

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

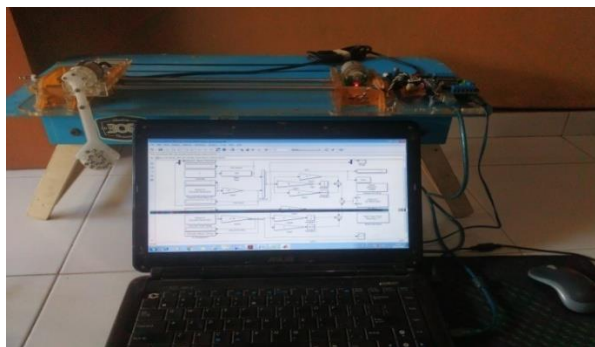
4.1 Hasil Perancangan

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hasil perancangan meliputi hasil perancangan perangkat keras dan perancangan sistem kendali.

4.1.1 Hasil Perancangan Perangkat Keras

Simulator *crane* yang dirancang seperti pada Gambar 4-1 dapat mempresentasikan cara kerja *crane* yang sebenarnya. Jib pada *crane* diwakili oleh lintasan simulator troli, troli jib pada *crane* diwakili oleh simulator troli, sling penggerak troli diwakili oleh *belt* penggerak troli, kabel sling *crane* diwakili oleh batang ayun, kemudian motor DC dan kedua *incremental rotary encoder* dapat beroperasi sesuai dengan fungsinya.

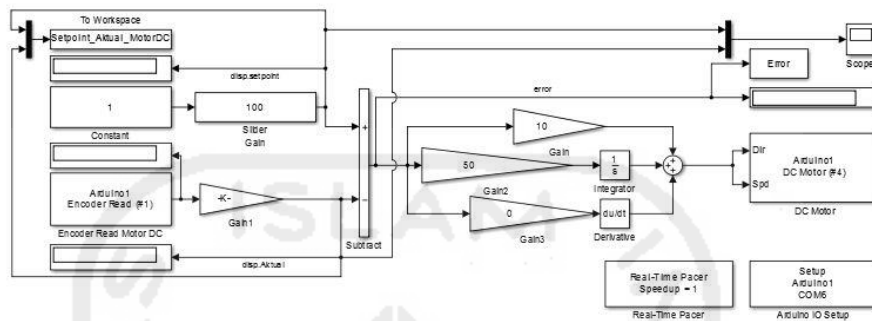
Simulator *crane* yang dirancang memiliki kekurangan dan kelebihan. Faktor kekurangan pada simulator *crane* yaitu bagian simulator troli yang mana kurang presisinya rumah penjepit *belt* guna menggerakkan troli tersebut, dan ukuran *pulley* yang berada pada ujung lintasan troli terlalu besar melebihi ukuran diameter roda gigi pada poros motor DC. Faktor kelebihan pada simulator troli yaitu bentuk visual yang jauh lebih menarik dan *simple*, gesekan yang dihasilkan dari gerakan troli dapat berkurang karena menggunakan *sliding bushing*, sehingga tenaga yang dihasilkan dapat bekerja secara maksimal, dan mekanisme kerja pada alat peraga memaksimalkan performa perancangan sistem dalam mengurangi ayunan berlebih pada batang ayun saat simulator *crane* beroperasi.



Gambar 4 - 1 Hasil Perancangan Simulator *Crane*.

4.1.2 Hasil Perancangan Sistem Kendali

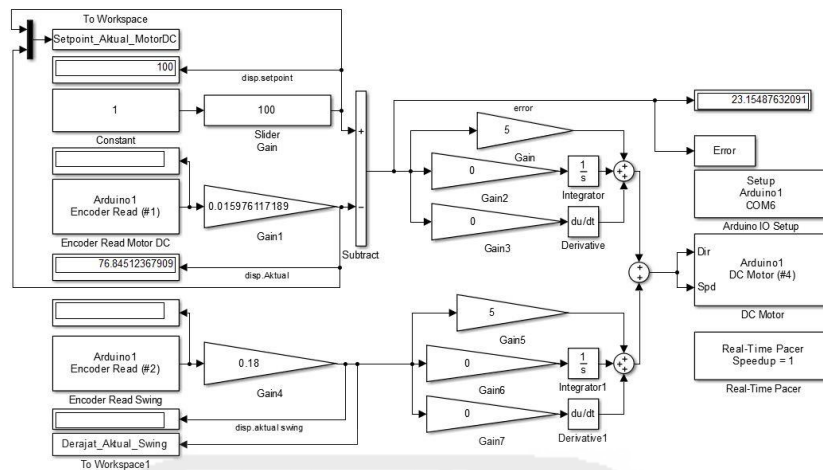
Perancangan perangkat lunak meliputi perancangan kendali posisi dan perancangan kendali ayun. Sistem kendali posisi digunakan untuk kendali posisi simulator troli dan juga untuk mencari nilai kontroler PID. Hasil perancangan susunan blok kendali posisi dapat dilihat pada Gambar 4-2.



Gambar 4 - 2 Blok Diagram Sistem Kendali Posisi Simulator Troli.

Sistem kendali posisi terdiri dari beberapa blok simulink. Blok tersebut terdiri dari blok *step/constant* dan blok *slider gain* sebagai *input*, blok pembacaan putaran poros motor DC, susunan blok kontroler PID digunakan untuk mengkompensasi *error* yang terjadi pada rotasi motor DC menggerakkan simulator troli. Nilai *error* yang dihasilkan dari blok *subtract* atau blok pembandingan antara nilai dari blok *input* dan blok pembacaan rotasi motor DC.

Sistem kendali posisi dengan sistem kendali ayun memiliki dua *feedback*/umpan balik yaitu pembacaan enkoder posisi simulator troli dan pembacaan enkoder posisi ayun. Kedua *feedback* digunakan sebagai referensi simulator troli untuk bergerak. Beberapa blok ditambahkan dalam sistem kendali posisi dengan sistem kendali ayun yaitu blok pembacaan enkoder posisi ayun, blok *gain*, blok kontrol PID untuk kompensasi nilai *error* dari enkoder ayun. Gambar 4-3 menunjukkan susunan blok sistem kendali posisi dengan sistem kendali ayun.



Gambar 4 - 3 Sistem Kendali Posisi Simulator Troli dengan Kendali Posisi Ayun.

4.2 Hasil Pengujian Sistem

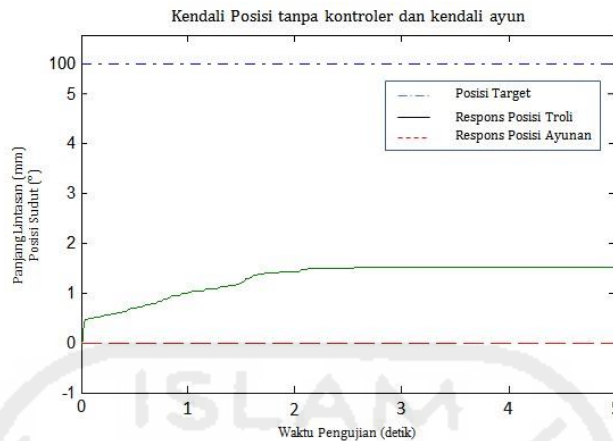
Pada bagian ini akan dilakukan beberapa pengujian terhadap sistem untuk mengetahui responsnya. Batas simpangan ayunan batang pendulum yang diperbolehkan pada pengujian ini adalah dibawah 5° . Beberapa pengujian tersebut antara lain :

- Pengujian kendali posisi troli tanpa kontroler dan kendali posisi ayun.
- Pengujian kendali posisi troli tanpa kendali posisi ayun menggunakan kontroler PID metode Ziegler-Nichols 2.
- Pengujian kendali posisi troli tanpa kendali posisi ayun menggunakan kontroler PID metode *trial and error*.
- Pengujian kendali posisi troli dengan kendali posisi ayun menggunakan kontroler PID metode Ziegler-Nichols 2.
- Pengujian kendali posisi simulator troli dengan kendali posisi ayun menggunakan kontroler PID metode *trial and error*.

4.2.1 Pengujian Kendali Posisi Troli Tanpa Kontroler dan Kendali Posisi Ayun

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui respons sistem tanpa kompensasi dari kontroler dan kendali ayun. Respons sistem selanjutnya akan digunakan sebagai pembandingan dengan sistem kontrol yang dirancang sehingga

performa kontroler yang digunakan akan jelas terlihat perbandingannya. Gambar 4-4 merupakan respons sistem kendali posisi tanpa kontroler dan kendali ayun.



Gambar 4 - 4 Respons Sistem Kendali Posisi Tanpa Kontroler dan Kendali Ayun.

Pengujian ini dilakukan dengan memberikan target posisi troli pada posisi 100 mm, terlihat bahwa respons sistem tidak mencapai posisi yang diinginkan. Posisi *steady state* simulator troli hanya mencapai posisi 1,52 mm. *Error steady state* (e_{ss}) yang terjadi sebesar 98,48 mm. *Settling time* (t_s) dapat ditentukan jika nilai *error steady state* berada pada nilai $\pm 2\%$ dari target sudut yang ditentukan. Akan tetapi respons sistem yang ditunjukkan pada gambar diatas tidak mencapai nilai $\pm 2\%$ dari target posisi yang menyebabkan *settling time* tidak dapat ditentukan. Pada dasarnya sistem kendali posisi tanpa kontroler pada pengujian diatas memiliki respons yang halus dan tidak memiliki *overshoot* namun tidak dapat mencapai target posisi.

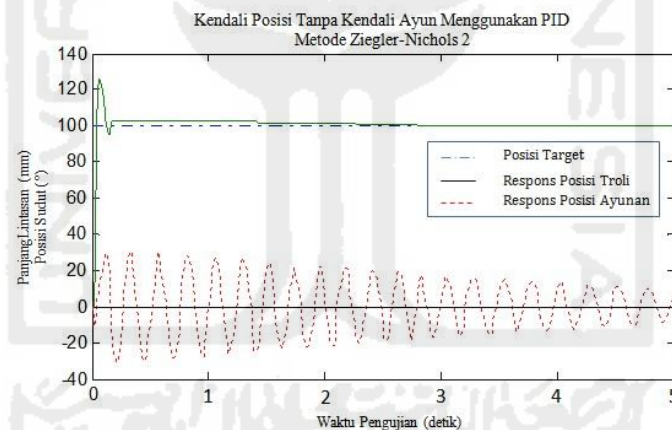
Ayunan/simpangan batang ayun yang terjadi pada pengujian ini mendekati batas simpangan yang diperbolehkan pada perancangan simulator *crane* yaitu 5° . Nilai simpangan batang ayun yang terjadi adalah 0° , maka nilai ayunan tersebut masuk pada nilai yang diperbolehkan.

4.2.2 Pengujian Kendali Posisi Troli Tanpa Kendali Posisi Ayun Menggunakan Metode Ziegler-Nichols 2

Pada pengujian ini sistem kendali posisi diberikan kontroler PID Zieger-Nichols 2 agar respons sistem dapat mencapai target posisi yang diinginkan. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan target posisi simulator troli pada

posisi 100 mm, dan terlihat bahwa respons sistem mencapai target posisi. Respons sistem yang terjadi memiliki maksimal *overshoot* (M_p) sebesar 26,38 mm. *Overshoot* terjadi pada waktu ke-0,05 detik. *Error steady state* (e_{ss}) yang terjadi sebesar -0,28 mm. *Error steady state* dicapai cukup lama yaitu pada waktu ke-4,12 detik. Nilai *settling time* (t_s) dicapai pada waktu ke-1,42 detik.

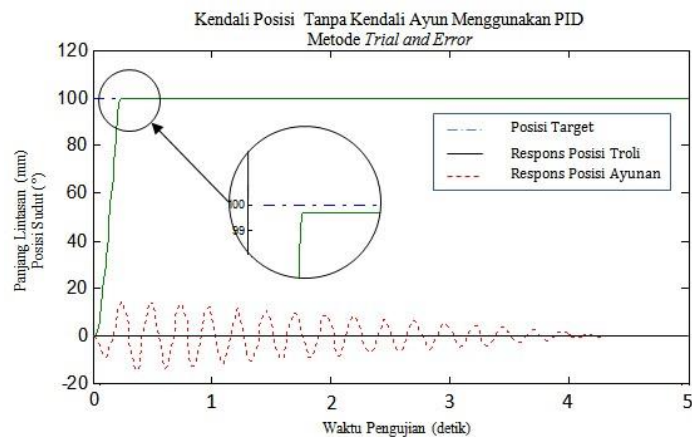
Ayunan yang terjadi pada pengujian ini masih di atas nilai yang diperbolehkan pada saat simulator troli bergerak. Nilai terbesar dari simpangan/ayunan batang ayun yang terjadi adalah $30,96^\circ$. Nilai terbesar simpangan/ayunan batang ayun terjadi pada waktu ke-0,33 detik. Nilai simpangan/ayunan batang ayun terjadi karena adanya *overshoot* pada simulator. Batang ayun secara cepat berbalik arah rotasi ketika kontroler membaca adanya *overshoot*. Hal ini menyebabkan batang ayun berisolasi. Nilai simpangan/ayunan batang ayun terakhir yang didapat sebesar $10,08^\circ$, dicapai pada waktu ke-4,78 detik. Respons tersebut masih belum masuk pada nilai yang diperbolehkan. Respons sistem dapat dilihat pada Gambar 4-5.



Gambar 4 - 5 Respons Sistem Posisi Troli Tanpa Kendali Ayun Menggunakan Kontroler PID Metode Ziegler-Nichols 2

4.2.3 Pengujian Kendali Posisi Troli Tanpa Kendali Ayun Menggunakan Metode *Trial And Error*

Pada pengujian ini sistem kendali posisi simulator troli diberikan kontroler PID dengan metode *trial and error*. Kontroler PID ini dirancang berdasarkan coba-coba untuk mendapatkan respons sistem yang diinginkan. Respons sistem dapat dilihat pada Gambar 4-6.



Gambar 4 - 6 Respons Sistem Kendali Posisi Troli Tanpa Kendali Ayun Menggunakan Kontroler PID Metode *Trial And Error*.

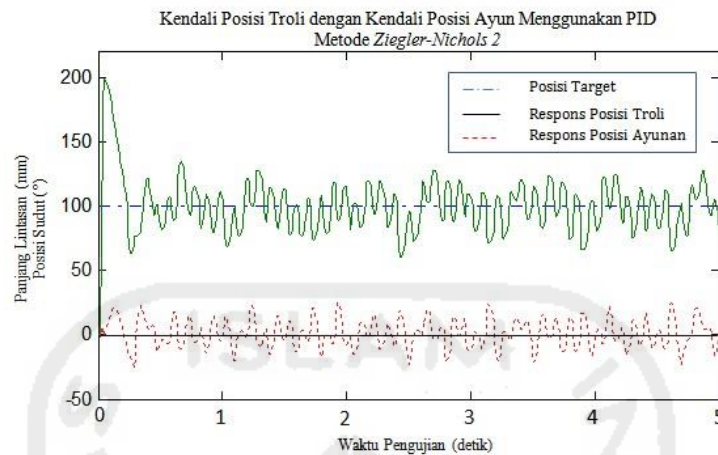
Pengujian ini dilakukan dengan memberikan target posisi simulator troli pada posisi 100 mm, dan terlihat bahwa respons sistem mencapai target posisi. Respons yang terjadi tidak memiliki maksimal *overshoot* (M_p), respons yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan kontroler PID metode Ziegler-Nichols 2. *Error steady state* (e_{ss}) yang terjadi sebesar -0,18 mm. *Settling time* (t_s) dicapai pada waktu ke-0,21 detik.

Simpangan/ayunan batang ayun yang terjadi pada pengujian ini masih diatas nilai yang diperbolehkan. Nilai terbesar dari ayunan yang terjadi adalah $14,76^\circ$. Nilai terbesar ayunan batang ayun terjadi pada waktu ke-0,24 detik. Ayunan batang ayun terjadi disebabkan oleh gerakan yang dihasilkan simulator troli secara tiba-tiba. Nilai ayunan batang ayun terakhir yang didapat sebesar $0,54^\circ$. Respons ayunan sudah masuk pada nilai yang diperbolehkan, waktu pencapaian terjadi pada waktu ke-4,37 detik.

4.2.4 Pengujian Kendali Posisi Troli dengan Kendali Posisi Ayun Menggunakan Kontroler PID Metode Ziegler-Nichols 2

Pengujian kali ini bertujuan mengurangi simpangan/ayunan batang ayun yang terjadi pada saat simulator troli bergerak. Sistem kendali posisi simulator troli yang dirancang ditambahkan kendali posisi ayun untuk mengurangi ayunan yang terjadi pada batang ayun. Ayunan batang ayun yang terjadi dibaca oleh enkoder posisi ayun yang kemudian digunakan sebagai umpan balik untuk

menghilangkannya. Pengujian kendali posisi simulator troli dengan kendali posisi ayun menggunakan posisi target posisi yang sama agar perbandingan sistem yang dirancang lebih jelas terlihat. Respons sistem dapat dilihat pada Gambar 4-7.



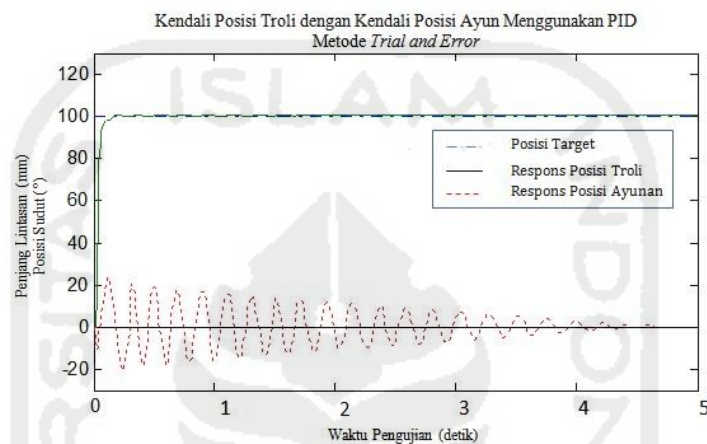
Gambar 4 - 7 Respons Sistem Kendali Posisi dengan Kendali Ayun Menggunakan PID Metode Ziegler-Nichols 2.

Pengujian ini dilakukan dengan memberikan target posisi simulator troli pada posisi 100 mm. Pada grafik terlihat bahwa respons sistem menunjukkan osilasi yang tidak teratur, hal itu disebabkan karena simulator troli harus menyeimbangkan ayunan batang ayun terlebih dahulu saat mencapai target posisi yang ditentukan. Maksimal *overshoot* (M_p) yang terjadi adalah 99,43 mm, 0,47 detik setelah simulator diberikan *input*. Hal ini juga dikarenakan respons kontroler PID memiliki *overshoot* yang sangat besar sehingga kendali posisi digabungkan dengan kendali posisi ayun nilai *overshoot* juga meningkat. *Error steady state* (e_{ss}) bernilai -19,95 mm. Nilai respons sistem *settling time* (t_s) tidak dapat diidentifikasi.

Ayunan batang ayun menunjukkan respons yang tidak stabil, sehingga nilai ayunan batang ayun maksimal diambil dari grafik respons pencapaian tertinggi yang bernilai $25,02^\circ$. Untuk ayunan batang ayun terendah tidak dapat teridentifikasi dikarenakan ketidakstabilan respons ayunan tidak dapat menyeimbangkan ayunan batang ayun sehingga sistem tidak dapat mereduksi ayunan yang terjadi.

4.2.5 Pengujian Kendali Posisi Troli dengan Kendali Posisi Ayun Menggunakan Kontroler PID Metode *Trial And Error*

Pengujian ini dilakukan sama seperti pengujian pada subsubbab 4.2.4. Perbedaan dari pengujian sebelumnya hanya pada kontroler PID yang digunakan. Nilai-nilai dari setiap konstanta kontroler PID dicari berdasarkan coba-coba hingga sistem menunjukkan respons yang diinginkan. Respons sistem dapat dilihat pada Gambar 4-8.



Gambar 4 - 8 Respons Sistem Kendali Posisi Troli dengan Kendali Posisi Ayun Menggunakan Kontroler PID Metode *Trial And Error*.

Pengujian ini dilakukan dengan memberikan target posisi simulator *crane* pada posisi 100 mm, Dari grafik yang muncul terlihat bahwa respons sistem dapat mencapai target posisi yang ditentukan. Maksimal *overshoot* (M_p) yang terjadi adalah 0,87 mm dan terjadi pada waktu ke-0,38 detik. *Settling time* (t_s) dengan menggunakan kontroler PID metode *trial and error* tercapai lebih cepat dibandingkan dengan kontroler PID metode Ziegler-Nichols 2. *Settling time* pada pengujian ini dicapai pada waktu ke-0,14 detik. *Error steady state* (e_{ss}) didapat sebesar 0,50 mm.

Simpangan/ayunan batang ayun yang terjadi pada pengujian ini masih diatas nilai yang diperbolehkan pada saat simulator troli bergerak sama seperti pengujian sebelumnya. Nilai terbesar dari ayunan yang terjadi adalah 23,04°. Nilai terbesar simpangan terjadi pada waktu ke-0,13 detik. Ayunan batang ayun yang besar terjadi disebabkan akibat gerakan simulator itu sendiri yang begitu

cepat. Nilai ayunan batang ayun yang mendekati batas nilai yang diperbolehkan sebesar $3,96^\circ$ terjadi pada waktu ke-3,77 detik.

4.3 Perbandingan Hasil Pengujian Seluruh Sistem Kendali

Pada bagian ini setiap sistem kendali akan dibandingkan untuk melihat performa yang paling optimum. Perbandingan hasil pengujian sistem kendali posisi troli tanpa kendali posisi ayun dan kendali posisi troli dengan kendali posisi ayun menggunakan metode Ziegler-Nichols 2 dapat dilihat pada Tabel 4-1.

Tabel 4 - 1 Perbandingan Hasil Pengujian Sistem Kendali Posisi Menggunakan Kontroler PID Metode Ziegler-Nichols 2

Sistem Kendali	Target Posisi (mm)	Posisi Steady State (mm)	Maksimal Overshoot (mm)	Settling time (detik)	Error steady state (mm)	Ayunan maksimum ($^\circ$)
Tanpa kendali posisi dan ayun	100	1,52	-	-	98,48	0
Tanpa Kendali Ayun	100	100,28	26,38	1,42	0,28	30,96
Dengan Kendali Ayun	100	80,05	99,43	-	-19,95	25,02

Perbandingan hasil pengujian sistem kendali posisi tanpa kendali ayun dan kendali posisi dengan kendali ayun menggunakan metode *trial and error* dapat dilihat pada Tabel 4-2.

Tabel 4 - 2 Perbandingan Hasil Pengujian Sistem Kendali Posisi Menggunakan Kontroler PID Metode Trial And Error.

Sistem Kendali	Target Posisi (mm)	Posisi Steady State (mm)	Maksimal Overshoot (mm)	Settling time (detik)	Error steady state (mm)	Ayunan maksimum ($^\circ$)
Tanpa kendali posisi dan ayun	100	1,52	-	-	-98,48	0
Tanpa Kendali Ayun	100	99,82	-	0,21	-0,18	14,76
Dengan Kendali Ayun	100	100,5	0,87	0,14	0,5	23,04

4.4 Analisis dan Pembahasan

4.4.1 Analisis Sistem

Pada sistem kendali posisi ini simulator troli yang terhubung ke poros motor DC adalah obyek kendali. Pembacaan posisi motor DC yaitu dengan menggunakan enkoder motor DC bawaan yang mempunyai 448 ppr. Mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino mega 2560 R3 sebagai alat akuisisi data untuk ditampilkan didalam Matlab. *Input* dimasukan melalui Matlab oleh *user* yang kemudian diteruskan ke dalam Arduino untuk menggerakkan motor DC. Hasil gerakan dari motor DC kemudian dibaca oleh enkoder motor DC dan dikirimkan kembali ke Matlab sebagai umpan balik. Selisih antara *input* dengan umpan balik disebut *error*. Nilai *error* akan terus berubah seiring jalan motor DC. *Error* digunakan kembali oleh kontroler PID sebagai *input*/masukan agar motor DC dapat bergerak sesuai dengan nilai *input* yang diberikan.

Kemudian sistem kendali ayun pada dasarnya merupakan sistem kendali posisi yang pengendalian motor DC-nya memperhitungkan ayunan batang ayun yang terjadi. Sistem kendali ayun dirancang bertujuan untuk mengurangi ayunan batang ayun hingga dibawah 5° . Pembacaan ayunan batang ayun menggunakan *incremental rotary encoder* 500 ppr. Ayunan batang ayun yang mengeluarkan nilai keluaran pulsa diubah menjadi derajat. Hasil konversi ini kemudian menjadi kompensasi untuk motor DC bergerak. Pada saat *input* diberikan melalui Matlab oleh *user*, kompensasi dari *error* tidak langsung diteruskan ke motor DC akan tetapi digabungkan terlebih dahulu dengan kompensasi dari konversi ayunan batang ayun. Sistem kendali ayun memiliki umpan balik, umpan balik dari enkoder motor DC dan umpan balik dari pembacaan ayunan batang ayun. *Error* dari pembacaan kedua enkoder tersebut masing-masing digunakan kembali oleh kontroler PID sebagai *input* agar ayunan pada batang ayun dapat berkurang dan motor DC dapat bergerak sesuai *input*.

4.4.2 Analisis Kerja Sistem Kendali

Kontroler PID yang dirancang untuk sistem kendali posisi troli tanpa kendali posisi ayun yaitu dengan metode Ziegler-Nichols 2 dan metode *trial and*

error. Pada sistem kendali posisi troli tanpa kendali posisi ayun menggunakan metode Ziegler-Nichols 2 dapat dianalisis bahwa respons sistem dapat mencapai target posisi yang telah ditentukan. Respons sistem memiliki maksimal *overshoot* (M_p) sebesar 26,38 mm. *Overshoot* yang muncul terjadi pada waktu ke-0,05 detik. *Error steady state* (e_{ss}) yang terjadi cukup kecil yaitu hanya sebesar 0,28 mm. *Error steady state* dicapai cukup lama yaitu pada waktu ke-4,12 detik. *Settling time* (t_s) sistem dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols 2 dicapai pada waktu ke-1,42 detik. Ayunan batang ayun yang terjadi pada sistem kendali menggunakan metode Ziegler-Nichols 2 masih cukup besar, jauh diatas ayunan batang ayun yang diperbolehkan. Ayunan batang ayun terbesar adalah $30,96^\circ$ dan terus berisolasi meredam hingga pengujian berhenti, Nilai ayunan batang ayun terbesar terjadi pada waktu ke-0,33 detik setelah batang ayun bergerak. Besar nilai ayunan batang ayun terakhir tercatat $10,08^\circ$, masih jauh dari nilai ayunan yang diperbolehkan yaitu 5° . Nilai ayunan batang ayun terakhir terjadi pada waktu ke-4,78 detik setelah batang ayun bergerak.

Pada perancangan kontroler PID metode *trial and error* untuk sistem kendali posisi troli tanpa sistem kendali posisi ayun respons sistem dapat mencapai target posisi. Respons sistem ini tidak memiliki *overshoot* setelah sistem diberikan *input*. Respons *overshoot* pada metode *trial and error* lebih baik dibandingkan dengan *overshoot* yang muncul pada sistem kendali posisi troli tanpa kendali posisi ayun menggunakan metode Ziegler-Nichols 2, karena respons sistem menggunakan metode *trial and error* tidak terdapat *overshoot*. *Settling time* sistem dicapai dengan waktu yang lebih cepat dibandingkan dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols 2. Waktu yang diperlukan sistem dalam mencapai *settling time* adalah 0,21 detik. *Error steady state* sistem bernilai -0,18 mm, sedikit lebih kecil dibandingkan dengan sistem yang menggunakan metode Ziegler-Nichols 2. Ayunan batang ayun yang terjadi pada sistem dengan menggunakan metode *trial and error* masih jauh dari target yang telah ditentukan. Perangkat lunak Matlab mencatat ayunan terbesar yang terjadi bernilai $14,76^\circ$. Ayunan batang ayun terbesar terjadi pada waktu ke-0,24 detik setelah batang ayun bergerak. Besar nilai ayunan batang ayun terakhir yang masuk pada batas ayunan 5° yang diperbolehkan sebelum pengujian berakhir

tercatat bernilai $4,5^\circ$. Ayunan batang ayun terakhir tersebut terjadi pada waktu ke-3,2 detik.

Secara umum perancangan kontroler PID untuk sistem kendali posisi troli tanpa kendali posisi ayun dari kedua metode yang digunakan menghasilkan respons sistem yang baik. Kedua metode memiliki *error steady state* yang kecil dan *overshoot* yang tidak terlalu besar. *Settling time* yang dicapai dengan menggunakan kedua metode tersebut, untuk metode *trial and error settling time* dicapai cukup cepat, sedangkan dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols 2 *settling time* dicapai cukup lama, akan tetapi masih masuk kedalam batas waktu yang diperbolehkan yaitu 75% atau 3,75 detik.

Ayunan batang ayun yang terjadi masih cukup besar, jauh di atas nilai yang diperbolehkan yaitu 5° untuk yang menggunakan metode Ziegler-Nichols 2. Ayunan batang ayun terjadi karena adanya *overshoot* pada sistem dan gerakan troli itu sendiri. Ketika kontroler mengetahui adanya *overshoot* maka batang ayun secara tiba-tiba merubah arah rotasi sehingga menyebabkan batang ayun bergerak.

Secara keseluruhan kendali posisi troli tanpa kendali posisi ayun dengan metode *trial and error* memiliki respons yang lebih baik jika dibandingkan dengan sistem kendali posisi troli tanpa kendali posisi ayun dengan metode Ziegler-Nichols 2.

Kendali ayun dirancang untuk mengurangi ayunan batang ayun yang terjadi saat simulator beroperasi. Sistem kendali posisi troli digabungkan dengan sistem kendali posisi ayun menggunakan kontroler PID yang bertujuan untuk mengurangi ayunan hingga 5° . Pada perancangan sistem kendali posisi troli dengan sistem kendali posisi ayun menggunakan metode Ziegler-Nichols 2 memiliki respons sistem yang tidak stabil sehingga sistem tidak dapat mencapai target posisi yang telah ditentukan. Pada sistem kendali posisi troli dengan kendali posisi ayun menggunakan metode Ziegler-Nichols 2 memiliki nilai *overshoot* yang cukup besar. Nilai maksimal *overshoot* yang terjadi adalah 99,43 mm. *overshoot* terjadi pada waktu ke-0,47 detik setelah simulator diberikan *input*. *Overshoot* yang terjadi dikarenakan troli harus menyeimbangkan batang ayun terlebih dahulu sebelum merubah arah rotasi menuju target posisi. Nilai

overshoot yang besar juga disebabkan oleh metode Ziegler-Nichols 2 tanpa sistem kendali ayun yang pada dasarnya memiliki maksimal *overshoot* yang besar sehingga respons sistem tidak dapat mencapai target posisi dengan akurat. Ini jelas terlihat dari respons sistem yang tidak stabil ditunjukkan pada Gambar 4-7 di atas. *Error steady state* yang cukup jauh dari nilai nol bernilai 19,95 mm. *Settling time* tidak dapat ditentukan karena tidak mendekati batas $\pm 2\%$ *error steady state* yang diperbolehkan. Waktu mencapai *settling time* tidak dapat ditentukan dikarenakan kecepatan motor DC berputar dipengaruhi oleh ayunan batang ayun yang terjadi saat simulator bergerak. Ayunan batang ayun yang terjadi pada sistem kendali posisi simulator troli dengan sistem kendali posisi ayun menggunakan metode Ziegler-Nichols 2 tidak berhasil mereduksi hingga batas 5° ayunan yang diperbolehkan dan memiliki ayunan maksimal sebesar $25,02^\circ$.

Kendali posisi troli dengan kendali posisi ayun menggunakan metode *trial and error* memiliki respons yang dapat mencapai target posisi yang ditentukan. Ini terlihat dari nilai *error steady state* yang masuk pada rentang nilai $\pm 2\%$ target posisi. Besar *error steady state* yang terjadi yaitu 0,50 mm. lebih kecil dibandingkan dengan sistem yang menggunakan metode Ziegler-Nichols 2. Respons sistem juga memiliki maksimal *overshoot* sebesar 0,87mm. Nilai *overshoot* terjadi pada waktu ke-0,38 detik setelah simulator diberikan *input*. *Settling time* dicapai sistem pada waktu ke-0,14 detik. Besar ayunan batang ayun yang terjadi pada saat simulator beroperasi bernilai $23,04^\circ$. Ayunan batang ayun terbesar terjadi pada waktu ke-0,13 detik. Besar nilai ayunan batang ayun terakhir yang masuk pada batas ayunan 5° yang diperbolehkan sebelum pengujian berakhir tercatat bernilai $3,96^\circ$. Kendali posisi simulator troli dengan kendali posisi ayun menggunakan metode *trial and error* berhasil mereduksi ayunan yang terjadi dibawah 5° sesuai dengan batas ayunan yang diperbolehkan.

Perancangan kontroler PID untuk kendali posisi troli dengan kendali posisi ayun menghasilkan respons yang memuaskan. Ini dapat dilihat dari ayunan yang berhasil direduksi hingga dibawah nilai ayunan yang diperbolehkan yaitu 5° . Dari kedua kontroler yang digunakan, metode *trial and error* memiliki *overshoot* yang paling kecil. *Settling time* tercepat dan ayunan terkecil dicapai

oleh sistem dengan kontroler PID metode *trial and error* walaupun waktu ayunan yang mendekati nilai yang diperbolehkan terjadi pada waktu ke-3,74 detik.

Dapat dilihat pada tabel 4-3 dibawah ini kriteria respons sistem yang diinginkan dengan hasil pencapaian berdasarkan pengujian yang telah dilakukan dari masing-masing metode kontroler PID.

Tabel 4 - 3 Kriteria respons sistem yang diinginkan dengan hasil pencapaian respons sistem berdasarkan pengujian.

Kriteria Respons Sistem	Kriteria respons Sistem yang diinginkan	Metode Ziegler-Nichols 2 Tanpa Kendali Ayun					
		Target Posisi	t_s (detik)	M_p (mm)	E_{ss} (mm)	Ayunan Maksimum ($^{\circ}$)	Ayunan Tereduksi ($^{\circ}$)
t_s (settling time)	< 3,75 detik	100	1,42				
M_p (maksimal overshoot)	< 5% atau < 5mm	100		26,38			
E_{ss} (error steady state)	Posisi steady state mendekati target posisi	100			0,28		
Ayunan Batang Ayun	mereduksi hingga < 5°	100				30,96	10,08
Respons Sistem	Kriteria respons Sistem yang diinginkan	Metode Ziegler-Nichols 2 Dengan Kendali Ayun					
		Target Posisi	t_s (detik)	M_p (mm)	E_{ss} (mm)	Ayunan Maksimum ($^{\circ}$)	Ayunan Tereduksi ($^{\circ}$)
t_s (settling time)	< 3,75 detik	100	-				
M_p (maksimal overshoot)	< 5% atau < 5mm	100		99,43			
E_{ss} (error steady state)	Posisi steady state mendekati target posisi	100			-19,95		
Ayunan Batang Ayun	mereduksi hingga < 5°	100				25,02	-
Kriteria Respons Sistem	Kriteria respons Sistem yang diinginkan	Metode Trial and Error Tanpa Kendali Ayun					
		Target Posisi	t_s (detik)	M_p (mm)	E_{ss} (mm)	Ayunan Maksimum ($^{\circ}$)	Ayunan Tereduksi ($^{\circ}$)
t_s (settling time)	< 3,75 detik	100	0,21				
M_p (maksimal overshoot)	< 5% atau < 5mm	100		-			
E_{ss} (error steady state)	Posisi steady state mendekati target posisi	100			-0,18		
Ayunan Batang Ayun	mereduksi hingga < 5°	100				14,76	4,5
Kriteria Respons Sistem	Kriteria respons Sistem yang diinginkan	Metode Trial and Error Dengan Kendali Ayun					
		Target Posisi	t_s (detik)	M_p (mm)	E_{ss} (mm)	Ayunan Maksimum ($^{\circ}$)	Ayunan Tereduksi ($^{\circ}$)
t_s (settling time)	< 3,75 detik	100	0,14				
M_p (maksimal overshoot)	< 5% atau < 5mm	100		0,87			
E_{ss} (error steady state)	Posisi steady state mendekati target posisi	100			0,5		
Ayunan Batang Ayun	mereduksi hingga < 5°	100				23,04	3,96