Predictive Modified Cross-Coupled Control untuk Kesalahan Kontur Mesin CNC *Milling* 3-*Axis*

Abdul Hadi[1], Mochammad Rameli[2] dan Rusdhianto Effendi, Ak[3]
[1) 2) 3)]*Institut Teknologi Sepuluh Nopember*
Jurusan Teknik Elektro
Kampus ITS Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111
Indonesia

Abstrak

Pergerakan meja kerja (*work piece*) yang relatif lambat pada proses *feeding* mesin CNC *Milling* 3 aksis mempengaruhi sinkronisasi aksis X dan Y. Tidak sinkron antara dua aksis ini menyebabkan terjadinya kesalahan kontur. Material manufaktur berbentuk zat padat mengakibatkan kesalahan kontur tidak dapat diulang lagi. Penelitian ini mendesain kontrol *Predictive* dengan kombinasi *Modified Cross-Coupled Control* untuk memprediksi kesalahan kontur. Metode *Predictive Modified Cross-Coupled Control* (PMCCC) mampu mereduksi kesalahan kontur linear dibandingkan dengan menggunakan metode PI *Modified Cross-Coupled Control*. Namun, untuk kesalahan kontur *circular* metode *Predictive Modified Cross-Coupled* menghasilkan kesalahan kontur yang lebih besar.

Kata Kunci: *Feeding, Work Piece, Kesalahan Kontur, Mesin CNC Milling 3 Aksis, Predictive Modified Cross-Coupled Control, Sinkronisasi.*

1. Pendahuluan

Sistem kontrol untuk perbaikan sinkronisasi pada mesin *Computer Numerical Control* (CNC) bertujuan untuk memperbaiki kesalahan kontur saat *tool path tracking*. Kesalahan kontur merupakan penyimpangan dari pola atau jalur yang didesain, dimana diakibatkan oleh adanya beda posisi meja kerja karena kurangnya sinkronisasi pergerakan motor pada aksis X dan Y. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan kontrol posisi untuk sinkronisasi dua aksis.

Penelitian sistem kontrol untuk sinkronisasi dua aksis berawal dari penelitian Koren yang mendesain konsep *Cross-Coupled Control* (CCC) untuk sinkronisasi dua aksis [1]. Namun, desainnya hanya sesuai untuk kontrol kecepatan. Padahal meja kerja CNC *Milling* 3 aksis membutuhkan kontrol posisi dan diinginkan CCC difungsikan untuk kontrol posisi. Oleh karena itu, Shih mendesain novel struktur baru dari CCC yang disebut dengan *Modified Cross-Coupled Control* (MCCC), dimana memiliki kelebihan dapat digunakan untuk mode kontrol posisi, kecepatan dan torsi. CCC yang diterapkan pada konfigurasi kontroler PI pada *Cross-Coupled Gain*[2].

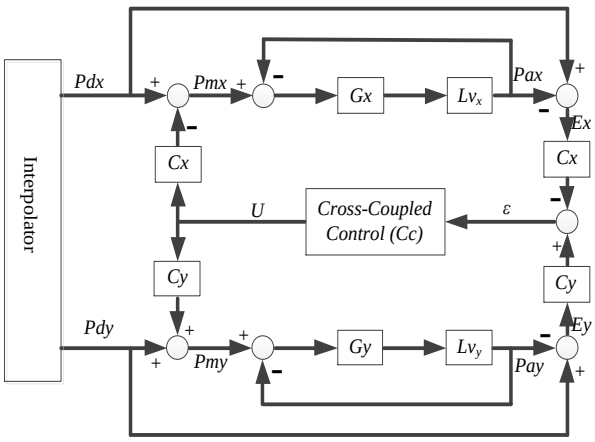
Penelitian menggunakan MCCC telah dilakukan dengan menggunakan *adaptive gain scheduling* untuk kontur linear dan nonlinear [3]. Penelitian ini melakukan penjadwalan gain yang mampu beradaptasi adanya perubahan beban saat *tool path tracking*. Dari penelitian ini, kesalahan kontur masih relatif besar, sehingga diperlukan kontroler yang mampu mereduksi kesalahan kontur yang akan terjadi.

Pembentukan kontur saat *cutting* dan *feeding* jika terjadi kesalahan tidak dapat di ulang lagi karena material berbentuk zat padat. Oleh karena itu, penelitian ini akan mendesain kontroler prediktif dari manipulasi fungsi transfer masing-masing aksis dan perilaku kesalahan kontur berkurang secara eksponensial. Diharapkan kontrol prediktif mampu memprediksi kesalahan kontur sehingga dapat direduksi. Desain kontrol prediktif ini menggunakan konfigurasi MCCC dan mengabaikan pengaruh kecepatan putaran

spindle, fungsi transfer *plant* dari dua aksis identik dan benda kerja bersifat dua dimensi dengan tingkat kelunakan bernilai tetap. Penelitian ini mengembangkan konfigurasi MCCC untuk sinkronisasi posisi dua aksis yaitu dengan menggunakan kontroler *Predictive* kesalahan kontur.

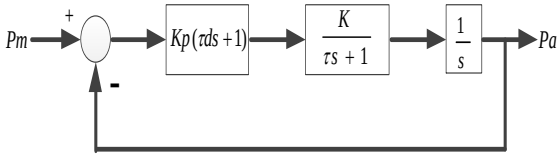
2. Kesalahan Kontur *Modified Cross-Coupled Control*

Kesalahan kontur diperoleh dari analisa diagram blok MCCC yang didesain Shih [2] seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. *Modified Cross-Coupled Control*

Dari Gambar 1 diperoleh untuk masing-masing aksis dikontrol seperti pada Gambar 2. Dengan menerapkan kontroler PD pada masing-masing aksis, hubungan antara Pm (*Path manipulation*) terhadap keluaran aktual dapat dilihat dalam bentuk fungsi transfer Persamaan (1).



Gambar 2 Kontroler PD dan *Plant*

$$\frac{Pax}{Pmx} = \frac{1}{\frac{1}{KpK}s+1} = \frac{1}{\tau * s+1} \tag{1}$$

Persamaan (1) merupakan gambaran plant dan kontroler telah tergabung menjadi satu persamaan orde satu. Sehingga persamaan hubungan antara keluaran aktual terhadap sinyal kontrol dari *Cross-Coupled Gain* dilihat pada Persamaan (2).

$$Pax = \frac{1}{\tau * s+1} Pmx = \frac{1}{\tau * s+1}(Pdx - CxU) \tag{2a}$$

$$Pay = \frac{1}{\tau * s+1} Pmy = \frac{1}{\tau * s+1}(Pdy - CyU) \tag{2b}$$

Persamaan kesalahan kontur dari Gambar 1 diperoleh seperti didefenisikan pada Persamaan (3) dan substitusi Persamaan (2) ke (3) menghasilkan Persamaan (4)

$$\varepsilon = Cy(Pdy - Pay) - Cx(Pdx - Pax) \tag{3}$$

$$\varepsilon = \frac{Cy\ \tau * s}{\tau * s+1} Pdy - \frac{Cx\ \tau * s}{\tau * s+1} Pdx + \frac{Cy^2 + Cx^2}{\tau * s+1} U \tag{4}$$

3. Desain Prediktif Kesalahan Kontur

Kesalahan kontur akan diprediksi dengan horizon prediksi tertentu dengan menggunakan Persamaan (4). Hasil prediksi diharapkan kesalahan kontur akan berkurang secara eksponensial yaitu menuju ke nol dalam skala waktu yang tidak ditentukan.

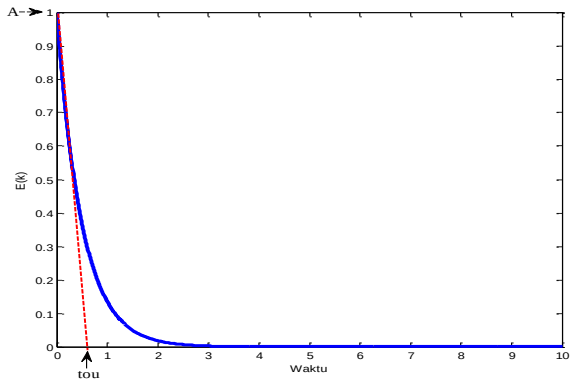
Kurva eksponensial dapat dilihat pada Gambar 3. Diasumsikan nilai *error* berada pada titik A dan menurun dengan bertambahnya τ seperti Persamaan (5). Persamaan (6) menggambarkan penurunan nilai *error* satu langkah sampai ke N langkah dengan asumsi $t = kTs$.

$$e(t) = A \cdot \exp\left(-\frac{1}{\tau}\right) \tag{5}$$

$$e(k+1) = \exp\left(-\frac{Ts}{\tau}\right) \cdot e(k) \tag{6a}$$

$$\vdots$$

$$e(k+N) = \exp\left(-N\frac{Ts}{\tau}\right) \cdot e(k) \tag{6b}$$



Gambar 3. Kurva Eksponensial

Hasil analisa untuk mendapatkan sinyal kontrol prediksi, Persamaan (6) dapat ditulis ulang seperti pada Persamaan (7).

$$\varepsilon(s) = \frac{\tau *}{\tau * s + 1}\left(Cy\ s\ Pdy\ -\ Cx\ \ s\ \ Pdy\ +\ \frac{Cy^2 + Cx^2}{\tau *} U \right) \tag{7}$$

Asumsi bahwa

$$Cy\ \ s\ Pdy - Cx\ \ s\ Pdx + \frac{Cy^2 + Cx^2}{\tau *} U = W(s)$$

Sehingga *W(s)* menggambarkan hubungan terhadap sinyal kontrol *Cross-Coupled (U)* seperti pada Persamaan (8)

$$U = \frac{\left(W - Cy\ s\ Pdy + Cx\ s\ Pdx\right)\tau *}{Cy^2 + Cx^2} \tag{8}$$

Untuk melakukan prediksi kesalahan kontur, Persamaan (8) akan digunakan sebagai sinyal kontrol. Persamaan (7) dapat ditulis ulang seperti yang terlihat pada Persamaan (9).

$$\varepsilon(s) = \frac{\tau *}{\tau * s + 1} W(s) \tag{9}$$

Persamaan (9) ditransformasikan kedalam bentuk persamaan diferensial. Selanjutnya persamaan diferensial tersebut ditransformasi lagi ke bentuk persamaan diskrit. Sehingga, untuk dilakukan prediksi satu langkah kedepan akan menghasilkan Persamaan (10).

$$\left(\frac{\tau * + Ts}{Ts}\right)\varepsilon(k+1) - \frac{\tau *}{Ts}\varepsilon(k) = \tau * W(k+1) \tag{10}$$

Dengan Persamaan (6a) disubstitusikan ke Persamaan (10) pada dapat diperoleh Persamaan (11).

$$\left[\left(\frac{\tau * + Ts}{Ts}\right)\exp\left(-\frac{Ts}{\tau}\right) - \frac{\tau *}{Ts}\right]\varepsilon(k) = \tau * W(k+1) \tag{11}$$

Jika diasumsikan $\left[\left(\frac{\tau * + Ts}{Ts}\right)\exp\left(-\frac{Ts}{\tau}\right) - \frac{\tau *}{Ts}\right] = A$ maka dapat diperoleh Persamaan (12) yaitu prediksi satu langkah dan dua langkah kedepan dari *W(k)*. *W(k)* merupakan hasil manipulasi matematis prediksi kesalahan kontur yang menjadi bagian dari Persamaan (8).

$$W(k+1) = \frac{A}{\tau *}\varepsilon(\mathrm{k}) = \beta\ \varepsilon(\mathrm{k}) \tag{12a}$$

$$W(k+2) = \beta\ \varepsilon(\mathrm{k}+1) = \beta \times \exp\left(-\frac{Ts}{\tau}\right) \times\ \varepsilon(k) \tag{12b}$$

dimana $\beta = \frac{A}{\tau *}$

Dengan melakukan substitusi Persamaan (6a) ke Persamaan (12b) maka diperoleh prediksi *W(k)* dengan *horizon* prediksi ke *N* seperti Persamaan (13).

$$W(k+N) = \beta \times \exp\left(-N\frac{Ts}{\tau}\right) \times\ \varepsilon(k) \tag{13}$$

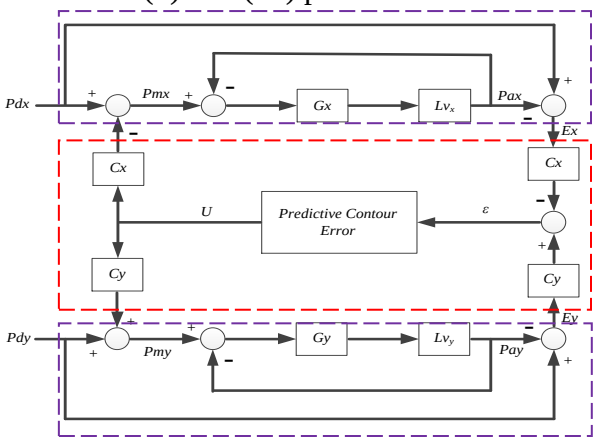
Jika telah terukur besarnya kesalahan kontur saat ini ($\varepsilon(k)$), maka untuk prediksi *W(k)* diperoleh dengan dikalikan dengan suatu *gain* α seperti pada Persamaan (14).

$$\alpha = \beta \times \exp\left(-N\frac{Ts}{\tau}\right) \tag{14}$$

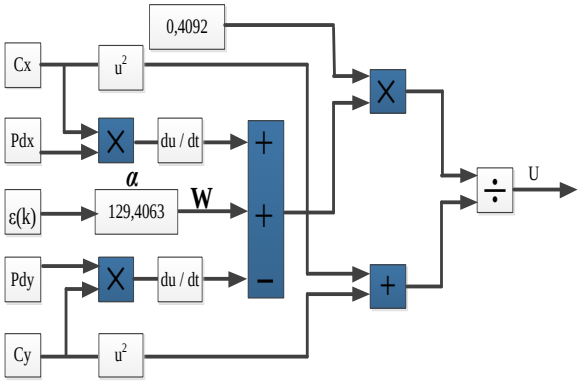
Dari hasil desain kontroler prediktif ini dapat diberi kesimpulan bahwa desain prediktif yang diterapkan pada penelitian ini adalah gabungan antara manipulasi sinyal kontrol ke masing-masing aksis dengan sebuah *gain* prediksi α. Hasil yang diperoleh ini merupakan kontribusi matematis dalam penelitian ini.

4. Simulasi dan Analisa

Penerapan metode kontrol prediktif pada konfigurasi MCCC dapat dilihat pada Gambar 4 yaitu diagram blok yang menggambarkan sistem secara keseluruhan. Untuk desain kontroler prediktif merupakan gambaran dari Persamaan (8) dan (14) pada Gambar 5.



Gambar 4. Konfigurasi *Predictive Modified Cross-coupled Control*



Gambar 5. Diagram Blok Prediktif Kesalahan Kontur pada MCCC

Struktur kontroler dari masing-masing aksis seperti Gambar 2 dengan menggunakan *plant* motor servo penelitian Arista yaitu *Km* = 0,899 dan *Tm* = 0,294 [5]. Untuk kontur linear X_0 = 5 dan Y_0 = 2 dan koordinat target yaitu X_t = 100 dan Y_t = 100. Sedangkan kontur *circular* koordinat pusat lingkaran pada aksis X = 50 dan Y = 50. Besar lingkaran yang dibentuk memiliki jari-jari 100 dan sudut awalnya pembentukan sebesar 0,52 radian (30 derajat).

Feedrate yang diterapkan sebesar 2 *mm/sec* dengan simulasi dijalankan dalam waktu 70 detik untuk linear dan *circular* 320 detik. Pencarian *gain* akurasi (*Cx* dan *Cy*) seperti pada penelitian pemodelan kontur [4] [6]. Dengan τ* = 0,1 dari kecepatan *feedrate* per mm diperoleh *gain* Kp = 11,124 untuk masing-masing aksis dan Kd ditentukan *time constant plant* yaitu 0,294. Setelah dihitung Persamaan (14) dengan horizon prediksi 5 langkah kedepan diperoleh *gain* PMCCC yaitu 129.4063.

Simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan kontroler prediktif hasil desain dibandingkan dengan kontroler PI serta tanpa penerapan *Cross-Coupled Gain*. Hasil simulasi akan dihitung nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dari kesalahan kontur. *Gain* PI ditentukan dengan Kp = 11,124 dan Ki = 0,294.

Hasil simulasi kesalahan kontur dapat dilihat pada Gambar 7 dan 8. Pada pengujian tanpa *Cross-Couple Gain* menunjukkan kesalahan kontur linear (Gambar 7a) yang terjadi sangat besar sekali mencapai 25 mm. Hal ini akan sangat merusak kontur yang didesain jika kesalahan kontur sebesar itu. Kesalahan kontur menuju ke nol membutuhkan waktu sekitar 5 detik. Sedangkan kesalahan kontur circular (Gambar 8a) memiliki nilai maksimal sebesar 1,2 mm pada waktu sekitar detik ke 150. Nilai kesalahan kontur yang terukur tidak pernah berada pada nilai nol. Ini menjadikan saat dikontrol hanya pada masing-masing aksis kesalahan kontur selalu saja terjadi.

Pengujian selanjutnya yaitu menggunakan kontroler PI pada *Cross-Coupled Gain* dimana kesalahan kontur linear (Gambar 7b) yang terjadi sudah sangat kecil sekali. Nilai kesalahan kontur maksimal hanya bernilai $3x10^{-4}$mm. Kesalahan kontur mencapai nilai tertinggi pada sekitar detik ke 50. Namun, sebelum dan setelah detik ke 50 itu nilai kesalahan kontur relatif stabil dan berkisar pada nilai sekitar nol. Sedangkan untuk

kesalahan kontur *circular* (8b), menunjukkan kesalahan kontur yang terjadi dari kontur *circular* ini mencapai nilai maksimum $12x10^{-3}$. Nilai maksimum ini merupakan bentuk *overshoot* dari kesalahan kontur. Ini diakibatkan oleh aksi kontrol PI yang diterapkan pada MCCC. Kesalahan kontur baru stabil dinilai minimum sekitar pada detik ke 20. Dapat diketahui selama proses 20 detik pertama terjadi kesalahan kontur saat diterapkannya PI-MCCC ini. Walaupun terjadi kesalahan kontur pada 20 detik pertama, namun kesalahan tersebut bernilai sangat kecil sekali. Sehingga dapat di katakan bahwa kesalahan kontur yang terjadi dapat diabaikan.

Simulasi pengujian untuk kontrol *Predictive* pada konfigurasi *Modified Cross-Coupled Control*. Kegunaan prediktif pada metode ini yaitu untuk memprediksi kesalahan kontur yang akan terjadi sehingga dapat direduksi. Gambar 7c menunjukkan kesalahan kontur pada pengujian kontur linear dengan nilai maksimum kesalahan kontur yang terjadi sebesar 0,025 mm. Kesalahan kontur tersebut dimulai sekitar pada detik ke 3 sampai detik ke 5. Pengujian pada kontur c*ircular* dan mengamati kesalahan kontur pada Gambar 8c menunjukkan kesalahan kontur terjadi *chaterring* sampai sekitar pada detik ke 35. Namun, setelah itu kesalahan kontur bersifat stabil dengan nilai maksimal sekitar 0,16 mm. terlihat bahwa kesalahan kontur *circular* ini tidak *steady state* pada nilai nol. Hal ini berarti untuk kontur circular ini masih tetap mengalami kesalahan kontur.

5. Kesimpulan

Dari hasil simulasi dapat ditarik kesimpulan bahwa penggunaan metode *Predictive Modified Cross-Coupled Control* pada mesin CNC *Milling* 3 aksis dapat mereduksi kesalahan kontur linear secara signifikan dibandingkan dengan metode PI *Modified Cross-Coupled Control*. Namun, untuk kontur *circular* nilai RMSE lebih besar dibandingkan menggunakan metode PI *Modified Cross-Coupled Control*.

Berdasarkan kesimpulan diatas dapat diberikan saran untuk semakin menguji performasi kontroler yang didesain, perlu di uji coba menggunakan kontur bebas bentuk (*free form contour*). Selain itu, pengaruh kecepatan *spindle* tidak diabaikan karena proses *feeding* sangat erat kaitannya dengan *feedrate*. Untuk penelitian selanjutnya agar dapat diimplementasikan pada sistem *real* yang sebenarnya.

Nilai RMSE dari masing-masing percobaan dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Nilai RMSE kontur linear dan circular

Kontur	**Nilai RMSE**		
	Prediktif	**PI**	**Tanpa CCC**
Linear	0,0012	0.1348	2.2993
Circular	0.1348	0,0013	0.8611

Dari tabel 1 diatas terdapat perbedaan yang signifikan antara metode yang satu dengan yang lainnya.

Daftar Pustaka

[1] Koren, Y., 1980. “Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems”. *ASME Journal Of Dynamic System, Measurement, and Control VOL. 102.* 265–272.

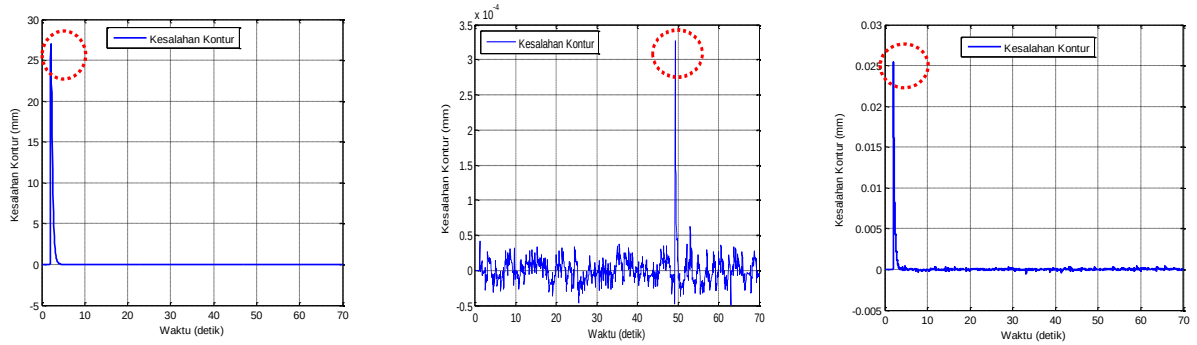
[2] Shih, Y., dkk., 2002, “A novel cross-coupling control design for Bi-axis motion”. *International Journal of Machine Tool & Manufacture 42*, 1539-1548.

[3] Hady, M, A., 2014. “Optimisasi Multi-Objektif Untuk *Adaptive Cross-Coupled Control* Pada *Tool Path Tracking* Mesin Cnc *Milling* 3-*Axis*”. *Thesis Jurusan Teknik Elektro ITS, Surabaya.*

[4] Koren, Y dan Lo, Ch-Ch., 1991, “Variable-Gain Cross-coupling Control for Contouring ”. *Annals of The CIRP*. 371-374

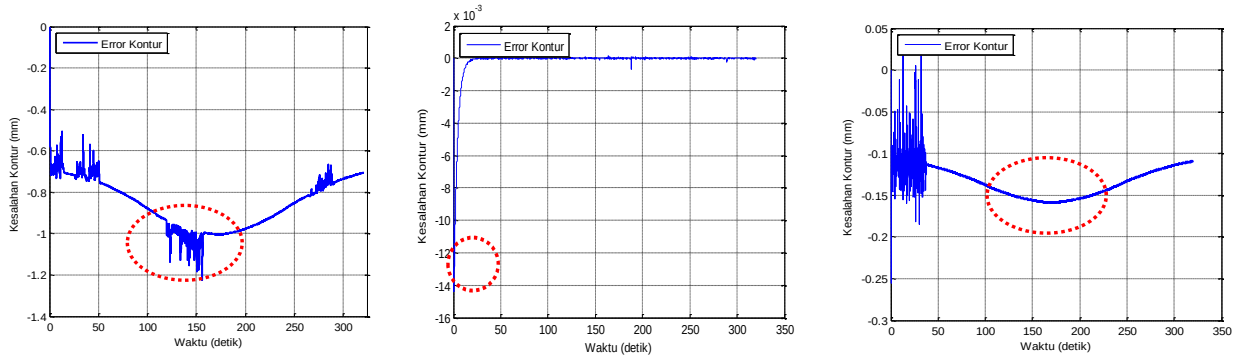
[5] Safitri, E, B, dkk., 2012, “Implementasi Kontroler P-PI Kaskade untuk Meningkatkan Keakuratan Mesin Bubut CNC ”. *JURNAL TEKNIK ITS Vol 1*. F75-F80.

[6] Sun, J dan Hu, J., 2011. “Research on Modeling of Contour Error for Motion Control System of CNC Machine”. *Science Foundation of Gansu Province Education Office of China (0914-01)*. 1553-1556.



(a) (b) (c)

Gambar 7. Kesalahan Kontur Linear (a) Tanpa Cross-Couple Gain, (b) Kontroler PI, dan (c) Kontroler Prediktif



(a) (b) (c)

Gambar 8. Kesalahan Kontur *Circular* (a) Tanpa Cross-Couple Gain, (b) Kontroler PI, dan (c) Kontroler Prediktif