

# SISTEM KENDALI GERAKAN LENGAN ROBOT PELEMPAR BOLA PINGPONG BERBASIS ARDUINO

Priyatmadi, Ir., M.T.<sup>1</sup>, Bambang Sugiyantoro, Ir., M.T.<sup>2</sup> M. Nur Wangsa Saputra<sup>3</sup>,

**Abstract**— *Table Tennis Ball Shooting Machine is widely used in every table tennis training centre in Indonesia, including Yogyakarta. It's usage purpose is to develop athlete skill through self training. But most of them produce little variation of shooting type.*

*In this research, a Table Tennis Ball Shooting Robot Control System which can produce many shooting types based on it's speed, spin, spin direction, and positioning is designed. Arduino as it's brain ware makes this robot can provide many features and as robust as premium machine even with additional features such as user position detection, and of course with a good price. Control and path planning algorithm are applied to the robot's arm joint to minimize the mechanic vibration due to fast robotic arm movement while maintaining the desired speed. P, PI, PID control combined with Trapezoid, Cubic Polynomial, and 5 Orde Cubic Polynomial path planning algorithm are applied and tested.*

*This Robot is able to produce 96 kinds of shooting to 8 area commonly targeted by human player. Shot ball speed ranged about 5 to 20m/s and shot 20 to 34 cm from table surface from all elevation. Combination between PI Controller and 5 Degree Cubic Polynomial Path Planning produce the best movement result.. This robot able to train player with many kind of shooting target, speed, and spin type.*

**Intisari**— Penggunaan mesin pelempar pingpong digunakan di semua pusat pelatihan atlet tenis meja di Indonesia, termasuk Yogyakarta. Tujuannya adalah mengembangkan kemampuan pemain melalui latihan mandiri. Namun robot pelempar bola pingpong yang ada hanya menghasilkan tidak banyak variasi jenis pukulan.

Dalam penelitian ini, dilakukan perancangan sistem kendali sebuah robot pelempar bola pingpong berbasis Arduino yang mampu menghasilkan berbagai jenis lemparan berdasarkan kecepatan, putaran, arah putar, serta penempatan jatuhnya bola. Sehingga dengan penggunaan Arduino sebagai brainware, membuat mesin ini mampu menyediakan fitur sehandal mesin premium bahkan dengan fitur tambahan seperti pendeteksi posisi pemain. Diaplikasikan beberapa algoritma kendali dan path planning pada robot berupa lengan 4 DOF untuk meminimalkan getaran mekanis yang timbul akibat gerakan lengan robot tanpa mengurangi kecepatan gerakannya. Algoritma yang digunakan adalah gabungan antara kendali P, PI, PID, dengan trajectory planning seperti Trapezoid path, Cubic polynomial path, dan Polynomial orde 5 path.

Robot ini mampu menghasilkan 96 variasi lemparan di 8 titik yang mewakili seluruh lokasi penempatan bola pada permainan bola pingpong. Lemparan memiliki kecepatan 5 sampai 20 m/s dan posisi lempar dinamis antara 20 sampai 34 cm dari permukaan meja dari semua elevasi. Dengan kombinasi Pengendali PI dan Path Planning menggunakan Polynomial orde 5, robot ini mampu bergerak selama 0,34 detik tanpa overshoot pada gerakan ekstrim, yang merupakan hasil optimum. Robot ini memungkinkan pemain bukan hanya untuk menghadapi satu jenis lemparan, bahkan serangkaian lemparan yang dapat diatur sesuai kebutuhan latihan.

**Kata Kunci**— Arduino, PID, Path Planning, Robot Tenis Meja.

## I. PENDAHULUAN

Permainan memiliki popularitas yang sangat tinggi di Indonesia. Berbagai pusat pelatihan pun mengembangkan metode pelatihan, salah satunya menggunakan mesin pelempar bola. Suatu mesin pelempar otomatis, yang mampu menempatkan bola pada titik, putaran, dan kecepatan tertentu, yang tentunya konsisten menepatkan bola di titik atau pola yang dibutuhkan, akan membantu proses pelatihan para atlet. Namun mesin yang beredar di pasaran sangat mahal harganya dan belum terjangkau oleh berbagai pusat pelatihan, khususnya Yogyakarta [1].

Dengan mengendalikan sensor jarak dengan suara ultrasonik, motor, servo, menggunakan mikroprosesor Arduino yang beredar luas di pasaran, robot pelempar bola pingpong otomatis yang mampu melempar berbagai variasi bola dapat direalisasikan, tentunya dengan harga yang terjangkau.

Pembuatan lengan robot yang bergerak membutuhkan analisa pada gerakannya untuk mengurangi getaran mekanis yang disebabkan oleh pergerakan lengan robot. Getaran mekanis berlebih akan berpengaruh pada berkurangnya usia penggunaan robot [2]. Gerakan dari suatu lengan robot dapat diubah dengan mengaplikasikan algoritma path planning, atau metode kendali seperti kendali PID [3].

## II. KAJIAN PUSTAKA

### A. Pergerakan Bola Pingpong

Bola pingpong memiliki beberapa paramter dalam gerakannya, yaitu kecepatan, putaran (*spin*), arah dan lintasan (*trajectory*) [4]. Memukul bola dengan arah dan kecepatan tertentu, akan menghasilkan putarann dan kecepatan tertentu. Putaran dan kecepatan ini lah yang menentukan lintasan bola. Kecepatan bola bervariasi dari 5 – 20 m/s [5]. Beberapa jenis putaran pada permainan tennis meja adalah topspin, backspin, dan sidespin [6].

### B. Rekayasa Gerakan Bola Pingpong

Untuk melempar bola pingpong, dapat dilakukan dengan menggunakan motor DC. Kecepatan luncur bola dapat diatur dengan mengatur tegangan masukan motor DC. Putaran bola pingpong dapat direkayasa dengan membuat peluncur dengan 2 motor yang memiliki kecepatan putar yang berbeda. Arah luncur dan sudut luncur untuk membuat berbagai jenis putaran (topspin, backspin, dan sidespin) dapat direkayasa dengan menggerakkan robot ke letak tertentu. Kemampuan untuk mengetahui posisi pemain dan meluncurkan bola menyilang dapat dilakukan dengan menggunakan sensor jarak. Semua proses ini membutuhkan pengendali yang dapat dilakukan oleh mikrokontroler.

### C. Servomechanism

<sup>1,2,3</sup> Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta, 55281 (priyatmadi@ugm.ac.id)

Sistem servo secara garis besar terdiri atas tiga komponen utama, yaitu motor yang dikendalikan, sensor motor, dan sistem kendali. *Servomechanism* merupakan closed loop system, membandingkan sinyal keluaran dari gerakan motor yang dideteksi oleh sensor dengan referensi yang dikehendaki.

Biasanya, sensor yang digunakan adalah potentiometer, yang merupakan sensor putar terbatas pada rentang tertentu. Potentiometer yang dihubungkan pada putaran motor, baik secara langsung maupun melalui bantuan sistem mekanis, akan menghasilkan tegangan sesuai putaran motor listrik. Sehingga dengan membandingkan tegangan potentiometer dan tegangan referensi, akan diperoleh perbedaan yang nantinya akan digunakan untuk memberikan daya pada motor listrik [7].

#### D. Servomotor

Servomotor adalah motor listrik yang dikendalikan dengan metode *Servomechanism*. Servo hanya akan berputar sesuai kehendak pengguna kemudian berhenti dan menunggu perintah selanjutnya. Tidak seperti motor listrik biasa, yang mulai berputar secara terus menerus ketika diberi daya.

Untuk menghasilkan putaran motor listrik yang optimum sesuai dengan prinsip servomechanism, diperlukan teknik kendali gerakan servo (*Servo Motion Control*). Kendali servo secara umum dibagi menjadi 2 bagian, yaitu eksekusi perintah (command tracking) dan penolakan gangguan (disturbance rejection) [3].

#### E. Command Tracking

Command tracking merupakan perintah yang diberikan kepada servo. Beberapa perintah yang biasa diberikan pada sistem servo adalah posisi, kecepatan, akselerasi, dan torsi. Pemberian perintah berpengaruh terhadap respon sistem secara natural, sehingga diperlukan perintah gerakan yang optimum kecepatan dan akselerasi nya. Teknik untuk menghasilkan perintah gerakan pada sistem servo ini dinamakan trajectory generation.

1) *Trapezoid Path*: Pembentukan gerakan yang berubah linear terhadap perubahan waktu. Trapezoid path merupakan karakteristik kecepatan yang paling umum dan marak digunakan. Hal ini dikarenakan kemudahan pengaturan posisi ( $y(t)$ ) yang linear terhadap perubahan waktu respon ( $t$ ), bergantung pada posisi awal ( $\theta_0$ ) dan posisi target ( $\theta_1$ )

$$y(t) = \theta_0 + \left(\frac{1}{t} \times (\theta_1 - \theta_0)\right)t \quad (1)$$

2) *Cubic Polynomial*: Untuk menciptakan gerakan yang optimum pada lengan robot, maka dirancang beberapa konstrain sebagai syarat gerakan yang optimum. Beberapa constraint pada trajectory yang kita rancang seperti posisi awal ( $\theta_{(0)}$ ) dan posisi akhir ( $\theta_{(t)}$ ) yang dikehendaki, serta kecepatan awal ( $d\theta_{(0)}$ ) dan kecepatan akhir ( $d\theta_{(t)}$ ) harus bernilai nol.

$$\theta_{(0)} = \theta_0; \theta_{(t)} = \theta_t; d\theta_{(0)} = 0; d\theta_{(t)} = 0 \quad (2)$$

Untuk memenuhi constraint pada persamaan di atas, maka persamaan trajectory harus minimal orde 3, dengan 4 koefisien, sehingga bisa memenuhi 4 constraint di atas [8]. Sehingga dibuatlah persamaan polinomial 3 derajat.

$$y(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (3)$$

3) *Polynomial orde 5*: Kelemahan dari sistem cubic polynomial adalah akselerasi (merupakan turunan kedua dari posisi) yang tidak kontinyu. Pada dunia nyata, hal ini tidak dapat diperoleh. Sehingga masih kurang akurat dalam menentukan kecepatan perpindahan joint yang berakhir munculnya getaran. Solusi dari permasalahan ini adalah menaikkan orde dari persamaan cubic polynomial. Salah satu yang handal digunakan adalah polynomial orde 5.

$$y(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \quad (4)$$

#### F. Disturbance Rejection

Disturbance dapat berarti banyak hal, mulai dari gangguan torsi pada poros motor hingga estimasi parameter yang digunakan pada feedforward control. Teknik kendali konvensional seperti PID (Proportional, Integral, and Derivative position loop) dapat digunakan untuk mengatasi masalah seperti ini.

Pada sistem PID, gain yang diberikan pada sistem motor bergantung pada error ( $e(t)$ ) yaitu selisih antara posisi estimasi/setpoint ( $\theta^*(t)$ ) dengan posisi aktual ( $\theta(t)$ )

$$e(t) = \theta^*(t) - \theta(t) \quad (5)$$

Ada 3 gain yang diatur pada PID kontrol, yaitu  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ . Prinsipnya adalah memberikan input kepada plant berdasarkan besar error saat itu, akumulasi error total, dan selisih error sekarang dan sebelumnya. Persamaan matematika dari gain sistem kendali PID [9] mengacu pada "(6)".

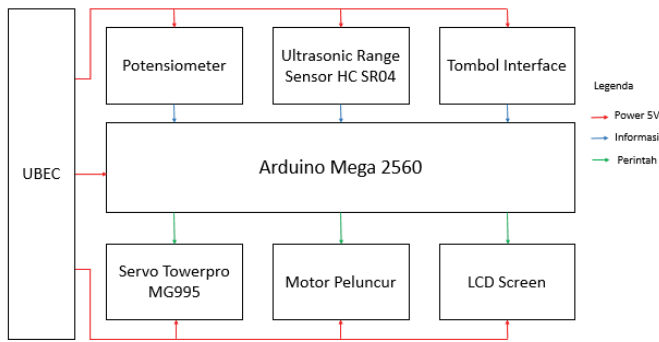
$$PID\ Output(t) = K_p(e(t)) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{d}{dt}(e(t)) \quad (6)$$

### III. PERANCANGAN SISTEM

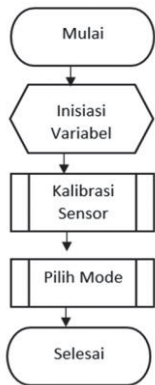
#### A. Perancangan Sistem Secara Umum

Perancangan yang dilakukan antara lain perancangan gerakan lengan robot dengan mengatur servo, perancangan jenis lemparan bola dengan mengatur motor pelempar, sistem deteksi posisi pemain, serta pengambilan keputusan jenis lemparan yang akan dilakukan robot terhadap kondisi aktual. Konfigurasi hardware dari robot ini dijelaskan pada Gbr.5. Dari sistem yang telah dirancang ini, terdapat proses sekuensial yang akan dilakukan oleh mikroprosesor sehingga robot dapat bekerja. Proses nya digambarkan sesuai diagram alir pada Gbr.6.

Proses inisiasi variabel lebih menekankan pada global variabel yang akan digunakan pada seluruh fungsi, misalnya variabel mode untuk memilih mode mesin, otomatis atau manual. Kalibrasi sensor dilakukan pertama kali mesin dinyalakan untuk mengeset nilai titik tengah sensor.



Gbr. 2 Konfigurasi hardware robot



Gbr. 1 Diagram alir program robot

Mode permainan yang dapat dipilih adalah otomatis dan manual, dimana mode ini akan menggerakkan lengan robot menuju untuk menghasilkan lemparan tertentu.

**B. Mekanis Robot**

Robot dituntut agar mampu merekayasa hasil pukulan pemain tenis meja di dunia nyata. Rata rata pemain melakukan serve serta memukul bola pada ketinggian 20 - 34cm dari atas meja dengan sudut pukul yang sangat bervariasi tergantung trayek bola hasil pukulan yang diinginkan [4].

Untuk itu diperlukan rancangan mekanik robot yang mampu bergerak secara dinamis, menghasilkan lemparan dari ketinggian sesuai standar, tentunya dengan sudut lempar yang dinamis sesuai dengan jenis lemparan.

**C. Parameter Robot Pelempar**

Robot ini bekerja dengan 3 parameter hasil lemparan, Yaitu posisi, kecepatan, dan spin. Posisi hasil lemparan diwakilkan ke dalam 8 posisi bola di meja. 8 posisi ini merupakan perwakilan dari semua kemungkinan peletakan bola pada permainan tenis meja.

Kecepatan dari lemparan robot ini dibagi menjadi 3 tingkat kecepatan, yaitu kecepatan tinggi, sedang, dan rendah. Pembagian tingkat kecepatan ini berdasarkan level pemberian tegangan pada motor peluncur.

Spin bola diatur dengan membuat kecepatan peluncur tidak sama. Pada robot ini, selisih kecepatan putaran bola menjadi nilai parameter spin. Spin dibagi menjadi 2 tingkatan, yaitu rendah dan tinggi. Untuk membuat jenis variasi *backspin*, *topspin*, dan *sidespin* maka sudut peluncur diputar pada sudut tertentu

Kombinasi parameter ini menghasilkan 96 variasi lemparan yang akan menjadi tolak ukur dalam penentuan nilai dari parameter robot pelempar, seperti sudut-sudut di setiap *joint* dan kecepatan putar motor pelontar.

**D. Pengukuran Kecepatan Luncur Bola**

Kecepatan pukulan bola pingpong oleh atlit berkisar antara 5 – 23 m/s [5]. Pengukuran kecepatan dapat dilakukan dengan analisis gerak parabolik dengan mempertimbangkan

kecepatan pada sumbu x dan y [9]. Kecepatan rata-rata yang dihasilkan oleh perubahan *input PWM arduino* dapat diperoleh dari pengukuran jarak lemparan bola pada meja. Dengan menegakkan peluncur, maka diperoleh persamaan kecepatan ( $v_{0x}$ ) berdasarkan jarak jatuh bola ( $d$ ) dan waktu tempuhnya ( $t$ ).

$$v_{0x} = \frac{d}{t} \tag{7}$$

Karena tinggi peluncur selalu sama, maka waktu tempuh bola dari peluncur dapat dihitung dengan menggunakan prinsip gerak jatuh bebas, berdasarkan ketinggian peluncur ( $h$ ) dan percepatan gravitasi ( $g$ ) [10]

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \tag{8}$$

**E. Pengukuran Getaran Mekanik**

Pengukuran getaran mekanik dilakukan dengan menggunakan transduser yang mengubah getaran mekanik ke sinyal listrik. Beberapa jenis transduser yang umum digunakan adalah variabel resistor yang dirangkai dengan konfigurasi bridge dan pembagi tegangan [12].

Analisa hasil rekaman getaran ini dapat pula dilakukan di ranah waktu. Beberapa parameter getaran mekanik di ranah waktu digambarkan oleh peak amplitude transduser atau tegangan RMS [13].

**F. Perancangan Sistem Kendali**

Sistem kendali yang akan digunakan pada lengan robot ini adalah sistem kendali *closed loop* dan juga menggunakan *path planning*. Untuk menggerakkan robot, dibutuhkan algoritma kendali yang optimum sehingga gerakan lengannya tidak menghasilkan getaran mekanis berlebih namun cukup cepat bergerak. Karena keterbatasan sistem mekanis, maka sensor posisi yang dapat diletakkan hanya terdapat pada satu joint. Sehingga untuk keperluan analisis, hanya digunakan satu joint saja yaitu pada joint tengah.

1) *Proportional-Integral-Derivative Control* : Sistem kendali P, PI, dan PID akan digunakan pada sistem ini untuk menghasilkan respon sistem dengan Error terkecil, serta tanggapan yang optimum. Tuning parameter kendali sistem ini dilakukan dengan menggunakan metode *Open Loop Ziegler Nichols* [14]. Setelah itu dilanjutkan dengan tuning manual.

2) *Path Planning* : untuk menggerakkan robot, dibutuhkan algoritma path planning yang optimum sehingga gerakan lengan robot tidak menghasilkan getaran mekanis berlebih namun cukup cepat bergerak Pada datasheet, diperoleh data kecepatan servo yang cukup bervariasi pada tegangan 5V. Untuk menggerakkan beban seberat maksimum 10kg pada lengan sepanjang 1 cm dari pusat servo sebesar 60 derajat, maka dibutuhkan waktu 0,2 sekon. Sehingga untuk mencari estimasi waktu perpindahan ( $t^*$ ) dari posisi awal ( $\theta_0$ ) menuju target ( $\theta_1$ ), dibuat persamaan garis lurus yang menggambarkan perubahan waktu gerak terhadap besar perubahan sudut merujuk pada "(10)".

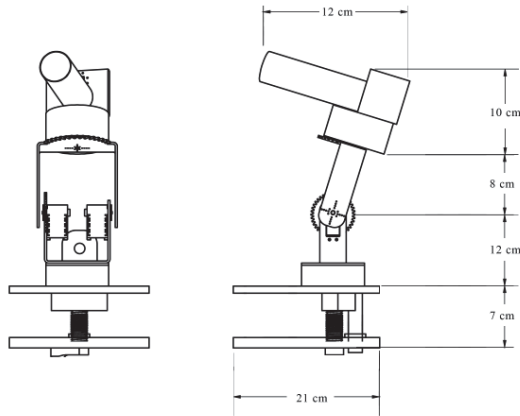
$$t^* = |(\theta_0 - \theta_1)|^0 x \frac{0.2s}{60^\circ} \tag{9}$$

**IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

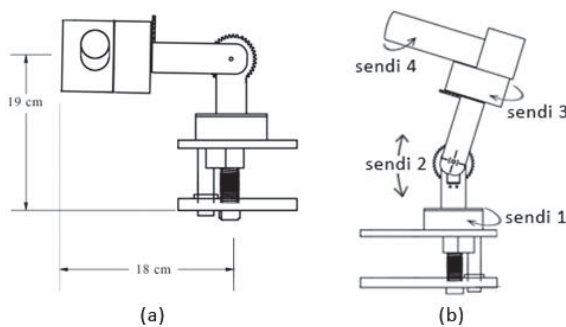


A. Rancangan Mekanis Robot

Sistem mekanis robot ini dibuat dapat bergerak kiri kanan dan naik turun serta dapat mengubah sudut lemparnya naik turun. Dengan desain menyerupai lengan robot 4 DOF dengan dikendalikan oleh servomotor, robot ini dapat menjangkau ketinggian 35 cm sampai 19 cm, dan lebar sampai 30 cm ( $\pm 15$ cm ke kiri dan ke kanan), menggerakkan sudut lempar - 5 derajat (menunduk) sampai 90 derajat (menengadahkan). Kemampuan fisik lengan robot ini membuatnya mampu menghasilkan semua jenis lemparan bola dari dan ke arah mana pun.



Gbr. 3 Tampak depan dan samping lengan robot



Gbr. 4 Tampak samping robot dengan sendi 2 di set pada posisi ekstrim (a) dan sendi sendi pada lengan robot (b)

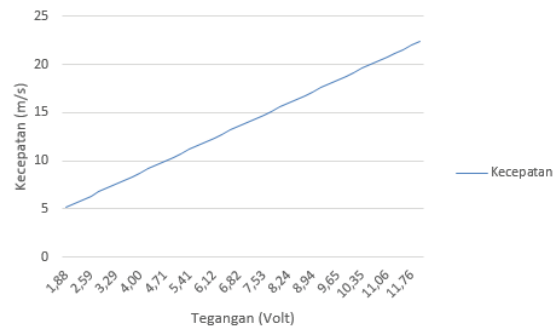
B. Pengujian Kecepatan dan Spin Bola

Dengan mengubah PWM sebagai input dari motor driver yang diberi tegangan 12VDC, Maka diperoleh data hasil pengukuran sebagai pada Tabel I.

TABEL I. Data perubahan PWM terhadap jarak luncur bola

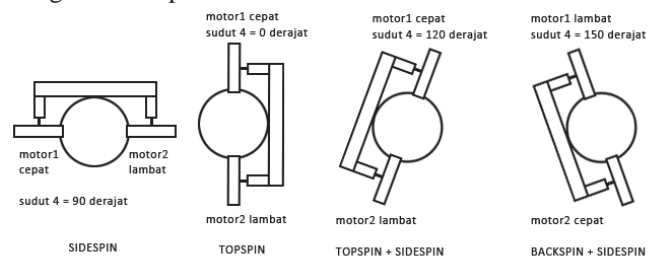
PWM	Jarak(cm)
60	167
70	189
80	209
90	230
100	249

Untuk menghitung waktu jatuh bola, digunakan prinsip gerak jatuh bebas merujuk pada "(9)" dengan tinggi lengan robot peluncur 30 cm dan konstanta gravitasi  $10\text{m/s}^2$ . Perbandingan perubahan tegangan terhadap perubahan kecepatan digambarkan pada Gbr.7. Hasil ini memenuhi standar kecepatan bola pada 5 m/s - 23 m/s.



Gbr. 5 Grafik perbandingan tegangan motor dengan kecepatan bola

Spin pada bola dapat diatur dengan memutar sendi ke empat pada robot. Seluruh jenis spin dapat diperoleh dengan membuat kecepatan dua peluncur ini tidak sama. Gbr. 10 menunjukkan berbagai posisi sudut sendi ke 4 lengan robot dan perbedaan kecepatan peluncur sehingga mampu menghasilkan spin tertentu.



Gbr. 6 Berbagai spin yang dihasilkan dari mengatur sendi 4 robot

Karena keterbatasan sumber daya dan biaya, maka metode assesment spin yang dihasilkan robot masih kualitatif dengan mengetes spin pada beberapa pemain. Spin yang dihasilkan dinilai cukup baik.

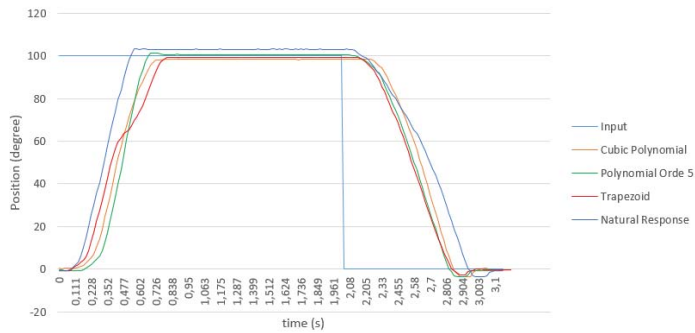
B. Pengujian Respon Sistem dengan Path Planning

Respon terhadap pemberian algoritma path planning digambarkan pada Gbr.11. Data pengujian sistem dengan algoritma path planning terdapat pada tabel III.

TABLE II. Data pengukuran parameter hasil kendali

	Tanpa Path	Trapezoid	Cubic Polynom	Polynom Orde 5 <sup>o</sup>
Rise Time	0,285 s	0,5 s	0,368 s	0,29 s
Time Settling	0,305 s	0,53 s	0,415 s	0,31 s
%Overshoot	3,49%	0%	0 %	1,52%
SSE	3,05%	0,44%	1,32%	0,43%
Delay Time	0,16 s	0,22 s	0,265 s	0,32 s

Polynomial orde 5 mampu menghasilkan parameter kendali [15] terbaik, dengan getaran mekanik terkecil yang ditandai oleh kecilnya overshoot dan mampu memberikan respon tercepat dengan error terkecil.



Gbr. 7 Plot respon dengan path planning di ranah waktu

C. Pengujian Sistem Kendali PID

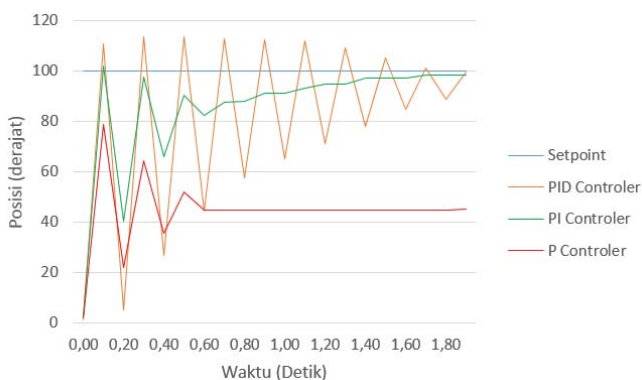
Dengan menggunakan metode *Ziegler-Nichols* [14] diperoleh nilai

- Step (U) = 10%
- Lag Time (L) = 0,135
- Slope (R) = 114,21%/s

TABLE III. Nilai Parameter Kendali dengan metode ZN

Pengendali	Kp	Ki	Kd
P Controller	0,65	-	-
PI Controller	0,58	0,45	-
PID Controller	0,778	0,27	0,07

Respon pengendali PID yang diperoleh digambarkan pada Gbr.12. Terlihat bahwa pengendali PI menghasilkan respon terbaik.

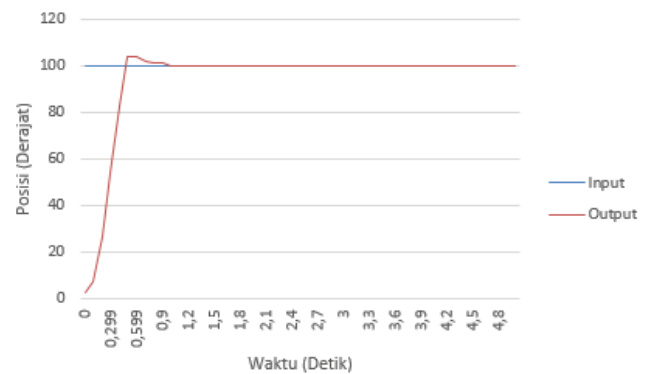


Gbr. 8 Respon pengendali PID dengan parameter hasil estimasi ZN

Untuk mendapatkan respon sistem terbaik, maka dilakukan *manual tuning*. Hasil dari tuning menggunakan metode ZN dapat digunakan sebagai acuan untuk melakukan *manual tuning*. *Manual tuning* juga dilakukan untuk menghasilkan parameter kendali optimum.

- Kp manual tuning = 0.05
- Ki manual tuning = 0.95
- Kd manual tuning = 0

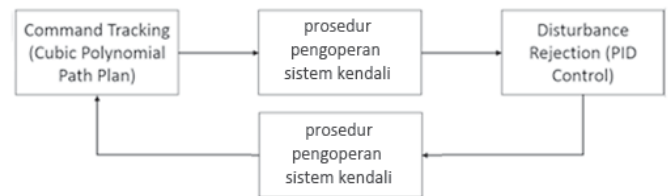
Respon sistem dengan parameter ini sangat baik, tanpa *steady state error* dan *settling time* 0,37 detik.



Gbr. 9 Respon sistem dengan pengendali PI hasil manual tuning

D. Pengujian Kendali Hybrid

Ide dari pembuatan algoritma kendali hybrid ini adalah memadukan antara proses tracking command yang telah diteliti sebelumnya dimana *path planning* polynomial Orde 5 diperoleh sebagai algoritma yang paling optimum, serta proses disturbance rejection dimana kendali PI menjadi pengendali yang mampu menghilangkan gangguan dan error, paling handal untuk lengan robot ini.



Gbr. 10 Diagram alir pengendali hybrid

Pada kendali hybrid ini, proses dimulai dari pemberian perintah berupa polynomial orde 5. Kemudian setelah perintah selesai diberikan, maka dilakukan prosedur pengoperan sistem kendali ke pengendali PI, sebelum akhirnya pengendali PI ini mengendalikan lengan robot hingga error tidak tersisa. Permasalahan utama dari proses perpindahan algoritma kendali ini adalah prosedur pengoperan sistem kendali dari *path planning* ke pengendali PI, dimana akan terjadi lonjakan (*bumping*) apabila tidak ada prosedur pengoperan yang benar.

Untuk itu, perlu dibuat prosedur pengoperan sistem kendali pengendali PI dimana *integrated error* ( $\int_t^{t+i} e(t) dt$ ) tidak dibiarkan nol, tapi di beri nilai awal sebesar sudut yang diperintahkan *path plan* saat  $i$  ( $\theta_{path}(i)$ ), tepat setelah algoritma pengendali dipindah ke PI. Selain itu parameter kendali PI seperti  $K_p$  dan  $K_i$  harus disesuaikan juga sesuai besar error. Karena overshoot yang besar dapat terjadi ketika menggunakan parameter pengendali untuk error yang besar pada sistem dengan error yang lebih kecil. Posisi awal lengan juga dibuat sesuai bacaan sensor sudut lengan, karena untuk mengoper kembali ke algoritma *path plan*, dibutuhkan nilai posisi awal ( $\theta_0$ ) yang sesuai sehingga tidak terjadi *bumping*. Tabel IV Merepresentasikan parameter prosedur pengoperan sistem kendali dari *path plan* ke pengendali PI.

TABLE IV. Parameter pada prosedur pengoperan sistem kendali

Parameter	Error > 20	Error < 20 derajat
-----------	------------	--------------------

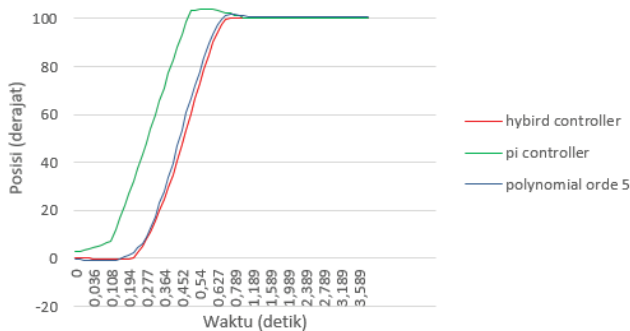
	derajat	
Kp	0.05	0.04
Ki	0.95	0.8
$\int_t^{t+i} e(t) dt$	$\theta_{Path}(i)$	$\theta_{Path}(i)$
$\theta_0$	$\theta(i)$	$\theta(i)$

Perbandingan respon pengendali *hybird* dengan pengendali lain dijabarkan pada Tabel V.

TABLE V. Perbandingan respon pengendali *hubird* dengan pengendali lain

Parameter	<i>Path plan</i>	PI	hybird
Rise Time	0,29 s	0,34 s	0,315 s
Time Settling	0,31 s	0,37 s	0,34 s
% Overshoot	1,52%	3,57%	0,25%
Steady State Error	0,43%	0,24%	0,03%
Delay Time	0,32 s	0,11 s	0,29 s

Kendali Hybrid ini menjadi pengendali yang sangat handal, dengan respon yang cepat serta akurasi yang tinggi, tentunya tanpa getaran mekanis yang mengganggu.



Gbr. 11 Perbandingan respon pengendali hybrid dan yang lainnya di ranah waktu

#### IV. KESIMPULAN

Dari analisis dan pembahasan hasil pengujian, dapat ditarik kesimpulan antara lain :

- Sistem kendali robot pelembar pingpong otomatis dengan 2 motor peluncur dan lengan robot 4 DOF sebagai pemindah posisi peluncur membuat robot dapat melempar bola di semua posisi dengan berbagai variasi lemparan, dengan mikrokontroler Arduino Mega.
- Sistem kendali robot yang di rancang mampu menghasilkan 96 jenis lemparan, di 8 area yang berbeda yang mewakili semua area pada meja bola pingpong. Variasi lemparan bergantung pada kecepatan lempar bola, spin bola, dan posisi pantul bola.
- Kendali hybrid menggabungkan polynomial orde 5 path planning sebagai command tracking nya, dan PI Control sebagai disturbance rejection nya, menjadikan robot ini mampu menghasilkan gerakan yang halus, minim getaran, tanpa mengurangi kecepatan secara signifikan dan error minimum.

#### REFERENSI

- [1] P. Hanantasia Dinda, “Pengembangan Penilaian Teknik Servis Backspin Forehand dan Backhand Atlet Tenis Meja Yuniior Klub Jusma Table Tennis School Yogyakarta,” Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, 2012.
- [2] Fluke Corporation, “reliableplant.com,” 1 1 2015. [Online]. Available: <http://www.reliableplant.com/Read/24117/introduction-machinery-vibration>.
- [3] P. Hannifin, “parkermotion.com,” 1 1 2003. [Online]. Available: <http://www.parkermotion.com/whitepages/ServoFundamentals.pdf>.
- [4] M. Alexander dan A. Honish, “Table Tennis : A Brief Overview Of Biomechanical Aspescts Of The Game For Coach and Players,” Sport Biomechanicals Laboratory, Faculty Of Kinesiology And Recreation Management, University Of Manitoba, Winnipeg, 2009.
- [5] H.-P. Tang, M. Mizoguchi dan S. Toyoshima, “Speed and spin characteristics of the 40mm table tennis ball,” Aichi Prefectural University, Japan and Toyama Industrial Technology Center, Aichi, 2000.
- [6] allabouttabletennis.com, “allabouttabletennis.com,” 1 1 2015. [Online]. Available: <http://www.allabouttabletennis.com/table-tennis-techniques-spin.html>.
- [7] electrical4u, “Servo Motor | Servo Mechanism | Theory and Working Principle,” 1 1 2015. [Online]. Available: <http://www.electrical4u.com/servo-motor-servo-mechanism-theory-and-working-principle/>.
- [8] J. J. Craig, Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Prentice Hall, 2004.
- [9] N. S. Nise, Control System Engineering, Wiley, 2010.
- [10] wikipedia.org, “wikipedia,” 1 1 2014. [Online]. Available: [https://id.wikipedia.org/wiki/Gerak\\_jatuh\\_bebas](https://id.wikipedia.org/wiki/Gerak_jatuh_bebas).
- [11] wikipedia.org, “wikipedia,” 1 1 2014. [Online]. Available: <https://id.wikipedia.org/wiki/Kecepatan>.
- [12] S. S. Rao, “Chapter 10. Vibration Measurement and Appllications,” dalam *Mechanical Vibration*, Prentice-Hall, 2010, p. 918.
- [13] S. S. Rao, “Chapter 10. Vibration Measurement and Application,” dalam *Mechanical Vibration*, Prentice-Hall, 2010, p. 873.
- [14] J. Ziegler dan N. Nichols, “Optimum settings for automatic controllers,” *Transactions of the ASME*, pp. 759-768, 1942.
- [15] J. D’Azzo dan C. Houpis, Linear Control System Analysis and Design : Conventional and Modern, New York: McGraw-Hill, 1995.