

## Desain Sistem Pengaturan Sudut Aero Pendulum Menggunakan Metode PID dan MPC

**Ariq Teja Pamuji**

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya  
e-mail : ariq.18057@mhs.unesa.ac.id

**Raden Roro Hapsari Peni Agustin Tjahyaningtjas, Nur Kholis, Muhamad Syariffuddin Zuhrie**

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya  
e-mail : hapsaripeni@unesa.ac.id, nurkholis@unesa.ac.id, zuhrie@unesa.ac.id

### Abstrak

Aero Pendulum adalah pendulum yang dilengkapi motor dengan baling-baling pada ujungnya, yang mampu memberikan gaya kontrol yang diperlukan ke pendulum itu sendiri. Aero Pendulum adalah sistem nonlinier dan dapat dikontrol dengan baik dengan metode kontrol klasik ketika sistem dilinierkan di sekitar titik desain. Artikel ini memiliki bertujuan untuk mensimulasikan penerapan dua teknik kontrol yang berbeda, yaitu metode Proportional Integral Derivative (PID) dan Metode Predictive Control (MPC) untuk mengembangkan dan menentukan respon yang terjadi pada sistem Aero Pendulum. Sistem kendali ini disimulasikan dengan menggunakan software Matlab 2016 untuk menguji respon self-balancing menggunakan sudut yang telah ditentukan. Hasil simulasi membandingkan sistem yang tidak menggunakan kontrol dengan sistem kontroler PID dan MPC. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dari hasil PID kontroler pengujian didapatkan data bahwa respon sistem setpoint  $40^\circ$  memiliki nilai yang lebih baik yaitu Peak Max = 45,81, Peak Time = 0,147 s, Rise Time = 0,052797 s, yaitu cepat dengan overshoot = 14,368%. Sedangkan untuk MPC respon sistem setpoint  $40^\circ$  memiliki nilai yang lebih baik yaitu Peak Max = 40,00, Peak time = 5,800 s, Rise time = 0,639 209 s, dan Overshoot = 0,501%.

**Kata kunci :** Aero pendulum, Method Predictive Control (MPC), Matlab

### Abstract

The Aero Pendulum is a motor-equipped pendulum with a propeller at the end, capable of providing the necessary control force to the pendulum itself. The Aero Pendulum is a nonlinear system and can be controlled well using classical control methods if the system is linearized around the design point. The purpose of this article is to demonstrate the application of two different control techniques, namely the proportional-integral-derivative (PID) technique and the metode predictive control (MPC), to develop and determine the response that occurs in an aero pendulum system. This control system is carried out using Matlab 2016 software to test the self-balancing response using a predetermined angle. The simulation results compare a system that does not use control a PID and MPC controller system. Based on the research that has been carried out, from the results of the PID controller testing data was obtained that the system response was setpoint  $40^\circ$  of the  $40^\circ$  setpoint system had better values, namely Peak Max = 45.81, Peak Time = 0.147 s, Rise Time = 0.052797 s, which is fast with overshoot = 14.368%. Meanwhile, for MPC, the response of the  $40^\circ$  setpoint system has better values, namely Peak Max = 40.00, Peak time = 5.800 s, Rise time = 0.639 209 s, and Overshoot = 0.501%.

**Keywords:** Aero pendulum, Method Predictive Control (MPC), Matlab.

Universitas Negeri Surabaya

### PENDAHULUAN

Uncrewed Aerial Vehicle atau bisa disebut dengan UAV, adalah sebuah teknologi udara tanpa awak, dan Teknologi ini merupakan salah satu yang sedang berkembang pesat di era saat ini. Terutama pada bidang aplikasi militer dan sipil, mengingat kemampuan lepas landas dan mendarat vertikal, ketidakpekaan terhadap berbagai lingkungan, mobilitas dan stabilitas tinggi, dan mode pengoperasian yang mudah (J. Dong. 2019). Contoh penggunaan UAV pada zaman sekarang adalah seperti survei patroli, pendeteksian fotografi, penelitian tambang, dan keperluan lainnya. UAV

memiliki permasalahan dalam singlerotor/multirotor yang mempengaruhi stabilitas ketika terbang, jadi pada saat terbang dan beban pada UAV tidak seimbang maka akan mempengaruhi stabilitas terbang UAV, dimana berkemungkinan bisa menimbulkan kerusakan UAV dengan jatuhnya dari udara. Oleh karena itu dibutuhkannya sebuah tenaga yang seimbang dari semua motornya untuk mengatasi beban dengan gaya gravitasi.

UAV memiliki titik keseimbangan yang disebut center gravity (CG). Pada sebuah pesawat, central gravity menjadi "titik tumpu" dan pusat gerakan pesawat yaitu rotasi (roll, yaw, dan pitch) dan translasi (naik, turun, dan maju),

sehingga center gravity (CG) akan sangat menentukan sikap (attitude) Ketika pesawat terbang, (Abdurahaman. 2020). Ketika beban pesawat tidak dapat stabil, maka dapat menyebabkan beban jatuh saat berada di udara. Oleh karena itu dibutuhkan tenaga dari motor untuk mengatasi gaya gravitasi. Inverted pendulum telah digunakan sebagai patokan populer untuk membangun dan menguji pengontrol baru dalam banyak penelitian. Sistem ini sangat cocok untuk menggambarkan gerak periodic.

Ada beberapa variasi dari sistem pendulum, seperti pendulum aero. Aero pendulum adalah model paling sederhana untuk muatan yang dipasang pada quadrotor (Nayak, 2022). Aero pendulum dapat digambarkan sebagai motor dengan baling-baling yang menghasilkan gaya dorong pada ujung batang pendulum dan dapat mengangkat pendulum ke atas dan ke bawah. Gaya dorong dapat dimanfaatkan untuk menstabilkan pendulum pada setiap posisi yang diinginkan dengan menggunakan berbagai metode control. Aero pendulum adalah sistem yang pada dasarnya tidak stabil. Perilakunya menyerupai dinamika kompleks nonlinier dari rotorcrafts tradisional (Saleem. 2020).

Metode PID sering juga digunakan pada sistem pengendalian karena PID adalah metode yang layak dan mudah untuk diimplementasikan secara real time. Metode ini biasa digunakan pada proses pengaturan kecepatan motor DC. Pada aero pendulum motor dc dengan propeller berfungsi mengatur sudut pendulum pada bidang lengan motor diseimbangkannya terhadap gravitasi dan beban untuk setiap angle sudut yang diperlukan.

Proportional Integral Derivative Control (PID), kesederhanaan kontroler PID klasik memberikan keuntungan baik untuk aplikasi linier maupun nonlinier (A. Noordin. 2021). Namun, metode PID bukanlah strategi yang ideal karena dapat menurunkan kinerja ketika berhadapan dengan sistem yang berubah-ubah waktu dan nonlinier (W. Tang. 2020). Kontrol PID tidak memiliki algoritma untuk mengatur parameter PID secara optimal, sehingga mudah terpengaruh oleh gangguan yang tidak menentu atau perubahan parameter pada sistem proses yang dikontrol. Selain itu, kontrol PID akan memberikan respon yang kurang memuaskan bila digunakan pada setpoint yang berbeda karena parameter PID mempunyai nilai konstan yang hanya disetel untuk nilai setpoint tertentu dengan kondisi parameter dan noise tetap tidak berubah.

Di sisi lain, MPC dirancang untuk memecahkan masalah optimasi dengan mendefinisikan dan meminimalkan fungsi tujuan yang terkait dengan keadaan optimal dan input kontrol (Estevez. 2021). MPC juga merupakan metode yang sering digunakan pada bidang Teknik industri dan robotika memiliki manfaat lebih besar dibandingkan menggunakan kontrol tradisional.

Pengendalian tradisional mempunyai beberapa keterbatasan yang tidak dapat dikendalikan, terutama ketika terjadi perubahan mendadak. Hal ini dapat dihindari dengan MPC, karena pada dasarnya memiliki konsep pengendalian yang memungkinkan prediksi kinerja masa depan dengan tetap mempertimbangkan batasan yang ditentukan. Namun kontrol MPC juga memiliki respon yang lambat saat mencapai target (Kumavat. 2022).

Pada penelitian PID (M. Nasir. 2021) untuk menentukan posisi sudut motor dc menggunakan metode kendali pid metode 2 nikolas zigler menunjukkan hasil yang baik namun memiliki respon waktu yang cukup lama apabila semakin besar sudut yang diberikan. Berdasarkan latar belakang dari sebuah permasalahan dan hasil studi literatur penelitian yang sebelumnya bahwa control kendali MPC dapat digunakan pada motor dc dengan propeller pada aero pendulum. Maka akan dilakukan penelitian untuk merancang sistem kendali aero pendulum dengan menggunakan metode kendali PID dan kendali MPC, sehingga dapat diketahui hasil perbandingan respon dari kedua implementasi pengendali tersebut.

## **METODE**

### **Pendekatan Penelitian**

Pendekatan penelitian pada jurnal ini menggunakan pendekatan kuantitatif. Dalam pengertian dapat diartikan penelitian kuantitatif sebagai suatu proses perolehan pengetahuan yang menggunakan sumber data berupa angka-angka sebagai alat untuk menganalisis informasi tentang apa yang ingin diperlukan dan diketahui.

Pada penelitian jurnal ini menggunakan aplikasi komputer Matlab 2016b. Matlab 2016b akan dimanfaatkan untuk menemukan fungsi matematika dari model Aero Pendulum, membuat desain simulasi block sistem, dengan menggunakan kontroler Proporsional Integral Derivative (PID) berbasis tuning dari Ziegler-Nichols metode kedua dan kontroler model predictive control (MPC), juga menampilkan hasil respon dari sistem Aero Pendulum yang menerapkan sistem self stabilizing control pada hasil simulasi Matlab 2016b.

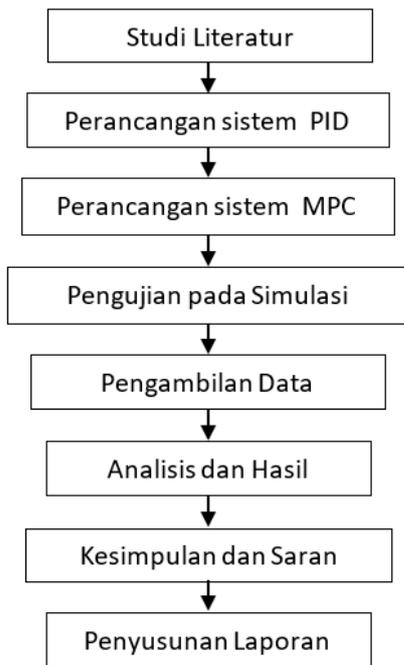
### **Rancangan Penelitian**

Tahapan dari rancangan penelitian jurnal ini dapat ditampilkan Gambar 1.

### **Aero Pendulum**

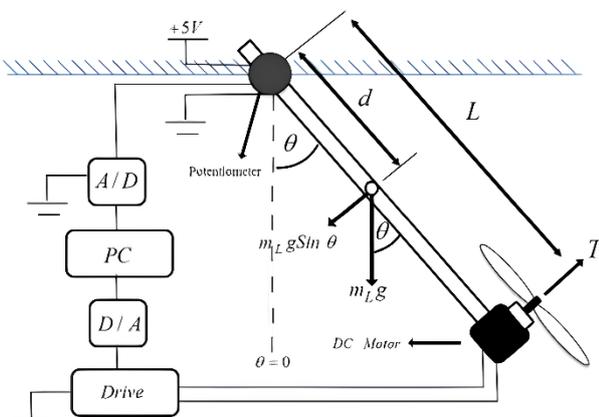
Aero pendulum sendiri terdiri dari lengan pendulum yang memiliki sebuah baling-baling bermotor di ujung bebasnya. Dapat diketahui bentuk model matematisnya pada Gambar 2. dimana diperlukan untuk menganalisis dan mengendalikan sistem pendulum.

## Desain Sistem Pengaturan Sudut Aero Pendulum Menggunakan Metode PID dan MPC



Gambar 1. Tahapan dari perancangan penelitian.

Adanya motor yang memiliki baling-baling pada ujung lengan tongkat. Motor tersebut merupakan control input sudut dari lengan pendulum dengan gerakan dari sumbu vertikal adalah variabel kontrol. Tegangan pada aero pendulum akan menggerakkan baling-baling dan menghasilkan torsi (T) untuk mengangkat lengan pendulum (Prasetyo, 2020). Tujuannya adalah membuat pendulum berayun dengan sudut tertentu. Oleh karena itu, variabel yang digunakan adalah tegangan dimana diterapkan pada baling-baling listrik, dan variabel yang dikontrol untuk sistem ini adalah sudut pendulum tetap.



Gambar 2. Gambar sistematis dari sistem kontrol aero pendulum. (Sumber : Prasetyo, 2021).

Berdasarkan hukum Newton dan juga momentum sudut, persamaan dari gerak pendulum yang digerakkan dapat dijadikan turunan sebagai persamaan (1).

$$J \cdot \ddot{\theta} + c \cdot \dot{\theta} + m_L \cdot g \cdot d \cdot \sin\theta = T \quad (1)$$

Dengan mempertimbangkan  $\sin\theta \approx \theta$ , persamaan gerak linier dapat ditulis sebagai persamaan (2).

$$J \cdot \ddot{\theta} + c \cdot \dot{\theta} + m_L \cdot g \cdot d \cdot \theta = T \quad (2)$$

Hasil persamaan diatas, kemudian dirubah menjadi Laplace dengan domain s menjadi persamaan (3).

$$J \cdot s^2\theta(s) + c \cdot s\theta(s) + m_L \cdot g \cdot d\theta(s) = T(s) \quad (3)$$

Sehingga dapat dijadikan fungsi alih dengan persamaan (4).

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1}{J \cdot s^2 + c \cdot s + m_L \cdot g \cdot d} \quad (4)$$

Dari persamaan 4 bisa disederhanakan menjadi persamaan (5)

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1/J}{s^2 + \frac{c}{J} \cdot s + \frac{m_L \cdot g \cdot d}{J}} \quad (5)$$

dimana;

$\theta$  = sudut dalam derajat

$\theta(s)$  = sudut dalam domain waktu (Laplace)

$\dot{\theta}$  = kecepatan sudut (rad/s)

$\ddot{\theta}$  = percepatan sudut (rad/s<sup>2</sup>)

s = hasil dari Laplace dalam domain waktu

L = panjang bandul pendulum (m)

m = berat bandul pendulum (kg)

d = jarak dari titik gantung ke pusat massa (m)

J = momen inersia (kg · m<sup>2</sup>)

g = percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

c = koefisien redaman kental (kg · m<sup>2</sup>/s)

T = gaya dorong yang disediakan oleh Motor Brushless DC (Nm/kg)

T(s) = gaya dorong dalam domain waktu (Laplace)

V = tegangan diterapkan pada motor brushlessDC

V(s) = tegangan dalam domain waktu (Laplace)

Km = parameter motor propeller

Karena pendulum diatur oleh tegangan yang diberikan, sehingga persamaan diatas menghasilkan gaya dorong dimana variabel yang berbeda dari yang manipulasi dari sistem kendali. Oleh karena itu, ekspresi rasional dari tegangan (V) yang digunakan pada motor DC brushless dengan gaya dorong (T) didapatkan rumus persamaan (6) :

$$T(s) = K_m \cdot V(s) \tag{6}$$

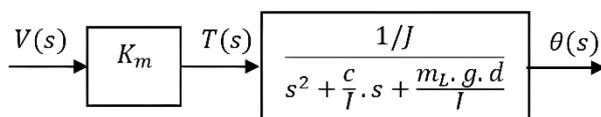
Dapatkan agar pendulum dalam keadaan stabil. Kemudian didapatkan  $\frac{d}{dt} \theta(t) = 0$  dan  $\frac{d^2}{dt^2} \theta(t) = 0$ . Kemudian dari persamaan (6) dapat ditulis menjadi persamaan (7).

$$T = m_L \cdot g \cdot d \cdot \sin \theta_{ss} \tag{7}$$

Dimana  $\theta_{ss}$  adalah sudut yang berada dalam keadaan stabil. Kemudian disubstitusikan persamaan (6) dan persamaan (7) maka didapatkan persamaan (8).

$$K_m = \frac{m_L \cdot g \cdot d \cdot \sin \theta_{ss}}{v} \tag{8}$$

Kemudian dari persamaan (5) dan (6) dapat ditampilkan pada Gambar 3. yaitu diagram blok sistem aero pendulum.



Baling-baling bermotor Pendulum

Gambar 3. Open loop diagram blok aero pendulum

Kemudian, dari hasil transfer function aero pendulum dapat disederhanakan menjadi persamaan (9) dan (10).

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K_m/J}{s^2 + \frac{c}{J} \cdot s + \frac{m_L \cdot g \cdot d}{J}} \tag{9}$$

$$T(s) = K_m \cdot V(s) \tag{10}$$

Dimana :

T (s) = Gaya angkat yang dihasilkan oleh motor brushless DC dalam domain waktu (Nm/ kg).

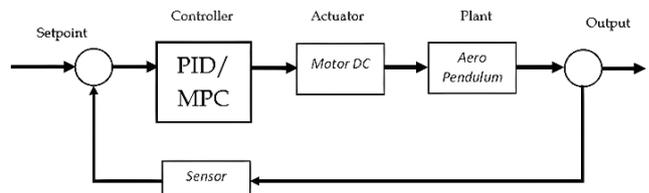
Km = Kecepatan dari putaran baling-baling motor (rad/ s/ V).

V (s) = Tegangan dalam domain waktu yang diberikan kemotor brushless DC (Volt).

(Sumber; Hasib. 2021).

**Desain Sistem**

Dari diagram blok diatas dapat ditulis desain dari sistem pengaturan sudut aero pendulum menggunakan aplikasi matlab sebagai pengontrol posisi sudut pendulum dengan metode PID dan MPC ditampilkan Gambar 4.



Gambar 4. Desain Sistem Aero Pendulum.

Input nilai setpoint dari sistem diatas adalah sudut yang diperlukan. Kontroler yang akan digunakan untuk menyelesaikan permasalahan self-stabilizing adalah kontroler PID menggunakan tuning Ziegler-Nichols dan juga kontroler MPC. Dimana dari kedua desain kontroler tersebut mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing. Terdapat sensor yang akan membaca nilai derajat plant ketika bergerak akibat putaran motor dc, nilai derajat akan digunakan sebagai feedback nilai kontroler.

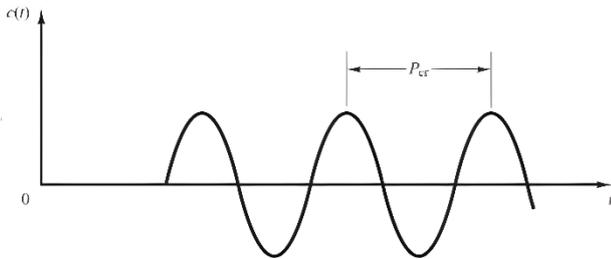
**Kontroler Proporsional-Integral-Derivative (PID)**

Pengontrol proporsional-integral-turunan (PID) merupakan pengontrol yang bekerja pada sistem kendali yang bekerja menggunakan metode umpan balik yang mendeteksi error. Hal ini memungkinkan sistem dari kontroler PID menggunakan nilai yang benar untuk mencapai nilai kontrol yang terbaik dalam kondisi stabil.

**Kontrol PID Dengan Tuning Ziegler-Nichols**

Pemilihan parameter kontrol dalam memenuhi spesifikasi kerja yang akan diproses dapat dikatan sebagai penyetelan pengontrol. Salah satu contoh penyetelan adalah metode tuning Ziegler Nichols. Pada metode ini menyarankan aturan dalam menyesuaikan kontrol PID (mengatur nilai parameter) berdasarkan respons atau nilai langkah eksperimental, ketika hanya menggunakan pengontrol proposional memperoleh stabilitas yang baik.

Pada metode ini, pertama-tama kita menetapkan nilai parameter  $T_i = \infty$  dan  $T_d = 0$ . Hanya dengan menggunakan aksi pengontrol proporsional, naikan nilai Kp dari 0 ke nilai kritis Kcr, di mana output pertama menunjukkan osilasi kontinu. Dan juga sering disebut dengan osilasi berkelanjutan. Apabila respons keluaran tidak menampilkan osila kontinu pada nilai Kp yang dibutuhkan, maka metode ini tidak bisa digunakan. Untuk gain dari nilai Kritis (Kcr) dan Periode (Pcr) yang benar ditentukan dengan eksperimental. Nilai Kp diberikan dari angka 0 sampai nilai Kritis (Kcr) dimana menunjukkan osilasi berkelanjutan pada respon sistem pertama. Seperti ditampilkan pada Gambar 5. (Ogata. 1985).



Gambar 5. Continuous Oscillation

Rumus yang digunakan pada metode Ziegler dan Nichols dalam menetapkan parameter nilai dari Kp, Ti, dan Td ditampilkan Tabel 1.

Tabel 1. Ziegler-Nichols tuning rules Method 2

Kendali	Kp	Ti <sub>cr</sub>	Td <sub>cr</sub>
P <sub>cr</sub>	0,5 Kcr <sub>cr</sub>	∞ <sub>cr</sub>	0 <sub>cr</sub>
PI <sub>cr</sub>	0,45 Kcr <sub>cr</sub>	0,83 Pcr <sub>cr</sub>	0 <sub>cr</sub>
PID <sub>cr</sub>	0,6 Kcr <sub>cr</sub>	0,5 Pcr <sub>cr</sub>	0,125 Pcr <sub>cr</sub>

Keterangan :

- P<sub>cr</sub> : Proportional
- PI<sub>cr</sub> : Proportional-Integral
- PID<sub>cr</sub> : Proportional-Integral-Derivative
- Kp<sub>cr</sub> : Parameter for Proportional
- Ti<sub>cr</sub> : Parameters for Integral
- Td<sub>cr</sub> : Parameters for Derivative
- Kcr<sub>cr</sub> : Critical Constant
- Pcr<sub>cr</sub> : Critical Time

### MPC (Model Predictive Control)

Model Predictive Control adalah suatu metode pengendalian dengan menggunakan bentuk waktu diskrit model proses system (Mughni. 2022). Metode MPC bekerja dengan memprediksi perilaku sebuah proses di masa depan guna mendapatkan tindakan pengendalian optimal dalam batas tertentu dengan meminimalkan suatu fungsi tujuan dalam jangka waktu terbatas. Hasil nilai perhitungan metode MPC digunakan dalam proses input sebagai solusi masalah optimasi real-time.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Aero Pendulum System Modeling

Untuk mencari nilai fungsi transfer sistem maka diperlukan suatu nilai spesifikasi dari perangkat keras dari modul aero pendulum. Nilai tersebut diperoleh penulis dari penelitian jurnal sebelumnya seperti pada Tabel 2 yang menunjukkan spesifikasi perangkat keras aero pendulum yang diperlukan Untuk mencari nilai transfer fungsi, dengan menggunakan nilai tersebut kedalam transfer fungsi pada persamaan (6). Sehingga diperoleh tranfer fungsi sebagai persamaan (11) :

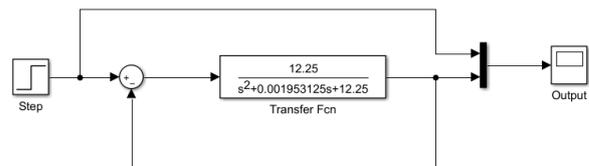
$$G(s) = \frac{12,25}{s^2 + 0,00195s + 12,25} \quad (11)$$

Tabel 2. Spesifikasi perangkat keras pendulum aero

No	Parameter	Symbol	Value	Unit
1	Sleeve Length	L	0,4	M
2	Mass	m	0,32	Kg
3	Length of Center of Mass	d	0,2	m
4	Damping Coefficient	c	0,0001	Kg.m <sup>2</sup> /s
5	Moment of Inertia	J	0,0512	Kg.m <sup>2</sup>
6	Gravity Acceleration	g	9,8	m <sup>2</sup> /s

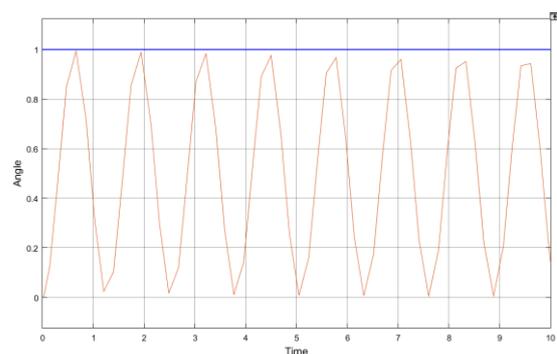
### Diagram Blok Dan Simulasi Sistem Tanpa Kendali

Pada tahap pengembangan sistem aero pendulum, prosesnya meliputi perancangan diagram blok dan pengujian simulasi sistem menggunakan Simulink di Matlab 2016b. Pada tahap penelitian ini berfokus pada evaluasi sistem aero pendulum yang tidak stabil melalui penerapan fungsi transfer yang berasal dari model matematika yang dijelaskan dalam Persamaan (11).



Gambar 6. Diagram Blok Sistem Tidak Terkendali

Gambar 6 adalah gambar diagram blok sistem loop tertutup tanpa kontrol yang diimplementasikan di Simulink dalam aplikasi perangkat lunak Matlab 2016a. Representasi grafis pada Gambar 9 merupakan hasil grafik respon sistem tanpa kendali.

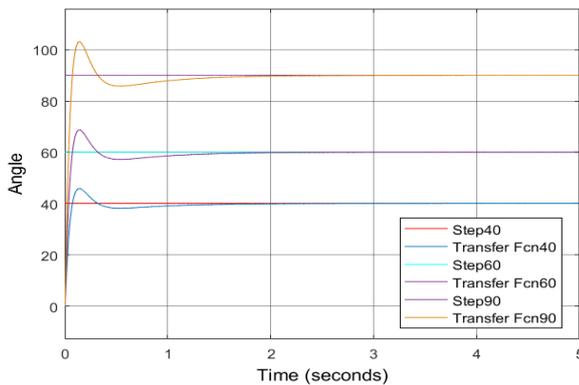


Gambar 7. Grafik Respon Sistem Tidak Terkendali

Dari hasil simulasi respon aero pendulum pada gambar 7 menunjukkan system tidak dapat mencapai setpoint atau sudut yang diberikan. Respon sitem selalu berosilasi (tidak stabil). Dengan hal ini aero pendulum tidak akan bisa menyeimbangkan beban diposisinya.karena itu pengontrol dirancang agar system dapat menyeimbangkan beban diposisinya berdasarkan setpoint yang diberikan.

**Pengaturan PID Pada Setpoint Tetap**

Untuk pengujian set point tetap, terdapat tiga pengujian pada setiap set point: 40°, 60°, dan 90°, dan waktu pengujian adalah 10 detik. Parameter PID yang berhasil ditentukan dengan hasil kinerja sistem yang baik dan memenuhi kriteria yang ditentukan yaitu Parameter P dengan nilai 13.841, Parameter I dengan nilai 21.4340, dan Parameter D dengan nilai 1.9495. Grafik respon kontroler PID dengan menggunakan setpoint (sudut) 40°, 60°, dan 90° ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Respon Sistem pada Setpoint 40°, 60°, 90°.

Gambar 8. menunjukkan respon sistem dengan pengontrol proporsional integral derivatif (PID) menggunakan metode penyesuaian Ziegler-Nicol kedua. Tergantung pada pengaturan Anda, sistem Anda akan tampak lebih stabil dan lebih cepat. Respon sistem mengikuti karakteristik pengontrol PID (proportional-integral-derivative). yaitu sistem memiliki respon atau respon yang cepat Tabel 3.

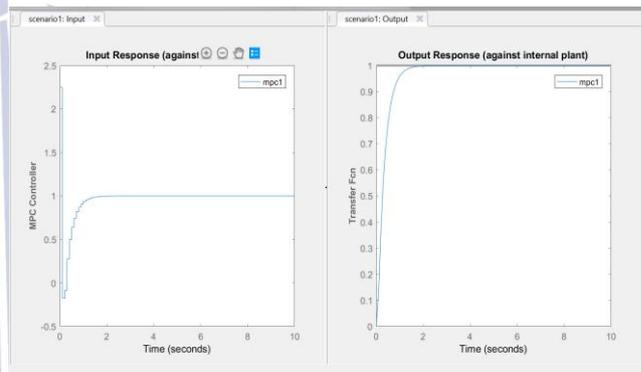
Tabel 3. Karakteristik Hasil Respon Pengendali PID

Kontrol MPC	Setpoint t 40°	Setpoint 60°	Setpoint 90°
Peak Max	40.00	60.00	90.00
Peak Time	5.800	5.800	5.800
Rise Time	0.639 209 s	0.641 055 s	0.642 541 s
Overshoot	0.501%	0.501%	1.544%

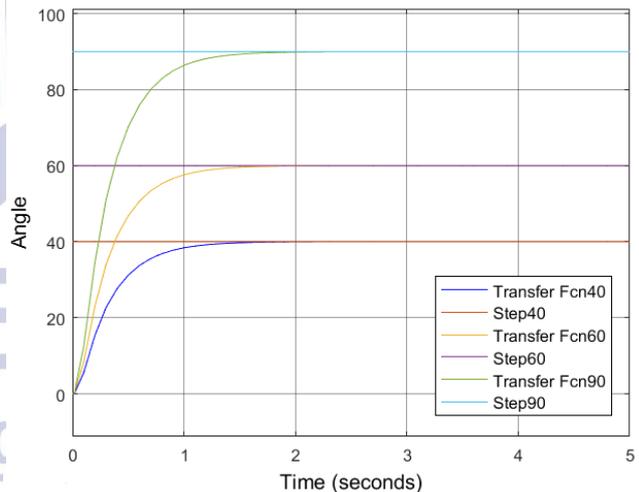
Dari hasil pengujian didapatkan data bahwa respon sistem setpoint 40° memiliki nilai yang lebih baik yaitu Peak Max = 45,81, Peak Time = 0,147 s, Rise Time = 0,052797 s, yaitu cepat dengan overshoot = 14,368%,

**Pengaturan MPC Pada Setpoint Tetap**

Pengujian menggunakan MPC Toolbox pada state-space controller dengan sample time = 0.1, prediksi horizon = 10, control horizon = 2 ditunjukan pada Gambar 9. menghasilkan respon input dan output seperti yang dapat dilihat di Gambar 10. Pengujian dengan nilai setpoint masing-masing: 40°, 60°, dan 90°, dan waktu pengujian 10 detik.



Gambar 9. Toolbox MPC



Gambar 10. Grafik Respon Sistem pada Setpoint 40°, 60°, 90°.

Tabel 4. Karakteristik Hasil Respons Kontroler MPC

Kontrol PID	Setpoint 40°	Setpoint 60°	Setpoint 90°
Peak Max	45.81	68.703	103.1
Peak Time	0.147	0.144	0.140
Rise Time	0.052 797 s	0.053 331 s	0.053 547 s
Overshoot	14.368%	14.368%	14.368%

Pada Tabel 4 hasil kontroler MPC menghasilkan nilai respon Peak Max yang dapat menstabilkan beban Ketika diberikan nilai sudut dan nilai respon dari overshoot juga memiliki nilai yang lebih rendah apabila dibandingkan dengan kontroler PID. Hasil dari pengujian didapatkan untuk respon sistem setpoint  $40^\circ$  memiliki nilai yang lebih baik yaitu Peak Max = 40,00 , Peak time = 5,800 s, Rise time = 0,639 209 s, , dan Overshoot = 0,501%.

### PENUTUP

#### Simpulan

Berdasarkan penelitian dari hasil proses pengujian simulasi beberapa kontroler pada sistem Aero Pendulum, dapat diambil sebuah kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini menggunakan nilai matematika tersebut digunakan sebagai desain kontroler PID yang menggunakan second method Ziegler-Nichols dan didapatkan nilai  $K_p=0.9$ ,  $K_i=4.186$  dan  $K_d=0.047$ . Pada pengujian Aero Pendulum, nilai  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  yang telah diperoleh dari simulasi matlab akan diterapkan pada Aero Pendulum. Sedangkan pengujian menggunakan MPC Toolbox pada state-space controller dengan sample time = 0.1, prediksi horizon = 10, control horizon, 2.
2. Pengujian dilakukan sebanyak dua kali yaitu, pertama dengan kontrol PID, kedua dengan kontrol MPC. Pada pengujian control PID didapatkan nilai dengan beberapa setpoint. Dilakukan pada setpoint  $40^\circ$  yang mempunyai rise time (tr) sebesar 0.052797s, Peak Max sebesar 45.81 dan Overshoot sebesar 14.368%. pada setpoint  $60^\circ$  yang mempunyai rise time (tr) sebesar 0.053331s, Peak Max sebesar 68.703 dan Overshoot sebesar 14.368%. pada setpoint  $90^\circ$  yang mempunyai rise time (tr) sebesar 0.053547s, Peak Max sebesar 103.1 dan Overshoot sebesar 14.368%. Kemudian Pada pengujian control MPC didapatkan nilai dengan beberapa setpoint. Dilakukan pada setpoint  $40^\circ$  yang mempunyai rise time (tr) sebesar 0.641s, Peak Max sebesar 40.00 dan Overshoot sebesar 0.501%. Pada setpoint  $60^\circ$  yang mempunyai rise time (tr) sebesar 0.641s, Peak Max sebesar 60.00 dan Overshoot sebesar 0.501%. Pada setpoint  $90^\circ$  yang mempunyai rise time (tr) sebesar 0.642s, Peak Max sebesar 90.00 dan Overshoot sebesar 1.544%.
3. Berdasarkan hasil nilai kinerja dan grafik simulasi PID memiliki nilai tercepat sampai ke target dibandingkan MPC, namun control MPC memiliki system yang lebih stabil sampai pada target.

#### Saran

Dalam pengerjaan penelitian ini didapatkan beberapa saran yang dapat membantu pengembangan dalam penelitian berikutnya :

1. Dalam penelitian ini, metode penyesuaian Ziegler-Nichols kedua digunakan sebagai metode simulasi sistem. Metode pemungutan suara berbasis PID lainnya dapat digunakan, seperti metode Cohen-Kuhn atau metode PSO.
2. Sistem ini memiliki potensi untuk ditingkatkan. lebih lanjut dengan melakukan perbandingan atau penggabungan metode pengendalian lain seperti FLC, LQR, SMC, dan sebagainya. Dengan menggabungkan pendekatan-pendekatan ini, tujuannya adalah untuk mencapai hasil respons yang unggul dan lebih konsisten.
3. Pada aero pendulum dapat dikembangkan menggunakan dua atau lebih motor dengan propeller sehingga penelitian dapat langsung terimplementasi pada sistem UAV/ Drone.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Afdal. Ridhowatul. (2022). *Perancangan Sistem Kendali Hybrid Linear Quadratic Regulator (LQR)-PID Untuk Mengendalikan Sudut Pada Aero Pendulum*. Pekanbaru: Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
- Abdurahaman. Hilman. (2020). *Perancangan dan Perakitan FIXED WING UAV yang Dapat Lepas Landas Secara Vertikal*. e-Proceeding of Engineering. Vol. 7 (1): Hal. 1268.
- Dong. J. dan He. B. (2019). *Novel fuzzy PID-type iterative learning control for quadrotor UAV*, Sensors (Switzerland), vol. 19, no. 1, doi: 10.3390/s19010024
- Estevez. Julian, Lopez-Guede. Jose Manuel, Garate. Gorka, dan Graña. Manuel. (2021). *A hybrid control approach for the swing free transportation of a double pendulum with a quadrotor*, Appl. Sci., vol. 11, no. 12.
- Hasib. Muhammad Faishol. (2021). *Desain Sistem Pengaturan Posisi Sudut Aero Pendulum Menggunakan Hybrid PD-Fuzzy Controller*. Jurnal Teknik Elektro, Universitas Negeri Surabaya.
- Khoirudin. Mochamad Masnur. (2020). *Desain Sistem Pengaturan Posisi Sudut Aero Pendulum Menggunakan Pengendali Adaptive Neuro Fuzzy Interface System*. Jurnal Teknik Elektro, Universitas Negeri Surabaya.
- Kumavat. Mayur dan Thale. Sushil. (2022). *Analysis of CSTR Temperature Control with PID, MPC & Hybrid MPC-PID Controller*, ITM Web Conf., vol. 44, p. 01001.
- Mughni. M. Atsilah Al, Rahmat. Basuki, dan Rosa. M. Ridho. (2022). *Perancangan Model Predictive Control Untuk Sistem Kendali Penggerak Photovoltaic (Design Of Model Predictive Control For Control Systems In Photovoltaic Drivers)*. Jurnal Fakultas Teknik Elektro Universitas Telkom Bandung, Indonesia.
- Nasir. (2021). *Rancang Bangun PID Controller Dengan Tuning Ziegler Nichols Untuk Pengendalian Posisi Sudut Motor DC*. Jurnal Teknik Elektro, Universitas Negeri Surabaya.

- Nayak. Aradhana. (2022). *Stabilizing a spherical pendulum on a quadrotor*, Asian J. Control, vol. 24, no. 3, pp. 1112–1121.
- Noordin, M. A. Mohd Basri, Z. Mohamed, dan I. Mat Lazim. (2021). *Adaptive PID Controller Using Sliding Mode Control Approaches for Quadrotor UAV Attitude and Position Stabilization*, Arab. J. Sci. Eng., vol. 46, no. 2, pp. 963–981.
- Ogata. Katsuhiko. (1985). *Teknik Kontrol Automatik jilid 1*. Terjemahan Edi Laksono. Jakarta: Erlangga.
- Ogata. Katsuhiko. (2010). *Modern Control Engineering fifth edition*. New York: Prentice-Hall, Inc.
- Prasetyo. Aldo Tri. (2021). *Desain Sistem Pengaturan Sudut Aero Pendulum Menggunakan Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) Berbasis MATLAB*. Jurnal Teknik Elektro, Universitas Negeri Surabaya.
- Prasetyo. Muhammad Eko. (2020). *Desain system Pengaturan Posisi Sudut Aero Pendulum Berbasis PID Metode Genetic Algorithm Optimization Dengan Software Labview*. Jurnal Teknik Elektro, Universitas Negeri Surabaya.
- Saleem. Omer, Rizwan. Mohsin, Zeb. Agha Ali, Ali. Abdul Hannan, dan Saleem. Muhammad Ahmad. (2020). *Online adaptive PID tracking control of an aero-pendulum using PSO-scaled fuzzy gain adjustment mechanism*, Soft Comput., vol. 24, no. 14, pp. 10629–10643.
- Tang, L. Wang, J. Gu, and Y. Gu. (2020). *Single neural adaptive PID control for small UAV micro-turbojet engine*, Sensors (Switzerland), vol. 20, no. 2.
- Zamra. Nada Rahmi. (2022). *Desain Kendali Tuning PID Menggunakan Fuzzy Logic Untuk Pengendalian Posisi Sudut Pada Aero Pendulum*. Pekanbaru: Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.

