuhkan komputasi dan juga struktur kontroler yang kompleks. Oleh karena itu, kontroler kecerdasan buatan sulit untuk mendapatkan keakurasian yang *real-time*. Akibatnya, kontroler kecerdasan buatan tidak cocok apabila diterapkan pada mesin CNC. Selain kontroler kecerdasan buatan, kontroler PD juga sering digunakan pada mesin CNC. Kontroler PD adalah kontroler yang sederhana, namun memiliki ketahanan yang baik sehingga kontroler PD lebih banyak digunakan pada mesin CNC. Namun, kontroler PD pada pengaturan posisi servo motor menunjukkan keterbatasannya ketika kontroler tersebut menyelesaikan kenaikan kebutuhan kepresisian dan keefisienan mesin CNC. Pada kontroler PD, kebutuhan akan respon yang cepat bertentangan dengan *overshoot* yang diinginkan, karena ketika dibutuhkan *overshoot* tertentu, respon akan semakin lambat, sedangkan *overshoot* akan tinggi jika respon dibuat cepat.[1]

Untuk menyelesaikan permasalahan pengaturan posisi, digabungkan kontroler PD dengan kontroler *Fuzzy*. Kelebihan dari kontroler PD yaitu dapat menghilangkan kesalahan waktu tunak dan meningkatkan kecepatan respon akan digabungkan dengan kelebihan kontroler *Fuzzy* yang memiliki desain yang sederhana, tidak membutuhkan model matematis yang akurat, dan dapat beradaptasi dengan ketidakstabilan dan variasi waktu. Pada mesin CNC, kontroler *Fuzzy* akan beradaptasi dengan kondisi dan kebutuhan mesin CNC sehingga mampu mengatur parameter-parameter kontroler PD. Dari gabungan antara kontroler *Fuzzy* dan kontroler PD tersebut, diharapkan kontroler dapat memenuhi kebutuhan dari mesin CNC.

II. PENGATURAN POSISI *SPINDLE* PADA MESIN CNC

A. *Computerized Numerical Control* (CNC)

Mesin CNC adalah mesin perkakas yang digunakan untuk mengikis, memotong, atau membentuk sebuah benda. Mesin CNC adalah pengembangan dari mesin perkakas yang menggunakan program dalam melakukan membentuk sebuah benda.

Pada penelitian Tugas Akhir ini, mesin CNC yang digunakan adalah mesin CNC *Milling*. Mesin CNC *Milling* digunakan untuk memotong, melubangi, atau membentuk benda kerja. Pada mesin CNC *milling* terdapat bagian yang berputar yang disebut dengan *spindle*. Pada *spindle* tersebut terdapat pisau pemotong atau biasa disebut dengan bor.

Dalam membentuk sebuah benda, mata bor mesin CNC *Milling* harus dapat bergerak sesuai dengan bentuk benda yang diinginkan. Oleh karena itu, mesin CNC memiliki tiga sumbu gerak. Ketiga sumbu tersebut adalah X, Y, dan Z. Sumbu X menunjukkan arah gerak ke kanan atau ke kiri. Sumbu Y menunjukkan arah gerak ke depan atau ke belakang. Sumbu Z menunjukkan arah gerak secara vertikal, ke atas atau ke bawah. Pergerakan sumbu ini dilakukan oleh motor servo yang terhubung pada mekanik dari mesin CNC. Oleh karena itu, pada mesin CNC perbaikan posisi dan kontur dilakukan dengan mengatur motor servo tersebut.

B. Motor Servo AC

Motor Servo AC merupakan motor AC 2 fasa yang memiliki satu fasa sebagai fasa referensi dan satu fasa kontrol. Motor Servo AC menghasilkan torsi yang disebut dengan T_m , torsi ini mendapat gangguan yang berlawanan arah oleh torsi gangguan T_w . Sedangkan pada beban motor, terdapat parameter B dan J. [2]

Dalam pengaturan Motor AC Servo sangat penting untuk mengetahui hubungan antara masukan dengan keluaran motor. Masukan Motor AC Servo berupa tegangan sedangkan keluarannya berupa kecepatan motor. Torsi dan kecepatan memiliki hubungan terbalik, semakin besar torsi maka kecepatan akan semakin berkurang, dan sebaliknya semakin kecil torsi maka kecepatan akan semakin bertambah. Selain itu kecepatan dan torsi juga dipengaruhi oleh tegangan kontrol, semakin besar tegangan kontrol torsi akan semakin meningkat. Persamaan torsi motor dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$T_m = K_1 e_c(t) - K_2 \dot{\theta}(t) \tag{1}$$

Beban motor dipengaruhi oleh momen inersia J dan koefisien gesekan B sehingga persamaan beban pada motor menjadi $J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + T_w$ sehingga persamaan Motor AC Servo secara keseluruhan dapat ditulis :

$$k_1 e_c(t) = J\ddot{\theta}(t) + B\dot{\theta}(t) + T_w + k_2 \dot{\theta}(t) \tag{2}$$

$$T_m = k_1 e_c(t) - k_2 \dot{\theta}(t) = J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + T_w \tag{3}$$

Apabila dirubah kedalam bentuk Laplace persamaan menjadi:

$$k_1 e_c(s) - k_2 \cdot s \cdot \theta(s) = J \cdot s^2 \cdot \theta(s) + B \cdot s \cdot \theta(s) + T_w \tag{4}$$

Dengan membuat $T_w = 0$, maka didapat persamaan:

$$k_1 e_c(s) - k_2 \cdot s \cdot \theta(s) = J \cdot s^2 \cdot \theta(s) + B \cdot s \cdot \theta(s) + T_w \tag{5}$$

Sehingga hubungan antara kecepatan dengan tegangan kontrol dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{\theta(s)}{e_c(s)} = \frac{k_1}{J \cdot s^2 + k_2 \cdot s + B \cdot s} = \frac{K_m}{s(\tau_m s + 1)} \tag{6}$$

III. PERANCANGAN KONTROL FUZZY-PD PADA MOTOR SERVO AC

A. Pemodelan Matematis Motor Servo AC

Fungsi alih motor AC servo untuk pengaturan kecepatan dinyatakan pada Persamaan 7. Persamaan tersebut didapatkan dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.[3]

$$G(s) = \frac{0,4}{2,776s+1} \tag{7}$$

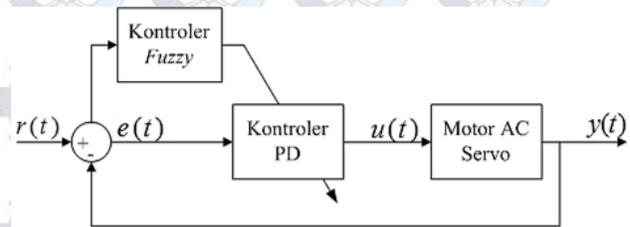
Karena integral dari kecepatan adalah posisi maka untuk mendapatkan fungsi alih motor servo untuk pengaturan posisi, dapat fungsi alih pada Persamaan 7 dapat diintegrasikan, menjadi fungsi alih kecepatan pada persamaan 8.

$$G(s) = \frac{0,4}{s(2,776s+1)} \tag{8}$$

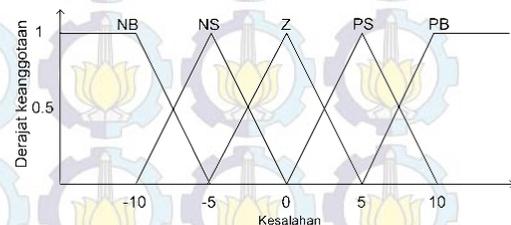
B. Perancangan Kontroler Fuzzy-PD

Kontroler *fuzzy* melakukan pengaturan nilai K_p dan K_d berdasarkan besarnya kesalahan dan juga perubahan kesalahan pada sistem.

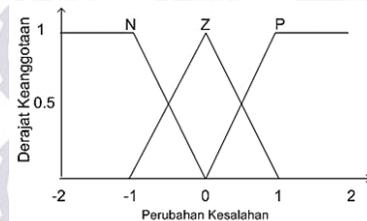
Fungsi keanggotaan untuk masukan kesalahan dan perubahan kesalahan dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2. Batas-batas fungsi dibuat berdasarkan respon plant tanpa menggunakan kontroler.



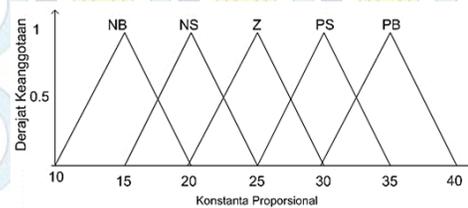
Gambar 1. Diagram blok sistem



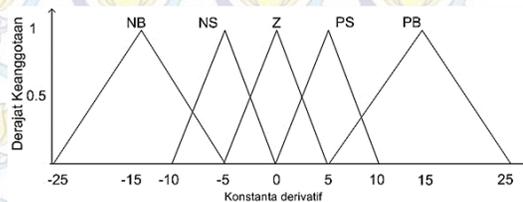
Gambar 2. Fungsi keanggotaan untuk masukan kesalahan



Gambar 5. Fungsi keanggotaan untuk masukan perubahan kesalahan



Gambar 3. Fungsi keanggotaan untuk Konstanta Proporsional



Gambar 4. Fungsi keanggotaan untuk konstanta derivatif
Sedangkan keluaran kontroler *fuzzy* adalah Konstanta proporsional dan konstanta derivatif. Fungsi keanggotaan untuk keluaran dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Prinsip pembuatan aturan dasar :

- (1) Ketika $e > 0$, $de > 0$, diperlukan penambahan K_p dan K_d , hal ini bertujuan untuk mengurangi kesalahan waktu tunak dan meningkatkan kestabilan
- (2) Ketika $e > 0$, $de < 0$, sistem dalam keadaan menuju waktu tunak, sehingga K_p harus ditambah, sedangkan K_d harus diturunkan, hal ini bertujuan untuk mempercepat rise time.
- (3) Ketika $e < 0$, $de > 0$, sistem akan mendekati waktu tunak setelah *overshoot*, oleh karena itu nilai K_p harus diturunkan, sedangkan nilai K_d dinaikkan sehingga akan mengurangi kesalahan waktu tunak dan meningkatkan kestabilan
- (4) Ketika $e < 0$, $de < 0$, hal ini menunjukkan sistem akan mengalami *overshoot*, sehingga nilai K_p harus dikurangi dan K_d harus ditingkatkan.

Berdasarkan prinsip tersebut, aturan dasar *fuzzy* untuk K_p dan K_d dinyatakan pada Tabel 1.

Tabel 1. Aturan dasar kontroler *Fuzzy*

Kp dan Kd		Kesalahan				
		NB	NS	Z	PS	PB
Perubahan kesalahan	N	NB,NB	NS,NS	PS,Z	PS,PS	PB,PB
	Z	NS,PS	NS,PS	Z,Z	PS,NS	PB,NB
	P	NB,PB	NS,PS	NS,Z	PS,NS	PB,NB

IV. PENGUJIAN PENGATURAN POSISI SPINDLE MENGGUNAKAN KONTROLER FUZZY-PD

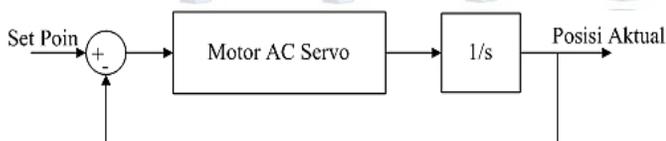
Pengujian dan analisis sistem dilakukan melalui simulasi pada *software* Matlab. Untuk menguji keefektifan dari kontroler *Fuzzy*-PD yang diajukan, pengujian juga dilakukan dengan membandingkan kontroler *Fuzzy*-PD terhadap kontroler PD.

A. Pengujian untuk mencapai Sinyal Referensi

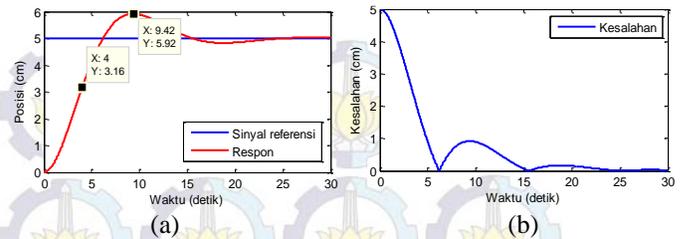
Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan respon sistem secara langsung dalam menerima sinyal referensi tertentu. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan sinyal referensi sebesar 5 cm kepada sistem tanpa menggunakan kontroler, menggunakan kontroler PD, dan menggunakan kontroler *Fuzzy*-PD.

Pengujian pertama dilakukan terhadap sistem tanpa menggunakan kontroler. Diagram blok dan respon sistem ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6a. Sedangkan grafik kesalahan sistem ditunjukkan pada Gambar 6b.

Respon sistem tanpa menggunakan kontroler memiliki *overshoot* sebesar 18,4% dan *rise time* sebesar 11,77 detik, serta nilai RMSE sistem tanpa menggunakan kontroler sebesar 1,4844.

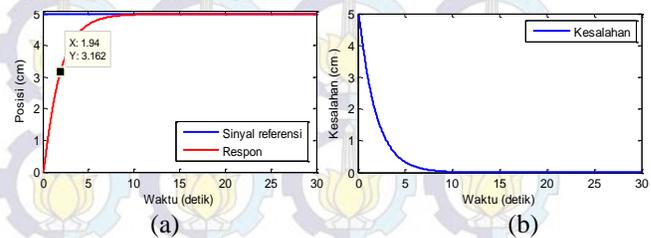


Gambar 5. Diagram blok pengaturan posisi motor AC servo tanpa menggunakan Kontroler.

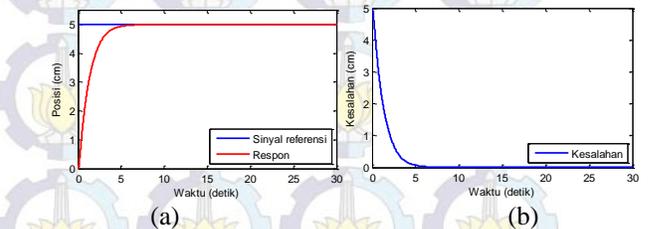


Gambar 6. a) Respon motor AC servo tanpa menggunakan Kontroler; b) Grafik kesalahan sistem tanpa menggunakan kontroler

Pengujian kedua dilakukan terhadap sistem dengan menggunakan kontroler PD. Respon sistem dengan menggunakan kontroler PD memiliki RMSE sebesar 0,8524 dan *rise time* sebesar 5,7 detik. Respon sistem dengan menggunakan kontroler PD dapat dilihat pada Gambar 7a. Sedangkan grafik kesalahan sistem ditunjukkan pada Gambar 7b.



Gambar 7. a) Respon motor AC servo menggunakan Kontroler PD; b) Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler PD



Gambar 8. a) Respon motor AC servo menggunakan Kontroler *Fuzzy*-PD; b) Grafik kesalahan menggunakan Kontroler *Fuzzy*-PD

Pengujian ketiga dilakukan terhadap sistem menggunakan kontroler *Fuzzy*-PD. Respon sistem dengan menggunakan kontroler *Fuzzy*-PD memiliki RMSE sebesar 0,7531 dan *rise time* sebesar 3,59 detik. Respon sistem tersebut dapat dilihat pada Gambar 8a. Sedangkan grafik kesalahan sistem ditunjukkan pada Gambar 8b.

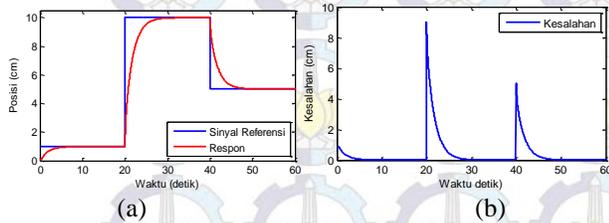
Hasil dari pengujian untuk mencapai sinyal referensi menunjukkan bahwa kontroler *Fuzzy*-PD mampu memperbaiki respon dari sistem. Diantara ketiga sistem yang diuji, kontroler *Fuzzy*-PD memiliki kecepatan respon paling tinggi serta nilai RMSE paling kecil.

B. Pengujian dengan Perubahan Sinyal Referensi

Pengujian dengan perubahan sinyal referensi bertujuan untuk melihat kemampuan kontroler dalam mengatasi perubahan parameter. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan sinyal referensi berupa sinyal step dengan nilai

yang berubah-ubah pada selang waktu tertentu. Besar sinyal referensi yang digunakan yaitu 1, 5, dan 10.

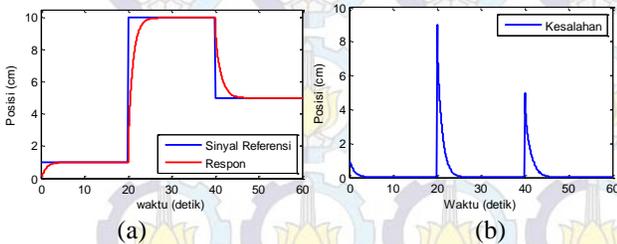
Pengujian pertama dilakukan terhadap sistem dengan menggunakan kontroler PD. Berdasarkan Gambar 9a terlihat bahwa respon sistem yang menggunakan kontroler PD dapat beradaptasi dengan perubahan sinyal referensi yang diberikan, namun waktu untuk mencapai keadaan waktu tunak melambat untuk masukan yang besar.



Gambar 9. a) Respon sistem terhadap perubahan sinyal referensi dengan kontroler PD; b) Grafik kesalahan sistem dengan menggunakan kontroler PD

Kemampuan kontroler PD dalam menghadapi perubahan sinyal referensi juga dapat dilihat pada Gambar 9b yang menunjukkan kesalahan yang terjadi pada sistem. Gambar 9b menunjukkan kesalahan sistem akan meningkat ketika perubahan sinyal referensi diberikan, namun nilai kesalahan akan segera mengecil beberapa saat kemudian.

Pengujian kedua dilakukan terhadap sistem dengan kontroler *Fuzzy*-PD. Berdasarkan Gambar 10a terlihat bahwa respon sistem yang menggunakan kontroler *fuzzy*-PD dapat beradaptasi dengan perubahan sinyal referensi yang diberikan.



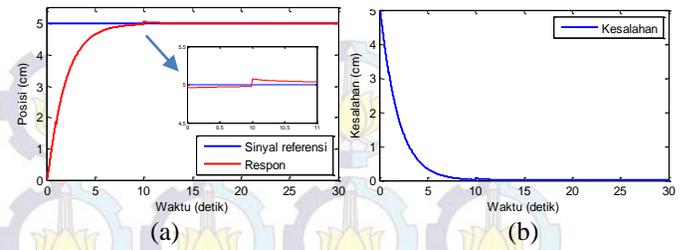
Gambar 10. a) Respon sistem terhadap perubahan sinyal referensi dengan kontroler *Fuzzy*-PD; b) Grafik Kesalahan sistem dengan kontroler *Fuzzy*-PD

Gambar 10b menunjukkan kesalahan sistem dengan kontroler *Fuzzy*-PD akan meningkat ketika perubahan sinyal referensi diberikan, namun nilai kesalahan akan segera mengecil beberapa saat kemudian.

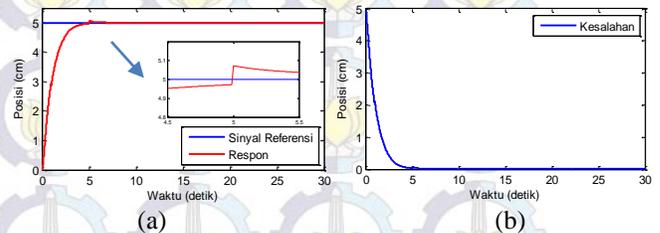
Berdasarkan pengujian terhadap kontroler PD dan *Fuzzy*-PD didapatkan nilai RMSE untuk sistem dengan kontroler PD sebesar 1,3656 dan sistem dengan kontroler *Fuzzy*-PD sebesar 0,9247. Nilai RMSE tersebut menunjukkan bahwa kontroler *Fuzzy*-PD memiliki kemampuan lebih baik dalam menerima perubahan sinyal referensi.

C. Pengujian dengan pemberian Beban

Pengujian dengan memberikan beban bertujuan untuk menggambarkan kondisi mesin CNC saat melakukan proses



Gambar 11. a) Respon sistem menggunakan kontroler PD terhadap penambahan beban sebesar 0,1; b) Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler PD terhadap penambahan beban sebesar 0,1



Gambar 12. a) Respon sistem menggunakan kontroler *Fuzzy*-PD terhadap penambahan beban sebesar 0,1; b) Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *Fuzzy*-PD terhadap penambahan beban sebesar 0,1

pemakanan yang mendapatkan pembebanan dari benda kerja. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban senilai 0,1, 0,3, dan 0,5 pada selang waktu tertentu. Selang waktu tersebut disesuaikan dengan *rise time* masing-masing sistem.

Pengujian pertamakali dilakukan terhadap sistem dengan kontroler PD. Respon sistem dapat dilihat pada Gambar 11a. Sedangkan grafik kesalahan sistem ditunjukkan pada Gambar 11b. Pemberian beban mempengaruhi sistem saat menuju sinyal referensi yang ditentukan. Pada detik satu, sistem mengalami perlambatan ketika beban pertamakali diberikan. Sedangkan pengurangan beban menyebabkan respon meningkat sehingga terjadi *overshoot*.

Pengujian kedua dilakukan terhadap sistem dengan menggunakan kontroler *Fuzzy*-PD. Respon sistem dapat dilihat pada Gambar 12a. Sedangkan grafik kesalahan sistem ditunjukkan pada Gambar 12b. Pemberian beban mempengaruhi sistem saat menuju sinyal referensi yang ditentukan. Pada detik satu, sistem mengalami perlambatan ketika beban pertamakali diberikan. Sedangkan pengurangan beban menyebabkan respon meningkat sehingga terjadi *overshoot*.

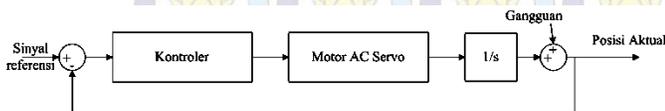
Tabel 2. Nilai RMSE untuk pengujian sistem dengan pemberian beban

Beban	RMSE	
	PD	<i>Fuzzy</i> -PD
0	0,9267	0,7531
0.1	0,9355	0,7583
0.3	0,9544	0,7696
0.5	0,9748	0,7824

Setelah dilakukan pengujian, didapatkan nilai RMSE untuk masing-masing proses pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 2. Dapat dilihat bahwa peningkatan nilai RMSE sistem dengan kontroler Fuzzy-PD untuk masing-masing beban lebih kecil apabila dibandingkan dengan sistem dengan kontroler PD. Hal tersebut menunjukkan bahwa kontroler *Fuzzy-PD* memiliki kemampuan lebih baik untuk beradaptasi dengan nilai beban yang berubah-ubah.

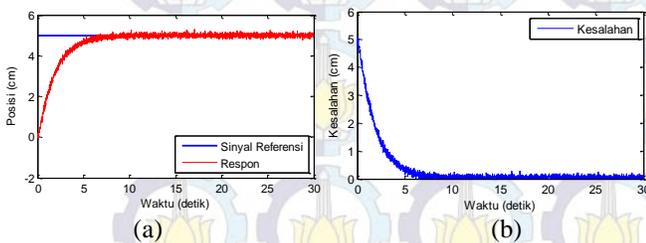
D. Pengujian dengan Gangguan

Pemberian gangguan bertujuan untuk menguji ketahanan dari sistem. Gangguan yang diberikan merupakan gangguan terukur berupa sinyal acak normal. Gangguan diberikan sebanyak tiga kali dengan nilai rata-rata adalah nol dan varian sebesar 0,005, 0,5, dan 5. Diagram blok sistem dengan gangguan dapat dilihat pada Gambar 13.

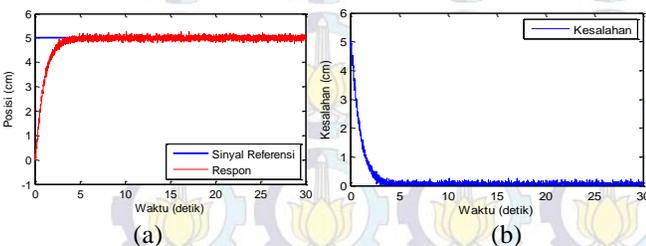


Gambar 13. Diagram blok sistem dengan gangguan

Pengujian yang pertama dilakukan terhadap sistem dengan kontroler PD. Respon sistem menggunakan gangguan pada Gambar 14a menunjukkan bahwa respon masih dapat menuju sinyal referensi yang diberikan. Terlihat bahwa gangguan tidak mempengaruhi kemampuan sistem dalam menuju sinyal referensi yang diberikan. Hal ini juga ditunjukkan oleh grafik kesalahan sistem pada Gambar 14b yang nilainya turun sehingga mendekati nol.



Gambar 14. a) Respon sistem menggunakan kontroler PD terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 0,005; b) Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler PD terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 0,005



Gambar 15. a) Respon sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 0,005; b) Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 0,005

Pengujian kedua dilakukan terhadap sistem dengan kontroler Fuzzy-PD. Respon sistem dapat dilihat pada Gambar 15a. Respon sistem menggunakan gangguan menunjukkan bahwa respon masih dapat menuju sinyal referensi yang diberikan. Terlihat bahwa gangguan tidak mempengaruhi kemampuan sistem dalam menuju sinyal referensi yang diberikan. Hal ini juga ditunjukkan oleh grafik kesalahan sistem pada Gambar 15b yang nilainya turun sehingga mendekati nol.

Setelah dilakukan pengujian untuk setiap varian, didapatkan nilai RMSE untuk masing-masing proses pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 2. Dapat dilihat bahwa nilai RMSE sistem dengan kontroler Fuzzy-PD untuk masing-masing varian gangguan lebih kecil apabila dibandingkan dengan sistem dengan kontroler PD. Hal tersebut menunjukkan bahwa kontroler *Fuzzy-PD* memiliki ketahanan yang baik terhadap gangguan.

Tabel 3. Nilai RMSE untuk pengujian sistem dengan gangguan

Varian	RMSE	
	PD	Fuzzy-PD
0	0.9267	0,7531
0.005	0.9621	0,7657
0.5	1.1476	1,0330
5	2.4216	2,3787

V. KESIMPULAN

Sistem dengan kontroler *Fuzzy-PD* mampu mencapai posisi yang diinginkan pada waktu 3,59 detik, hal ini lebih baik daripada kontroler PD ataupun sistem tanpa menggunakan kontroler.

Hasil simulasi dengan gangguan menunjukkan bahwa kontroler *Fuzzy-PD* memiliki ketahanan yang baik terhadap gangguan dengan nilai RMSE sebesar 0,7657.

Hasil simulasi dengan beban menunjukkan bahwa kontroler *Fuzzy-PD* memiliki ketahanan yang baik terhadap beban dengan nilai RMSE meningkat 0,69% dari nilai RMSE tanpa beban, hal ini lebih kecil daripada sistem dengan kontroler PD yang peningkatan nilai RMSE-nya sebesar 0,95%.

Penentuan aturan dasar kontroler *Fuzzy* sangat berpengaruh terhadap respon dari sistem. Pemilihan aturan dasar yang baik akan meningkatkan performansi sistem, sedangkan pemilihan aturan dasar yang salah dapat mengurangi performansi dari sistem bahkan dapat membuat sistem tidak stabil.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Guoyong Zhao, Yugang Zhao, Lili Zhang, and Amei Dong, "Research on Nonlinear PID Position Controller of CNC System", Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, pp. 2446-2450, 2007
 [2] Madan Gopal, *Models of Industrial Control Devices and Systems*, volume 14 Lecture of Control Engineering,

Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology, Delhi

- [3] M. Vijayakarhick and P.K. Bhaba, *Position Tracking Performance Of Ac Servomotor Based*, Ijrras 10(1),pp. 119-128, 2012

