

Kendali Posisi Bola Mengambang oleh Angin dengan Metode Kontrol PID (Proportional Integral Derivative)

Nurista Wahyu Kirana, Bisma Ferriand, Feriyonika, Indra Chandra Riadi
Politeknik Negeri Bandung, Jurusan Teknik Elektro

Jl. Gegerkalong Hilir, Ds.Ciwaruga, Bandung 40012, (022) 2013789

nurista.wahyu@polban.ac.id, bismaferriand11@gmail.com, feriyonika@polban.ac.id, indra.riadi@polban.ac.id

Abstrak— Posisi pada suatu benda dapat diatur dan diubah oleh berbagai jenis aktuator, salah satunya oleh tekanan angin. Kendali posisi, secara alamiah merupakan salah satu *plant* yang memiliki respon dari sistem yang ideal, tetapi pada kenyataannya *noise* pada sistem tidak dapat dihindari sehingga mengakibatkan pengendalian tidak sesuai dengan apa yang diinginkan. *Noise* pada *plant* ini terjadi akibat dari perubahan aliran udara yang dihasilkan oleh kipas DC (*Direct Current*) terganggu oleh rongga pada ruangan bola yang terbuka dan dibutuhkan pengendalian yang tepat agar dapat diatur sesuai apa yang diinginkan. Pada penelitian ini digunakan jenis pengendalian control PID (*Proportional Integral Derivative*) untuk menjaga posisi beban yaitu bola ringan agar tetap dalam keadaan sesuai *set point*. Langkah awal adalah mencari parameter kendali PID dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols tipe 2. Metode ini bertujuan untuk mengidentifikasi sistem pada *plant* sehingga akan diperoleh parameter-parameter kendali PID. Angin yang dihasilkan oleh aktuator berfungsi untuk menggerakkan benda agar tetap pada *set pointnya* dan dibaca oleh sensor ultrasonik. Perubahan angin yang diatur menggunakan potensiometer agar posisi benda sesuai dengan yang diinginkan. Pengendalian dari nilai parameter *tuning* (K_p), T_i , T_d sebagai parameter agar respon dapat dalam keadaan *steady state* dan respon akan mengikuti *set point* sesuai yang dibutuhkan. Parameter yang didapat yaitu $K_p = 1,6$, $T_i = 1,05$, dan $T_d = 0,05$ dengan filter atau $fc = 0,4$ sehingga dihasilkan overshoot = 2,2% dan *risetime* = 5,1 s. Pengujian juga dilakukan gangguan berupa sentuhan, tekanan dan gerakan manual menggunakan tangan pada bola tetapi respon kembali pada *set pointnya*.

Kata Kunci— kendali Posisi, kendali PID, Ziegler Nichols, Motor DC

I. PENDAHULUAN

Pengendalian posisi bola ringan dengan menggunakan Motor DC (*Direct Current*) merupakan suatu proses yang mudah. Secara luas digunakan pada prototipe tugas-tugas kuliah karena mempunyai efisiensi tinggi. Kendali PID (*Proportional Integral Derivative*) teruji dapat menampilkan kinerja yang baik pada pengendalian dengan pembebanan tertentu pada *plant*. Namun supaya respon dalam kondisi stabil, kendali PID harus dilakukan *tuning* parameter yaitu *gain proportional* (K_p), *gain integral* (K_i) serta *gain derivatif* (K_d) agar dapat mengarah ke kondisi *steady state* sesuai dengan *set point* yang diinginkan. Seperti penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh Harianto [1] posisi bola menjadi kurang stabil dikarenakan banyak celah pada pipa dan ruang pipa lebih besar daripada bola pingpong tersebut, sehingga membuat banyak angin yang kabur, dan membuat bola tidak *stady state*. Penelitian sebelumnya juga dilakukan oleh Ma'arif [2] yang menyatakan bahwa kontrol PID dapat

mengendalikan, menangani, dan menstabilisasi sistem motor DC dengan berbagai variasi *set point*. Selain itu, penggunaan arduino sebagai proses kendali dimana hasilnya dikirim ke motor servo dapat digunakan untuk menyeimbangkan posisi bola seperti yang telah diteliti oleh Orlanda [3].

Pada penelitian ini dirancang *plant* sederhana untuk dijadikan uji coba pengendalian dengan menggunakan metode kendali PID. Selain itu, digunakan MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) sebagai *driver* untuk menjalankan aktuator dan kontroler menggunakan Arduino UNO. *Set point* dengan respon yang didapat bisa ditampilkan melalui LCD (*Liquid Crystal Display*) 16x2 dalam bentuk angka dengan satuan "cm". Sementara itu untuk melihat respon dari sistem dalam bentuk gelombang menggunakan *serial plotter* pada *software* Arduino kemudian pengujian dengan memberikan gangguan pada bola dan mengamati responnya. Proses perancangan dari sistem ini menggunakan kendali PID untuk mengetahui parameter-parameter kendalinya yang dilakukan dengan mengidentifikasi sistem dengan metode Ziegler-Nichols tipe ke-2.

II. METODE DAN PERANCANGAN SISTEM

A. Kendali PID

Kendali PID merupakan kontroler *feed-forward* yang berfungsi mengolah sinyal *error* menjadi sinyal kontrol dengan hubungan sinyal kontrol terhadap sinyal *error* dapat proporsional, integral, diferensial atau gabungan diantaranya. Berdasarkan bentuk hubungan sinyal *error* dan sinyal control, persamaan umum PID dalam waktu (1) dan dalam bidang *laplace* (2)[4]

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt + K_p T_d \frac{d(e(t))}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_{ds} \quad (2)$$

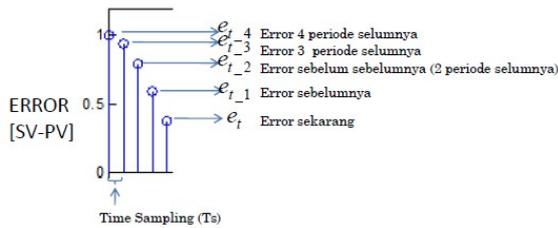
dimana K_p adalah *gain proportional*, $e(t)$ adalah *error*, K_i adalah *gain integral*, $\int e(t) dt$ adalah integral *error* yaitu luas area yang dibentuk dari nilai *error* dari awal ($t=0$) sampai dengan waktu perhitungan *error* terakhir, T_d adalah *time derivative*, T_i adalah *time integral*, $\frac{d(e(t))}{dt}$ adalah *deffrensial error* yaitu perubahan *error* terhadap waktu. Sementara itu $u(s)$ adalah sinyal control, $e(s)$ adalah sinyal *error*, dan K_{ds} adalah *gain derivative serial* [5].

Error adalah selisih antara nilai yang diinginkan dengan nilai proses sehingga dapat dituliskan dalam persamaan (3) dan (4).

$$e(t) = \text{Set point Value} - \text{Proses Value} \quad (3)$$

$$MV = K_p \cdot e(t) = K_p \cdot (SV - PV) \quad (4)$$

Dimana $e(t)$ adalah *error*, MV adalah *manipulated variable* atau variable yang parameternya dapat diatur, SV adalah *set point value* atau nilai *set point* dan PV adalah *proses value* atau nilai proses [6]. Luas sebelum adanya 'et' + Luas area baru yang dibentuk oleh 'et' dan 'et_1', pada persamaan ini digunakan rumus luas trapesium dengan tinggi nya adalah T_s (*Time sampling*). Hubungan antara pembacaan *error* terhadap waktu seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pembacaan Error terhadap waktu

Pada proses digitalisasi digunakan e_{int} untuk merepresentasikan sebagai *integral error*. Lalu e_{int_1} sebagai *integral error* sebelumnya. Maka didapatkan persamaan (5) dan (6) [7].

$$e_{int} = e_{int_1} + \left(\frac{et + et_1}{2} \right) T_s \quad (5)$$

$$= K_i \cdot e_{int} \quad (6)$$

Persamaan selanjutnya yaitu persamaan *derivative*. Rumus *derivative* adalah $K_p T_d \frac{d(e[t])}{dt}$, $K_p T_d$ adalah K_d , sedangkan $\frac{d(e[t])}{dt} = \text{differential error}$. Pada persamaan digital *differential error* ini digunakan *ediff* untuk merepresentasikan *differential error*. Maka didapatkan persamaan (7), (8) dan (9) [8]

$$\frac{d(e[t])}{dt} = \frac{\text{Perubahan Error}}{\text{Perubahan Waktu}} = \frac{(et - e_{t-1})}{T_s} \quad (7)$$

$$\text{ediff} = \frac{(et - e_{t-1})}{T_s} \quad (8)$$

$$MV = K_d \cdot \text{ediff} \quad (9)$$

Pada persamaan PID tersebut dapat digabungkan sehingga didapatkan persamaan PID seperti pada persamaan (10).

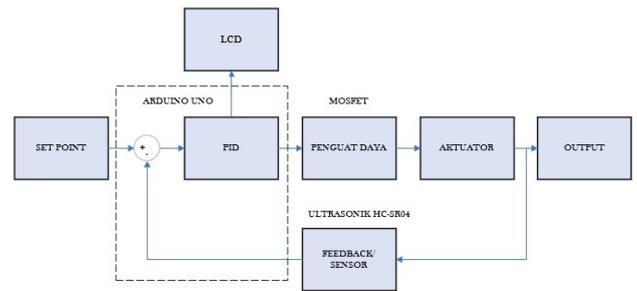
$$MV = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot e_{int} + K_d \cdot \text{ediff} \quad (10)$$

Dimana MV adalah variabel input yang dapat dimanipulasi, K_d adalah *gain derivative*, et adalah error pada waktu sekarang (t), dan et_1 adalah error pada waktu sebelumnya [9]

B. Perancangan Sistem

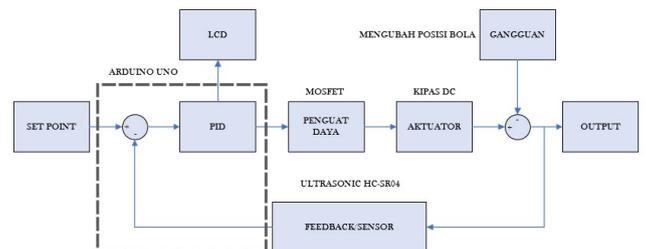
Sistem dirancang seperti blok diagram pada Gambar 2. Kipas DC sebagai aktuator untuk menggerakkan posisi bola supaya berada pada *set point* sesuai dengan permintaan kendali pada mikrokontroler dari hasil pembacaan sensor ultrasonik. Sementara itu sebagai penguat daya untuk mengatur aktuator digunakan MOSFET.

Hasil pembacaan pada mikrokontroler ditampilkan pada layar LCD, sehingga dapat diketahui kesesuaian respon dengan *set point* dan ditampilkan juga pada serial *plotter* sebagai gambaran dari respon sistem dalam bentuk sinyal.



Gambar 2. Blok diagram sistem

Rangkaian integrasi dari setiap komponen dengan fungsinya masing-masing pada sistem yang dibuat, seperti PID yang berada pada bagian mikrokontroler yang direalisasikan menggunakan Arduino UNO, MOSFET untuk penguat dayanya, aktuator dengan menggunakan kipas DC. Sebelum menuju output diumpambalikkan pembacaan data dengan sensor menggunakan sensor Ultrasonic HC-SR04. Arduino Uno sebagai mikrokontroler akan mengontrol kecepatan angin pada kipas DC agar sesuai dengan *set point* yang diinginkan sesuai dari putaran potensiometer. Sementara itu, respon dibaca oleh sensor Ultrasonic HC-SR04 yang dihitung berdasarkan jarak bola pada sensor Ultrasonic HC-SR04. Selanjutnya prosedur uji gangguan pada *plant* yang dilakukan dengan cara mengubah posisi bola atau mengubah jarak bola pada sensor saat respon dalam keadaan *steady-state*.



Gambar 3. Blok diagram gangguan sistem

C. Filter IIR (Infinite Impulse Response)

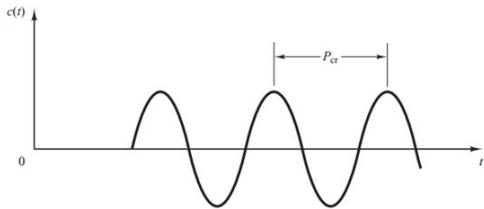
Pada Serial plotter, Arduino menampilkan nilai SV (*Set point Value*) dan PV (*Proses Value*). Pada nilai SV dan PV perlu dilakukan konversi antara waktu asli dan gambar respon dengan perbandingan seperti berikut ini:

$$\frac{\text{Periode Sinyal Asli}}{\text{Range Waktu Asli}} = \frac{\text{Periode Sinyal Gambar}}{\text{Range Waktu Gambar}} \quad (11)$$

Dimana akan didapatkan nilai parameter kendali K_p , K_i , K_d , T_i dan T_d [10].

D. Perancangan kendali PID dengan Ziegler Nichols 2

Pada penelitian ini digunakan metode *Ziegler Nichols* tipe 2 untuk sistem *close loop*. Proses perancangan dengan tipe 2 ini dilakukan dengan cara mengatur *time integral* $T_i = \infty$ dan *time derivative* $T_d = 0$ [11]. Selanjutnya menaikkan parameter proporsional hingga respon sistem berosilasi dengan simpangan yang tetap. Setelah sistem *sustain oscillation*, maka akan didapatkan parameter *gain critical* (K_{cr}) dan periode *critical* (P_{cr}). Respon osilasi *Ziegler Nichols* tipe 2 dapat dilihat pada gambar 4[12].



Gambar 4. Respon osilasi *Ziegler Nichols* tipe 2

Perhitungan parameter berupa nilai K_p , T_i dan T_d dapat dilihat di Tabel 1.

TABLE I. PERHITUNGAN PARAMETER ZIEGLER NICHOLS TIPE 2

TIPE KENDALI	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1,2}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Ketika terdapat fungsi alih suatu sistem maka dapat ditentukan parameter *gain proportional* (K_p), *time integral* (T_i) dan *time derivative* (T_d) melalui perhitungan menurut aturan *Ziegler-Nichols* [13] untuk perhitungan kendali PID sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\
 &= 0,6K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0,5P_{cr}s} + 0,125T_d s \right) \\
 &= 0,075K_{cr}P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s} \quad (12)
 \end{aligned}$$

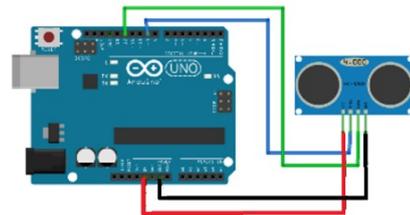
Dimana $T_i s$ adalah *time integral* serial, $T_d s$ adalah *time derivative* serial [14]. Untuk mendapatkan nilai *gain critical* (K_{cr}) menggunakan kriteria kestabilan *routh* sedangkan untuk mendapatkan periode *critical* (P_{cr}) dari simpangan yang tetap *sustained oscillation* [15]. Setelah didapat nilai parameter kendali PID terapkan parameter tersebut ke sistem yang akan dikontrol, jika belum sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan, maka perlu dilakukan *manual tuning* dengan mengikuti Tabel 2 sebagai berikut.

TABLE II. TABEL *TUNING* PID

PARAMETER	RISE TIME	OVERSHOOT	SETTLING TIME	S-S ERROR
K_p	BERKURANG	BERTAMBAH	MINOR CHANGE	BERKURANG
K_i	BERKURANG	BERTAMBAH	BERTAMBAH	MENGHILANG
K_d	MINOR CHANGE	BERKURANG	BERKURANG	MINOR CHANGE

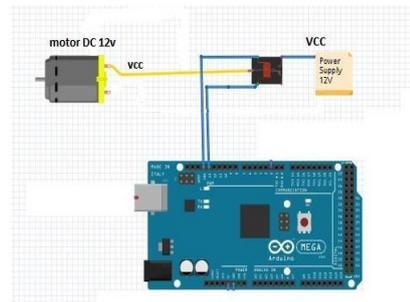
E. Perancangan Sensor Elektronik dan Aktuator

Sensor elektronik yang digunakan adalah sensor Ultrasonic-HC SR04. Sensor elektronik dihubungkan dengan Arduino UNO seperti pada gambar 5.



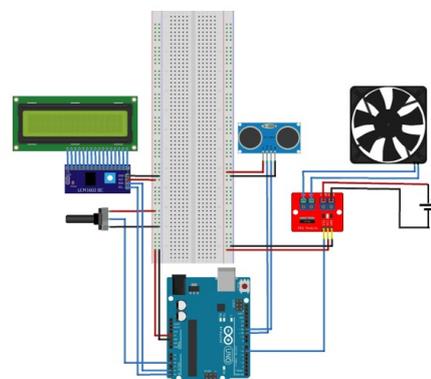
Gambar 5. Perancangan Sensor Elektronik

Aktuator yang digunakan adalah *blower fan motor DC* yang memiliki tegangan maksimum 12V. Aktuator tersebut dihubungkan pada driver (MOSFET) seperti terlihat pada gambar 6.



Gambar 6. Perancangan Aktuator

Langkah selanjutnya yaitu mengintegrasikan antara sensor dengan aktuator seperti terlihat pada gambar 7.



Gambar 7. Integrasi Rangkaian

F. Perancangan Desain Mekanik

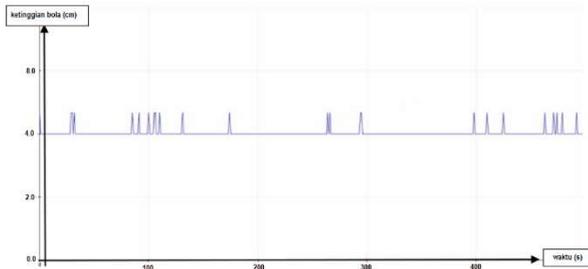
Desain mekanik untuk lintasan bola digunakan bahan pipa PVC dengan diameter 4,5 cm atau 0,5 cm lebih besar dari diameter bola. Hal ini bertujuan untuk menghindari *noise* yang dihasilkan oleh rongga pada lintasan yang terlalu lebar dibandingkan dengan bola atau beban seperti ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Mekanik untuk lintasan bola

G. Perancangan Filter

Pada perancangan filter, langkah pertama yang dilakukan adalah mengukur waktu asli *noise*. Setelah itu, langkah selanjutnya diukur periode *noise* yang terkecil serta panjang dari sinyal respon yang didapatkan. Sinyal respon dari sistem sebelum difilterisasi dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9. Sinyal respon sebelum filterisasi

Gambar 9 merepresentasikan gambar sinyal pembacaan sensor yang belum difilter. Waktu yang terukur pada *stopwatch* adalah 25,10 s. Seperti terlihat pada gambar 9, *range* menunjukkan 291,4 mm dan tinggi dari sinyal *noise* tercatat sebesar 0,5 mm. Oleh karena itu dari data yang dihasilkan dapat diperoleh frekuensi *cut-off* pembacaan sensor sebagai berikut[16] :

$$\frac{\text{Periode Waktu Asli}(T)}{\text{Range Waktu Asli}} = \frac{\text{Periode Sinyal Gambar}(T_s)}{\text{Range Waktu Gambar}} \quad (13)$$

$$\frac{\text{Periode Waktu Asli}(T)}{25,10 \text{ s}} = \frac{0,5 \text{ mm}}{291,4 \text{ mm}}$$

$$T = \frac{0,5}{291,4} \times 25,10 \text{ s} = 0,043 \text{ s} \quad (14)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,043} = 23,25 \text{ Hz} \quad (15)$$

Dimana T adalah periode, dan f adalah frekuensi sehingga nilai ω (dalam radian) :

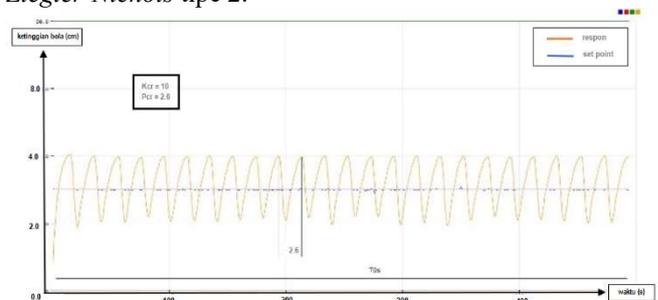
$$\omega = 2\pi f = 2 \times 3,14 \times 23,25 = 146 \text{ rad} \quad (16)$$

frekuensi cut off 2 dekade sehingga $f_c = 1,46 \text{ Hz}$. Setelah didapatkan frekuensi *cut off* dapat ditentukan pula nilai RC (*Resistansi kapasitansi*) seperti pada persamaan (17). Dimana RC dirumuskan sebagai berikut:

$$RC = \frac{1}{(6.28 \times f_c)} \quad (17)$$

H. Perancangan Kendali

Setelah perancangan filter, dilakukan perancangan kendali sehingga dapat diperoleh identifikasi parameternya. Gambar 10 menunjukkan hasil dari respon dengan Metode Ziegler-Nichols tipe 2.



Gambar 10. Identifikasi Parameter Ziegler-Nichols tipe 2

Waktu real yang dibutuhkan dari titik awal hingga akhir pada gambar 10 yaitu 1,10 s. K_{cr} didapat dari besarnya gain yang dipakai hingga respon osilasi, sehingga untuk mendapatkan parameter P_{cr} dilihat dari selisih waktu antar puncak sehingga diperoleh $P_{cr} = 2,6$. Setelah diperoleh nilai K_{cr} dan P_{cr} pada respon, maka dapat didapatkan parameter PID.

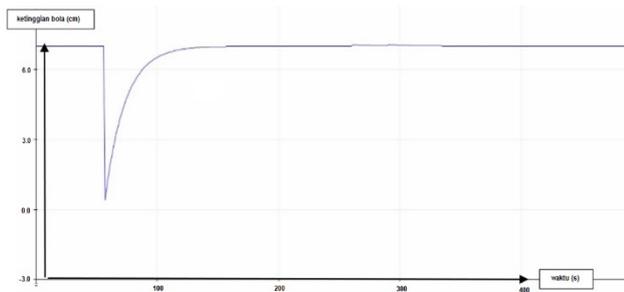
$$K_p = 0,6K_{cr} = 0,6 \times 10 = 6 \quad (18)$$

$$T_i = 0,5P_{cr} = 0,5 \times 2,6 = 1,3 \quad (19)$$

$$T_d = 0,125P_{cr} = 0,125 \times 2,6 = 0,325 \quad (20)$$

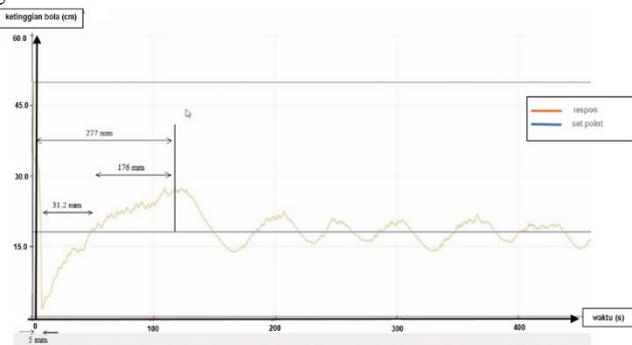
III. HASIL DAN ANALISA

Dari hasil filterisasi pada respon sensor yang telah dilakukan, dapat dilihat perbandingan sebelum dan sesudah filterisasi. Setelah dilakukan perhitungan seperti pada persamaan (13) sampai dengan (16) selanjutnya perhitungan tersebut direalisasikan dengan filterisasi digital. Selanjutnya substitusi pada program Arduino UNO dan ditampilkan hasil filter tersebut pada serial plotter aplikasi Arduino UNO. Hasil respon setelah adanya filterisasi digital seperti ditunjukkan pada gambar 11.



Gambar 11. Sinyal respon setelah filterisasi digital

Setelah didapatkan parameter *gain proportional* (K_p), *time integral* (T_i) dan *time derivative* (T_d) dari hasil perhitungan selanjutnya dimasukkan dalam program Arduino UNO beserta dengan rumus-rumus kendali digital yang digunakan yaitu menggunakan PID tipe A sehingga diperoleh gambar sinyal respon yang dihasilkan seperti pada gambar 12.



Gambar 12. Sinyal respon awal parameter kendali

Dari hasil pengujian, respon masih belum sempurna atau *steady state* karena masih memiliki beberapa error yaitu :

$$\%Overshoot = (277\text{mm}-176\text{mm})/176\text{mm} \times 100\% = 57,38\%$$

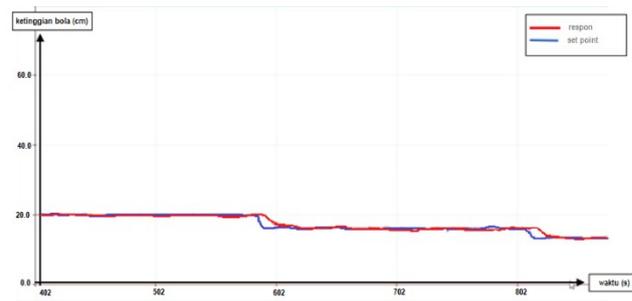
$$Rise\ Time = \frac{31,2\text{mm} - 5\text{m}}{291,4\text{ mm}} \times 1,10 = 0,098\text{ s}$$

Respon masih memiliki *overshoot* sebesar 57,38% sehingga perlu dilakukan *tuning* manual dengan merubah nilai K_p terlebih dahulu, kemudian T_i dan T_d sampai sinyal respon sesuai dengan yang diharapkan. Tabel III menunjukkan nilai perbandingan parameter kendali sebelum dan sesudah dilakukan *tuning*.

TABLE III. PARAMETER KENDALI SEBELUM DAN SESUDAH TUNING

PARAMETER	SEBELUM TUNING	SESUDAH TUNING
K_p	6	1,6
T_i	1,3	1,05
T_d	0,325	0,05
K_i	4,61	1
K_d	18,46	0,08

Setelah dilakukan *tuning*, didapatkan beberapa parameter kendali seperti pada tabel III. Hasil sinyal respon ditunjukkan pada gambar 13.



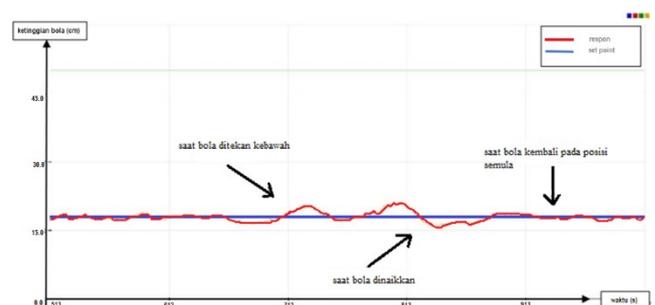
Gambar 13. Sinyal respon setelah dilakukan *tuning*

Dikarenakan hilangnya *overshoot* dan *error steady-state*, maka respon akan tetap mengikuti *set point*nya, pada gambar 14 menunjukkan hasil sinyal respon ketika *set point* dinaikkan dan diturunkan.



Gambar 14. Respon sinyal saat *setpoint* diubah

Saat sinyal dalam kondisi mempertahankan respon pada *set point*nya, selanjutnya diberikan gangguan pada beban untuk melihat pertahanan sinyal respon pada *setpoint*. Dalam pengujian ini diberikan gangguan dengan cara menggerakkan bola secara acak naik dan turun sehingga diperoleh respon sinyal seperti pada gambar 15.



Gambar 15. Respon sinyal saat diberikan gangguan

Ketika alat diberi gangguan, maka sinyal respon akan mempertahankan pada posisi semula atau *steady state*. Error sebelum terjadinya gangguan adalah 0.04 dan setelah gangguan errornya menjadi 3,75. Sedangkan untuk *settling time* bernilai 6,75 s. Kriteria performansi dari *plant* yang digunakan yaitu *error steady state* kurang dari 5% dari *set point*, *rise time* sebesar 5,1 s. *Overshoot* yang dihasilkan sebesar 2,2% sehingga dapat mengendalikan bola atau objek tetap berada pada *set point*. Hal ini menunjukkan bahwa

sistem yang baik dan terkendali akan tetap mempertahankan kondisinya meskipun terjadi gangguan pada waktu tertentu.

IV. KESIMPULAN

Sistem pada kendali posisi bola mengambang oleh udara dengan metode PID control ini dapat mengendalikan posisi bola sesuai dengan *set point* yang diinginkan. Filter digunakan untuk meminimalisir sinyal *noise* pada respon dengan cara mengidentifikasi sistem terlebih dahulu menggunakan metode *Ziegler-Nichols* tipe 2 untuk mengetahui parameter-parameter kendali PID. Parameter yang didapatkan yaitu $K_p = 1,6$, $T_i = 1,05$, dan $T_d = 0,05$ dengan filter atau $fc = 0,4$. Overshoot yang dihasilkan sebesar 2,2% dan risetime sebesar 5,1 s sehingga dapat mengendalikan bola atau objek tetap berada pada *set point*. Gangguan juga diberikan diantaranya berupa sentuhan, tekanan dan gerakan manual menggunakan tangan pada bola tetapi respon kembali pada *set point*nya. *Tuning* dilakukan agar didapatkan respon yang sempurna dan sesuai dengan apa yang diharapkan serta untuk memastikan respon sistem dalam keadaan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Harianto M.L, "Pengendali Ketinggian Bola Dalam Pipa Vertikal Dengan Metode PID," *STIKOM Surabaya - Undergraduate Theses*, Jul. 2013.
- [2] A. Ma'Arif, Iswanto, N. M. Raharja, P. A. Rosyady, A. R. C. Baswara, and A. A. Nuryono, "Control of DC Motor Using Proportional Integral Derivative (PID): Arduino Hardware Implementation," *Proceeding - 2020 2nd International Conference on Industrial Electrical and Electronics, ICIEE 2020*, pp. 74–78, Oct. 2020, doi: 10.1109/ICIEE49813.2020.9277258.
- [3] Orlanda E and Suprianto B, "Perancangan Sistem Keseimbangan Ball And Beam dengan menggunakan Pengendali PID Berbasis Arduino UNO," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 8, no. 1, pp. 53–61, 2018.
- [4] Krisnawati, PuspitaSari A, and Rachman N, "Sistem Kendali Jarak Jauh Senjata SS2 Pada Pasukan dengan Metode PID," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, vol. 5, no. 2, 2018.
- [5] L. Wang, "Tuning PID Control Systems with Experimental Validations," Singapore, 2015.
- [6] Imam M, Shalahuddin M, and Setiawan R, "Pengaruh Kendali Kecepatan Motor DC Pada Chopper Drive," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, vol. 8, no. 2, 2021.
- [7] Y. B. Koca, Y. Aslan, and B. Gokce, "Speed Control Based PID Configuration of a DC Motor for An Unmanned Agricultural Vehicle," in *2021 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ICEEE 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Apr. 2021, pp. 117–120.
- [8] Setiawan Iwan, *KONTROL PID UNTUK PROSES INDUSTRI*, 1st ed. Semarang: PT Elex Media Komputindo, 2008.
- [9] Sahputro S, Fadilah F, Wicaksono N A, and Yusivar F, "Design and Implementation of Adaptive PID Controller for Speed Control of DC Motor," *IEEE International Conference QIR Electrical and Computer Engineering*, pp. 179–183, 2017.
- [10] Tang W, Liu Z, and Wang Q, "DC Motor Speed Control Based on System Identification and PID Auto Tuning," *Proceedings of 36th Chinese Control Conference*, pp. 6420–6423, 2017.
- [11] Asa P, Priyambodo S, and Subandi, "Sistem Pembelajaran Kontrol PID (*Proporsional Integral Derivatif*) Pada Pengatur Kecepatan Motor DC PID," *Jurnal Elektrikal*, vol. 3, no. 1, pp. 72–77, 2016.
- [12] Sulastri, Bachrudin M, and Safrudin, "Analisa Pengaturan Aliran Menggunakan Metode PID Pada Filter Backwash Pump di PLTU Unit 5 dan 6 PAITON," *Jurnal TESLA*, vol. 22, no. 2, pp. 151–162, 2020.
- [13] Mahmud M, Motakabber S.M.A, Alam Z, and Nordin A.N, "Adaptive PID Controller Using for Speed Control of the BLDC Motor," *IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE)*, pp. 168–171, 2020.
- [14] E. Jossy Handoko and C. Nurin Hamdani, "Penalaan PID Pada Sistem Pengendalian Level Seal Water Separator Dengan Metode IMC di PLTP," *SNTEM*, vol. 2, pp. 1304–1315, 2022.
- [15] Z. Li and C. Xia, "Speed control of brushless DC motor based on CMAC and PID controller," *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, vol. 2, pp. 6318–6322, 2006, doi: 10.1109/WCICA.2006.1714299.
- [16] Rahmawati D, Alfita R, and Rasyid M.F, "Rancang Bangun Mesin Telur Asin Berbasis Proportional Integral Derivative," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, 2022.