

Perancangan *Coupled Fuzzy Logic Controller* pada Prototipe Mesin *Computer Numerical Control (CNC)*

Nabilla Gustiviana, Josaphat Pramudijanto

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: jos@ee.its.ac.id

Abstrak— Tingkat ketelitian mesin CNC dalam membuat suatu kontur merupakan hal yang penting. Adanya gesekan antara mata pahat dengan benda kerja saat melakukan gerakan feeding dalam membentuk suatu kontur dapat berakibat pada kesalahan bentuk kontur yang akan dihasilkan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka dirancang *Fuzzy Logic Controller* sebagai kontroler individu yang mengatasi permasalahan di tiap sumbu, dengan kontroler koordinasi, yaitu *Cross-Coupled Controller*. Algoritma dari kontroler ini dibuat dengan menggunakan *software LabView 8.6*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan menambahkan kontroler koordinasi, dapat memperbaiki nilai indeks performansi sebesar 37,5% untuk kontur linier dan 2,78% untuk kontur lingkaran.

Kata Kunci—CNC, Error Kontur, *Cross-Coupled Controller*, *Fuzzy Logic Controller*.

I. PENDAHULUAN

Mesin *Computer Numerical Control (CNC)* merupakan suatu mesin perkakas yang dapat beroperasi secara otomatis dengan memanfaatkan komputer sebagai pengendali gerakan. Mesin ini memiliki peranan penting dalam dunia industri manufaktur. Mesin CNC biasanya menggunakan motor sebagai penggerak tiap sumbu yang akan bekerja secara bersamaan untuk menghasilkan kontur yang diinginkan. Hal terpenting dalam menghasilkan kontur tersebut adalah tingkat ketelitian saat melakukan *tracking* lintasan sehingga menghasilkan suatu kontur dengan *error* kontur seminimal mungkin.

Saat mesin CNC berkerja untuk membentuk suatu kontur, timbul beban seperti adanya gesekan antara benda kerja dengan mata pahat saat motor bergerak. Proses ini akan menyebabkan adanya kesalahan pada sumbu tersebut. Apabila proses ini dilakukan oleh dua buah sumbu secara bersamaan, maka dapat berakibat pada kesalahan bentuk kontur keseluruhan yang akan dihasilkan. Pada pengaturan mesin CNC konvensional, pergerakan tiap sumbu dikontrol secara independen pada masing-masing pergerakan sumbunya, dimana tiap sistem kontrol tersebut hanya menerima informasi lokal pada sumbu tersebut tanpa mempertimbangkan informasi dari sumbu yang lainnya.

Mengacu pada bahasan tersebut, untuk memperbaiki ketelitian dari sistem yang dikontrol secara independen pada masing-masing pergerakan sumbunya, biasanya kontroler independen tersebut akan dikoordinasikan oleh kontroler

koordinasi yang akan memperkuat atau memperlemah sinyal kontrol masing-masing kontroler independen, sehingga antar kontroler independen akan saling berkoordinasi untuk memperkecil *error* kontur. Oleh karena itu pada penelitian ini digunakan kombinasi antara *Fuzzy Logic Controller* dengan *Cross-Coupled Controller*.

II. TEORI DASAR

A. Interpolasi

Dalam membentuk suatu kontur, digunakan proses interpolasi untuk mengubah lintasan tersebut menjadi sinyal referensi untuk tiap sumbu. Interpolasi merupakan proses yang menghasilkan pergerakan terkoordinasi antar dua sumbu pergerakan untuk membentuk kontur yang diinginkan relatif terhadap benda kerja [1].

Dua bentuk kontur yang paling umum ditemukan dalam praktek adalah bentuk garis (*linear*) dan lingkaran (*circular*). Untuk kontur lingkaran, proses interpolasi mengubah suatu bentuk lintasan menjadi sinyal sinus untuk sumbu x dan sinyal kosinus untuk sumbu y. Persamaan interpolasi untuk tiap sumbu ditunjukkan pada Persamaan (1) dan (2) seperti berikut:

$$x = R \sin \dot{S}t \quad (1)$$

$$y = R(\cos \dot{S}t - 1) \quad (2)$$

Dimana R adalah jari-jari lingkaran yang diinginkan dan $\dot{S} = 2ff$, dengan f adalah frekuensi.

Sedangkan untuk kontur linier, persamaan interpolasi masing-masing sumbu ditunjukkan Persamaan (3) dan (4).

$$x = f.t \quad (3)$$

$$y = m.f.t \quad (4)$$

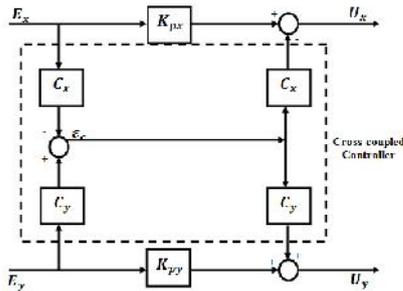
Dimana m adalah gradien garis yang diinginkan dan f adalah frekuensi.

B. Cross-coupled Controller

Konsep *Cross-Coupled* pertama kali diperkenalkan oleh Yoram Koren pada tahun 1980. Tujuan dari pengaturan *Cross-Coupled* ini adalah untuk mengurangi *error* kontur, termasuk *error* posisi dari tiap sumbu. *Error* kontur didefinisikan sebagai jarak terpendek antara kontur yang diinginkan dengan yang sebenarnya. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kontroler ini mempunyai tingkat ketelitian kontur yang lebih baik dibandingkan dengan pengaturan *uncoupled*, dimana tiap

sumbunya mempunyai *loop* kontrol yang terpisah. Sedangkan pada *Cross-Coupled Controller*, *error* yang terjadi pada salah sumbu akan mempengaruhi *loop* kontrol kedua sumbu [2].

Blok diagram dari *Cross-Coupled Controller* ditunjukkan pada Gambar 1. *Error* posisi E_x dan E_y digunakan untuk mendapatkan nilai dari *error* kontur dengan dikalikan *gain* variabel C_x dan C_y . Keluaran dari perkalian tersebut adalah perhitungan dari *error* kontur yang akan didekomposisi menjadi dua komponen aksial dengan dikalikan C_x dan C_y . Komponen aksial ini dimasukkan ke dalam *loop* individu tiap sumbu dengan tanda yang sesuai [3].



Gambar 1 Blok Diagram *Cross-Coupled Controller*

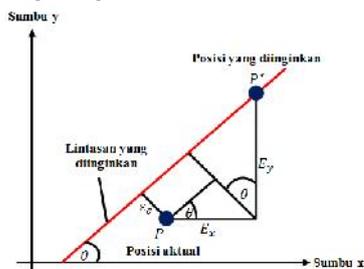
Pada dasarnya, algoritma *Cross-Coupled Controller* diturunkan hanya berdasarkan pendekatan *error* kontur dari kontur linier dan lingkaran [4].

1) *Kontur Linier* [3]

Kontur *error* linier dapat ditentukan dari hubungan geometris yang ditunjukkan pada Gambar 2:

$$v_c = -E_x \sin \theta + E_y \cos \theta \tag{5}$$

Pada Persamaan 5, x_0 adalah *error* posisi sumbu x, y_0 adalah *error* posisi sumbu y, dan θ adalah sudut antara sumbu x dengan garis yang diinginkan.



Gambar 2 *Error Kontur Linier*

Oleh karena itu, pada kontur linier, *gain* variabel C_x dan C_y seperti pada Persamaan (6) dan (7).

$$C_x = \sin \theta \tag{6}$$

$$C_y = \cos \theta \tag{7}$$

2) *Kontur Lingkaran* [3],[5]

Error kontur lingkaran dapat didefinisikan sebagai jarak antara posisi *tool* dengan titik tengah dan jari-jari lingkaran seperti yang ditunjukkan Persamaan (8).

$$v_c = \sqrt{(P_x - x_0)^2 + (P_y - y_0)^2} - r \tag{8}$$

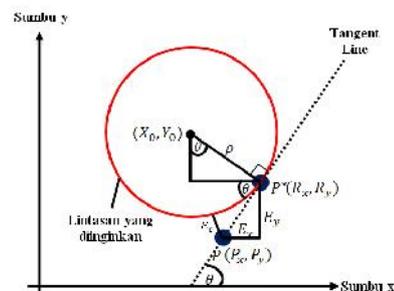
Dimana r adalah jari-jari lingkaran, (x_0, y_0) adalah titik tengah lingkaran, dan (P_x, P_y) adalah posisi aktual dari *tool*. Persamaan (9) dan (10) menunjukkan hubungan geometris seperti pada Gambar 3, posisi aktual, P dapat direpresentasikan dengan *error* tiap sumbu dan posisi referensi:

$$P_x = R_x - E_x = \dots \sin \theta + x_0 - E_x \tag{9}$$

$$P_y = R_y - E_y = \dots \cos \theta + y_0 - E_y \tag{10}$$

Dimana x_0 dan y_0 adalah posisi *tool* referensi, dan E_x dan E_y adalah *error* posisi sumbu x dan y. Dengan memasukkan Persamaan (9) dan (10) ke dalam Persamaan (8), maka diperoleh Persamaan (11).

$$v_c = \sqrt{(\dots \sin \theta - E_x)^2 + (\dots \cos \theta - E_y)^2} - r \tag{11}$$



Gambar 3 *Error Kontur Lingkaran*

Kemudian dengan menggunakan Deret Taylor, Persamaan (11) dapat ditulis menjadi Persamaan (12).

$$v_c = -\left(\sin \theta - \frac{E_x}{2r}\right)E_x + \left(\cos \theta + \frac{E_y}{2r}\right)E_y \tag{12}$$

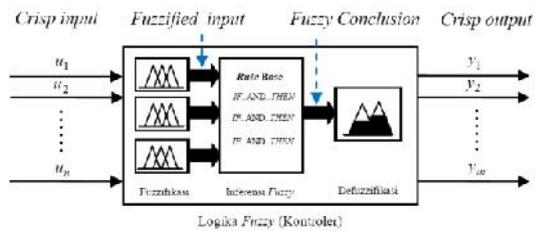
Dengan membandingkan Persamaan (5) dengan Persamaan (12), didapatkan *gain* variabel seperti pada Persamaan (13) dan (14).

$$C_x = \sin \theta - \frac{E_x}{2r} \tag{13}$$

$$C_y = \cos \theta + \frac{E_y}{2r} \tag{14}$$

C. *Fuzzy Logic Controller* [6]

Untuk mendesain *Fuzzy Logic Controller*, terdapat empat tahap, yaitu fuzzifikasi, implikasi *fuzzy*, agregasi *fuzzy*, dan defuzzifikasi. Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa masukan dan keluaran *fuzzy* berupa bilangan *crisp*, yaitu bilangan riil bukan sebuah himpunan *fuzzy*.



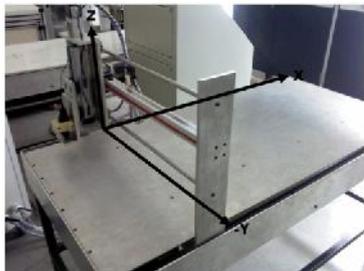
Gambar 4 Struktur Dasar Sistem Inferensi Fuzzy

Proses fuzzifikasi berperan untuk mengubah masukan berupa bilangan riil menjadi himpunan fuzzy (fuzzy set) sedangkan proses inferensi fuzzy berisi aturan-aturan dasar (rule-base) yang menjadi acuan pengambilan keputusan fuzzy. Hasil dari proses inferensi tersebut adalah keputusan atau kesimpulan fuzzy. Defuzzifikasi merupakan proses terakhir dari sistem fuzzy yang mengubah himpunan fuzzy menjadi bilangan crisp.

III. PERANCANGAN SISTEM

A. Arsitektur Sistem

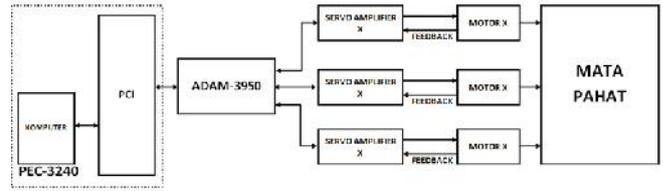
Perancangan sistem pada Tugas Akhir ini terdiri dari tiga bagian utama, yaitu komputer, terminal unit, dan bagian mekanik. Pada bagian mekanik, yaitu berupa prototipe mesin CNC yang mempunyai tiga buah sumbu kerja, tetapi yang digunakan pada Tugas Akhir ini hanya dua sumbu, yaitu sumbu x dan y. Ilustrasi mengenai ketiga sumbu tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Prototipe Mesin CNC

Benda kerja yang akan dibentuk diletakkan di atas meja kerja, dan sebagai penggerak mata pahat dalam membentuk suatu kontur digunakan motor servo yang terletak pada tiap sumbu kerja. Masing-masing motor ini dilengkapi dengan encoder sebagai sensor posisi. Selain itu, juga terdapat servo amplifier yang berfungsi sebagai aktuator untuk menggerakkan motor servo tersebut. Bagian mekanik ini terkoneksi dengan komputer sebagai sumber perintah melalui wiring terminal ADAM-3950.

Bagian komputer berupa PEC-3240 yang di dalamnya terdapat SBC (Single Board Computer) dan modul antarmuka berupa PCI. Untuk menghasilkan suatu bentuk kontur yang diinginkan, yaitu berupa lingkaran dan garis linier, parameter-parameter yang diperlukan dapat diatur pada komputer melalui PCI-1240 Utility. Blok arsitektur sistem keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 6 :



Gambar 6 Arsitektur Sistem

B. Perancangan Kontroler

Pada Tugas Akhir ini, untuk mendapatkan bentuk kontur yang diinginkan, dirancang dua macam kontroler, yaitu Fuzzy Logic Controller independen dan Coupled Fuzzy Logic Controller.

1) Fuzzy Logic Controller Independen

Fuzzy Logic Controller digunakan sebagai kontroler individu untuk mengatasi pergerakan masing-masing sumbu dengan memanfaatkan informasi error (e) dan delta error (Δe) posisi dari tiap sumbu. Dalam merancang kontroler Fuzzy ada beberapa tahap yang dilakukan, yaitu :

A. Tahap Fuzzifikasi

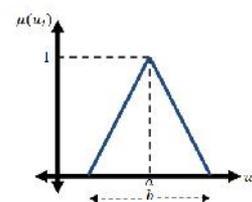
Pada tahap fuzzifikasi, terdapat beberapa langkah yang dilakukan, antara lain :

1. Menentukan fungsi keanggotaan himpunan fuzzy. Dalam Tugas Akhir ini fungsi keanggotaan yang dipilih adalah bentuk segitiga.

Fungsi keanggotaan segitiga seperti pada Gambar 7 dipilih untuk himpunan masukan fuzzy dengan seperti Persamaan (15).

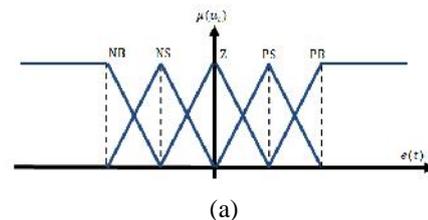
Persamaan fungsi keanggotaan segitiga adalah sebagai berikut :

$$\mu(u_i) = 1 - \frac{2|u_i - a|}{b}, a - \frac{b}{2} \leq u_i \leq a + \frac{b}{2} \quad (15)$$

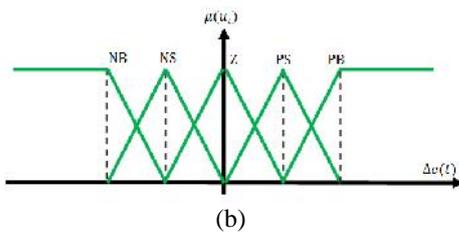


Gambar 7 Fungsi Keanggotaan Segitiga

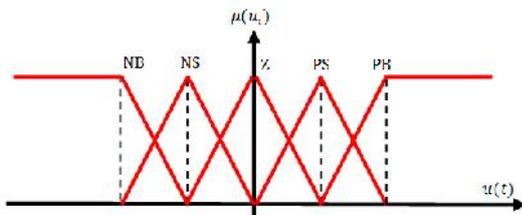
2. Menentukan himpunan fuzzy dari masukan dan keluaran fuzzy. Himpunan fuzzy didesain dengan 5 variabel linguistik, yaitu NB, NS, Z, PS, dan PB.



(a)



Gambar 8 Himpunan Masukan Fuzzy untuk (a) Error, (b) Delta Error



Gambar 9 Himpunan Keluaran Fuzzy

- Menentukan titik tengah, lebar, dan rentang masing-masing himpunan fuzzy. Titik tengah, lebar, dan rentang dapat diperoleh dari pengamatan respon sistem.

B. Tahap Sistem Inferensi Fuzzy

Sistem inferensi fuzzy merupakan proses pengambilan keputusan fuzzy melalui pemetaan masukan terhadap rule base yang telah dirancang sehingga menghasilkan sebuah keluaran fuzzy. Rule base yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah :

Tabel 1 Tabel Rule Base Fuzzy

| | | | | | |
|-------------------------|----|----|----|----|----|
| $e \backslash \Delta e$ | NB | NK | Z | PK | PB |
| NB | NB | NB | NK | NK | Z |
| NK | NB | NK | NK | Z | PK |
| Z | NK | NK | Z | PK | PK |
| PK | NK | Z | PK | PK | PB |
| PB | Z | PK | PK | PB | PB |

C. Tahap Defuzzifikasi

Pada Tugas Akhir ini tahap defuzzifikasi menggunakan metode COA (Centre of Area) seperti pada Persamaan (16).

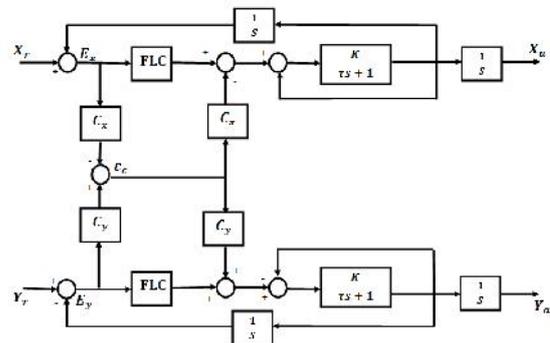
$$y_{COA} = \frac{\sum_{i=1}^m v_i \cdot \tilde{v}(v_i)}{\sum_{i=1}^m \tilde{v}(v_i)} \tag{16}$$

2) Coupled Fuzzy Logic Controller

Coupled Fuzzy Logic Controller merupakan kombinasi antara Cross-Coupled Controller dan Fuzzy Logic Controller. Kontroler ini dirancang untuk memperbaiki performansi dari Fuzzy Logic Controller independen.

Perancangan kontroler fuzzy dilakukan pada tiap sumbu nya seperti pada perancangan fuzzy independen. Perancangan Cross-coupled Controller dilakukan untuk mengkoordinasikan pergerakan antar sumbu prototipe mesin CNC. Hasil perhitungan error kontur yang telah dikalikan dengan gain Cross-Coupled Controller digunakan untuk melemahkan atau

memperkuat sinyal kontrol keluaran dari fuzzy yang selanjutnya akan dikirimkan ke plant.



Gambar 10 Struktur Coupled Fuzzy Logic Controller pada Prototipe Mesin CNC

Struktur Coupled Fuzzy Logic Controller untuk sistem ini dapat dilihat pada Gambar 10. menunjukkan error kontur. (,) adalah gain cross-coupled yang bervariasi terhadap waktu dan bergantung pada posisi tool saat membentuk lintasan. (,) adalah kontroler loop posisi. (,) dan (,) secara berturut menunjukkan posisi referensi dan posisi yang sebenarnya. Sedangkan (,) adalah error yang terjadi pada tiap sumbu. Nilai dan didapatkan dengan Persamaan (7) dan (8) atau Persamaan (15) dan (16).

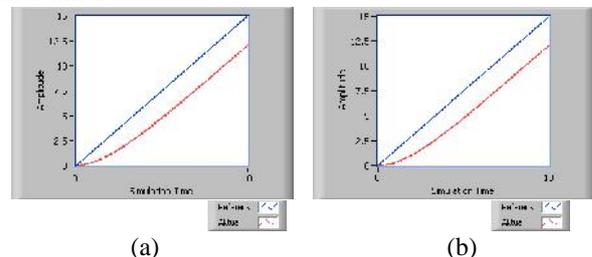
IV. HASIL SIMULASI

Kontroler yang telah dirancang disimulasikan menggunakan software LabView 8.6 Student Edition. Simulasi dilakukan dengan mengambil kondisi awal dari tiap sumbu berada pada koordinat (0,0), yang selanjutnya akan dibentuk kontur linier dengan panjang x dan y sebesar 15 cm dan kontur lingkaran dengan radius 7,5 cm.

Kriteria performansi yang digunakan adalah Integral Absolute Error (IAE), yang berarti jumlah nilai absolut dari error, dimana error yang dimaksud disini adalah error kontur.

1) Simulasi Tanpa Kontroler

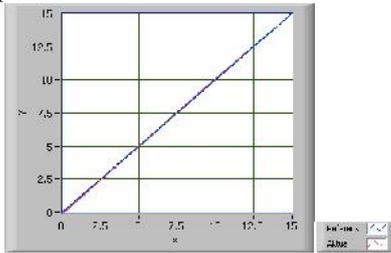
Pada hasil simulasi ini dapat dilihat respon sistem tanpa menggunakan tambahan kontroler. Respon tersebut merupakan output dari plant. Indeks performansi yang didapat adalah sebesar 51,19 untuk kontur lingkaran dan 0,243 untuk kontur linier.



Gambar 11 Respon Tanpa Kontroler (a) Sumbu x, (b) Sumbu y

Gambar 11 menunjukkan bahwa respon plant untuk masing-masing sumbu dalam membentuk kontur linier tertinggal dari referensi yang diinginkan. Hal ini menyebabkan hasil kontur yang merupakan gabungan dari respon sumbu x dan y juga

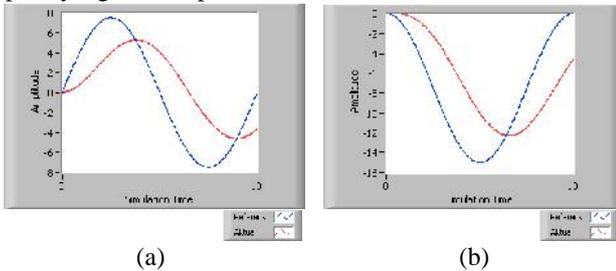
tidak dapat mengikuti bentuk kontur yang diinginkan, seperti yang terlihat pada Gambar 12.



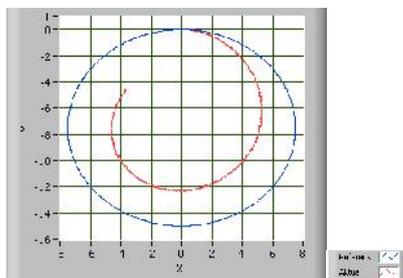
Gambar 12 Kontur Linier Tanpa Kontroler

Sedangkan untuk respon tiap sumbu dalam membentuk kontur lingkaran dapat dilihat pada Gambar 13. Pada gambar tersebut terlihat bahwa respon untuk masing-masing sumbu tertinggal dari referensi. Selain itu, saat referensi mencapai puncak, respon juga tidak dapat mencapai titik puncak yang diinginkan tersebut.

Hasil kontur yang terbentuk dari kedua sumbu tersebut pun tidak dapat mengikuti bentuk kontur yang diinginkan seperti yang terlihat pada Gambar 14.



Gambar 13 Respon Tanpa Kontroler (a) Sumbu x, (b) Sumbu y

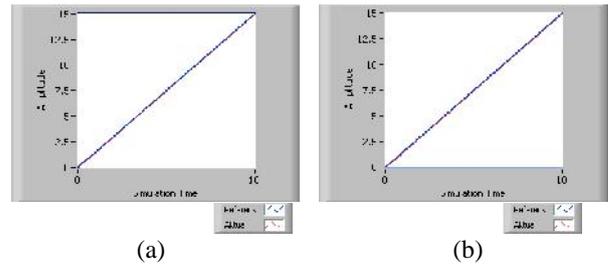


Gambar 14 Kontur Lingkaran Tanpa Kontroler

2) Simulasi Fuzzy Logic Controller Independen

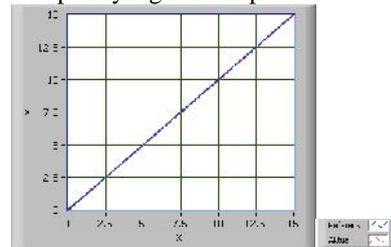
Batas-batas fungsi keanggotaan untuk tiap sumbu dalam membentuk kontur linier maupun lingkaran diperoleh dengan mengubah-ubah batas fungsi keanggotaan masukan dan keluaran yang bertujuan untuk memperoleh indeks performansi yang minimum dari pembentukan kontur.

Gambar 15 menunjukkan bahwa respon untuk masing-masing sumbu sudah tidak tertinggal dan dapat mencapai referensi yang diinginkan. Indeks performansi yang didapat dengan menggunakan metode ini adalah 0,08 untuk kontur linier. Hasil dari metode ini berdasarkan indeks performansi dan gambar respon menunjukkan adanya perubahan yang jauh lebih baik dibandingkan dengan respon tanpa kontroler.



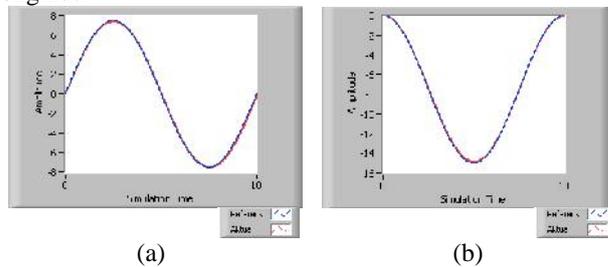
Gambar 15 Respon dengan Metode Fuzzy Independen, (a) Sumbu x, (b) Sumbu y

Melihat respon pada masing-masing sumbu tersebut, maka bentuk kontur yang dihasilkan sudah dapat mengikuti bentuk kontur referensi seperti yang terlihat pada Gambar 16



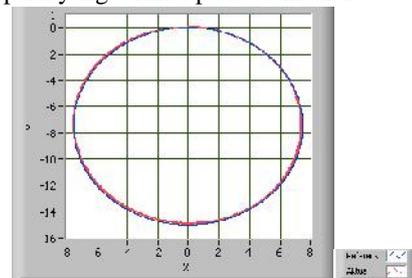
Gambar 16 Kontur Linier Metode Fuzzy Independen

Sedangkan indeks performansi yang didapat untuk kontur lingkaran ini adalah 1,44. Hasil pembentukan kontur lingkaran dengan menggunakan metode ini berdasarkan indeks performansi dan gambar respon juga menunjukkan adanya perubahan yang jauh lebih baik dibandingkan dengan respon tanpa kontroler. Gambar 17 menunjukkan respon masing-masing sumbu. Terlihat bahwa respon sudah tidak tertinggal dan saat referensi mencapai puncak, respon juga sudah dapat mengikuti.



Gambar 17 Respon dengan Metode Fuzzy Independen, (a) Sumbu x, (b) Sumbu y

Bentuk kontur lingkaran yang merupakan gabungan dari sumbu x dan y pun terlihat sudah menyerupai bentuk kontur referensi seperti yang terlihat pada Gambar 18.

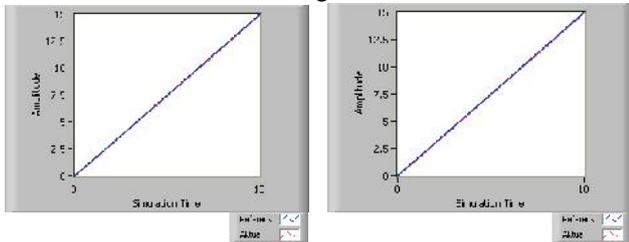


Gambar 18 Kontur Lingkaran Metode Fuzzy Independen

3) Simulasi Coupled Fuzzy Logic Controller

Metode ini merupakan penggabungan antara metode fuzzy

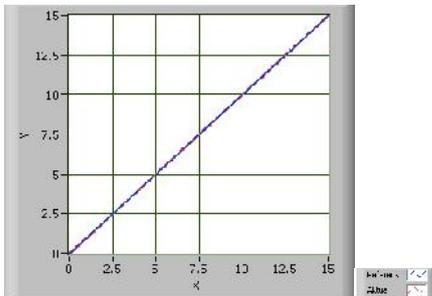
independen dengan *Cross-Coupled Controller*. Batas-batas fungsi keanggotaan yang dipakai sama dengan yang digunakan pada metode *fuzzy* independen. Indeks performansi yang didapatkan dari hasil simulasi adalah 0,05 untuk kontur linier dan 1,40 untuk kontur lingkaran.



(a) (b)

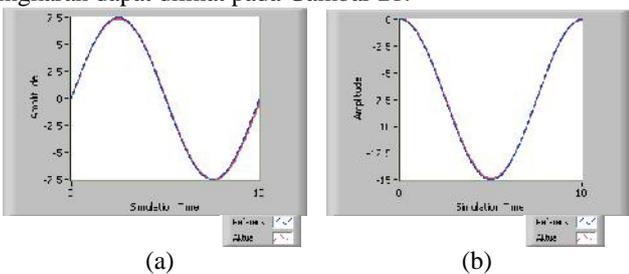
Gambar 19 Respon dengan Metode *Coupled Fuzzy Logic Controller* (a) Sumbu x, (b) Sumbu y

Indeks performansi dan grafik respon tiap sumbu pada Gambar 19 terlihat bahwa dengan menambahkan kontroler koordinasi didapat hasil yang lebih baik dibandingkan dengan metode kontrol individu. Kontur linier yang terbentuk dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 20 Kontur Linier Metode *Coupled Fuzzy Logic Controller*

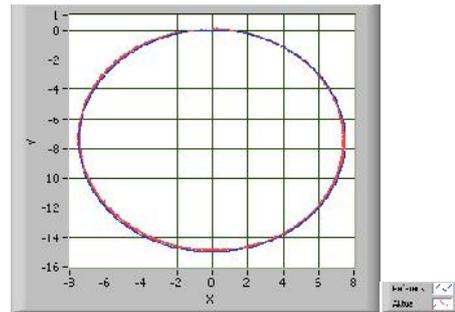
Sedangkan untuk respon tiap sumbu dalam membentuk kontur lingkaran dapat dilihat pada Gambar 21.



(a) (b)

Gambar 21 Respon dengan Metode *Coupled Fuzzy Logic Controller* (a) Sumbu x, (b) Sumbu y

Respon tiap sumbu untuk kontur lingkaran dan indeks performansi yang didapatkan dengan menggunakan metode ini juga menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan metode *fuzzy* independen. Bentuk kontur lingkaran yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 22.



Gambar 22 Kontur Lingkaran Metode *Coupled Fuzzy Logic Controller*

V. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi untuk membuat gerakan interpolasi dengan dua sumbu kerja, dapat ditarik beberapa kesimpulan antara lain:

1. Saat membentuk kontur linier, simulasi dengan menggunakan metode kontrol *fuzzy* pada tiap sumbunya (*fuzzy* independen) memiliki indeks performansi sebesar 0,08. Penambahan metode *Cross-Coupled Controller* yang dikombinasikan dengan metode kontrol *fuzzy* tersebut dapat meningkatkan performansi sistem yang ditunjukkan dengan indeks performansi menjadi sebesar 0,05.
2. Hal yang sama juga terjadi saat membentuk kontur lingkaran. Dengan menambahkan metode *Cross-Coupled Controller*, indeks performansi menjadi bernilai 1,40. Hal ini menunjukkan perbaikan dibandingkan dengan metode kontrol *fuzzy* saja pada tiap sumbunya yang sebelumnya memiliki indeks performansi sebesar 1,44.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Koren, Y., "Computer Control of Manufacturing Systems", McGraw-Hill, New York, (1983).
- [2] Koren, Y., "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing System". *ASME Transaction, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, University of Michigan, pp.1-8, (1980)
- [3] Lee, Jinho, "Design of Controllers for Improving Contour Accuracy in a High-Speed Milling Machine", *Dissertation*, University of Florida, pp.1-141, (2005)
- [4] Syh-Shiuh Yeh, "Pao-Lo Hsu, A new Approach to Biaxial Cross-coupled Control". *Proc. IEEE International Conference on Control Application*, Alaska, USA, pp.168-173, 2000
- [5] Jywe, W. Y., Chen, S. S., Wang, H. S., Liu, C. H., Jwo, H. H., Teng, Y. F., dan Hsieh, T. H., "Study of Improving Nano-Contouring Performance by Employing Cross-Coupling Controller", *ICIUS*, Bali, Indonesia, pp.329-334. 2007
- [6] Pasino, K. M., dan Yurkovich, S., *Fuzzy Control*, Addison Wesley Longman, California, 1998.