

# PENERAPAN METODE KENDALI CONTROL LYAPUNOV-BARRIER FUNCTION (CLBF) PADA MODEL QUADCOPTER

Farhan Dwi Cahyo<sup>1</sup>, Muhammad Zakiyullah Romdlony<sup>2</sup>, Muhammad Ridho Rosa<sup>3</sup>,

<sup>1,2,3</sup>Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom Indonesia

<sup>1</sup>farhandc@student.telkomuniversity.ac.id, <sup>2</sup>zakiyullah@telkomuniversity.ac.id,

<sup>3</sup>mridhorosa@telkomuniversity.ac.id

Diterima pada 9 September 2021; disetujui pada 22 Agustus 2022; dan diterbitkan pada 2 September 2022.

## Abstrak

Penelitian ini melakukan penerapan metode kendali Control Lyapunov-Barrier Function (CLBF) pada model quadcopter menggunakan perangkat lunak Simulink. Kendali CLBF digunakan untuk menggerakkan model quadcopter dari posisi awal model ke posisi tujuan. Kendali CLBF juga berfungsi untuk menghindari unsafe states atau penghalang yang dimiliki oleh model quadcopter. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan kendali CLBF pada model quadcopter telah berhasil dilakukan. Percobaan model quadcopter menghasilkan nilai rata-rata galat sebesar 0,926% dan berhasil menghindari penghalang dengan rata-rata nilai terdekat terhadap penghalang sebesar 0,079 m.

**Kata Kunci:** *control Lyapunov-barrier function, model quadcopter, simulasi*

## Abstract

In this study, the Control Lyapunov-Barrier Function (CLBF) control method was applied to the quadcopter model using Simulink. CLBF is used to move the quadcopter model from the initial position of the model to the destination. CLBF control also functions to avoid unsafe states or obstacle that are owned by the quadcopter model. The results of this study indicate that the implementation of CLBF control on the quadcopter model has been successfully carried out. The quadcopter model experiment resulted in an average error value of 0.926% and managed to avoid the obstacle with the closest average value to the obstacle of 0.079 m.

**Key Words:** *control Lyapunov-barrier function, quadcopter model, simulation*

## 1. Pendahuluan

perancangan suatu kendali terhadap sebuah sistem yang terdiri dari pengendali dan sistem. Dari tahap perancangan sistem ini kemudian diperoleh spesifikasi pengendali dan sistem. Tahap selanjutnya adalah simulasi, simulasi merupakan tahap dimana desain sistem kendali diuji. Hasil simulasi akan menentukan apakah rancangan sistem kendali layak untuk diimplementasikan. Jika hasil simulasi masih belum sesuai dengan yang diharapkan, maka pengerjaan akan kembali ke tahap desain. Proses ini akan terus berulang hingga hasil simulasi sesuai dengan yang diharapkan. Tahapan terakhir merupakan implementasi hasil desain yang layak pada sistem dan pengendali yang sesungguhnya.

Pada tahap simulasi, pengendali dan sistem akan dibangun pada sebuah perangkat lunak. Dalam proses ini, perangkat lunak akan membentuk sebuah pengendali dan sistem secara virtual yang memiliki karakteristik

pengendali dan sistem yang sesungguhnya.

*Quadcopter* merupakan sebuah pesawat tanpa awak yang dapat dikendalikan baik secara remote maupun secara autonomous. *Quadcopter* memiliki empat buah motor penggerak yang dilengkapi dengan propeler [1]. *Quadcopter* dapat diterapkan dalam berbagai bidang, seperti sebagai alat pemantau alam liar [2] dan sebagai alat pengawasan [3].

Metode kendali CLBF merupakan gabungan dari metode kendali *control Lyapunov function* (CLF) dan *control barrier function* (CBF). Metode kendali CLF berfokus menjaga kestabilan dan menggerakkan sistem ke *origin point*. Karena karakteristik tersebut, kendali CLBF dapat digunakan pada sebuah *autonomous vehicle* sebagai kendali gerak dan *obstacle avoidance*. Contoh penerapan CLF adalah pada *trajectory tracking* untuk sebuah *mobile robot* [4]. CBF berfungsi untuk menghindari suatu keadaan terlarang atau *unsafe states* yang dimiliki oleh suatu sistem [5].

Dalam penelitian ini, sistem dan metode kendali

yang digunakan adalah model *quadcopter* dan metode kendali *control Lyapunov-barrier function* (CLBF). Hasil dari pengujian simulasi akan menjadi faktor yang menentukan kelayakan implementasi kendali CLBF yang didesain pada penelitian ini.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Control Lyapunov-Barrier Function

Metode *control Lyapunov-barrier function* (CLBF) merupakan metode kendali yang relatif baru, metode kendali ini merupakan gabungan dari metode kendali *control Lyapunov function* (CLF) dan *control barrier function* (CBF). Kedua metode kendali ini memiliki kegunaan yang berbeda, CLF berfokus pada kestabilan sebuah sistem sementara CBF menjaga *safety* dari suatu sistem. Dengan menggabungkan kedua metode kendali tersebut, CLBF memiliki fungsi kendali yang lebih sederhana tanpa menghilangkan aspek kestabilan dan keamanan yang dimiliki oleh kendali CLF dan CBF [6].

Untuk sebuah *nonlinear affine system*,  $\dot{x} = f(x) + g(x)u$ , berikut merupakan Persamaan umum fungsi CLBF (1) dan Persamaan turunan fungsi CLBF (2):

$$W(x) = V(x) + \lambda B(x) + x \quad (1)$$

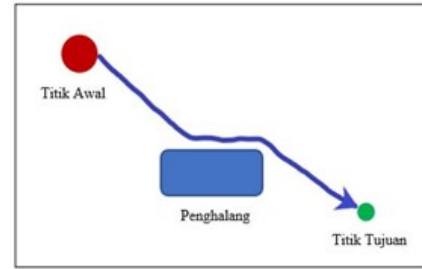
$$\frac{dW(x)}{dx} = \frac{dW}{dx} f(x) + \frac{dW}{dx} g(x)u \quad (2)$$

Simbol  $V$  adalah fungsi CLF,  $b$  adalah fungsi CBF dan  $w$  adalah fungsi CLBF.  $B$  dan  $W$  merupakan parameter kendali CLBF yang bernilai 100 dan 1. Persamaan keluaran kendali CLBF dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\text{output} = \begin{cases} -\frac{a + \sqrt{a^2 + \gamma \|b\|^4}}{b^T b} & b \neq 0 \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (3)$$

dengan nilai  $a = L_f W, b = L_g W^T$  dan  $\gamma$  persamaan (3) merupakan persamaan yang menghasilkan keluaran dari CLBF. Sinyal keluaran CLBF akan bernilai apabila sistem belum mencapai titik tujuan yang ditandai dengan nilai  $b \neq 0$  Jika sistem telah mencapai titik tujuan,  $b$  akan bernilai sama dengan nol dan sistem akan stabil pada daerah tersebut karena kendali CLBF mengeluarkan keluaran bernilai nol pada kondisi tersebut.

Cara kerja kendali CLBF dapat diilustrasikan seperti yang ada pada Gambar 1. Jika sebuah sistem memiliki state berupa posisi dalam bentuk dua dimensi dengan sebuah titik awal tertentu, titik awal yang dimiliki oleh sistem merupakan masukan bagi kendali CLBF. Perbedaan antara titik awal dengan titik tujuan akan membuat kendali CLBF bekerja untuk menggerakkan sistem ke titik tujuan. Apabila sistem memasuki daerah unsafe states, kendali CLBF akan mengirimkan keluaran yang membuat sistem menghindari unsafe state. Saat sistem berhasil bergerak ke titik tujuan, sistem akan diam pada titik tersebut karena sistem sudah dalam kondisi stabil.



Gambar 1. Ilustrasi Kendali CLBF

### 2.2 Model Quadcopter

*Quadcopter* merupakan salah satu jenis *rotorcraft* yang memiliki 4 buah rotor. Keempat rotor ini akan menggerakkan baling-baling agar *quadcopter* dapat terbang dan bergerak. Persamaan yang digunakan merupakan persamaan model yang telah dirubah ke dalam bentuk linier pada penelitian [7] dan menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{x}_1 = \dot{X} = x_2, \quad \dot{x}_2 = \ddot{X} = g x_9, \quad (4a)$$

$$\dot{x}_3 = \dot{Y} = x_4, \quad \dot{x}_4 = \ddot{Y} = g x_7, \quad (4b)$$

$$\dot{x}_5 = \dot{Z} = x_6, \quad \dot{x}_6 = \ddot{Z} = \frac{1}{m} u_1 \quad (4c)$$

$$\dot{x}_7 = \dot{\phi} = x_8, \quad \dot{x}_8 = \ddot{\phi} = \frac{1}{I_x} u_2, \quad (4d)$$

$$\dot{x}_9 = \dot{\theta} = x_{10}, \quad \dot{x}_{10} = \ddot{\theta} = \frac{1}{I_y} u_3, \quad (4e)$$

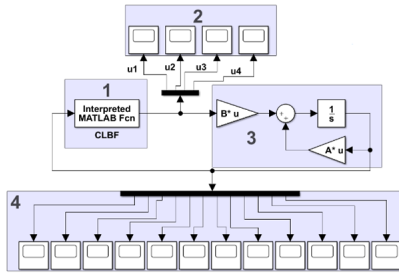
$$\dot{x}_{11} = \dot{\psi} = x_{12}, \quad \dot{x}_{12} = \ddot{\psi} = \frac{1}{I_z} u_4, \quad (4f)$$

$$u_1 = F, u_2 = T_x, u_3 = T_y, u_4 = T_z. \quad (4g)$$

Kedua belas variabel ini membentuk dinamika dari model *quadcopter*. Pada Persamaan (4a) - (4c), *state*  $x_1, x_3$  dan  $x_5$  merupakan posisi dari *quadcopter* sedangkan *state*  $x_2, x_4$  dan  $x_6$  merupakan kecepatan *quadcopter* pada sumbu X, Y, dan Z. Pada persamaan (4d) - (4f), *state*  $x_7, x_9, x_{11}$  merupakan sudut *quadcopter* sedangkan *state*  $x_8, x_{10}, x_{12}$  merupakan kecepatan sudut *quadcopter*. Pada Persamaan (4g), simbol  $u_1, u_2, u_3, u_4$  merupakan masukan dari model *quadcopter* berupa gaya angkat ( $F$ ) dan torsi pada sumbu X, Y, dan Z ( $T_y, T_x, T_z$ ) Terdapat juga simbol  $g$  yang melambangkan gravitasi, simbol  $m$  yang melambangkan massa dari *quadcopter*, dan simbol  $I_y, I_x, I_z$  yang melambangkan momen inersia sumbu X, Y, dan Z. Dari Persamaan (4a) - (4g), kita dapat juga menuliskan persamaan tersebut ke dalam bentuk:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, \quad (5)$$

dengan  $f(x)$  merupakan matriks *state* dari sebuah sistem sedangkan  $g(x)$  merupakan matriks masukan dari sebuah sistem. Berdasarkan nilai pada Persamaan (4a) - (4f), diperoleh bentuk  $f(x)+g(x)$  seperti pada Persamaan (6)



Gambar 2. Desain Simulasi Model Quadcopter

berikut ini:

$$f(x) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \dot{X} \\ Y \\ \dot{Y} \\ Z \\ \dot{Z} \\ \phi \\ \dot{\phi} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

$f(x)$  dan  $g(x)$  akan digunakan sebagai parameter pembangun fungsi CLBF untuk model *quadcopter*.

### 3. Perancangan Simulasi

Perancangan simulasi terdiri atas desain rangkaian Simulink dan desain kendali CLBF. Rangkaian Simulink berisi rangkaian yang menghubungkan kendali CLBF dengan model *quadcopter* dalam bentuk ruang keadaan.

#### 3.1 Desain Simulink

Desain simulasi seperti yang ada pada Gambar 2 terdiri atas kendali CLBF dan model *quadcopter* dalam bentuk ruang keadaan. Berikut penjelasan desain simulasi model *quadcopter* yang ada pada Gambar 2:

1. Pada bagian yang ditandai dengan nomor 1 terdapat kendali CLBF. CLBF akan menerima data-data keadaan dari model *quadcopter* dan akan mengeluarkan keluaran berdasarkan nilai galat yang diperoleh. Nilai keluaran kendali CLBF adalah sinyal kendali berupa nilai  $u_1, u_2, u_3,$  dan  $u_4$  yang akan menggerakkan model *quadcopter* pada Gambar 3.
2. Pada nomor 2, terdapat empat buah scope yang akan mengambil data  $u_1, u_2, u_3,$  dan  $u_4$  dari kendali CLBF.
3. Nilai keluaran yang dikeluarkan oleh kendali CLBF kemudian akan menggerakkan model *quadcopter* yang ditandai dengan nomor 3. Model *quadcopter* akan mengeluarkan data-data terbaru setelah diberi masukan oleh kendali CLBF. Data-data terbaru ini nantinya akan dikirim kembali ke kendali CLBF sebagai umpan balik.
4. Data-data keadaan dari model *quadcopter* juga akan masuk ke scope yang ditandai dengan nomor 4. Kedua belas scope ini berfungsi menyimpan data-data keadaan yang dimiliki oleh model *quadcopter* berupa posisi dan kecepatan pada sumbu X, Y, dan Z serta sudut dan kecepatan sudut pada sumbu X, Y, dan Z.

### 3.2 Desain Kendali CLBF

Untuk merancang kendali CLBF, perlu ditentukan fungsi CLF dan CBF. Kedua fungsi ini dihasilkan berdasarkan sistem dan parameter yang akan digunakan dalam membangun kedua fungsi tersebut. CLF pada model *quadcopter* berfungsi untuk membuat sistem bergerak dan stabil di titik tujuan. CBF merupakan fungsi yang mengatur daerah *unsafe states* atau kondisi yang tidak boleh dialami oleh sistem. Untuk model *quadcopter*, *unsafe states* berbentuk bola dengan titik pusat pada titik 1 sumbu X, 0 sumbu Y, dan 0 sumbu Z dengan jari-jari sebesar 0,5 m. Fungsi CLF yang diusulkan untuk model *quadcopter* berdasarkan nilai  $f(x)$  dan  $g(x)$  adalah sebagai berikut:

$$V(x) = x_6^2 + 0,1x_8^2 + 0,1x_{10}^2 + 0,01x_{12}^2 + 2x_1x_{10} + 2x_2x_{10} + 2x_3x_8 + 2x_4x_8 + 2x_5x_6 + 2x_7x_8 + 2x_9x_{10} + 0,2x_{11}x_{12}. \quad (7)$$

Untuk dapat digunakan pada kendali CLBF, selanjutnya fungsi CLF pada Persamaan (7) harus dicari nilai  $L_i$  derivative terhadap  $f(x)$  dan  $g(x)$  atau disebut  $L_fVL_gV$  Persamaan untuk mencari nilai  $L_fVL_gV$  dijelaskan dalam Persamaan berikut:

$$L_fV = \frac{\partial V}{\partial x} f(x), L_gV = \frac{\partial V}{\partial x} g(x) \quad (8)$$

Fungsi CBF yang digunakan untuk pada model quadcopter adalah bidang bola. Persamaan bola dalam bentuk CBF ada pada Persamaan berikut:

$$B(x) = (x_1 - a)^2 + (x_2 - b)^2 + (x_3 - c)^2 \quad (9)$$

dengan nilai a, b, dan c menentukan pusat bola di sumbu X, Y, dan Z. Pusat penghalang yang digunakan dalam model ini ada pada titik (1, 0, 0) sehingga diketahui nilai a = 1, b = 0, dan c = 0. Nilai a, b, dan c akan digunakan untuk membentuk persamaan penghalang sebagai berikut:

$$B(x) = (x_1 - 1)^2 + x_2^2 + x_3^2. \quad (10)$$

Sama seperti CLF, selanjutnya fungsi CBF pada Persamaan (10) harus dicari nilai *Li derivative* terhadap f(x) dan g(x) atau disebut  $L_f B, L_g B$  Persamaan untuk mencari nilai  $L_f B, L_g B$  dijelaskan dalam Persamaan berikut:

$$L_f B = \frac{\partial B}{\partial x} f(x), L_g V = \frac{\partial B}{\partial x} g(x). \quad (11)$$

Untuk mendapatkan nilai  $\frac{\partial B}{\partial x}$  cara yang digunakan dijabarkan dalam Persamaan (12) dan Persamaan (13). Nilai pada Persamaan (14) dihasilkan dari hasil kali Persamaan (13) dengan nilai f(x) dan g(x) model quadcopter yang ada pada Persamaan (6), dengan Persamaan (12), Persamaan (13), dan Persamaan (14) sebagai berikut:

$$\frac{\partial B}{\partial x_1} = 2x_1 - 2, \frac{\partial B}{\partial x_2} = 2x_2, \frac{\partial B}{\partial x_3} = 2x_3, \quad (12)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} = \begin{bmatrix} 2x_1 - 2 \\ 2x_2 \\ 2x_3 \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

$$L_f B = 0 \text{ dan } L_g B = \begin{bmatrix} 2x_1 - 2 \\ 2x_2 \\ 2x_3 \end{bmatrix}^T. \quad (14)$$

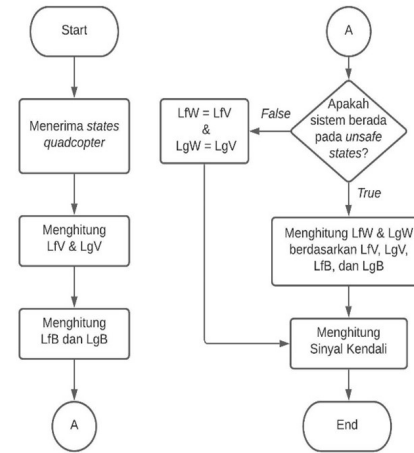
Fungsi CLBF sebagai gabungan dari fungsi CLF dan CBF dapat dituliskan sebagai berikut:

$$W = V + \lambda B + \kappa, \quad (15)$$

$$L_f W = L_f V + \lambda L_f B, \quad (16)$$

$$L_g W = L_g V + \lambda L_g B. \quad (17)$$

Pada Persamaan (15),  $\lambda$  dan  $\kappa$  merupakan parameter kendali CLBF yang memiliki nilai  $\kappa = -1$  dan  $\kappa = 100$ . Persamaan (16) dan (17) merupakan nilai *Li derivative* dari fungsi CLBF dengan nilai  $L_f V, L_g V$  dan  $L_f B, L_g B$  yang telah dicari sebelumnya. Apabila model quadcopter tidak berada pada daerah unsafe states, maka nilai  $L_f B, L_g B$  akan bernilai nol. Namun, jika model quadcopter berada pada unsafe states, maka nilai  $L_f B, L_g B$  akan dihitung sesuai dengan Persamaan (14).



Gambar 3. Diagram Alir Kendali CLBF

### 3.3 Diagram Air

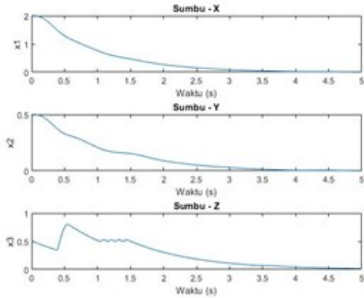
Gambar 3 merupakan diagram alir kendali CLBF pada penelitian ini. Kendali CLBF akan menerima data states dari model quadcopter. Berdasarkan nilai tersebut, kendali CLBF menghitung nilai variabel  $L_f V, L_g V$  yang merupakan variabel kendali CLF dan berfungsi untuk menggerakkan sistem ke titik tujuan. Kendali CLBF juga menghitung nilai variabel  $L_f B, L_g B$  yang merupakan variabel kendali CBF dan berfungsi menggerakkan sistem untuk menjauhi penghalang apabila sistem hendak memasuki daerah unsafe states. Apabila model quadcopter hendak memasuki daerah unsafe states, maka kendali CLBF akan menghitung nilai variabel kendali CLBF berupa  $L_f W, L_g W$  berdasarkan nilai  $L_f V, L_g V, L_f B, L_g B$ . Jika tidak, maka nilai  $L_f B, L_g B$  akan sama dengan  $L_f V, L_g V$ . Setelah itu, kendali CLBF menghitung nilai sinyal kendali berdasarkan hasil  $L_f W, L_g W$ . Sinyal kendali tersebut diteruskan untuk menggerakkan model quadcopter.

### 4. Hasil dan Pembahasan

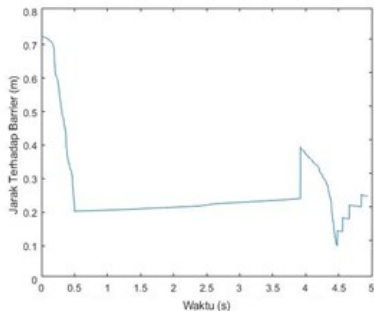
Parameter pengujian yang dianalisis dari model quadcopter adalah posisi dari quadcopter. Dari posisi quadcopter, nilai galat antara posisi quadcopter dan titik tujuan dapat diperoleh. Parameter lain yang dilihat adalah jarak antara model terhadap penghalang atau unsafe states. Parameter-parameter ini digunakan untuk menentukan apakah kendali CLBF layak untuk diimplementasikan pada model quadcopter.

Gambar 4 menampilkan state posisi model quadcopter, model quadcopter memiliki titik awal 2 pada sumbu X, 0,5 pada sumbu Y, dan 0,5 pada sumbu Z. Model bergerak dari titik awal menuju titik 0 pada sumbu X, Y, dan Z tanpa menabrak penghalang yang berbentuk bola dengan jari-jari sebesar 0,5 dan berpusat dititik (2, 0, 0) pada sumbu X, Y, dan Z.

Untuk mengetahui apakah model menabrak



Gambar 4. Respons Model Quadcopter



Gambar 5. Jarak Model Quadcopter Terhadap Penghalang

penghalang atau tidak, diperlukan grafik yang menunjukkan jarak antara penghalang dengan sistem. Jarak ini dihitung berdasarkan posisi sistem dan permukaan penghalang yang paling dekat dengan sistem.

Gambar 5 merupakan jarak antara model quadcopter dengan penghalang. Gambar tersebut menunjukkan bahwa model berhasil menghindari penghalang dan memiliki jarak terdekat sebesar 0,101 m. Model quadcopter dapat dikatakan berhasil menghindari penghalang atau unsafe states apabila jarak terdekat model quadcopter terhadap penghalang lebih besar dari nol.

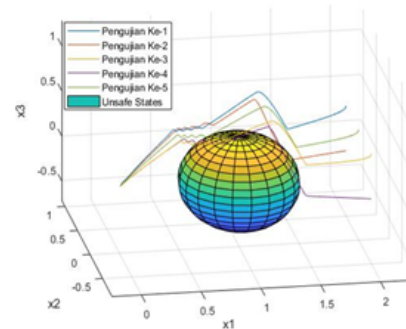
Dalam pengujian ini, dilakukan lima kali percobaan dengan titik awal yang berbeda-beda. Adapun Tabel 1 dan 2 merupakan hasil pengujian simulasi model quadcopter.

Tabel 2. Hasil Jarak Terdekat Terhadap Penghalang

No	Titik Awal			Jarak Terdekat Terhadap Penghalang (m)
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	2	0,5	0,5	0,101
2	2	0,5	0	0,068
3	2	-0,5	0,5	0,094
4	2	-0,5	0	0,067
5	2	0	0,5	0,069

Tabel 1. Hasil Parameter Error Steady State

No	Titik Awal			Error Steady State (m)		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$e_{x_1}$	$e_{x_2}$	$e_{x_3}$
1	2	0,5	0,5	0,006	0,001	0,016
2	2	0,5	0	0,011	0,004	0,014
3	2	-0,5	0,5	0,01	0,01	0,015
4	2	-0,5	0	0,01	0,001	0,015
5	2	0	0,5	0,009	0,002	0,015



Gambar 6. Pengujian Model Quadcopter

Pada Tabel 1 dan 2, pengujian dilakukan sebanyak lima kali dengan titik awal yang berbeda, dari lima pengujian tersebut akan diambil nilai jarak terdekat terhadap penghalang dan error steady state.

Gambar 6 merupakan hasil pengujian simulasi model quadcopter dengan lima titik awal yang berbeda. Dari gambar tersebut terlihat bahwa model quadcopter bergerak dari titik awal ke titik tujuan yakni titik 0 pada sumbu X, Y, dan Z. Model quadcopter juga mampu menghindari penghalang atau unsafe states yang berbentuk bola dengan titik pusat pada (1, 0, 0) sumbu X, Y, dan Z serta memiliki jari-jari sebesar 0,5 m. Dari hasil pengujian sebelumnya, diperoleh hasil rata-rata pengujian dengan lima titik awal yang berbeda.

Berdasarkan data dari Tabel 3, pengujian simulasi model quadcopter memiliki nilai rata-rata galat sebesar 0,926% dengan rata-rata jarak terdekat terhadap penghalang sebesar 0,079 m.

### 5. Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dirancang simulasi penerapan kendali CLBF pada model quadcopter. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk menggerakkan model quadcopter dari lima titik awal yang berbeda

Tabel 3. Perbandingan Rata-Rata Pengujian

Rata-rata galat	Rata-rata jarak terdekat terhadap penghalang (m)
0,926%	0,079

menuju titik tujuan tanpa memasuki wilayah *unsafe states*

Hasil penelitian menunjukkan bahwa model *quadcopter* mampu bergerak dari lima titik awal yang berbeda menuju titik tujuan dan menghindari wilayah *unsafe states* dengan rata-rata galat sebesar 0,926% dan rata-rata jarak terhadap penghalang sebesar 0,079 m. Dari hasil tersebut dapat dikatakan bahwa metode kendali CLBF relevan dan dapat diterapkan pada model *quadcopter*.

#### Daftar Pustaka

- [1] Fang, S., Xu, L. Da, Zhu, Y., Ahati, J., Pei, H., Yan, J., & Liu, Z. (2014). An integrated system for regional environmental monitoring and management based on internet of things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(2), 1596–1605. <http://doi.org/10.1109/TII.2014.2302638>
- [2] S. N. Kane, A. Mishra, and A. K. Dutta, “Quadcopter applications for wildlife monitoring,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 755, no. 1, 2016, doi: 10.1088/1742-6596/755/1/011001.
- [3] D. A. Gandhi and M. Ghosal, “Novel Low Cost Quadcopter for Surveillance Application,” *Proc. Int. Conf. Inven. Res. Comput. Appl. ICIRCA 2018*, no. Icirca, pp. 412–414, 2018, doi: 10.1109/ICIRCA.2018.8597391.
- [4] R. Kubo, Y. Fujii, and H. Nakamura, “Control Lyapunov function design for trajectory tracking problems of wheeled mobile robot,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 6177–6182, 2020, doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1704.
- [5] A. D. Ames, S. Coogan, M. Egerstedt, G. Notomista, K. Sreenath, and P. Tabuada, “Control barrier functions: Theory and applications,” 2019 18th Eur. Control Conf. ECC 2019, pp. 3420–3431, 2019, doi: 10.23919/ECC.2019.8796030.
- [6] M. Z. Romdlony and B. Jayawardhana, “Stabilization with guaranteed safety using Control Lyapunov-Barrier Function,” *Automatica*, vol. 66, pp. 39–47, 2016, doi: 10.1016/j.automatica.2015.12.011.
- [7] F. Ahmad, P. Kumar, A. Bhandari, and P. P. Patil, “Simulation of the Quadcopter Dynamics with LQR based Control,” *Mater. Today Proc.*, vol. 24, pp. 326–332, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.282.