

Perancangan Pengaturan Posisi Robot Manipulator Berbasis PD *Fuzzy Mamdani Computed Torque Control* (PD *Fuzzy CTC*)

Duli Ridlo Istantono dan Trihastuti Agustinah
Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: trihastuti@ee.its.ac.id

Abstrak—Ilmu robotika telah berkembang pesat selama dua puluh tahun terakhir, didorong oleh kemajuan pesat dalam komputer dan teknologi sensor serta kemajuan teoritis dalam kontrol dan *computer vision*. Perkembangan ini membuat maraknya penggunaan robot manipulator dalam lingkungan industri. Di antara keuntungan menggunakan robot adalah berdampak pada penurunan biaya tenaga kerja, meningkatkan presisi dan produktivitas, meningkatkan fleksibilitas, dan mengatasi kondisi kerja seperti membosankan, berulang-ulang, atau pekerjaan berbahaya. Masalah utama dalam mengendalikan manipulator robot adalah untuk mengontrol robot untuk mencapai posisi yang diinginkan. Oleh karena itu masalah desain kontrol robot adalah untuk memilih jenis kontroler yang tepat. *Computed Torque Controller* (CTC) merupakan kontroler nonlinier yang handal yang secara luas digunakan dalam pengendalian robot manipulator. Kontroler CTC didesain berdasarkan pada linierisasi umpan balik dan penghitungan besar torsi lengan robot yang diperlukan dengan menggunakan hukum kontrol *feedback* nonlinier. Kontroler ini menggunakan analisis gerak dinamik sehingga sangat memperhatikan energi dan gaya-gaya yang terjadi pada pergerakan robot manipulator. Simulasi dilakukan dengan memberikan trayektori *joint* dari satu titik ke titik yang lain. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontroler PD *Fuzzy CTC* mampu mengikuti trayektori *joint* dengan nilai RMSE posisi sudut *joint* dari kontroler PD *Fuzzy CTC* adalah 10 kali lebih kecil dibandingkan dengan kontroler PD CTC dengan ketelitian posisi *end-effector* dengan ketelitian mencapai 0,1 mm.

Kata Kunci—Dinamik, PD *Fuzzy CTC*, Robot Manipulator, Trayektori.

I. PENDAHULUAN

PERMASALAHAN yang sering terjadi adalah kendali posisi robot manipulator sesuai dengan referensi yang diinginkan. Dalam kinematik pergerakan robot tidak terlalu bermasalah dimana gaya-gaya yang terjadi pada robot tidak diperhatikan. Akan tetapi jika pembahasannya dalam gerak dinamik, gaya-gaya yang terjadi harus diperhatikan untuk dilakukan perhitungan dalam melakukan pemodelan robot manipulator.

Pengaturan posisi yang sering menjadi kendala pada robot perlu ditingkatkan agar lebih baik. Untuk itu perlu dilakukan pemilihan jenis kontroler yang tepat, yang bisa digunakan untuk mengendalikan gerak robot manipulator. Untuk itu perlu pemilihan jenis kontroler yang tepat, yang bisa digunakan untuk mengendalikan gerak robot manipulator. *Computed Torque Controller* (CTC) merupakan kontroler nonlinier yang handal yang secara luas digunakan dalam pengendalian robot manipulator. Kontroler CTC berdasarkan pada linierisasi umpan balik dan

menghitung besar torsi lengan robot yang diperlukan dengan menggunakan hukum kontrol *feedback* nonlinier. Kontroler ini bekerja sangat baik ketika semua parameter fisik dan dinamik diketahui, tetapi ketika robot manipulator memiliki variasi dalam parameter dinamik, dalam situasi seperti ini kontroler tidak mampu menangani kinerja yang diinginkan [1]. Untuk menjamin agar mendapatkan kinerja sistem robot manipulator yang sesuai, untuk mengikuti trayektori posisi yang diinginkan, pada makalah ini dirancang kontroler PD *Fuzzy CTC* yang digunakan untuk mengoreksi kekurangan respon yang ada pada kontroler PD CTC.

Makalah ini terbagi menjadi lima bagian sebagai berikut. Pada bagian II akan dijelaskan model dinamik robot manipulator. Bagian III menjelaskan mengenai perancangan kontroler PD *Fuzzy CTC*. Pada bagian IV akan dijelaskan mengenai hasil pengujian dan analisis sistem. Pada akhirnya kesimpulan dari makalah ini akan dijelaskan pada bagian V.

II. MODEL DINAMIK ROBOT MANIPULATOR

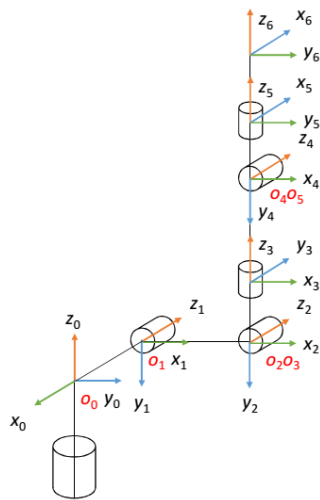
Berdasarkan Armstrong [1][2], model dinamik yang digunakan untuk mengatur posisi robot manipulator PUMA-560 didapatkan dari penurunan persamaan *lagrange* yang bergantung dari tiga *link* pertama dari total enam *link*.

Berdasar pada pembelajaran yang dilakukan oleh Armstrong [1][2], Robot PUMA-560 memiliki parameter-parameter yang digunakan dalam pemodelan dinamik. Tabel 2 dan Tabel 3 menunjukkan informasi parameter-parameter yang dimiliki robot PUMA-560 berupa konstanta inersia dan konstanta gravitasi.



Gambar 1. Bentuk Fisik Robot PUMA-560

Gambar 2 merupakan penetapan *frame* yang dibuat sesuai dengan standar *Denavit-Hartenberg* untuk menggambarkan robot secara kinematika.



Gambar 2. Sistem Koordinat Link PUMA-560

Tabel 1 merupakan data parameter tiap link yang didapatkan berdasarkan penetapan frame.

Tabel 1. Parameter DH PUMA-560 [3]

Link ke-i	a_i (mm)	α_i (deg)	d_i (mm)	θ_i (deg)
1	0	-90	0	θ_1^*
2	431,8	0	149,09	θ_2^*
3	-20,32	90	0	θ_3^*
4	0	-90	433,07	θ_4^*
5	0	90	0	θ_5^*
6	0	0	56,25	θ_6^*

Berikut ini merupakan

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = M(\theta) \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + B(\theta) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + C(\theta) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \\ \dot{\theta}_3^2 \end{bmatrix} + G(\theta) \quad (1)$$

Dimana

- τ : vektor torsi
- $M(\theta)$: matriks inersia
- $B(\theta)$: matriks coriolis
- $C(\theta)$: matriks sentrifugal
- $G(\theta)$: matriks gravitasi
- θ : vektor posisi
- $\ddot{\theta}$: vektor percepatan
- $[\dot{\theta}, \dot{\theta}]$: vektor perkalian kecepatan
- $[\dot{\theta}^2]$: vektor kuadrat kecepatan

Matriks inersia dihitung sebagai berikut

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & 0 & 0 & 0 \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & 0 & 0 & 0 \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & 0 & M_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} M_{11} &= I_{m1} + I_1 + I_3 c_2^2 + I_7 s_{23}^2 + I_{10} s_{23} c_{23} \\ &\quad + I_{11} s_2 c_2 + I_{21} s_{23}^2 + 2(I_5 c_2 s_{23} + I_{12} c_2 c_{23}) \\ &\quad + I_{15} s_{23} s_{23} + I_{16} c_2 s_{23} + I_{22} s_{23} c_{23} \\ M_{12} &= I_4 s_2 + I_8 c_{23} + I_9 c_2 + I_{13} s_{23} - I_{18} c_{23} \\ M_{13} &= I_8 c_{23} + I_{13} s_{23} - I_{18} c_{23} \\ M_{22} &= I_{m2} + I_2 + I_6 + 2(I_5 s_3 + I_{12} c_2 + I_{15} + I_{16} s_3) \\ M_{23} &= I_5 s_3 + I_6 + I_{12} c_3 + I_{16} s_3 + 2I_{15} \\ M_{33} &= I_{m3} + I_6 + 2 * I_{15} \\ M_{35} &= I_{15} + I_{17} \\ M_{44} &= I_{m4} + I_{14} \\ M_{55} &= I_{m5} + I_{17} \\ M_{66} &= I_{m6} + I_{23} \\ M_{21} &= M_{12}, M_{31} = M_{13}, M_{32} = M_{23} \\ M_{14} &= 0, M_{15} = 0, M_{16} = 0 \\ M_{24} &= 0, M_{25} = 0, M_{26} = 0 \\ M_{34} &= 0, M_{36} = 0 \\ M_{41} &= 0, M_{42} = 0, M_{43} = 0, M_{45} = 0, M_{46} = 0 \\ M_{51} &= 0, M_{52} = 0, M_{53} = 0, M_{54} = 0, M_{56} = 0 \\ M_{61} &= 0, M_{62} = 0, M_{63} = 0, M_{64} = 0, M_{65} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Matriks coriolis dihitung sebagai berikut

$$B(\theta) = \begin{bmatrix} b_{112} & b_{113} & 0 & b_{115} & 0 & b_{123} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{214} & 0 & 0 & b_{223} & 0 & b_{225} & 0 & 0 & b_{235} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{314} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{412} & b_{412} & 0 & b_{415} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{514} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} b_{112} &= 2(-I_3 s_2 c_2 + I_5 c_{223} + I_7 s_{23} c_{23} - I_{12} s_{223} + I_{15} 2s_{23} c_{23} \\ &\quad + I_{16} c_{223} + I_{21} s_{23} c_{23} + I_{22} (1 - 2s_{23}^2)) + I_{10} (1 - 2s_{23}^2) \\ &\quad + I_{11} (1 - 2s_2^2) \\ b_{113} &= 2(I_5 c_{23} c_2 + I_7 s_{23} c_{23} - I_{12} s_{23} c_2 + I_{15} 2s_{23} c_{23} + I_{16} c_2 c_{23} \\ &\quad + I_{21} s_{23} c_{23} + I_{22} (1 - 2s_{23}^2)) + I_{10} (1 - 2s_{23}^2) \\ b_{115} &= 2(-s_{23} c_{23} + I_{15} s_{23} c_{23} + I_{16} c_2 c_{23} + I_{22} c_{23}^2) \\ b_{123} &= 2(-I_8 s_{23} + I_{13} c_{23} + I_{18} s_{23}) \\ b_{214} &= I_{14} s_{23} + I_{19} s_{23} + I_{20} s_{23} \\ b_{223} &= 2(-I_{12} s_3 + I_5 c_3 + I_{16} c_3) \\ b_{225} &= 2(I_{16} c_3 + I_{22}) \\ b_{235} &= b_{225} \\ b_{314} &= (I_{20} + I_{14} + I_{19}) s_{23} \\ b_{412} &= -b_{214} \\ b_{413} &= -b_{314} \\ b_{415} &= -I_{20} s_{23} - I_{17} s_{23} \\ b_{514} &= -b_{415} \end{aligned} \quad (5)$$

Matriks sentrifugal dihitung sebagai berikut

$$C(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & 0 & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_{51} & c_{52} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} c_{12} &= I_4 c_2 - I_8 s_{23} - I_9 s_2 + I_{13} c_{23} + I_{18} s_{23} \\ c_{13} &= 0.5 b_{123} \\ c_{21} &= -0.5 b_{112} \\ c_{23} &= 0.5 b_{223} \\ c_{31} &= -0.5 b_{113} \\ c_{32} &= -c_{23} \\ c_{51} &= -0.5 b_{115} \\ c_{52} &= -0.5 b_{225} \end{aligned} \quad (7)$$

Matriks gravitasi dihitung sebagai berikut

$$G(\theta) = \begin{bmatrix} 0 \\ G_2 \\ G_3 \\ 0 \\ G_5 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} G_2 &= g_1 c_2 + g_2 s_{23} + g_3 s_2 + g_4 c_{23} + g_5 s_{23} \\ G_3 &= g_2 s_{23} + g_4 c_{23} + g_5 s_{23} \\ G_5 &= g_5 s_{23} \end{aligned}$$

Percepatan posisi dapat ditulis sebagai berikut

$$\ddot{\theta} = M^{-1}(\theta) [\tau - (B(\theta)\dot{\theta}\dot{\theta} + C(\theta)\dot{\theta}^2 + G(\theta))] \quad (10)$$

Tabel 2. Konstanta Inersia [1][2]

Konstanta Inersia ($Kg.m^2$)	
$I_1 = 1.43 \pm 0.05$	$I_2 = 1.75 \pm 0.07$
$I_1 = 1.38 \pm 0.05$	$I_4 = 0.69 \pm 0.02$
$I_5 = 0.372 \pm 0.031$	$I_6 = 0.333 \pm 0.016$
$I_7 = 0.298 \pm 0.029$	$I_8 = -0.134 \pm 0.014$
$I_9 = 0.0238 \pm 0.012$	$I_{10} = -0.0213 \pm 0.0022$
$I_{11} = -0.0142 \pm 0.007$	$I_{12} = -0.011 \pm 0.0011$
$I_{13} = 0.00379 \pm 0.0009$	$I_{14} = 0.00164 \pm 0.00007$
$I_{15} = 0.00125 \pm 0.0003$	$I_{16} = 0.00124 \pm 0.0003$
$I_{17} = 0.000642 \pm 0.0003$	$I_{18} = 0.000431 \pm 0.00013$
$I_{19} = 0.0003 \pm 0.0014$	$I_{20} = -0.000202 \pm 0.0008$
$I_{21} = -0.0001 \pm 0.0006$	$I_{22} = -0.000058 \pm 0.00001$
$I_{23} = 0.00004 \pm 0.00002$	$I_{m1} = 1.14 \pm 0.27$
$I_{m2} = 4.71 \pm 0.54$	$I_{m3} = 0.827 \pm 0.093$
$I_{m4} = 0.2 \pm 0.016$	$I_{m5} = 0.179 \pm 0.014$
$I_{m6} = 0.193 \pm 0.016$	

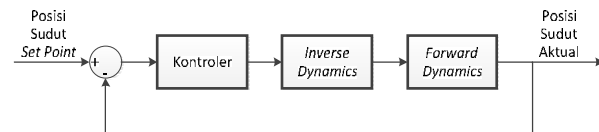
Tabel 3. Konstanta Gravitasi [1][2]

Konstanta Gravitasi ($N.m$)	
$g_1 = -37.2 \pm 0.5$	$g_4 = -8.44 \pm 0.2$
$g_2 = 1.02 \pm 0.5$	$g_5 = 0.249 \pm 0.025$
$g_3 = -0.0282 \pm 0.0056$	

III. PERANCANGAN KONTROLER PD FUZZY CTC

Pada makalah ini dirancang kontroler *Proporsional Derivative* (PD), kontroler *Fuzzy* dan kontroler *Computed Torque Controller* (CTC). Kontroler PD digunakan untuk memperbaiki respon *steady state* dari sistem kontrol robot manipulator, dirancang melalui pendekatan karakteristik respon sistem. Lalu kontroler *Fuzzy* digunakan sebagai koreksi terhadap *gain* kontroler PD yang digunakan untuk memperbaiki respon transien dari sistem kontrol robot manipulator. Sedangkan kontroler CTC merupakan kontroler yang digunakan dalam pemodelan dinamik robot manipulator yang menggunakan besaran torsi sebagai metode kendali robot manipulator.

Untuk memudahkan dalam perancangan pengaturan robot manipulator perlu dirancang sebuah blok diagram sistem. Gambar 3 menunjukkan blok diagram kontrol robot manipulator yang merepresentasikan sistem secara umum.



Gambar 3. Blok Diagram Kontrol Robot Manipulator

A. Perancangan Kontroler PD

Kontroler PD dirancang untuk memperbaiki respon *steady state* dari sistem kontrol manipulator, digunakan untuk mengolah data *error* dan perubahan *error* dari posisi sudut yang diinginkan terhadap posisi sudut aktual.

Dalam perancangan ini kontroler PD didesain dengan menerapkan metode *tuning Ziegler-Nichols* dengan menggunakan parameter yang sudah ditentukan. Tabel 4 menunjukkan nilai parameter yang bisa digunakan dengan beberapa kemungkinan kontroler yang bisa dipilih.

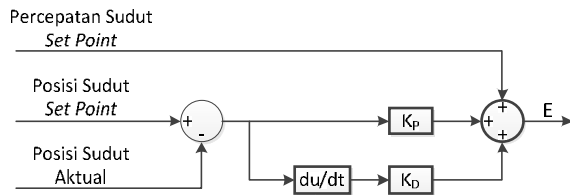
Tabel 4. Metode Ziegler-Nichols [4]

Tipe Kontrol	K_P	K_I	K_D
P	$0.5 K_U$	-	-
PI	$0.45 K_U$	$1.2 K_P/T_U$	-
PD	$0.8 K_U$	-	$K_P T_U/8$
PID	$0.6 K_U$	$2 K_P/T_U$	$K_P T_U/8$

Setelah didapatkan nilai *gain* kontroler PD, model dinamik menjadi berbentuk PD CTC seperti berikut [1].

$$\tau = M(\theta)(\ddot{\theta}_d + K_p e + K_d \dot{e}) + B(\theta)(\dot{\theta}\dot{\theta}) + C(\theta)\dot{\theta}^2 + G(\theta) \quad (11)$$

Sehingga bentuk struktur kontroler menjadi

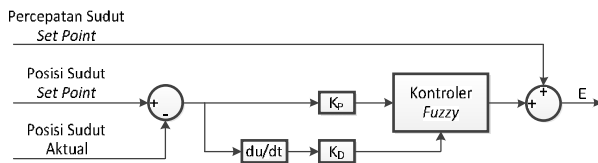


Gambar 4. Struktur Kontroler PD CTC [2]

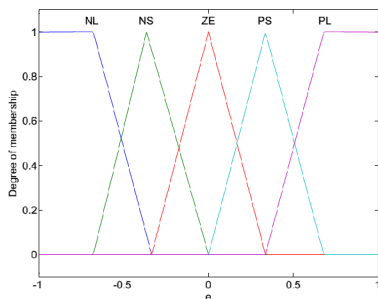
B. Perancangan Kontroler Fuzzy

Kontroler Fuzzy yang digunakan adalah kontroler Fuzzy tipe Mamdani. Tipe Mamdani digunakan karena tipe ini memiliki masukan yang sifatnya human input sehingga sangat sesuai dengan sistem kontrol robot manipulator yang nonlinier. Kontroler ini digunakan untuk memperbaiki respon transien sebagai koreksi dari respon sinyal kontrol dari kontroler PD.

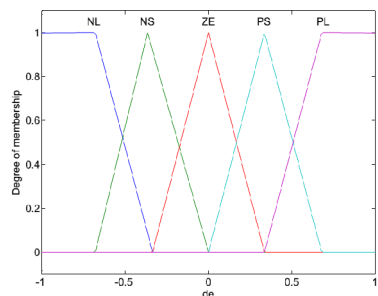
Gambar 5 menunjukkan blok diagram perancangan kontroler Fuzzy, gambar 6-8 menunjukkan fungsi keanggotaan untuk input dan output, Tabel 5 menunjukkan rule base kontroler dan gambar 9 merupakan diagram simulink sistem kontrol robot manipulator.



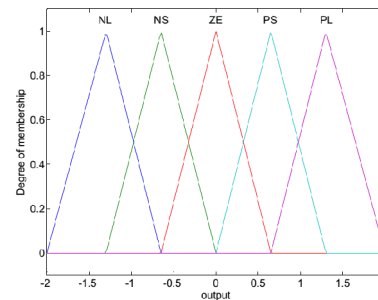
Gambar 5. Struktur Kontroler PD Fuzzy CTC



Gambar 6. Fungsi Keanggotaan untuk Input Sinyal Error



Gambar 7. Fungsi Keanggotaan untuk Input Sinyal Delta Error



Gambar 8. Fungsi Keanggotaan untuk Output Sinyal Kontrol

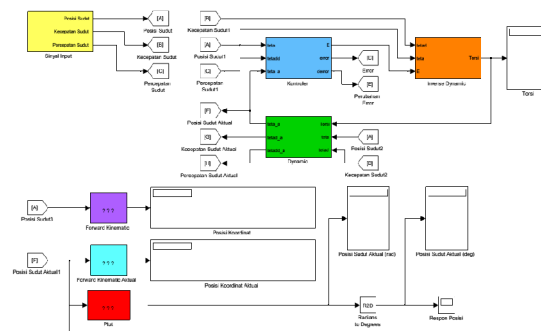
Tabel 5. Aturan Dasar Mack Vicar Whelan

Output		Delta Error				
		NL	NS	ZE	PS	PL
Error	NL	NL	NL	NS	NS	ZE
	NS	NL	NS	ZE	ZE	PS
	ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
	PS	NS	ZE	PS	PS	PL
	PL	ZE	PS	PS	PL	PL

Di mana deskripsi linguistik dari fungsi keanggotaan input dan output adalah Negative Large (NL), Negative Small (NS), Zero (ZE), Positive Small (PS) dan Positive Large (PL).

Dari aturan dasar yang sudah dibuat dilakukan proses inferensi untuk menarik kesimpulan sinyal kontrol yang digunakan. Aturan inferensi menggunakan metode Mamdani yang menentukan nilai maksimum sinyal kontrol dari minimum input sinyal error dan delta error.

Agar sistem mendapatkan besaran yang real maka dilakukan defuzzifikasi untuk memetakan besaran dari himpunan Fuzzy ke dalam bentuk nilai crisp. Metode yang digunakan dalam defuzzifikasi adalah metode centroid (center of gravity atau center of area).



Gambar 9. Diagram Simulink Sistem Kontrol Robot Manipulator

IV. HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM

Pada Bagian ini akan dibahas mengenai pengujian data antara respon masukan posisi sudut dalam ruang sendi yang diinginkan dengan respon keluaran posisi sudut dalam ruang sendi yang aktual. Kedua posisi sudut tersebut nantinya akan dibandingkan dan dianalisis lebih lanjut, dimana nilai keduanya akan menentukan posisi koordinat end-effector dari robot manipulator dalam ruang kartesian. Selanjutnya pergerakan robot manipulator disimulasikan menggunakan robotics toolbox Peter Corke versi 8.

A. Pengujian Posisi Sudut Setiap Joint

Pengujian posisi sudut setiap *joint* perlu dilakukan untuk mengetahui perbandingan antara posisi sudut yang diinginkan dengan posisi sudut aktual sebelum diberikan kontroler dalam sistem kontrol robot manipulator. Pada pengujian ini ada dua masukan posisi sudut yang diberikan untuk enam *joint* dari robot manipulator. Sinyal *input* yang diberikan pada tiap-tiap *joint* berupa trayektori kubik. Tabel 6 dan Tabel 7 menunjukkan hasil pengujian posisi sudut setiap *joint* robot manipulator dengan masukan dua posisi sudut dimana q_x merupakan posisi robot manipulator ke- x , θ_d merupakan posisi sudut *joint* yang diinginkan, dan θ_a merupakan posisi sudut *joint* aktual.

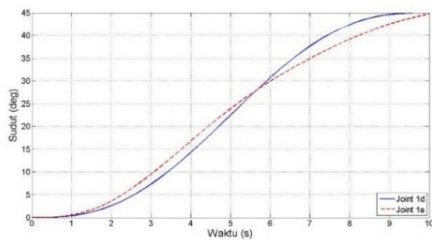
Tabel 6. Pengujian Posisi Sudut Joint 1, Joint 2 dan Joint 3

$q_0=0$	Joint 1		Joint 2		Joint 3	
	θ_d (deg)	θ_a (deg)	θ_d (deg)	θ_a (deg)	θ_d (deg)	θ_a (deg)
q_1	45	68.4	-90	-136.8	-45	-68.4

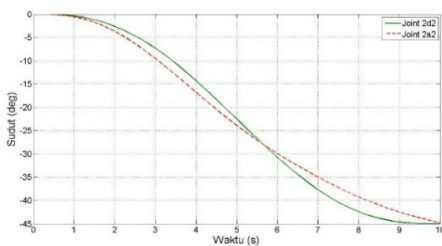
Tabel 7. Pengujian Posisi Sudut Joint 4, Joint 5 dan Joint 6

$q_0=0$	Joint 4		Joint 5		Joint 6	
	θ_d (deg)	θ_a (deg)	θ_d (deg)	θ_a (deg)	θ_d (deg)	θ_a (deg)
q_1	30	45.55	0	0	-180	-273.6

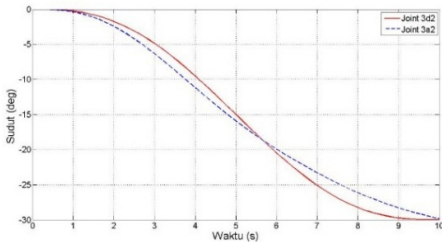
Gambar 10-15 menunjukkan respon posisi *joint* berdasarkan data pada tabel 6-7.



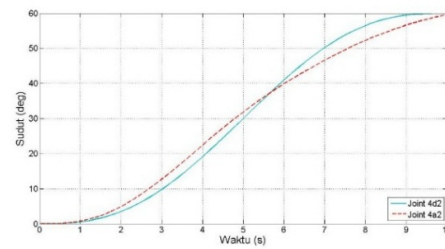
Gambar 10. Respon Joint ke-1 Posisi Pertama



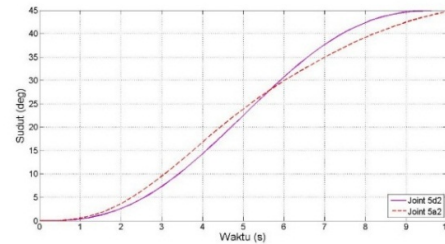
Gambar 11. Respon Joint ke-2 Posisi Pertama



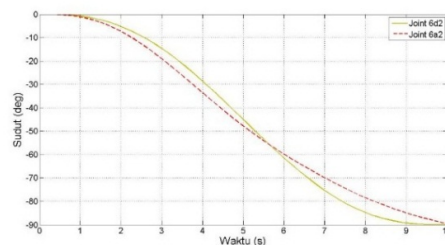
Gambar 12. Respon Joint ke-3 Posisi Pertama



Gambar 13. Respon Joint ke-4 Posisi Pertama



Gambar 14. Respon Joint ke-5 Posisi Pertama



Gambar 15. Respon Joint ke-6 Posisi Pertama

Dari respon posisi *joint* pada Gambar 10-15 didapatkan nilai RMSE antara nilai *set point* dan aktual, ditunjukkan pada tabel 8.

Tabel 8. Nilai RMSE tanpa Kontroler

Nilai RMSE	Posisi 1 (q_1)
Joint 1	1,14437
Joint 2	2,288741
Joint 3	1,14437
Joint 4	0,761025
Joint 5	0
Joint 6	4,577482

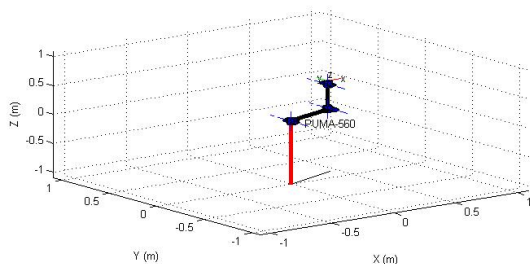
B. Pengujian Posisi End-Effector Robot Manipulator

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui koordinat posisi dari *end-effector* robot manipulator pada awal sebelum diberikan kontroler dalam sistem kontrol. Koordinat dari posisi yang diinginkan dibandingkan dengan koordinat dari posisi aktual. Koordinat posisi didapatkan dengan menggunakan persamaan transformasi homogen dalam *forward kinematics*. Tabel 9 menunjukkan posisi koordinat sumbu x , y dan z dari *end-effector*.

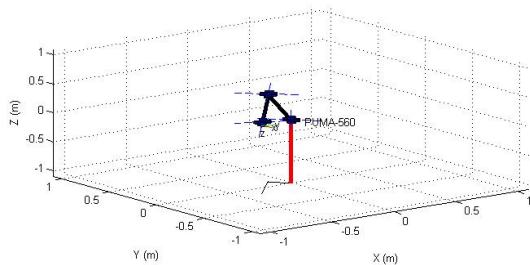
Tabel 9. Koordinat Posisi End-effector Robot Manipulator

Koordinat	x_i	y_i	z_i
q_1 Set Point	-0,3399	-0,1291	0,07144
Aktual	-0,3412	-0,1282	-0,07613

Gambar 16 menunjukkan posisi awal dan Gambar 17 menunjukkan posisi akhir robot manipulator dalam bentuk *plot* gambar.



Gambar 16. Posisi Awal Robot Manipulator



Gambar 17. Posisi Akhir Robot Manipulator Pertama

Dari persamaan yang berdasarkan tabel 4 didapatkan beberapa nilai T_U yang akan menentukan nilai K_P dan K_D . Nilai *set point* yang diberikan sebesar 90° dan hasil *tuning* ditunjukkan pada tabel 10.

Tabel 10.
Data Hasil *Tuning Gain* kontroler PD

Data <i>Tuning</i>	K_U	T_U	K_P	K_D
Set Point = 90	100	0,625	80	6,25

Tabel 11.
Nilai RMSE Kontroler PD *Fuzzy* CTC

Nilai RMSE	Posisi 1 (q_1)
Joint 1	0,001167805
Joint 2	0,00228027
Joint 3	0,00111588
Joint 4	0,000778844
Joint 5	4,5289E-16
Joint 6	0,004420558

Dengan posisi *end-effector* ditunjukkan pada tabel 12 berikut.

Tabel 12.
Koordinat Posisi *End-effector* Robot Manipulator (PD *Fuzzy* CTC)

Koordinat		x_i	y_i	z_i
q_1	Set Point	-0,3399	-0,1291	0,07144
	Aktual	-0,3399	-0,1291	0,07145

V. KESIMPULAN

Kontroler PD CTC mampu memperbaiki respon posisi tanpa kontroler, di mana posisi *joint* robot manipulator dapat mengikuti trayektori yang diinginkan.

Kontroler PD *Fuzzy* CTC mampu memperbaiki kekurangan respon pada kontroler PD CTC, di mana posisi *joint* robot manipulator dapat mengikuti trayektori yang diinginkan dengan nilai RMSE sekitar 10 kali lebih kecil pada tiap-tiap *joint*.

Kontroler PD *Fuzzy* CTC dapat memperbaiki posisi *end-effector* lebih baik dibandingkan dengan kontroler PD CTC dengan ketelitian mencapai 0,1 mm.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Piltan Farzin, Yarmahmoudi, M.H., Shamsodini Mohammad, Mazlomian Ebrahim and Hosainpour Ali, "PUMA-560 Robot Manipulator Position Computed Torque Control Methods Using MATLAB/SIMULINK and Their Integration into Graduate Nonlinear Control and MATLAB COURSE", *International Journal of Robotics and Automation*, (IJRA), Vol. 3, No. 3, 2012.
- [2] Fu, K.S., "Geometric Approach in Solving Inverse Kinematics of PUMA Robots", *IEEE Trans. Aero and Elect Sys*, Vol. AES-20, No. 6, pp. 695-706.
- [3] Armstrong, B., Khatib, O., and Burdick, J., "The Explicit Dynamic Model and Inertial Parameters of the PUMA 560 Arm", *IEEE Conference*, 2002, pp. 510-518.
- [4] Ziegler, J.G and Nichols, N.B., "Optimum Setting for Automatic Controller", *Transaction of the ASME* 64, pp. 759-768, 1942.