

Implementasi Kontroler P-PI Kaskade untuk Meningkatkan Keakuratan Mesin Bubut CNC

Erista Budi Safitri, Mochammad Rameli, Rusdhianto Effendie AK
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: ditto@elect-eng.its.ac.id

Abstrak—Beberapa industri manufaktur skala kecil menengah masih menggunakan mesin bubut konvensional dalam pengerjaan benda kerja karena tingginya biaya operasional yang dibutuhkan untuk sebuah mesin bubut CNC (*Computer Numerical Control*). Mesin bubut konvensional memiliki kelemahan yaitu ketidakpastian dan ketergantungan hasil produksi pada operator sehingga menyebabkan mesin ini tidak memiliki efisiensi dan produktifitas tinggi. Kualitas benda kerja yang dihasilkan beragam karena keakuratan saat *tracking* lintasan tidak dapat dicapai dengan baik seperti pada mesin CNC. Kelemahan ini dapat diatasi dengan cara *retrofit* dengan menambahkan CNC sebagai pusat kontrol sehingga mesin bubut konvensional dapat bekerja secara otomatis selayaknya mesin CNC. Keakuratan saat *tracking* lintasan ditingkatkan dengan menggunakan kontroler P-PI kaskade sehingga kualitas benda kerja yang dihasilkan menjadi lebih baik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan kontroler P-PI kaskade hasil desain dinilai lebih baik daripada kontroler P-PI kaskade hasil *auto-tuning*. Tingkat presisi mengalami peningkatan dengan nilai *error steady state* sebesar 0,88% pada Motor X dan 3,97% pada Motor Z. *Error* saat *tracking* lintasan juga lebih kecil dengan nilai indeks IAE sebesar 65.458 *pulse* pada Motor X dan 82.202 *pulse* pada Motor Z

Kata Kunci—Mesin Bubut CNC, Kontroler P-PI kaskade, *retrofit*.

I. PENDAHULUAN

KELANGSUNGAN industri manufaktur sangat dipengaruhi oleh kualitas hasil produksinya. Mesin bubut konvensional memiliki kelebihan karena harganya relatif murah, pemeliharaan mudah, dan cara pengoperasiannya sederhana sehingga banyak digunakan pada industri kecil, bengkel, dan lembaga ketrampilan pendidikan. Akan tetapi mesin ini memiliki kelemahan antara lain kualitas produksinya banyak ditentukan oleh faktor operator dan produktifitas rendah. Mesin CNC yang dioperasikan secara otomatis mempunyai kelebihan fleksibilitas tinggi, lebih akurat, memungkinkan untuk produksi benda kerja yang rumit, tidak dibutuhkan operator yang ahli, produktifitas tinggi dan lebih efisien dalam segi waktu. Kelemahan mesin ini adalah harganya mahal dan perawatan cukup sulit karena diperlukan teknisi khusus, dan dibutuhkan bagian *programmer* yang terampil [1,2]

Retrofit pada mesin bubut konvensional diartikan sebagai penggantian beberapa bagian mesin dengan sistem yang baru sehingga dapat bekerja secara otomatis selayaknya mesin CNC. Adanya gesekan pada kolom (*disturbance*) serta ketidakakuratan sensor posisi, dapat mengakibatkan *tracking error* sehingga pergerakan sumbu mesin menjadi tidak

akurat. Untuk meningkatkan keakuratan pergerakan masing-masing sumbu mesin maka digunakan kontroler P-PI kaskade. Penggunaan kontroler dengan parameter hasil desain ini kemudian dibandingkan dengan kontroler P-PI kaskade dengan parameter hasil *auto tuning* pada *driver*. Dengan dirancangnya kontroler P-PI kaskade tersebut, keakuratan pada mesin bubut CNC diharapkan dapat tercapai.

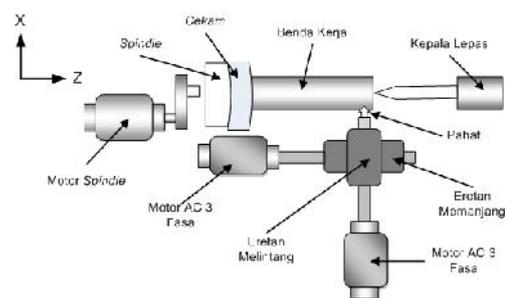
Makalah ini dibagi menjadi enam bagian. Bagian selanjutnya adalah mengenai teori dasar. Bagian ketiga adalah perancangan sistem dan identifikasi model matematis *plant* yang selanjutnya dibuat desain kontroler. Hasil dan analisis disampaikan pada bagian keempat kemudian disampaikan hasil analisis data. Kesimpulan mengenai hasil yang didapatkan, selanjutnya disampaikan pada bagian terakhir.

II. TEORI DASAR

A. Mesin Bubut Konvensional

Mesin bubut (*turning machine*) adalah suatu jenis mesin perkakas yang proses kerjanya bergerak memutar benda kerja dan menyayat benda tersebut dengan menggunakan mata potong pahat (*tools*). Mesin ini dipakai untuk membentuk benda kerja yang berbentuk silindris.

Bagian-bagian utama mesin bubut ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi Mesin Bubut dan Bagian-bagiannya

Terdapat 3 motor penggerak pada mesin bubut ini yang pertama adalah motor penggerak *spindle* berupa motor DC dengan spesifikasi sebagai berikut :

Type : DC Motor AMETEK
Power : 0,48 HP.
Voltage : 38 Volt / 800 rpm

Motor penggerak eretan memanjang dan motor penggerak eretan melintang berupa motor sinkron magnet permanen.

Motor sinkron beroperasi dalam keadaan sinkron. Artinya kecepatan rotor sama dengan kecepatan medan putar stator. Spesifikasi motor sinkron yang digunakan sebagai berikut :

- Input Voltage : AC 3 106 Volt
- Rated Output : 0,4 KW
- Rated Torque : 1,3 N.m
- Rated Current : 2,6 A
- Rated Frequency : 200 Hz
- Rated Rotational Speed : 3000 rpm

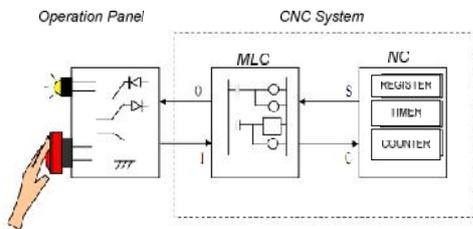
Driver merupakan sebuah alat yang berfungsi sebagai aktuator. Spesifikasi driver yang digunakan ditunjukkan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Driver Minas-A4 Series

Spesifikasi	Masukan	Keluaran
Tegangan	200-240 Volt	107,9 Volt
Fasa	1	3
Frekuensi	50/60 Hz	0-333,33 Hz
Daya	-	400 W

B. Computerized Numerical Control (CNC)

Salah satu mesin CNC yang khusus digunakan untuk mesin bubut adalah LNC T300. Sebuah mesin LNC T300 tersusun dari Numerical Control (NC) dan Programmable Logic Controller (PLC). NC berfungsi ibarat otak dari CNC sedangkan PLC berfungsi sebagai pembaca perintah/masukan yang selanjutnya akan disampaikan ke NC. PLC selanjutnya disebut sebagai Machine Logic Controller (MLC). Ilustrasi sistem internal pada CNC ditunjukkan pada Gambar 2.



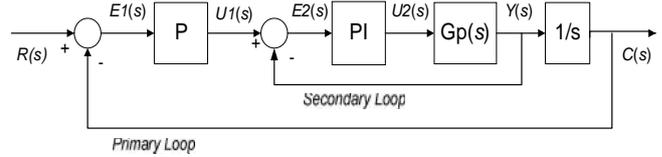
Gambar 2. Sistem Internal pada LNC T300

Sinyal komunikasi antara NC dan MLC terdiri dari kode bit I, O, C, S, A, dan R. Sinyal komunikasi ini diproses oleh MLC melalui program ladder diagram. Input menuju MLC dinyatakan dengan kode bit I, output dari MLC dinyatakan dengan kode bit O. Input menuju NC dinyatakan dengan kode bit C, sedangkan output dari NC dinyatakan dengan kode bit S.

C. Kontroler P-PI Kaskade

Sistem pengaturan kaskade terdiri dari satu atau lebih control loop yang terdapat di dalam primary loop. Syarat dari kontrol kaskade adalah slave controller harus memiliki respon yang lebih cepat daripada master controller sehingga kalkulasi pada master controller merupakan data yang telah sempurna. Tujuan dari penggunaan kontroler kaskade adalah agar sistem dapat mengatasi gangguan dengan cepat.

Diagram blok dari sistem dengan kontroler P-PI kaskade ditunjukkan seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Blok Kontroler P-PI Kaskade

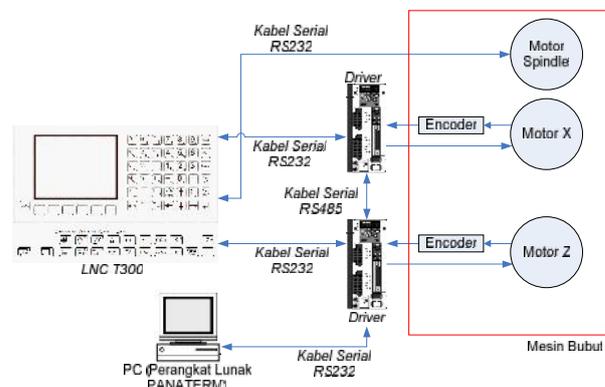
Primary loop merupakan loop pengaturan posisi sedangkan secondary loop merupakan loop pengaturan kecepatan. Model matematis plant disimbolkan sebagai $Gp(s)$. Torque filter dianggap termasuk bagian dari $Gp(s)$ untuk memudahkan perhitungan. $R(s)$ merupakan masukan sistem berupa posisi referensi, $E1(s)$ merupakan kesalahan posisi, $U1(s)$ adalah kecepatan referensi, $E2(s)$ merupakan kesalahan kecepatan, $U2(s)$ adalah sinyal kontrol, $Y(s)$ kecepatan aktual, dan $C(s)$ adalah keluaran sistem berupa posisi aktual. P merupakan kontroler proporsional sedangkan PI merupakan kontroler proporsional dan integral.

III. PERANCANGAN SISTEM

A. Gambaran Umum Perancangan Sistem

Pada Tugas Akhir ini dirancang sebuah sistem retrofit mesin bubut konvensional dengan CNC. Arsitektur sistem kontrol yang dibangun ditunjukkan seperti pada ilustrasi Gambar 4. Sistem ini terdiri beberapa elemen pembangun yaitu LNC T300 sebagai Computer Numerical Control, driver Panasonic Minas A4 Series sebagai aktuator, PC sebagai interface bagi pengguna, serta plant mesin bubut yang terdiri dari motor penggerak spindle, motor penggerak eretan memanjang dan motor penggerak eretan melintang. Motor penggerak eretan memanjang ini selanjutnya disebut dengan Motor Z, sedangkan motor penggerak eretan melintang selanjutnya disebut dengan Motor X. Jalur komunikasi yang digunakan antara elemen pembangun sistem terdiri dari kabel serial RS232 dan RS485.

Proses yang harus dilakukan sebelum mengintegrasikan alat adalah melakukan pengaturan parameter yang terbagi menjadi dua, yaitu pengaturan parameter pada driver dan pengaturan parameter pada LNC T300. Penjelasan lebih detail mengenai parameter ini dapat dilihat pada [3],[4]



Gambar 4. Arsitektur Sistem Kontrol yang Dibangun

Parameter pada driver ditulis dengan kode Pr.No sedangkan parameter pada LNC T300 ditulis dengan kode

Param0000 dengan 4 digit nomor urutan. Banyaknya sinyal pulsa yang dibutuhkan untuk menggerakkan motor satu kali putaran dihitung berdasarkan perhitungan pada Persamaan (1)

$$F = \frac{Pr44 \times 4 \times Pr48 \times 2^{Pr4A}}{Pr4B} \quad (1)$$

dengan: $F=Command\ pulse\ per\ revolution$
 $Pr44=Numerator\ of\ pulse\ output\ division$
 $Pr48=1^{st}\ numerator\ of\ electronic\ gear$
 $Pr4A=Multiplier\ of\ electronic\ gear\ numerator$
 $Pr4B=Denominator\ of\ electronic\ gear$
 setelah melalui perhitungan didapatkan nilai F sebagai berikut:

$$F = \frac{2500 \times 4 \times 10000 \times 2^0}{10000} = 10000\ pulse / rev$$

Besarnya sinyal pulsa tiap μm yang dikirim ke driver dapat dihitung berdasarkan CMR (Command Modification Ratio). Nilai CMR yang menuju Motor X diatur berdasarkan Persamaan (2)

$$CMR(pulses / -m) = \frac{F}{Param0104} \times 5 \quad (2)$$

F merupakan command pulse per revolution dan Param0104 adalah "Setting ball screw pitch of X axis". Setelah melalui perhitungan didapatkan nilai CMR pada Motor X sebesar 5 pulses / -m.

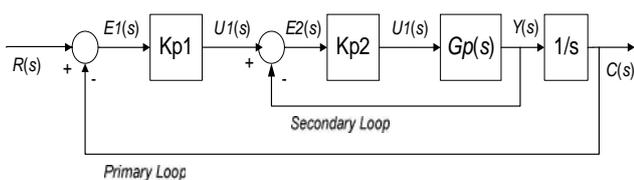
Nilai CMR yang menuju Motor Z diatur berdasarkan Persamaan (3)

$$CMR(pulses / -m) = \frac{F}{Param0106} \times 6 \quad (3)$$

Param0106 adalah "Setting ball screw pitch of Z axis" Nilai Param0104 dan Param0106 adalah 10000. Setelah melalui perhitungan didapatkan nilai CMR pada Motor X sebesar 6 pulses / -m

B. Identifikasi dan Permodelan Sistem

Proses identifikasi ini dilakukan untuk mendapatkan model matematis dari kedua plant yaitu, Motor X dan Motor Z. Pada kedua plant identifikasi hanya dapat dilakukan dengan metode identifikasi loop tertutup karena kondisi struktur dari aktuator tidak memungkinkan untuk diidentifikasi dengan loop terbuka. Selain itu plant bersifat tidak stabil apabila diidentifikasi secara loop terbuka. Blok diagram sistem yang digunakan saat identifikasi loop tertutup ditunjukkan seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Blok Diagram Sistem saat Identifikasi K_{p1} merupakan konstanta proporsional pada loop pengaturan posisi sedangkan K_{p2} merupakan konstanta proporsional pada loop pengaturan kecepatan. Data yang

dapat terukur melalui perangkat lunak PANATERM 3.7 adalah kecepatan referensi $UI(s)$, kecepatan aktual $Y(s)$, dan kesalahan posisi $EI(s)$. Karena $Y(s)$ dan $UI(s)$ diketahui, maka identifikasi loop tertutup dapat dilakukan dengan mempertimbangkan respon masukan-keluaran pada secondary loop.

1. Identifikasi Plant Motor X

Pada identifikasi ini eretan melintang diinginkan agar bergerak sepanjang 10mm menuju koordinat negatif. Agar sistem dapat stabil maka dipilih K_{p1} senilai 35 dan K_{p2} 63. Sedangkan parameter filter dipilih =0,065. Respon sistem cukup cepat sehingga dalam pengambilan data time sampling dipilih 0.002 detik.

Pemrograman dilakukan dengan cara memasukkan perintah G00 X-40 Z0. Pengambilan data untuk identifikasi loop tertutup dilakukan sebanyak 5 kali. Identifikasi parameter dilakukan dengan pendekatan ARX [5]. Validasi hasil permodelan dilakukan menggunakan RMSE (Root Mean Square Error). Hasil pemodelan respon sistem loop tertutup beserta RMSEnya masing – masing disajikan pada Tabel 2. Dari kelima model matematis yang berhasil dirumuskan tersebut, diambil model matematis no 2, yang disajikan kembali pada Persamaan (4), karena mempunyai nilai RMSE paling kecil.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{107}{s + 110,4} \quad (4)$$

Tabel 2. Model Matematis Respon Sistem Loop Tertutup pada Motor X

No.	Persamaan Model	RMSE
1	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{80,59}{s + 81,72}$	84,0518
2	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{107}{s + 110,4}$	70,7682
3	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{85,74}{s + 86,98}$	79,7344
4	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{93,23}{s + 95,28}$	78,4927
5	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{84,21}{s + 85,52}$	82,9212

Dimisalkan $Y(s)/U(s)$ adalah $H(s)$ sehingga model matematis plant $Gp(s)$ didapatkan melalui perhitungan pada Persamaan (5)

$$Gp(s) = \frac{H(s)}{K_{p1} [1 - H(s)]} \quad (5)$$

Model matematis plant Sumbu X disajikan pada Persamaan (6) setelah dilakukan perhitungan dengan substitsi nilai K_{p1} dan $H(s)$ pada Persamaan (5).

$$Gp(s) = \frac{0,899}{0,294s + 1} \quad (6)$$

2. Identifikasi Plant Motor Z

Pada identifikasi ini eretan memanjang diinginkan agar bergerak sepanjang 5mm menuju koordinat negative. Agar sistem dapat stabil maka dipilih K_{p1} senilai 35 dan K_{p2} 63. Time sampling dipilih 0.002 detik. Pemrograman dilakukan

pada mode MDI dengan memasukkan perintah G00 X0 Z-12,5

Hasil pemodelan respon sistem *loop* tertutup beserta RMSEnya masing – masing disajikan pada Tabel 3. Dari kelima model matematis yang berhasil dirumuskan tersebut, diambil model matematis no 1, yang disajikan kembali pada Persamaan (7), karena mempunyai RMSE yang paling kecil.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{80,8}{s + 81,03} \quad (7)$$

Tabel 3. Model Matematis Respon Sistem *Loop* Tertutup pada Motor Z

No.	Persamaan Model	RMSE
1	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{80,8}{s + 81,03}$	86,6487
2	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{85,58}{s + 86,7}$	87,7244
3	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{78,34}{s + 79,43}$	90,9277
4	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{37,12}{s + 35,13}$	201,8718
5	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{38,78}{s + 36,85}$	210,4894

Model matematis *plant* Sumbu Z disajikan pada Persamaan (8) setelah dilakukan perhitungan dengan substansi nilai K_{p1} dan $H(s)$ pada Persamaan (5) (5)

$$Gp(s) = \frac{10,037}{4,348s + 1} \quad (8)$$

C. Perancangan Kontroler P-PI Kaskade

Kontroler P-PI kaskade ini dirancang melalui dua tahap. Tahap pertama adalah perancangan kontroler PI secara analitik [7]. Tahap kedua adalah simulasi pada perangkat lunak Matlab 7.1 untuk mendapatkan parameter kontroler P.

1. Perancangan Kontroler P-PI Kaskade pada *Plant* Motor X

Pada *plant* Motor X ini kontroler PI dirancang agar respon sistem mendekati orde satu dengan waktu konstan (τ^*) sebesar 0,008 detik. Berdasarkan model matematis *plant* Motor X pada Persamaan (6) dapat ditentukan parameter *plant* sebagai berikut :

$$K = 0,899 \quad ; \quad \tau = 0,294 \text{ detik}$$

didapatkan parameter – parameter kontroler PI sebagai berikut:

$$\dagger_i = \dagger \quad \dagger_i = 0,294$$

$$K_p = \frac{\dagger_i}{\dagger * K} = \frac{0,294}{0,899 \times 0,008} = 40,879$$

sehingga didapatkan fungsi alih kontroler PI untuk *plant* Motor Z ditunjukkan pada Persamaan (9).

$$K(s) = 40,879 \left(1 + \frac{1}{0,249s} \right) \quad (9)$$

Berdasarkan hasil simulasi nilai K_{p1} didapatkan 35. Parameter ini kemudian ditata ulang untuk mendapatkan respon *plant* yang paling baik. Berdasarkan hasil penalaan beberapa kali didapatkan parameter kontroler terbaik yang digunakan untuk mengontrol *plant* adalah sebagai berikut :

$$K_{p1} = 63; K_{p2} = 35; \tau_i = 0,016$$

2. Perancangan Kontroler P-PI Kaskade pada *Plant* Motor Z

Pada *plant* Motor Z ini kontroler PI dirancang agar respon sistem mendekati orde satu dengan waktu konstan (τ^*) sebesar 0,008 detik. Berdasarkan model matematika *plant* Motor Z pada Persamaan (7) dapat ditentukan parameter *plant* sebagai berikut :

$$K = 10,037 \quad ; \quad \tau = 4,348 \text{ detik}$$

didapatkan parameter – parameter kontroler PI sebagai berikut:

$$\dagger_i = 4,348$$

$$K_p = \frac{\dagger_i}{\dagger * K} = \frac{4,348}{10,037 \times 0,008} = 54,149$$

Didapatkan fungsi alih kontroler PI untuk *plant* Motor Z yang ditunjukkan pada Persamaan (10).

$$K(s) = 54,149 \left(1 + \frac{1}{4,348s} \right) \quad (10)$$

Berdasarkan hasil penalaan saat simulasi nilai K_{p1} didapatkan 35. Berdasarkan hasil penalaan beberapa kali didapatkan parameter kontroler terbaik sebagai berikut :
 $K_{p1} = 63; K_{p2} = 35; \tau_i = 0,016$

IV. HASIL DAN ANALISIS

A. Implementasi pada *Plant* Motor X

Proses implementasi dilakukan sebanyak dua kali pada *plant* Motor X. Implementasi yang pertama dilakukan dengan menggunakan kontroler P-PI kaskade dengan parameter kontroler hasil desain yang telah disimulasikan terlebih dahulu menggunakan perangkat lunak MATLAB 7.1. Implementasi kedua dilakukan dengan menggunakan kontroler P-PI kaskade dengan parameter kontroler hasil *auto tuning* pada perangkat lunak PANATERM 3.7

Perpindahan : 5mm (Arah koordinat negatif)

Perintah : G00 X-20 Z0

Set Point (Xss) : 25000 *pulse*

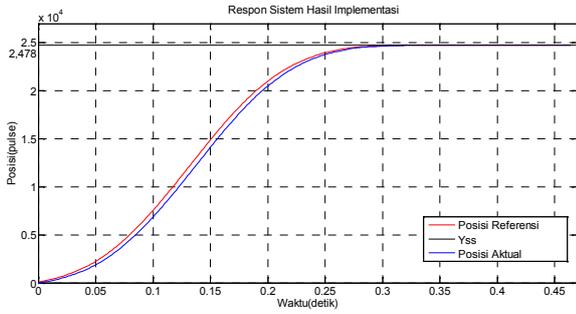
Parameter Kontroler : $K_{p1} = 63; K_{p2} = 35; \tau_i = 0,016 \text{ ms}$

Parameter *torque filter* : = 0,65 ms

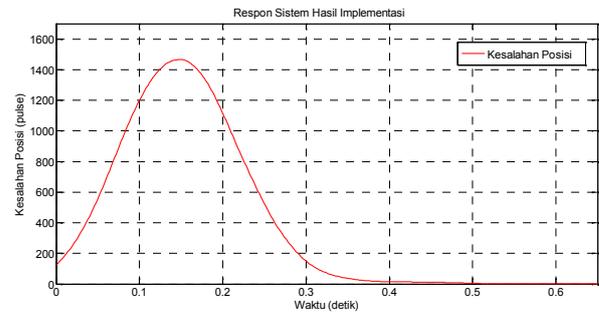
Setelah melalui proses perhitungan, didapatkan respon posisi *plant* Motor X saat implementasi dengan kontroler P-PI kaskade ditunjukkan pada Gambar 6. Posisi dalam *pulse* yang dicapai oleh Motor X adalah Y_{ss} senilai $2,478 \times 10^4$ atau 24.780 *pulse*, sehingga didapatkan nilai *error steady state* sebagai berikut :

$$e_{ss} = x_{ss} - y_{ss} = 25000 - 24780 = 220 \text{ pulse} = 44 \sim m$$

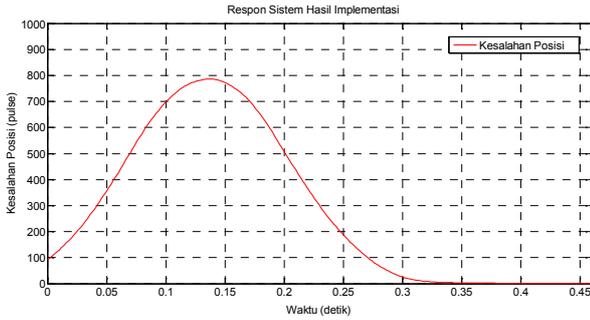
Adanya *error steady state* sebesar 0,88% menunjukkan respon belum mampu mencapai *set point* yang diberikan. Selain itu besarnya kesalahan posisi yang terukur ditunjukkan seperti pada Gambar 7. Respon kesalahan sempat mengalami kenaikan hingga mencapai 786,7 *pulse* sebelum akhirnya menuju 0. Besarnya nilai IAE adalah senilai 65.458 *pulse*.



Gambar 6. Grafik Respon *Plant* Motor X dengan Kontroler Hasil Desain



Gambar 9. Grafik Kesalahan Posisi *Plant* Motor X dengan Kontroler Hasil Desain



Gambar 7. Grafik Kesalahan Posisi *Plant* Motor X dengan Kontroler Hasil Desain

Implementasi kedua adalah menggunakan kontroler P-PI kaskade dengan parameter kontroler hasil *auto tuning*. Nilai *set point* sama seperti pada implementasi sebelumnya.

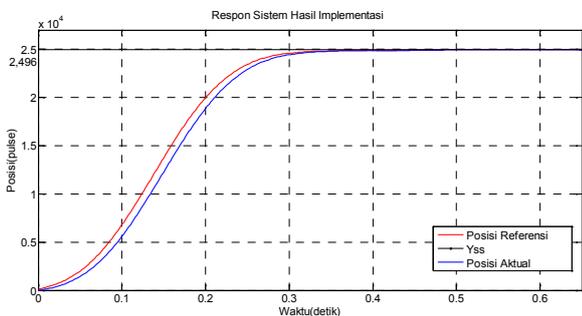
Parameter Kontroler : $K_{p1} = 32$; $K_{p2} = 18$; $i = 0,031$

Parameter *torque filter*: = 1,26 ms

Respon posisi *plant* Motor X saat implementasi kedua ditunjukkan pada Gambar 8. Berdasarkan grafik tersebut dapat diketahui bahwa posisi dalam *pulse* yang dicapai oleh Motor X adalah Y_{ss} senilai $2,496 \times 10^4$ atau 24.960 *pulse*. *Error steady state* yang dicapai sebesar :

$$e_{ss} = x_{ss} - y_{ss} = 25000 - 24960 = 40 \text{ pulse} = 8\text{-}m$$

Error steady state cukup kecil yaitu sebesar 0,16%. Hal ini menunjukkan adanya perbaikan pada performansi respon dibandingkan saat digunakan parameter kontroler hasil desain. Kesalahan posisi saat *tracking* lintasan, ditunjukkan seperti pada Gambar 9.



Gambar 8. Grafik Respon *Plant* Motor X dengan Kontroler Hasil *Auto Tuning*

Meskipun *error steady state* dengan kontroler hasil *auto tuning* ini cukup kecil, namun terjadi perbedaan yang cukup signifikan terhadap kesalahan posisi saat *tracking*. Kesalahan posisi mencapai nilai 1466 *pulse* sebelum akhirnya mencapai nilai 0. Nilai ini lebih besar bila dibandingkan dengan ketika menggunakan kontroler hasil desain. Indeks performansi IAE mengalami peningkatan hingga 129.231,67 *pulse*.

B. Implementasi pada *Plant* Motor Z

Implementasi yang dilakukan pada *plant* Motor Z hampir sama dengan yang telah diuji cobakan pada *plant* Motor Z. Nilai *set point* (X_{ss}) untuk menggerakkan eretan melintang sejauh 5mm senilai dengan 3 kali putaran

Perpindahan : 5mm (Arah koordinat negatif)

Perintah : G00 X0 Z-12.5

Set point (X_{ss}) : 30000 *pulse*

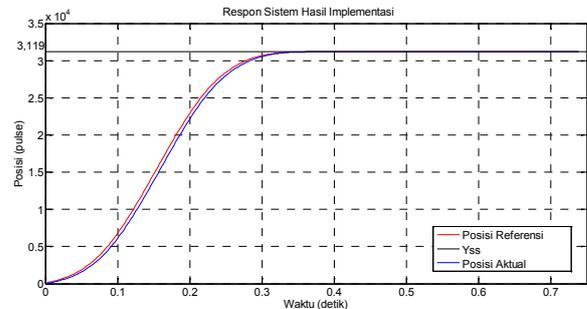
Parameter Kontroler : $K_{p1} = 63$; $K_{p2} = 35$; $i = 0,016$ ms

Parameter *torque filter*: = 0,65 ms

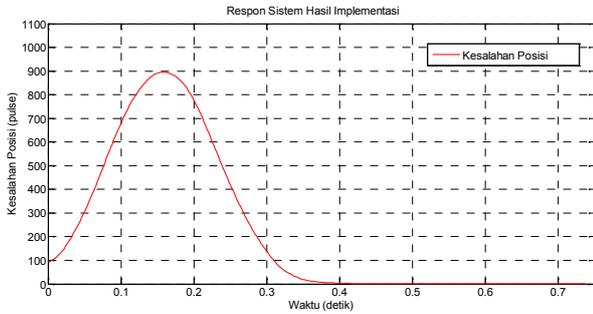
Respon posisi *plant* Motor Z saat implementasi dengan kontroler P-PI kaskade hasil desain ditunjukkan pada Gambar 10. Berdasarkan gambar tersebut, diketahui bahwa posisi dalam *pulse* yang dicapai oleh Motor Z adalah Y_{ss} senilai $3,119 \times 10^4$ atau 31.190 *pulse*.

$$e_{ss} = x_{ss} - y_{ss} = 30000 - 31190 = -1190 \text{ pulse} = -198,33\text{-}m$$

Adanya *error steady state* sebesar 3,97% ini menunjukkan respon belum mampu mencapai *set point* yang diberikan. Selain itu terdapat kesalahan posisi saat *tracking* lintasan. Besarnya kesalahan posisi yang terukur ditunjukkan seperti pada Gambar 11. Berdasarkan Gambar 11 diketahui bahwa respon kesalahan posisi sempat mengalami kenaikan hingga mencapai 895 *pulse* sebelum akhirnya menuju 0. Setelah melalui perhitungan nilai IAE adalah senilai 82.202 *pulse*.



Gambar 10. Respon *Plant* Motor Z dengan Kontroler Hasil Desain



Gambar 11. Grafik Kesalahan Posisi *Plant* Motor Z dengan Kontroler Hasil Desain

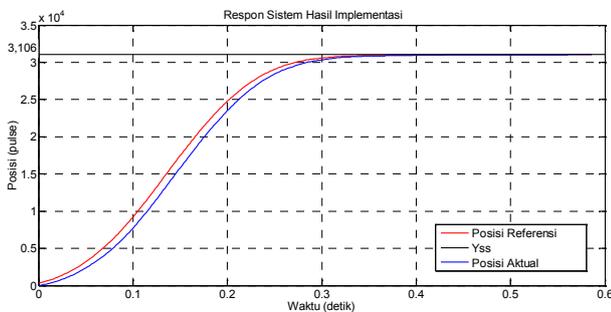
Implementasi kedua adalah menggunakan kontroler P-PI kaskade dengan parameter kontroler hasil *auto tuning* pada perangkat lunak PANATERM 3.7. Perpindahan sama seperti sebelumnya yaitu 5mm (Arah koordinat negatif). Parameter kontroler dan *filter* yang didapatkan setelah *auto tuning* adalah sebagai berikut :

Parameter Kontroler : $K_{p1} = 32$; $K_{p2} = 18$; $i = 0,031$
 Parameter *torque filter* : = 1,26 ms

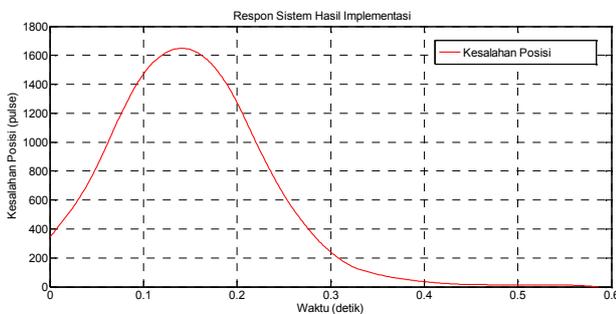
Respon posisi *plant* Motor X saat implementasi kedua ditunjukkan pada Gambar 12. Berdasarkan data tersebut, diketahui bahwa posisi dalam *pulse* yang dicapai oleh Motor Z adalah Y_{ss} senilai $3,106 \times 10^4$ atau 31.060 *pulse*. Nilai *error steady state* yang dicapai sebagai berikut :

$$e_{ss} = x_{ss} - y_{ss} = 30000 - 31060 = -1060 \text{ pulse} = -176,67 \text{ -}m$$

Error steady state berkurang yaitu sebesar 3,53%. Hal ini menunjukkan adanya perbaikan pada performansi respon dibandingkan dengan respon *plant* saat digunakan parameter kontroler hasil desain. Kesalahan posisi saat *tracking* yang terukur ditunjukkan seperti pada Gambar 13.



Gambar 12. Grafik Respon Sistem Hasil Implementasi *Plant* Motor Z dengan Kontroler Hasil *Auto Tuning*



Gambar 13. Grafik Kesalahan Posisi *Plant* Motor Z dengan Kontroler Hasil *Auto Tuning*

Meskipun *error steady state* dengan kontroler hasil *auto tuning* ini cukup kecil namun terjadi perbedaan yang cukup signifikan terhadap kesalahan posisi saat *tracking*. Kesalahan posisi mencapai nilai 1649 *pulse* sebelum

akhirnya mencapai nilai 0. Nilai ini lebih besar bila dibandingkan dengan ketika menggunakan kontroler hasil desain. Indeks performansi IAE mengalami peningkatan hingga 161.634,67 *pulse*.

V. KESIMPULAN

Dari berapa percobaan dan pengujian yang dilakukan dalam penelitian Tugas Akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Pada *plant* Motor X penggunaan kontroler hasil *auto tuning* memberikan hasil yang baik dalam mencapai nilai *error steady state* yang kecil , namun dapat memperbesar nilai *error* saat *tracking* lintasan. Penggunaan kontroler P-PI kaskade hasil desain dinilai lebih baik karena dapat mencapai nilai *error steady state* sebesar 0,88% dan memperkecil *error* saat *tracking* lintasan dengan nilai indeks IAE sebesar 65.458 *pulse*.
2. Pada *plant* Motor Z penggunaan kontroler hasil *auto tuning* memberikan hasil yang baik dalam mencapai nilai *error steady state* yang kecil , namun dapat memperbesar nilai *error* saat *tracking* lintasan. Penggunaan kontroler hasil desain dinilai lebih baik karena dapat mencapai nilai *error steady state* sebesar 3,97% dan memperkecil *error* saat *tracking* lintasan dengan nilai indeks IAE sebesar 82.202 *pulse*.

Penelitian menggunakan *plant* Mesin Bubut CNC ini dapat dilanjutkan dengan menambahkan fungsi *filter* dan kontroler *feed forward* yang telah ada pada aplikasi *driver* PANASONIC MINAS-A4 *Series* yang belum digunakan pada penelitian kali ini. Selain itu, mesin LNC T300 memiliki fitur pemrograman yang cukup aplikatif untuk pengerjaan benda kerja yang lebih kompleks sehingga dapat dieksplorasi lebih dalam pada penelitian yang selanjutnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih dan segenap penghargaan penulis ucapkan kepada ibu dan ayah tercinta atas segala dukungan moral, materi, semangat, dan doanya yang tak pernah berhenti mengalir; kepada dosen pembimbing pertama, Bapak Mochammad Rameli, yang telah bersedia memberikan bimbingannya kepada Bapak Rusdhianto Effendi selaku koordinator bidang studi dan dosen pembimbing kedua yang telah memberikan banyak arahan dan fasilitas dalam proses pengerjaan Tugas Akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sumbodo, W., Pujiono, S., dkk, “*Teknik Produksi Mesin Industri- Jilid 2*”, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Departemen Pendidikan Nasional, (2008).
- [2] Koren, Yoram., “*Computer Control of Manufacturing Systems*”, Auckland : McGraw-Hill International Book Company.
- [3] -----, “*LNC T300 Turning Controller Maintenance Manual*”, China : Pou Yuen Technology Corporation, (2004).
- [4] -----, “*Instruction Manual AC Servo Motor and Driver MINAS A4 Series*”, Panasonic.
- [5] Effendie A.K, Rushianto. “*Diktat Sistem Pengaturan Adaptif*”, (2011)