PERANCANGAN SISTEM KONTROL QUADROTOR LINCAH BERBASIS SIMULASI *HARDWARE IN THE LOOP*

LAPORAN KEMAJUAN TUGAS AKHIR

****

Oleh

Deedat Fatahillah NIM: 13320072

PROGRAM STUDI TEKNIK FISIKA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG  
2023

ABSTRAK

PERANCANGAN SISTEM KONTROL QUADROTOR LINCAH BERBASIS SIMULASI *HARDWARE IN THE LOOP*

Oleh

**Deedat Fatahillah** **NIM: 13320072**

(Program Studi Teknik Fisika)

Quadrotormerupakan salah satu tipe wahana nirawak melayang yang memiliki empat buah rotor untuk melakukan manuver yang membuatnya dapat bergerak dengan memiliki enam derajat kebebasan. Hal ini membuat quadrotor menjadi konfigurasi yang populer belakangan ini oleh industri dengan meningkatnya kompleksitas kriteria manuver dari suatu wahana nirawak. Namun sistem kontrol yang sudah ada sebelumnya kurang sesuai dalam melakukan kendali pada quadrotoryang bergerak dengan lincah. Sehingga, kebutuhan sistem kontrol mutakhir dalam melakukan kontrol pengendalian manuver quadrotordengan lincah sangatlah dibutuhkan untuk memenuhi perkembangan aplikasi quadrotorkedepannya.

Penelitian ini akan membahas terkait desain sistem kontrol drone yang tepat guna dalam melakukan manuver lincah. Desain sistem kontrol akan dirancang secara langsung pada *flight controller* nyata sehingga sistem kontrol yang didesain diharapkan dapat diimplementasikan secara tepat. Selain itu, desain sistem kontrol ini akan dilakukan pengujian dengan lingkungan virtual dengan metode *Hardware in the loop.*

**Kata kunci**: quadrotor, sistem kontrol, wahana nirawak, *hardware in the loop*

*ABSTRACT*

*CONTROL SYSTEM DESIGN FOR AGILE QUADROTOR BASED ON HARDWARE IN THE LOOP SIMULATION*

*By*

***Deedat Fatahillah*** ***NIM: 13320072***

*(Engineering Physics Study Program)*

*Quadrotor is one type of unmanned aerial vehicle with four rotors for maneuvering, allowing it to move with six degrees of freedom. This has made quadrotor a popular configuration in recent years due to the increasing complexity of maneuver criteria for unmanned vehicles. However, existing control systems are not well-suited for agile quadrotors. Therefore, the need for advanced control systems to handle the agile maneuver control of quadrotors is essential to meet the future applications of quadrotors.*

*This research will discuss the design of an effective drone control system for agile maneuvering. The control system design will be directly implemented on a real flight controller, with the expectation that the designed control system can be implemented accurately. Additionally, the control system design will be tested in a virtual environment using Hardware in the Loop method.*

***Keywords****: quadrotor, control systems, unmanned aerial vehicles, hardware in the loop*

PERANCANGAN SISTEM KONTROL QUADROTOR LINCAH BERBASIS SIMULASI *HARDWARE IN THE LOOP*

HALAMAN PENGESAHAN

Oleh

**Deedat Fatahillah** **NIM: 13320072**

**(Program Studi Teknik Fisika)**

Institut Teknologi Bandung

Menyetujui

Tim Pembimbing

Tanggal …………………..

|  |  |
| --- | --- |
| Pembimbing 1 | Pembimbing 2 |
| Dr. Ir. Eko Mursito Budi, M.T.  NIP. 196710061997021001 | Faqihza Mukhlish, S.T., M.T., Ph.D.  NIP. 121110001 |

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah Swt. atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan kemajuan tugas akhir ini dengan judul “Perancangan Sistem Kontrol Quadrotor Lincah Berbasis Simulasi Hardware In The Loop”. Laporan kemajuan tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat kelulusan mata kuliah TF4091 Metoda Penelitian dan Ujian Komprehensif, serta merupakan salah satu syarat dalam penyelesaian tugas akhir.

Dalam penyusunan laporan kemajuan tugas akhir ini, penulis mendapatkan bimbingan, bantuan, dan dukungan dari berbagai pihak sehingga pada kesempatan ini, penulis mengungkapkan rasa terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Eko Mursito Budi, M.T. dan Faqihza Mukhlish, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis dalam penyusunan laporan kemajuan tugas akhir ini.
2. Keluarga penulis atas doa dan dukungan yang diberikan tanpa henti.
3. Seluruh dosen pengajar yang telah membekali penulis ilmu pengetahuan selama menjalankan studi di Program Studi Teknik Fisika ITB.
4. Seluruh staf dan tenaga kependidikan Program Studi Teknik Fisika ITB atas bantuan dan dukungan kepada penulis selama menjadi mahasiswa di Program Studi Teknik Fisika ITB.
5. Seluruh teman penulis yang memberikan dukungan sehingga penulis senantiasa bersemangat dalam penyusunan laporan kemajuan tugas akhir ini.
6. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa laporan kemajuan tugas akhir ini masih memiliki kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka atas saran dan masukan dari berbagai pihak untuk pengembangan dan/atau perbaikan laporan ini agar menjadi lebih baik. Akhir kata, penulis berharap laporan kemajuan tugas akhir ini dapat menjadi awal yang baik dalam pengerjaan penelitian tugas akhir untuk memberikan kontribusi positif dan bermanfaat bagi pembacanya.

Bandung, 2 November 2023

Penulis

DAFTAR ISI

[ABSTRAK i](#_Toc149821930)

[*ABSTRACT* ii](#_Toc149821931)

[HALAMAN PENGESAHAN iii](#_Toc149821932)

[KATA PENGANTAR iv](#_Toc149821933)

[DAFTAR ISI vi](#_Toc149821934)

[DAFTAR GAMBAR vii](#_Toc149821935)

[DAFTAR TABEL viii](#_Toc149821936)

[DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG ix](#_Toc149821937)

[BAB I PENDAHULUAN 10](#_Toc149821938)

[1.1 Latar Belakang 10](#_Toc149821939)

[1.2 Rumusan Masalah 11](#_Toc149821940)

[1.3 Tujuan Penelitian 11](#_Toc149821941)

[1.4 Batasan dan Asumsi 11](#_Toc149821942)

[BAB II METODOLOGI DAN RENCANA PELAKSANAAN 13](#_Toc149821943)

[2.1 Metodologi 13](#_Toc149821944)

[2.2 Rencana Pelaksanaan 15](#_Toc149821945)

[2.2.1 Lokasi Pelaksanaan 15](#_Toc149821946)

[2.2.2 Alat dan Bahan 15](#_Toc149821947)

[2.2.3 Jadwal Pelaksanaan 16](#_Toc149821948)

[2.2.4 Biaya 17](#_Toc149821949)

[BAB III PENUTUP 18](#_Toc149821950)

[DAFTAR PUSTAKA 19](#_Toc149821951)

DAFTAR GAMBAR

[Gambar 2.1 Rencana Penelitian 15](#_Toc148031282)

DAFTAR TABEL

[Tabel 2.1 Lokasi Pelaksanaan 15](#_Toc148040618)

[Tabel 2.2 Alat dan Bahan 16](#_Toc148040619)

[Tabel 2.3 Jadwal Pelaksanaan 16](#_Toc148040620)

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| SINGKATAN | Nama | Pemakaian pertama kali pada halaman |
| UAV | *Unmanned Aerial Vehicle* | 8 |
| PID | *Proportional Integral Derivative* | 8 |
| LQR | *Linear Quardratic Regulator* | 8 |
| HILS | *Hardware in the Loop Simulation* | 8 |
| MPC | *Model Predictive Control* | 11 |
|  |  |  |
| LAMBANG |  |  |
|  |  |  |
|  | Posisi pada koordinat x | 10 |
| *y* | Posisi pada koordinat y | 10 |
|  | Posisi pada kootdinat z | 10 |
|  | Sudut *roll* | 10 |
|  | Sudut *pitch* | 10 |
|  | Sudut *yaw* | 10 |

BAB I  
PENDAHULUAN

# Pendahuluan

## Latar Belakang

Beberapa tahun terakhir, pengembangan teknologi seputar *unmanned aerial vehicle* (UAV) atau pesawat tanpa awak telah berkembang dengan pesat yang mengakibatkan adanya pengingkatan aplikasi UAV yang masif di berbagai macam industri. Macam-macam pengaplikasiannya antara lain di ranah logistik, misi penyelamatan, infrastruktur, agrikultur, maupun seni [1]. Dengan semakin banyak industri yang mengadopsi UAV, kriteria gerak dan manuver dari sebuah UAV juga semakin kompleks. Sehingga, penggunaan konfigurasi kendaraan nirawak dengan empat rotor atau quadrotor menjadi sangatlah populer. Hal ini dikarenakan quadrotor mampu bergerak dengan lincah sehingga mampu melakukan manuver yang kompleks [2], [3]. Agar quadrotordapat melakukan manuver dengan lincah maka harus terdapat suatu desain sistem kontrol yang dapat menjaga quadrotor tetap stabil.

Pada umumnya, sistem kontrol quadrotormenggunakan suatu bentuk atau variasi dari pengontrol proporsional, integral, dan derivative (PID) [4]. Kontroler ini merupakan tipe kontroler yang paling sederhana sehingga seseorang yang tidak memiliki latar belakang di bidang kontrol dapat menggunakannya dengan cukup baik. Namun, berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan, pengontrol PID telah terbukti menghasilkan manuver yang lebih buruk dibandingkan dengan sistem kontrol yang berbeda seperti *Fuzzy Logic* maupun *Linear Quadratic Regulator* (LQR) [5], [6]. Sehingga, pada penelitian ini akan dilakukan desain dan implementasi sistem kontrol mutakhir untuk kasus manuver quadrotorsecara lincah.

Sistem kontrol yang telah didesain tersebut tentunya perlu diuji untuk melihat kinerja pengontrol dalam melakukan tugasnya. Proses pengujian pengontrol ini dapat dilakukan dengan menggunakan simulasi sehingga resiko kerusakan sistem fisik dapat dihindari. Salah satu strategi untuk melakukan simulasi ini ialah *Hardware in the Loop Simulation* (HILS)*.* Metode ini dapat mengkombinasikan perangkat keras *flight controller* dengan simulasi lingkungan secara virtual. Sehingga sistem kontrol dapat didesain secara tepat dengan mempertimbangkan limitasi komputasi *flight controller* seperti yang sudah dilakukan pada penelitian sebelumnya [7].

## Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, permasalahan yang akan dicoba untuk diselesaikan ialah desain dan implementasi sistem kontrol quadrotor mutakhir untuk manuver lincah dengan pendekatan simulasi Hardware in the loop.

## Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini ialah mengembangkan sistem kontrol quadrotorlincah dengan memanfaatkan simulator *hardware in the loop.* Sehingga sasaran dari penelitian ini adalah:

1. Merancang lingkungan simulasi sistem kontrol secara waktu nyata dengan metode *Hardware in the Loop*.
2. Mendesain sistem kontrol mutakhir untuk quadrotorlincah.
3. Memprogram dan mengimplementasi sistem kontrol pada perangkat keraspengontrol penerbangan secara langsung.
4. Menganalisis kinerja sistem kontrol berdasarkan kinerjanya dalamsimulator.

## Batasan dan Asumsi

Untuk memenuhi tujuan dan sasaran pada perancangan penelitian ini, beberapa batasan yang digunakan antara lain:

1. Lingkungan simulasi dianggap ideal.
2. Struktur dari quadrotordianggap tegar dan simetris. Titik pusat massa berada pada titik tengah dari quadrotor.
3. Pengaruh dari gaya horizontal dan vertikal pada baling-baling diabaikan.
4. Simulator quadrotormemiliki sistem pengukuran yang lengkap.

## Sistematika Penulisan

Laporan kemajuan tugas akhir ini dituliskan dengan sistematika sebagai berikut:

1. Bab I Pendahuluan

Pada bab ini dijelaskan latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan dan asumsi, serta sistematika penulisan laporan kemajuan tugas akhir.

1. Bab II Studi Literatur
2. Bab III Metodologi dan Kemajuan

Pada bab ini dijelaskan metodologi penelitian dan kemajuan yang sudah dilakukan selama ini.

1. Bab IV Rencana Selanjutnya & Penutup

Pada bab ini memuat rencana riset kedepannya beserta harapan penulis sebagai penutup laporan kemajuan tugas akhir.

BAB II

STUDI LITERATUR

# Studi Literatur

## Quadrotor

Quadrotor adalah sebuah pengembangan dari konsep robot terbang untuk kendaraan terbang nirawak. Kendaraan ini memiliki total empat motor, dengan dua pasang motor bergerak berlawanan arah putar. Motor diletakkan pada sudut-sudut dari quadrotor yang dapat dilihat seperti pada Gambar 2.1 [8]. Konfigurasi ini memastikan wahana dapat terbang dengan stabil di angkasa.



Gambar 2.1 Quadrotor dengan Frame Dji F450

Quadrotor memiliki dua tipe konfigurasi berdasarkan cara propellernya terkoneksi. Dua tipe ini ialah konfigurasi “X” atau “+” [9]. Baling-baling terhubung berpasangan berlawan arah untuk membatalkan torsi yang diciptakan olehbaling-balingyang berputar ke satu arah. Pada gambar, baling-baling yang berlabel 1 dan 2 akan berputar secara berlawanan arah jarum, sedangkan baling-baling berlabel 3 dan 4 akan berputar searah dengan arah jarum jam. Hal ini dapat lebih jelas dilihat pada Gambar 2.2.

A diagram of directions and directions

Description automatically generated

Gambar 2.2 Konfigurasi Quadrotor

Dengan konfigurasi ini, quadrotor dapat diklasifikasikan sebagai suatu wahana terbang yang memiliki enam derajat kebebasan. Tiga derajatnya ialah translasional yang biasanya dapat direpresentasikan dengan koordinat kartesian dan tiga derajat lain ialah gerak rotasional yang biasanaya dapat direpresentasikan dengan menggunakan sudut euler [10]. Ilustrasi derajat kebebasan sebuah quadrotor dapat dilihat pada Gambar 2.3.

A drone with a quadcopter

Description automatically generated

Gambar 2.3 Enam Derajat Kebebasan Dari Quadrotor

Quadrotor juga merupakan sebuah wahana yang dapat diklasifikasikan sebagai sistem yang *underactuated.* Hal ini dikarenakan quadrotor hanya memiliki empat aktuator untuk mengontrol enam derajat kebebasan. Sehingga sebuah sistem kontrol sangat dibutuhkan dalam melakukan kompensasi untuk melakukan stabilisasi dan manuver sebuah quadrotor.

## Persamaan Newton-Euler

## Representasi Ruang Keadaan

## Pixhawk Autopilot

## Simulasi *Hardware in the Loop*

BAB III   
METODOLOGI DAN KEMAJUAN

# PERSAMAAN, GAMBAR, DAN TABEL

## Metodologi

Rencana penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat pada gambar di bawah. Secara garis besar, tahapan di bawah dapat dibagi menjadi dua bagian utama yaitu perancangan sistem kontrol dan pengujian pengontrol. Bagian perancangan sistem kontrol terdiri dari tiga bagian utama yaitu, pemodelan dan analisis dinamika sistem, membangun lingkungan simulasi pada gazebo, desain pengontrol agile drone, serta studi pemrograman pixhawk. Sedangkan bagian pengujian terdiri dari dua bagian utama yaitu, pengujian performa kontroler secara simulasi dan pengujian performa kontroler pada drone fisik.

Tahap desain sistem kontrol ini akan dilakukan tentunya dengan pertama-tama melakukan analisis dinamika sistem dan memodelkan sistem kontrol secara keseluruhan. Tahap ini dilakukan untuk mengetahui variabel apa saja yang perlu dilakukan aksi kontrol sehingga pengontrol dapat didesain dengan tepat. Seperti motor apa yang harus digerakan untuk mengubah posisi maupun sudut dari UAV ().

Setelah itu, akan dilakukan pembangunan lingkungan simulasi pada gazebo. Gazebo sendiri merupakan sebuah perangkat lunak yang akan digunakan dalam membuat lingkungan simulasi sekaligus melakukan pengujian sistem kontrol secara simulasi. Pembuatan lingkungan simulasi ini akan dilakukan dengan sebaik mungkin sehingga aproksimasi yang telah dibuat pada simulasi dapat merepresentasikan kondisi nyata dari UAV maupun lingkungan sekitarnya dengan ketelitian yang tinggi. Tahap ini tidak hanya penting dalam proses pengujian sistem kontrol nanti, namun dalam melakukan desain juga. Tahap ini akan krusial dalam mengetahui karakteristik gangguan yang akan diterima oleh UAV.

Dengan mengetahui karakteristik dinamika sistem UAV dan karakteristik gangguan yang ada, maka langkah selanjutnya ialah melakukan desain pengontrol yang tepat guna untuk mencapai objektif yang dituju. Pada tahap inilah, akan dilakukan pembelajaran lebih lanjut mengenai berbagai macam sistem kontrol yang sekiranya sesuai, seperti *model predictive control* (MPC), *linear quadratic control* (LQR), atau bentuk kontroler lainnya yang akan diuji. Selain aspek-aspek gangguan dari luar, aspek seperti limitasi komputasi dan waktu cacah dari *flight controller* juga akan diperhitungkan. Hal ini perlu dipertimbangkan karena sistem kontrol ini akan diimplementasi pada perangkat *flight controller* nyata sehingga aspek-aspek ini tentunya merupakan aspek yang cukup penting.

Desain sistem kontrol yang dilakukan akan menghasilkan diagram blok dan persamaan matematis dari sistem. Namun hal ini tidak bisa semerta-merta diimplementasi secara langsung kepada *flight controller* yang ada. Sehingga untuk mengimplementasi sistem kontrol yang sudah dibuat, maka perlu dilakukan studi mengenai bagaimana cara mengimplementasi sistem kontrol yang sudah dirancang pada *flight controller* pixhawk secara *software*. Dengan memahami ini, maka tahpa selanjutnya dapat dilakukan secara langsung.

Tahap selanjutnya ialah, tahap pengujian sistem kontrol yang telah didesain. Tahap ini diawali dengan menggunakan lingkungan simulasi yang sudah dibuat sebelumnya dengan menggunakan metode *hardware in the loop* (HILS)*.* Metode ini akan dilakukan dengan pertama-tama mengunggah kode sumber sistem kontrol kepada *flight controller* secara langsung dan menghubungkan *flight controller* tersebut kepada lingkungan simulasi yang telah dirancang. *Flight controller* akan menganggap dirinya hidup di dalam lingkungan tersebut sehingga pengujian sistem kontrol yang telah dibuat. Jika keluaran dari sistem kontrol ini kurang sesuai dengan yang diinginkan, maka desain sistem kontrol akan dilakukan kembali sampai sistem kontrol yang diimplementasi dan diuji telah sesuai dengan kriteria yang telah ditentukan.

Setelah sistem kontrol yang cocok telah ditemukan pada tahap sebelumnya, sistem kontrol ini akan diimplementasi secara langsung kepada wahan terbang quadcopternyata. Sama seperti tahap sebelumnya, hal ini dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem kontrol secara nyata dan bila perlu dilakukan modifikasi kepada sistem kontrol yang ada. Namun, tahap ini merupakan tahap yang bersifat opsional dikarenakan terdapat penelitian lain yang akan mengerjakan aspek ini.

A group of white rectangular shapes with black text

Description automatically generated

Gambar 3.1 Diagram Alir Rencana Penelitian

## Rencana Pelaksanaan

### Lokasi Pelaksanaan

Pelaksanaan penelitian tugas akhir ini bertempat di dua lokasi sesuai dengan yang tertera pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.1 Lokasi Pelaksanaan

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| No | Lokasi | Instansi | Kegiatan | Kesediaan |
| 1 | CITA ITB | Institut Teknologi Bandung | Pengembangan sistem kontrol drone dan simulasi | Siap |
| 2 | Kantor Pusat PT. SIS | PT. Sas Intereka Sistem | Konsultasi dan pengembangan perangkat lunak | Siap |

### Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.2 Alat dan Bahan

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| No | Nama alat / bahan | Banyak | Kegiatan | Ketersediaan |
| 1 | Laptop dengan Unit GPU, CPU di atas Intel I5, dan OS Ubuntu | 1 | Pengembangan algoritma sistem kontrol | Siap |
| 2 | Pixhawk 2.4.8 | 1 | Pengembangan Sistem Kontrol | Siap |

### Jadwal Pelaksanaan

Rincian jadwal pelaksanaan dari penelitian ini dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2.3 Jadwal Pelaksanaan

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| No | Kegiatan | 2023 | | | | 2024 | | | | | | | |
| Sep | Okt | Nov | Des | Jan | Feb | Mar | Apr | Mei | Jun | Juli |
| 1 | Studi Literatur |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | |
| 2 | Konsultasi dengan pihak PT. SIS |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 | Instalasi perangkat lunak dan penyiapan alat |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4 | Membangun Lingkungan Simulasi pada Gazebo |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5 | Pemodelan dan Analisis Dinamika Sistem |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 6 | Desain Pengontrol Agile Drone |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 7 | Implementasi Kontroler di Gazebo |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 8 | Implementasi Kontroler pada Drone |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 9 | Penyelesaian Laporan TA dan Presentasi |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Tabel 2.3 Jadwal Pelaksanaan | | | | | | | | | | | | |
| 10 | Persiapan sidang akhir dan pemenuhan administrasi |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

### Biaya

Biaya untuk penelitian ini telah disediakan oleh program MBKM Kedaireka dengan topik “Pembuatan Purwarupa Drone dengan Kepresisian Pendaratan sebagai Pembawa Kebutuhan Obat saat Bencana”.

## Kemajuan

### Pemodelan Dinamika Sistem

Dalam melakukan pemodelan sistem secara keseluruhan, hal pertama yang harus dilakukan terlebih dahulu ialah menentukan kerangka acuan dari quadrotor dan bumi. Sumbu stasioner akan dinamakan ,, dan sedangkan sumbu drone akan dinamakan ,, dan . Sumbu stasioner akan diletakkan pada bumi yang akan menunjukkan kepada arah utara, timur, dan ke arah bumi. Sedangkan sumbu x dari drone akan menghadap di antara propeller 1 dan propeller 3, sumbu y akan menghadap di antara propeller 1 dan propeller 4 dan sumbu z akan menghadap kepada arah bumi. Ilustrasi dari sumbu quadcopter dapat dilihat pada gambar.

A drone with black and white markings

Description automatically generated with medium confidence

Gambar 3.2 Sumbu Stasioner dan Sumbu Quadrotor

Sehingga vektor koordinat dan dapat dituliskan sebagai berikut.

Dengan matriks rotasi *R* dapat ditulis sebagai berikut.

Dimana , , dan merupakan sudut euler dari quadrotor yang dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 2.3. Sedangkan dan merupakan dan masing-masingnya. Matriks rotasi *R* ini akan digunakan dalam menurunkan dinamika translasi dari quadrotor.

Dengan asumsi permukaan bumi adalah rata, sehingga pengaruh permukaan tanah dapat diabaikan, persamaan gerak quadrotor yang memiliki enam derajat kebebasan dapat diturunkan dengan menggunakan persamaan Newton-Euler.

Dengan *I* matriks identitas, *m* massa total dari quadrotor, *J* momen inertia, *ω* kecepatan angular, kecepatan linear, gaya total, dan *τ* momen total.

Pada saat melakukan pergerakan di udara, quadrotor akan dipengaruhi oleh 3 gaya, gaya-gaya tersebut adalah gaya gravitasi, gaya gesekan dengan udara dan gaya angkat baling-baling yang dijabarkan oleh persamaan berikut.

Dengan adalah gaya angkat total yang dihasilkan oleh empat motor dengan konfigurasi sebagai berikut.

### Pembuatan Lingkungan Simulasi di Gazebo

### Simulasi *Hardware in the Loop*

BAB III  
PENUTUP

# HASIL PENELITIAN

## Rencana Selanjutnya

## Penutup

Demikian laporan kemajuan tugas akhir dengan judul “Perancangan Sistem Kontrol Quadrotor Lincah Berbasis Simulasi Hardware In The Loop “telah dibuat dengan sebaik-baiknya. Semoga laporan kemajuan tugas akhir ini dapat diterima dengan baik dan penelitian tugas akhir ini dapat berjalan dengan lancar.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Deja, M. S. Siemitkowski, G. C. Vosniakos, dan G. Maltezos, “Opportunities and challenges for exploiting drones in agile manufacturing systems,” dalam *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2020, hlm. 527–534. doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.074.

[2] J. Verbeke dan J. De Schutter, “Experimental maneuverability and agility quantification for rotary unmanned aerial vehicle,” *International Journal of Micro Air Vehicles*, vol. 10, no. 1. SAGE Publications Inc., hlm. 3–11, 1 Maret 2018. doi: 10.1177/1756829317736204.

[3] E. T. Efaz, M. M. Mowlee, J. Jabin, I. Khan, dan M. R. Islam, “Modeling of a high-speed and cost-effective FPV quadcopter for surveillance,” dalam *ICCIT 2020 - 23rd International Conference on Computer and Information Technology, Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Des 2020. doi: 10.1109/ICCIT51783.2020.9392696.

[4] “https://docs.px4.io/main/en/flight\_stack/controller\_diagrams.html,” Controller Diagram PX4 .

[5] M. W. Mueller dan R. D’Andrea, *A Model Predictive Controller For Quadcopter State Interception*. 2013.

[6] A. Surriani, un Budiyanto, dan M. Arrofiq, “Altitude Control of Quadrotor using Fuzzy Self Tuning PID Controller,” 2015.

[7] K. D. Nguyen dan C. Ha, “Development of Hardware-in-the-Loop Simulation Based on Gazebo and Pixhawk for Unmanned Aerial Vehicles,” *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, vol. 19, no. 1, hlm. 238–249, Mar 2018, doi: 10.1007/s42405-018-0012-8.

[8] Y. Fan, “Flight Control System Simulation for Quadcopter Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based on Matlab Simulink,” dalam *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2283/1/012011.

[9] K. M. Thu dan A. I. Gavrilov, “Designing and Modeling of Quadcopter Control System Using L1 Adaptive Control,” dalam *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2017, hlm. 528–535. doi: 10.1016/j.procs.2017.01.046.

[10] W. Smit, “Design and Implementation of Model Predictive Control on Pixhawk Flight Controller,” 2018. [Daring]. Tersedia pada: https://scholar.sun.ac.za