

Desain Kontroler *Fuzzy* untuk Sistem *Gantry Crane*

Rosita Melindawati, Trihastuti Agustinah

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: rositamelindawati@gmail.com, trihastuti@elect-eng.its.ac.id

Abstrak—*Gantry Crane* merupakan alat yang digunakan untuk memindahkan muatan berat. Proses pemindahan muatan menggunakan *Gantry Crane* bekerja di kecepatan yang tinggi, sehingga dapat menyebabkan ayunan yang besar. Permasalahan utama dari Sistem *Gantry Crane* adalah bagaimana sistem bergerak dari satu titik ke titik lain dengan tepat serta bergerak tanpa ayunan. Pada Tugas Akhir ini, kontroler *fuzzy* didesain untuk sistem *Gantry Crane* tersebut. Kontroler *fuzzy* Sugeno digunakan untuk *tracking* yaitu sistem *Gantry Crane* mampu bergerak mengikuti sinyal referensi. Sistem ini juga didesain untuk stabilisasi, yaitu mengurangi ayunan serta mampu mengatasi gangguan. Stabilisasi didesain dengan menggunakan teknik *pole placement*. Hasil desain disimulasikan, kemudian diimplementasikan pada *plant* nyata pendulum, “*Feedback Digital Pendulum System*” yang merepresentasikan Sistem *Gantry Crane*. Hasil simulasi dan implementasi menunjukkan bahwa posisi kereta dapat mengikuti sinyal referensi serta posisi *crane* stabil di sekitar 0 radian.

Kata Kunci— *Gantry Crane*, *fuzzy* Sugeno, *pole placement*,

I. PENDAHULUAN

Gantry Crane adalah suatu alat yang digunakan untuk mengangkat atau memindahkan muatan berat. *Gantry Crane* merupakan jenis *crane* yang memiliki trek sistem yang ditopang oleh sebuah tiang penyangga pada masing-masing ujung trek. Proses pemindahan muatan menggunakan *Gantry Crane* bekerja di kecepatan yang tinggi, sehingga dapat menyebabkan ayunan yang besar. Selain itu, juga menyebabkan permasalahan keselamatan di lingkungan kerja. Kegagalan dalam mengontrol *crane* secara manual dapat menyebabkan kecelakaan dan membahayakan orang-orang di sekitar. Ayunan pada saat proses pemindahan muatan dan lamanya waktu dari objek terkontrol dalam sistem *Gantry Crane*, mengakibatkan *plant* tidak bekerja secara efisien.

Permasalahan pada operasi *Gantry Crane* dimulai saat beban pada posisi tergantung vertikal ke bawah (posisi ekuilibrium). Pada saat *crane* bergerak untuk memindahkan beban, maka beban akan terayun dengan besar sudut ayun tertentu, mengikuti perubahan kecepatan pada perpindahan *crane*. Meskipun waktu perpindahan yang minimal dapat tercapai dengan kecepatan tinggi, tetapi akan mengakibatkan sudut ayun yang terlalu besar [1]. Pengendalian kecepatan *crane* dibutuhkan untuk memindahkan *crane* dengan cepat serta dengan osilasi sekecil mungkin pada beban.

Beberapa metode kontrol telah dikembangkan untuk mendapatkan solusi permasalahan tersebut. Zawawi, M.A., dkk [2] telah membandingkan hasil kontrol *feedback* pada sudut *crane* saja, antara lain metode *Linear Quadratic Regulator* (LQR), *Delayed Feedback Signal* (DFS), dan

Proportional-Derivative (PD). Metode yang dilakukan oleh Mahindra [3] yaitu metode algoritma *Linear Quadratic Minimum Time* (LQMT) memiliki respons yang lebih baik daripada LQR. Namun pada saat implementasi pada *plant* nyata “*Feedback Digital Pendulum System*”, kontroler gagal menghasilkan respons sistem yang diinginkan. Kontrol *fuzzy* telah banyak dan berhasil diterapkan untuk sistem *Gantry Crane* [4],[5],[6],[7]. Meskipun begitu, desain sistem kontrol *fuzzy* masih merupakan tantangan dalam desain kontrol nonlinear.

Pada Tugas Akhir ini akan dibuat desain kontroler *fuzzy* untuk sistem *Gantry Crane* yang diharapkan dapat menghasilkan respons yang lebih baik. Untuk stabilisasi akan dirancang gain *state feedback*, sedangkan untuk *tracking* menggunakan kontroler *fuzzy* Sugeno dengan 9 aturan *if-then*. Hasil desain kontroler akan diuji melalui simulasi pada *software* Matlab/Simulink dan implementasi pada *plant* nyata pendulum, “*Feedback Digital Pendulum System*”. *Plant* tersebut memiliki trek yang ditopang oleh sebuah tiang penyangga pada masing-masing ujung trek, sehingga dapat digunakan sebagai pemodelan bagi sistem *Gantry Crane*.

Makalah ini terbagi menjadi lima bagian. Bagian I berisi pendahuluan, pada bagian berikutnya dipaparkan mengenai model matematika sistem *Gantry Crane*. Bagian III menjelaskan tentang kontrol *fuzzy* Sugeno dan teknik *pole placement*. Pada bagian IV menjelaskan hasil simulasi dan implementasi pada sistem *Gantry Crane* Kesimpulan dari makalah ini disampaikan pada bab V.

II. MODEL MATEMATIKA SISTEM GANTRY CRANE

Untuk mendapatkan model matematika dari sistem *Gantry Crane*, langkah pertama yang harus diketahui adalah sistem koordinat pada *Gantry Crane* dengan parameter-parameter geometriknya. Model *Gantry Crane* yang digunakan pada Tugas Akhir ini dapat dilihat pada Gambar 1 [6]. Dari gambar dapat dilihat bahwa beban tergantung di ujung *crane*. Pada waktu tertentu, kereta akan berpindah ke \mathbf{x}_1 , gaya yang ditimbulkan dinotasikan dengan \mathbf{u} , sedangkan usaha sangat dipengaruhi oleh massa dan gravitasi. Notasi dari massa kereta adalah m_c , massa beban adalah m_L , panjang *crane* adalah l , dan sudut antara *crane* dan sumbu vertikal adalah θ . Dengan menggunakan hukum Newton kedua:

$$\Sigma \mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a} \quad (1)$$

Persamaan dinamika *Gantry Crane* dapat diturunkan, antara lain gerak kereta arah horisontal seperti pada Persamaan (2).

$$m_c \frac{d^2 x_1}{dt^2} = u + F \sin \theta \tag{2}$$

sedangkan untuk gerak kereta arah vertikal seperti pada Persamaan (3).

$$F \cos \theta + m_c g = 0 \tag{3}$$

Untuk gerak crane arah horisontal, persamaan dinamika Gantry Crane dapat diturunkan seperti pada Persamaan (4).

$$m_L \frac{d^2(x_1 + l \sin \theta)}{dt^2} = -F \sin \theta \tag{4}$$

sedangkan untuk gerak crane arah vertikal seperti pada Persamaan (5).

$$m_L \frac{d^2(l \cos \theta)}{dt^2} = -F \cos \theta + m_L g \tag{5}$$

dari Persamaan-Persamaan (2), (3), (4), dan (5), maka didapatkan persamaan baru yang dapat ditulis dalam bentuk persamaan state space seperti pada Persamaan (6):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u + m_L \sin \theta (l \theta^2 + g \cos \theta)}{m_c + m_L \sin \theta} \\ -\frac{u \cos \theta + m_L \sin \theta (g + l \theta^2 \cos \theta) + g m_c \sin \theta}{l(m_c + m_L \sin \theta)} \end{bmatrix} \tag{6}$$

Untuk memudahkan penulisan, model matematika sistem Gantry Crane dinyatakan dalam empat vektor state yaitu $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$, di mana:

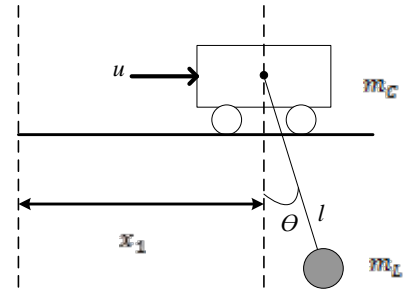
- x_1 adalah posisi kereta,
- x_2 adalah posisi sudut crane,
- x_3 adalah kecepatan kereta,
- x_4 adalah kecepatan sudut crane.

Kecepatan kereta x_3 merupakan turunan pertama dari posisi kereta x_1 dan kecepatan sudut x_4 merupakan turunan pertama dari sudut batang crane x_2 . Dari persamaan yang sudah diturunkan, maka model matematika dalam bentuk persamaan state dapat dituliskan dalam Persamaan (7) sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ \frac{u + m_L \sin x_2 (l x_4^2 + g \cos x_2)}{m_c + m_L \sin x_2} \\ -\frac{u \cos x_2 + m_L \sin x_2 (g + l x_4^2 \cos x_2) + g m_c \sin x_2}{l(m_c + m_L \sin x_2)} \end{bmatrix}$$

III. KONTROL FUZZY SUGENO DAN TEKNIK POLE PLACEMENT PADA GANTRY CRANE

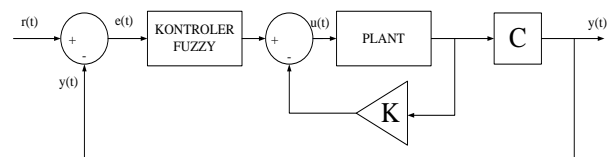
Sebelum mendesain kontroler yang digunakan pada Tugas Akhir ini, maka dibuat blok diagram sistem secara keseluruhan, seperti pada Gambar 2, di mana:



Gambar 1 Model Gantry Crane.

Tabel 1. Parameter Plant [8].

Parameter	Notasi	Nilai
Massa Crane (kg)	M_c	0,12
Massa Kereta (kg)	M_L	1,12
Jarak sumbu rotasi ke pusat massa sistem (m)	l	0,0167903
Percepatan Gravitasi (m/s^2)	g	9,8



Gambar 2 Diagram Blok Sistem Gantry Crane.

- $r(t)$ adalah sinyal referensi,
- $e(t)$ adalah $r(t) - y(t)$,
- $u(t)$ adalah sinyal kontrol,
- $y(t)$ adalah sinyal output,
- K adalah gain state feedback,
- C adalah matrik output.

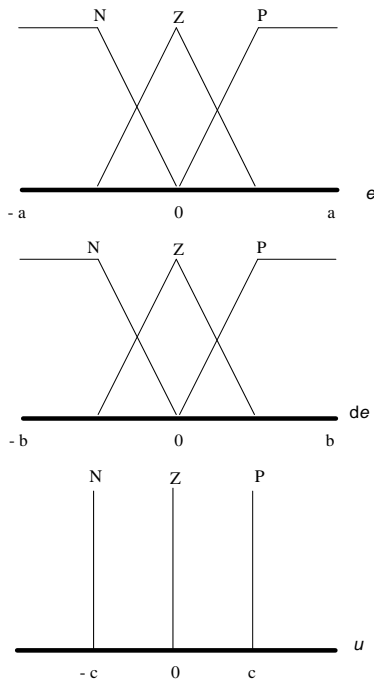
A. Desain Kontroler Fuzzy Sugeno

Desain kontrol model fuzzy Sugeno digunakan agar sistem menuju posisi yang diinginkan. Untuk kontrol posisi pada sistem Gantry Crane menggunakan dua variabel masukan yaitu error posisi dan delta error posisi. Sedangkan variabel keluaran adalah aksi kontrol u . Tiap-tiap variabel dibagi dalam beberapa himpunan fuzzy. Error posisi dari sistem Gantry Crane dinyatakan sebagai:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

Sedangkan delta error merupakan turunan dari error posisi.

Ada 3 himpunan fuzzy yang digunakan untuk error (e), delta error (de), dan sinyal kontrol (u) pada simulasi dan implementasi seperti pada Gambar 3 yaitu Negative (N), Zero (Z), dan Positive (P), sehingga akan disusun 9 aturan if-then. Arah gerak Positive (P) menyatakan kereta bergerak ke kanan, sedangkan Negative (N) menyatakan kereta bergerak ke kiri. Untuk membedakan batas fungsi keanggotaan di variabel masukan dan keluaran pada simulasi dan implementasi, dapat dilihat pada Tabel 2. Sedangkan untuk aturan fuzzy selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 3. Fungsi Keanggotaan

Tabel 2 Batas Fungsi Keanggotaan untuk Simulasi dan Implementasi

Batas Fungsi Keanggotaan	-a	a	-b	b	-c	c
Simulasi	-0,35	0,35	-0,5	0,5	-0,2	0,2
Implementasi	-0,3	0,3	-0,06	0,06	-0,55	0,52

Tabel 3.
Tabel Aturan Fuzzy untuk Kontrol Posisi.

Sinyal Kontrol (u)	Premis (error)		
	N	Z	P
Premis (delta error)	N	N	N
	Z	N	P
	P	P	P

B. Teknik Pole Placement untuk Mencari Gain State Feedback

Gain state feedback digunakan agar crane stabil di sekitar titik 0 radian. Untuk mencari gain state feedback digunakan teknik pole placement.

$$K_1 = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]$$

Langkah pertama adalah memeriksa kondisi controllability dari sistem, pada sistem ini rank $M = n$ yaitu 4, maka sistem merupakan completely state controllable. Pada sistem ini, karakteristik sistem yang diinginkan adalah critically damped ($\zeta = 1$) karena titik kerja di titik 0 radian dan nilai $ts = 1,15$ detik untuk simulasi dan $ts = 4$ detik untuk implementasi. Penentuan karakteristik tersebut digunakan untuk mencari nilai eigenvalue.

IV. SIMULASI DAN IMPLEMENTASI SISTEM GANTRY CRANE

Pada bagian ini membahas mengenai hasil-hasil yang didapatkan dari simulasi yang dilakukan pada software Matlab/Simulink dan implementasi pada plant "Feedback Digital Pendulum System". Simulasi dan implementasi dilakukan menurut perancangan yang telah dijelaskan pada Bagian 3. Simulasi dan implementasi dilakukan dengan menerapkan teknik pole placement untuk stabilisasi sistem Gantry Crane. Simulasi dilakukan dengan kondisi awal state posisi kereta, sudut crane, kecepatan kereta, dan kecepatan sudut crane adalah 0. Linearisasi Persamaan (4), diperoleh persamaan state-space sistem Gantry Crane sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = A_1x(t) + B_1u(t) \tag{8}$$

dengan titik kerja x_2 adalah 0 maka didapatkan A , dan B yaitu:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1,0500 & 0 & 0 \\ 0 & -646,2064 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,8929 \\ -53,1770 \end{bmatrix}$$

Untuk setiap simulasi dipilih $\xi = 1$ dan $ts = 1,15$, sehingga diperoleh pole-pole dan gain state feedback berikut:

$$\lambda = [0 \ -3,4783 \ -10,4348 \ -10,4348]$$

$$K = [0 \ 8,7393 \ -0,7267 \ 0,4457].$$

Sedangkan untuk implementasi dipilih $\xi = 1$ dan $ts = 3,5$, sehingga diperoleh pole-pole dan gain state feedback berikut:

$$\lambda = [-1 \ -1 \ -3 \ -3]$$

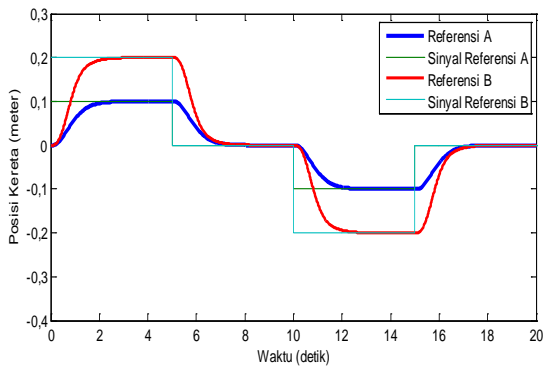
$$K = [-0,0173 \ 12,5660 \ -0,0461 \ 0,1512]$$

A. Simulasi

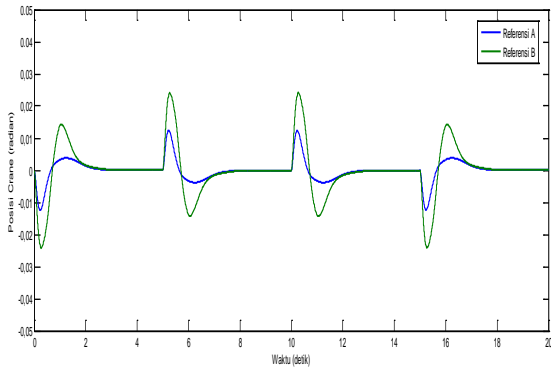
Simulasi sistem kontrol dilakukan dengan menggunakan software Matlab/Simulink. Parameter yang dipakai untuk menunjukkan performansi sistem adalah peak time dan amplitudo osilasi untuk keluaran posisi kereta dan settling time untuk keluaran sudut crane. Kondisi awal posisi kereta diberikan nilai sebesar 0 meter dan posisi crane sebesar 0 rad. Sinyal referensi yang diberikan adalah sinyal step.

Simulasi dilakukan dengan masukan sinyal modifikasi step yang dibuat di signal builder. Sinyal referensi modifikasi step yang digunakan berada antara -0,1 sampai 0,1 meter (A) dan -0,2 sampai 0,2 meter (B). Hasil respons posisi kereta akan ditunjukkan pada Gambar 5. Pada sinyal referensi A dan B respons kereta mampu mengikuti sinyal referensi yang diberikan. Respons memiliki delay sekitar 0,2 detik, sehingga kereta mulai bergerak setelah 0,2 detik.

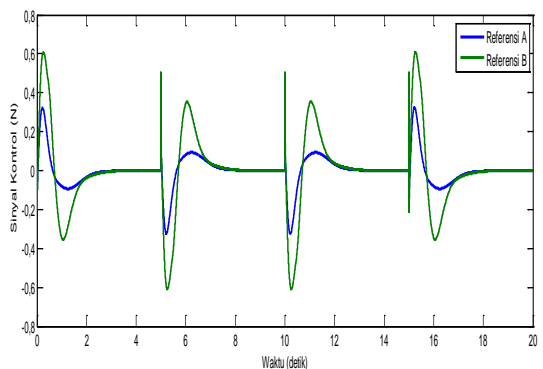
Gambar 6 menunjukkan hasil respons posisi crane. Dapat dilihat pada Gambar 6 bahwa settling time terjadi pada saat 4 detik. Nilai overshoot yang dihasilkan di awal respons dengan referensi A sebesar 0,0075 radian dengan peak-time 1,2 detik. Setelah 5 detik, overshoot menjadi 0,025 radian karena pada saat 5 detik terjadi perpindahan



Gambar 5. Hasil Respons Posisi Kereta dengan Beberapa Referensi pada Simulasi.



Gambar 6. Hasil Respons Posisi Crane dengan Beberapa Referensi pada Simulasi.



Gambar 7. Hasil Respons Sinyal Kontrol dengan Beberapa Referensi pada Simulasi.

undershoot terdapat pada $-0,048$ radian dengan *peak-time* 0,275 detik. Pada detik ke-5 nilai *overshoot* dan *undershoot* menjadi 0,048 dan $-0,0285$ radian. Dari hasil respons posisi crane, dapat disimpulkan bahwa ketika kereta bergerak ke kanan, maka posisi crane mengalami *overshoot* lebih kecil daripada *undershoot*. Sebaliknya, ketika kereta bergerak ke kiri, maka posisi crane mengalami *overshoot* lebih besar daripada *undershoot*.

Respons sinyal kontrol dengan menggunakan sinyal modifikasi *step* dapat dilihat pada Gambar 7. Gambar 7 menunjukkan bahwa ketika referensi di A maka, nilai *overshoot* yang dihasilkan yaitu 0,325 N dengan *peak time* 0,22 detik. Pada saat *undershoot* nilainya sebesar $-0,093$ N dengan *peak-time* 1,25 detik. Tetapi setelah 5 detik nilai *overshoot* 0,5 N dan nilai *undershoot* $-0,325$ N. Sama seperti respons posisi crane, perubahan nilai *overshoot* dan *undershoot* terjadi karena perubahan posisi kereta. Nilai *overshoot* yang dihasilkan pada saat referensi B yaitu 0,6 N dengan *peak time* 0,26 detik dan *undershoot* sebesar $-0,355$ N dengan *peak-time* 1 detik. Sama halnya dengan respons saat sinyal referensi A, setelah 5 detik terjadi perubahan nilai *overshoot* dan *undershoot*. Nilai *overshoot* menjadi 0,355 N, sedangkan nilai *undershoot* menjadi $-0,6$ N. Nilai *overshoot* pada sinyal kontrol saat kereta bergerak ke kanan lebih besar daripada nilai *undershoot*. Begitu juga sebaliknya. Keseluruhan hasil respons dapat dilihat pada Tabel 3.

Untuk mengetahui pengaruh perubahan massa beban, maka simulasi selanjutnya adalah dengan mengubah-ubah massa beban crane. Simulasi dilakukan menggunakan sinyal referensi *step* dengan nilai referensi 0,1 meter. Gambar 8 merupakan hasil respons posisi kereta ketika massa beban diubah, beban diubah dari 0,06 kg, 0,12 kg, dan 0,18 kg. Pada beban 0,06 kg *settling time* terjadi pada detik ke-3,3. Ketika beban diubah menjadi 0,12 kg, *settling time* terjadi pada detik ke-3. Perubahan yang terakhir adalah ketika beban diubah menjadi 0,18 kg. *Settling time* terjadi pada detik ke-2,5. Dapat disimpulkan bahwa semakin besar massa beban yang diberikan, *settling time* yang terjadi pada respons posisi kereta semakin cepat.

Respons selanjutnya yang diamati ketika massa beban diubah-ubah yaitu respons posisi crane. Pada Gambar 9 menunjukkan bahwa respons posisi crane ketika beban diubah menjadi 0,06 kg, terjadi *overshoot* sebesar 0,0104 meter dan *undershoot* sebesar $-0,0265$ meter. Selain itu, respons menunjukkan bahwa *settling time* terjadi pada detik ke-3,95. Saat beban 0,12 kg, *overshoot* dan *undershoot* yang terjadi pada respons posisi crane sebesar 0,0075 meter dan $-0,025$ meter. *Settling time* yang terjadi semakin lama yaitu pada detik ke-3,7. Ketika beban ditambah lagi, *overshoot* dan *undershoot* semakin kecil, yaitu 0,0069 meter dan $-0,022$ meter dan *settling time* menjadi 3,8. Dari hasil respons posisi crane, dapat diambil kesimpulan bahwa semakin besar massa beban, maka semakin kecil nilai *overshoot* dan *undershoot* yang terjadi pada respons posisi crane.

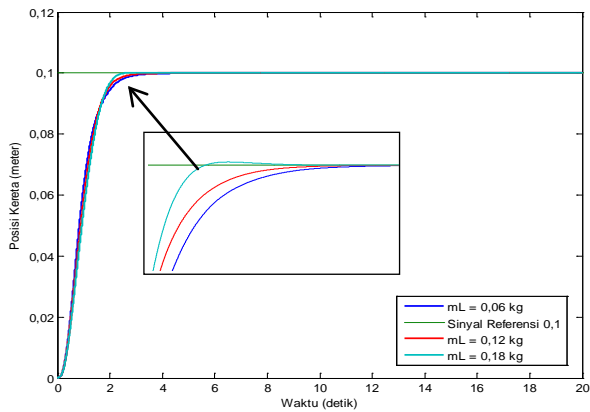
Gambar 10 merupakan gambar sinyal gangguan *step* yang diberikan pada sinyal kontrol dengan sinyal referensi modifikasi *step*. Gangguan diberikan pada interval waktu 7-8 detik, kemudian pada interval waktu 12-13 detik sebesar 0,02 N. Setelah diberi gangguan pada sinyal kontrol, respons posisi mengalami penyimpangan sebesar 0,01 meter, setelah

Tabel 3.

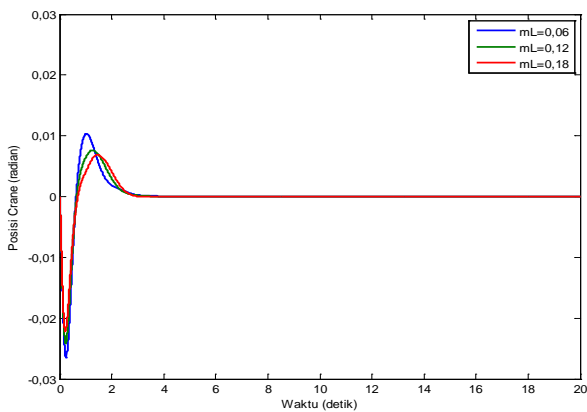
Hasil Respons Referensi Sinyal Modifikasi *Step*.

Kriteria	Sinyal Referensi		
	A	B	
Posisi Kereta	<i>Settling Time</i>	3 detik	3 detik
	<i>Delay Time</i>	0,2 detik	0,2 detik
	<i>Settling Time</i>	4 detik	4 detik
Posisi Crane	<i>Overshoot</i>	maks 0,025 rad	maks 0,048 rad
	<i>Undershoot</i>	maks $-0,025$ rad	maks $-0,048$ rad
Sinyal Kontrol	<i>Overshoot</i>	maks 0,5 N	maks 0,6 N
	<i>Undershoot</i>	maks 0,325 N	maks $-0,6$ N

posisi kereta dari 0,1 meter menuju 0 meter. Posisi *undershoot* pada referensi A memiliki nilai $-0,025$ radian dengan *peak-time* 0,23 detik dan setelah 5 detik *undershoot* menjadi 0,0075 radian. Pada saat referensi di B, nilai *overshoot* $-0,0285$ radian dengan *peak-time* 1 detik dan nilai



Gambar 8. Hasil Respons Posisi Kereta dengan Beberapa Massa Beban.



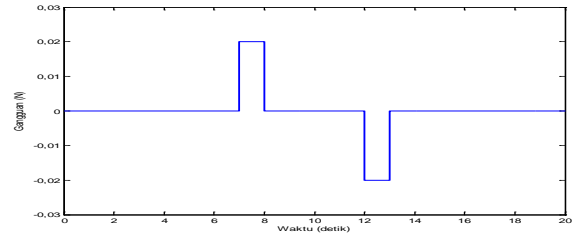
Gambar 9. Hasil Respons Posisi Crane dengan Beberapa Massa Beban.

Tabel 4.
Hasil Respons dengan Beberapa Massa Beban.

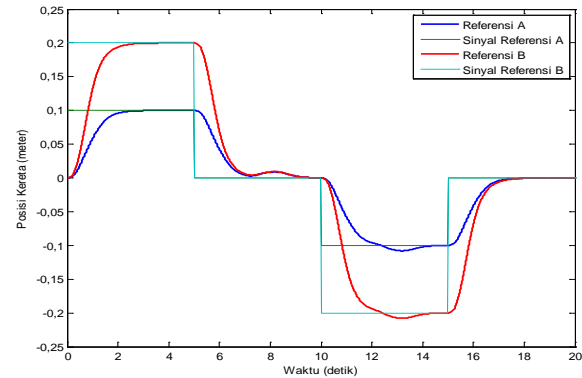
Kriteria		Massa Beban (kg)			
		0,12	0,24	0,36	0,48
Posisi Kereta	Settling Time (detik)	3	4	4,2	5
	Overshoot (meter)	-	0,1012	0,104	0,1065
Posisi Crane	Settling Time (detik)	4	4,2	5,4	7
	Overshoot (rad)	0,0075	0,0064	0,0059	0,0055
	Undershoot (rad)	-0,025	-0,02	-0,018	-0,015

gangguan dihilangkan, sistem kembali menuju posisi yang diinginkan selama 1 detik. Hal tersebut terjadi pada sinyal referensi -0,1 sampai 0,1 meter maupun -0,2 sampai 0,2 meter, seperti terlihat pada Gambar 11.

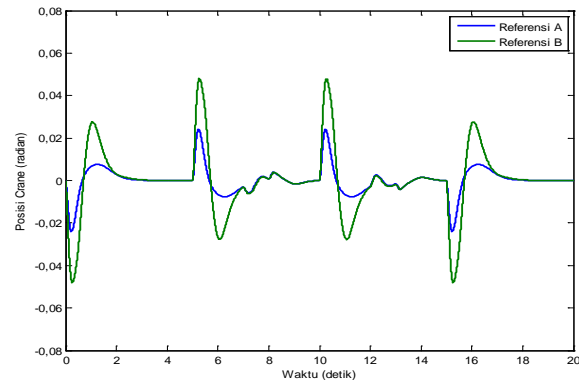
Posisi sudut crane saat diberi gangguan dapat dilihat pada Gambar 12. Saat diberi gangguan, posisi crane pada sinyal referensi -0,1 sampai 0,1 mengalami penyimpangan sebesar 0,0075 radian pada detik ke-7 dan detik ke-12. Ketika gangguan dihilangkan, sudut crane kembali menuju 0 radian. Sedangkan pada saat sinyal referensi -0,2 sampai 0,2, penyimpangan posisi crane sebesar 0,03 radian. Besarnya penyimpangan lebih kecil daripada overshoot dan undershoot yang terjadi pada saat referensi -0,1 sampai 0,1 meter maupun -0,2 sampai 0,2 meter. Dapat disimpulkan bahwa kontroler fuzzy Sugeno mampu mengatasi adanya gangguan yang diberikan pada sinyal kontrol untuk masukan dari sinyal step maupun sinyal modifikasi step.



Gambar 10 Gangguan Step pada Sinyal Kontrol dengan Sinyal Referensi Modifikasi Step.



Gambar 11 Hasil Respons Posisi Kereta Sinyal Modifikasi Step dengan Gangguan.



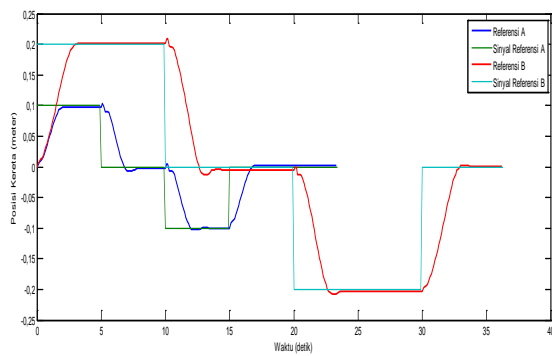
Gambar 12 Hasil Respons Posisi Crane Sinyal Modifikasi Step dengan Gangguan.

B. Implementasi

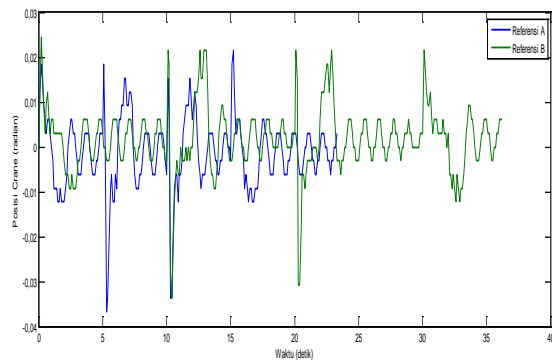
Seperti pada simulasi, respons yang diamati pada implementasi ini adalah respons posisi kereta, respons posisi crane, dan respons sinyal kontrol. Gambar 13 menunjukkan respons posisi kereta pada saat implementasi. Dapat dilihat pada gambar bahwa respons posisi kereta mengikuti sinyal referensi dengan settling time 2,2 detik untuk sinyal referensi A. Sedangkan untuk sinyal referensi B, settling time terjadi saat 3 detik. Hasil respons menunjukkan bahwa nilai overshoot sebesar ±0,01 meter dan undershoot sebesar ± 0,02 meter pada kedua referensi. Overshoot terjadi pada awal setiap perpindahan kereta. Respons posisi kereta pada saat implementasi memiliki error sekitar ± 0,01 meter.

Respons yang diamati selanjutnya adalah respons posisi crane. Respons posisi crane dapat dilihat pada Gambar 14. Dari gambar dapat diamati bahwa posisi crane stabil di 0 radian, namun terjadi penyimpangan sekitar -0,04 sampai 0,03 radian. Hal itu terjadi pada sinyal referensi A maupun sinyal referensi B. Pada implementasi, kondisi dengan beberapa nilai referensi tidak terlalu berpengaruh terhadap posisi crane.

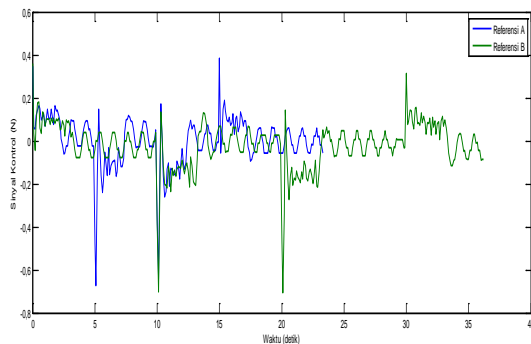
Sama halnya dengan respons sinyal kontrol pada saat implementasi, kondisi dengan beberapa nilai referensi juga tidak terlalu berpengaruh. Sinyal kontrol yang diperlukan untuk menggerakkan kereta dan menstabilkan posisi crane dapat dilihat pada Gambar 15. Respons menunjukkan bahwa



Gambar 13. Hasil Respons Posisi Kereta dengan Beberapa Referensi pada Implementasi.



Gambar 14. Hasil Respons Posisi Crane dengan Beberapa Referensi pada Implementasi.



Gambar 15. Hasil Respons Sinyal Kontrol dengan Beberapa Referensi pada Implementasi.

sinyal kontrol pada referensi A maupun B sebesar $-0,8$ sampai $0,4$ N.

V. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian simulasi maupun implementasi sistem kontrol *fuzzy* Sugeno sebagai kontrol posisi dengan teknik *pole placement* sebagai stabilisasi sistem dalam Tugas Akhir ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil simulasi dari sistem kontrol *fuzzy* Sugeno yang telah dibuat menunjukkan bahwa posisi kereta dapat mengikuti sinyal referensi berupa sinyal referensi *step*.
2. Hasil simulasi yang diperoleh bahwa Sistem *Gantry Crane* mampu mempertahankan sudut *crane* di sekitar sudut 0 radian.
3. Hasil implementasi menunjukkan bahwa posisi kereta berhasil mengikuti sinyal referensi yang berupa referensi modifikasi *step* dengan *error* posisi sebesar kurang dari 10% . Selain itu, posisi *crane* dapat dipertahankan pada titik 0 radian.

Penulis menyarankan sebagai pengembangan penelitian selanjutnya untuk mencari gain kontrol terbaik bisa dibandingkan dengan kontrol *robust*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Omar, H.M., "Control of Gantry and Tower Cranes", Ph.D. *Dissertation*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2003.
- [2] Zawawi, M.A., dkk, "Feedback Control Scheme for Gantry Crane System incorporating Payload", *IEEE Symposium on Industrial and Applications (ISIEA2011)*, 2011.
- [3] Mahindra, "Kontrol posisi Gantry Crane menggunakan Metoda Linear-Quadratic Minimum-Time", *Tugas Akhir*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [4] Wahyudi dan Jalani J., "Sensorless Anti-swing Control for Automatic Gantry Crane System: Model-based Approach", *International Journal of Applied Engineering Research*, ISSN 0973-4562, vol.2, no.1, pp. 147-161, 2007.
- [5] Wahyudi dan Jalani J., "Design and Implementation of Fuzzy Logic Controller for an Intelligent Gantry Crane System: Robustness Evaluation", *Proceedings of 2nd International Conference on Mechatronics*, 2005, pp. 345-351.
- [6] Rao, Kantha Simanjalam, "Position and Anti-Sway Control for a Gantry Crane System using Fuzzy-Tuned PID Controller", *Thesis*, Universitas Teknologi Malaysia, 2012.
- [7] Popadic, Tonci, dkk, "A fuzzy Control Scheme for the Gantry Crane Position and Load Swing Control", University of Zagreb, Croatia.
- [8] ———, *Control in a MATLAB[®] Environment-Digital Pendulum*, Feedback Instruments Ltd., England. 2004.