PERANCANGAN SISTEM KONTROL PERGERAKAN UNTUK MENGATASI PENGARUH GANGGUAN UDARA DALAM FORMASI *MULTIQUADROTOR*

LAPORAN KEMAJUAN TUGAS AKHIR

****

Oleh

Yosep Putra Setiyanto NIM: 13320026

PROGRAM STUDI TEKNIK FISIKA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG  
2023

ABSTRAK

PERANCANGAN SISTEM KONTROL PERGERAKAN UNTUK MENGATASI PENGARUH GANGGUAN UDARA DALAM FORMASI *MULTIQUADROTOR*

Oleh

**Yosep Putra Setiyanto NIM: 13320026**

(Program Studi Teknik Fisika)

Dalam era perkembangan teknologi, penggunaan *quadrotor* telah menjadi semakin relevan dalam berbagai bidang, termasuk militer, sipil, teknologi, dan ilmu pengetahuan. Keunggulan utama *quadrotor* terletak pada struktur mekaniknya yang sederhana dan manuverabilitas yang dapat ditingkatkan. Namun, penggunaan *quadrotor* tunggal untuk menyelesaikan tugas sehari-hari masih memiliki keterbatasan, seperti efisiensi yang rendah, kesulitan dalam mengeksekusi tugas kompleks, dan batasan dalam cakupan area.

Untuk mengatasi keterbatasan ini, pengembangan *swarm* *quadrotor* atau kelompok *quadrotor* yang bekerja bersama sebagai satu kesatuan telah menjadi fokus penelitian. *Swarm* *quadrotor* digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk pemetaan area di mana *quadrotor* perlu menjaga jarak yang dekat satu sama lain. Namun, penggunaan *swarm* *quadrotor* dalam jarak dekat menghadirkan tantangan terkait interaksi aerodinamika yang dapat mempengaruhi kinerja, stabilitas, dan keamanan *quadrotor*.

Penelitian sebelumnya telah mencoba mengatasi masalah ini dengan mengembangkan algoritma kontrol dalam mengatasi gangguan aerodinamika hanya pada satu buah *quadrotor*. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem kontrol kestabilan yang memungkinkan *quadrotor* dalam *swarm* untuk terbang dalam jarak yang sangat dekat tanpa mengalami gangguan signifikan akibat interaksi aerodinamika. Penelitian ini melibatkan pemodelan gangguan udara dan sistem pergerakan *quadrotor*, penggunaan algoritma kontrol PID, LQR dan Backstepping, simulasi menggunakan Simulink pada aplikasi MATLAB dan implementasi pada tiga unit *quadrotor*. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dan stabilitas penggunaan *swarm* *quadrotor* yang membutuhkan jarak yang dekat satu sama lain.

Kata kunci: swarm *quadrotor*, kontrol, simulasi, turbulensi udara.

*ABSTRACT*

PERANCANGAN SISTEM KONTROL PERGERAKAN UNTUK MENGATASI PENGARUH TURBULENSI UDARA DALAM FORMASI *MULTIQUADROTOR*

*By*

***Yosep Putra Setiyanto NIM: 13320026***

*(Engineering Physics Study Program)*

*In the era of technological development, the use of quadrotors has become increasingly relevant in various fields, including military, civil, technology, and science. The main advantages of quadrotors lie in their simple mechanical structure and enhanced maneuverability. However, the use of a single quadrotor to accomplish daily tasks still has limitations, such as low efficiency, difficulty in executing complex tasks, and limitations in area coverage.*

*To overcome these limitations, the development of quadrotor swarms or groups of quadrotors working together as a single unit has been the focus of research. Quadrotor swarms are used in a variety of applications, including area mapping where quadrotors need to keep a close distance from each other. However, the use of quadrotor swarms in close proximity presents challenges related to aerodynamic interactions that can affect quadrotor performance, stability and safety.*

*Previous research has tried to address this issue by developing control algorithms to overcome aerodynamic disturbances on only one quadrotor. This research aims to develop a stability control system that allows quadrotors in a swarm to fly in very close proximity without experiencing significant disturbances due to aerodynamic interactions. This research involves modeling the air disturbance and quadrotor movement system, the use of PID, LQR and Backstepping control algorithms, simulation using Simulink on MATLAB application and implementation on three quadrotor units. The results of this research are expected to improve the efficiency and stability of the use of quadrotor swarms that require close proximity to each other.*

*Keywords: swarm quadrotor, control, simulation, air turbulence.*

PERANCANGAN SISTEM KONTROL PERGERAKAN UNTUK MENGATASI PENGARUH TURBULENSI UDARA DALAM FORMASI *MULTIQUADROTOR*

HALAMAN PENGESAHAN

Oleh

**Yosep Putra Setiyanto NIM: 13320026**

**(Program Studi Teknik Fisika)**

Institut Teknologi Bandung

Menyetujui

Tim Pembimbing

Tanggal ………………………..

|  |
| --- |
| Pembimbing 1 |
| (Ir. Estiyanti Ekawati, M.T., Ph.D.)  NIP. 196908052008012020 |

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat beserta karunia-Nya, serta diberi-Nya kemudahan dalam menyelesaikan penulisan Laporan Kemajuan Tugas Akhir yang berjudul “Perancangan Sistem Kontrol Pergerakan Untuk Mengatasi Pengaruh Gangguan Udara Dalam Formasi Multi*quadrotor*”. Penulisan Laporan Kemajuan Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan tahap sarjana pada Program Studi Sarjana Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung.

Laporan Kemajuan tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik, tidak lepas dari bimbingan dan dukungan dari banyak pihak, sehingga dalam kesempatan ini penulis dengan segala hormat mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Brian Yuliarto, S.T., M.Eng., Ph.D., selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung,
2. Iwan Prasetiyo, S.T., M.T., Ph.D., selaku Ketua Program Studi Sarjana Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung,
3. Ir. Estiyanti Ekawati, M.T., Ph.D., selaku pembimbing yang telah meluangkan waktu dan pikirannya untuk membimbing penulis dalam menyelesaikan penelitian dan penyusunan Laporan Kemajuan Tugas Akhir ini,
4. Kedua orang tua yang selalu memberikan doa dan dukungan kepada penulis,
5. Seluruh Dosen dan Staf di Program Studi Sarjana Teknik Fisika yang telah membekali banyak ilmu pengetahuan yang bermanfaat selama penulis menjalani studi di Program Studi Sarjana Teknik Fisika,
6. Rekan-rekan di laboratorium CITA atas kebersamaan selama penelitian ini dilaksanakan,
7. Teman-teman S1 Teknik Fisika Angkatan 2020 yang memberikan dukungan dan semangat kepada penulis, dan
8. Semua pihak yang telah membantu hingga terselesaikannya Laporan Kemajuan Tugas Akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Akhir kata penulis memohon maaf apabila terdapat banyak kekurangan dalam penulisan Laporan Kemajuan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan guna penyempurnaan dan pengembangan Tugas Akhir ini ke arah yang lebih baik. Semoga segala yang tertuang dalam Laporan Kemajuan Tugas akhir ini memberikan manfaat bagi kita semua baik sekarang maupun dimasa yang akan datang.

Bandung, Oktober 2023

Penulis

DAFTAR ISI

[ABSTRAK i](#_Toc152917667)

[*ABSTRACT* ii](#_Toc152917668)

[HALAMAN PENGESAHAN iii](#_Toc152917669)

[KATA PENGANTAR iv](#_Toc152917670)

[DAFTAR ISI vi](#_Toc152917671)

[DAFTAR GAMBAR viii](#_Toc152917672)

[DAFTAR TABEL ix](#_Toc152917673)

[DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG x](#_Toc152917674)

[BAB I PENDAHULUAN 11](#_Toc152917675)

[1.1 Latar Belakang 11](#_Toc152917677)

[1.2 Permasalahan 13](#_Toc152917678)

[1.3 Tujuan dan Sasaran 14](#_Toc152917679)

[1.4 Batasan dan Asumsi 15](#_Toc152917680)

[1.5 Sistematika 15](#_Toc152917681)

[BAB II STUDI LITERATUR 17](#_Toc152917682)

[2.1 Sistem Dinamik *Quadrotor* 17](#_Toc152917684)

[2.2 Arsitektur Komunikasi *Quadrotor* 20](#_Toc152917685)

[2.2.1 TCP/IP 21](#_Toc152917686)

[2.2.2 UDP 21](#_Toc152917687)

[2.3 Gangguan Turbulensi Udara 22](#_Toc152917688)

[2.4 Sistem Kontrol pada *Quadrotor* 22](#_Toc152917689)

[2.4.1 PID Control 23](#_Toc152917690)

[2.4.2 Backstepping-Integral Control 25](#_Toc152917691)

[2.4.3 Feed Forward Control 26](#_Toc152917692)

[2.5 Simulasi Menggunakan MATLAB/Simulink 27](#_Toc152917693)

[2.5.1 Dryden Wind Turbulence Model 28](#_Toc152917694)

[BAB III METODOLOGI DAN KEMAJUAN 31](#_Toc152917695)

[3.1 Metodologi 31](#_Toc152917696)

[3.1.1 Akuisisi dan Analisis Data 32](#_Toc152917697)

[3.1.2 Simulasi 33](#_Toc152917698)

[3.1.3 Implementasi dan Validasi 34](#_Toc152917699)

[3.2 Kemajuan 34](#_Toc152917700)

[3.2.1 Flowchart Pelaksanaan Tugas Akhir 34](#_Toc152917701)

[3.2.2 Set up *Quadrotor* dan Medan Terbang 36](#_Toc152917702)

[3.2.3 Konsultasi dengan Alumni 36](#_Toc152917703)

[3.2.4 Set Up Aplikasi, Library dan Pemrograman 36](#_Toc152917704)

[3.2.5 Uji Terbang 36](#_Toc152917705)

[BAB IV RENCANA SELANJUTNYA DAN PENUTUP 37](#_Toc152917706)

[4.1 Rencana Selanjutnya 37](#_Toc152917707)

[4.2 Penutup 37](#_Toc152917708)

[DAFTAR PUSTAKA 38](#_Toc152917709)

DAFTAR GAMBAR

[Gambar 1.2.1 Diagram tulang ikan rumusan permasalahan 14](#_Toc152917710)

[Gambar 2.1.1 Dinamika pada *Quadrotor* 17](#_Toc152917711)

[Gambar 2.4.1 Cara Kerja Sistem Kontrol Pada Umumnya 22](#_Toc152917712)

[Gambar 3.1.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian 31](#_Toc152917713)

[Gambar 3.1.2 Skema akuisisi data karakteristik turbulensi udara 32](#_Toc152917714)

[Gambar 3.1.3 Karakteristik dinamik *quadrotor* 32](#_Toc152917715)

[Gambar 3.1.4 Skema kontrol pergerakan *quadrotor* 33](#_Toc152917716)

[Gambar 3.1.5 Skema Validasi performa implementasi sistem kontrol 34](#_Toc152917717)

[Gambar 3.2.1 *Update* Diagram Alir Proses Pengerjaan Tugas Akhir 35](#_Toc152917718)

DAFTAR TABEL

**No table of figures entries found.**

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| SINGKATAN | Nama |  |
| PID | *Proportional Integral Derivative* | 9 |
| DCM | *Direction cosine matrix* | 10 |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

BAB I  
PENDAHULUAN

# Pendahuluan

## Latar Belakang

Saat ini, *quadrotor* memiliki potensi yang sangat tinggi dalam pengembangan aplikasi di bidang militer, sipil, teknologi, dan ilmu pengetahuan [1] [2]. Hal tersebut dikarenakan *quadrotor* menjadi salah satu robotik pesawat tanpa awak dengan keunggulan berupa struktur mekanik sederhana serta manuverabilitas yang dapat ditingkatkan [3]. Akan tetapi, penggunaan *single quadrotor* untuk memecahkan permasalahan sehari-hari masih memiliki keterbatasan, seperti efisiensi yang rendah dalam menjalankan tugas, sulit menjalankan tugas yang kompleks, dan tidak mampu mencakup area tugas yang luas. Maka dari itu, semakin gencar pengembangan sekelompok *quadrotor* atau *swarm quadrotor*. *Swarm quadrotor* akan berkoordinasi dan bekerja sama sebagai satu kesatuan dengan menjaga formasi yang diinginkan selama melaksanakan tugas [4].

Pengembangan *swarm* *quadrotor* yang semakin maju, membuatnya kini telah diaplikasikan dalam berbagai tujuan dan bidang keilmuan. Tak jarang pada aplikasi tersebut membutuhkan *swarm* dengan kerapatan atau jarak antar *quadrotor* yang berdekatan. Salah satu contohnya adalah untuk melakukan pemetaan area. Saat *quadrotor* harus menjaga jarak yang relatif aman satu sama lain, efisiensi pemetaan dapat terpengaruh karena cakupan area yang lebih luas mungkin tidak tercapai. Oleh karenanya, dibutuhkan formasi *swarm* *multiquadrotor* yang berdekatan satu sama lain.

Penggunaan *swarm quadrotor* yang mengharuskan jarak antar *quadrotor* berdekatan memunculkan permasalahan utama terkait dengan interaksi antar *quadrotor* dalam jarak dekat. Ketika *quadrotor* terbang dalam formasi yang rapat, interaksi aerodinamika antar *quadrotor* dapat menciptakan gangguan yang berdampak negatif pada kinerja, stabilitas, dan keamanan *quadrotor* tersebut. Pada penelitian yang dilakukan oleh Nekoo dkk (2021) telah dibuktikan bahwa rotor yang berputar pada *quadrotor* menyebabkan turbulensi udara di sekitarnya, dan akan memengaruhi kinerja dari *quadrotor* [5]. Hanya saja, penelitian tersebut terbatas membahas turbulensi pada sumbu vertical saja belum membahas pengaruh turbulensi pada sumbu horizontal.

Penelitian yang dilakukan oleh Regula G. (2013) telah merancang algoritma kontrol yang memungkinkan *quadrotor* dalam *swarm quadrotor* untuk menjaga jarak yang aman satu sama lain. Algoritma ini memberikan solusi untuk menghindari tabrakan dan menjaga jarak yang cukup [6]. Meskipun solusi ini efektif dalam mencegah tabrakan, mereka sering kali kurang efisien dalam mengatasi gangguan aerodinamika yang muncul akibat interaksi antar *quadrotor* dalam jarak dekat [7]. Pembahasan pada penelitian tersebut cenderung mengutamakan mencegah tabrakan daripada mengatasi gangguan aerodinamika yang muncul akibat interaksi antar *quadrotor* dalam jarak dekat.

Pemahaman yang mendalam tentang pengendalian dan kompensasi gangguan ini menjadi penting untuk mengoptimalkan penggunaan *swarm quadrotor* dalam pemetaan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem kontrol kestabilan yang memungkinkan *quadrotor* dalam *swarm quadrotor* untuk terbang berdekatan tanpa mengalami gangguan yang signifikan akibat interaksi aerodinamika antar *quadrotor*.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Mukhlish dkk (2015) dikembangkan algoritma kontrol untuk mengompensasi pengaruh gangguan udara ketika *quadrotor* sedang terbang. Pada penelitian tersebut, gangguan udara bukan berasal dari *quadrotor* yang lain, namun berasal dari udara bebas karena uji coba dilakukan di tempat terbuka. Objek pada penelitian ini adalah sebuah *quadrotor* tunggal, bukan *swarm* *quadrotor*. pada penelitian yang dilakukan oleh Kamran dkk (2014) juga dibuat algoritma kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) untuk mengatasi gangguan udara. Berdasarkan kedua penelitian tersebut kontrol PID terbukti telah berhasil mengurangi kesalahan rute penerbangan yang disebabkan gangguan dari udara [8] [9].

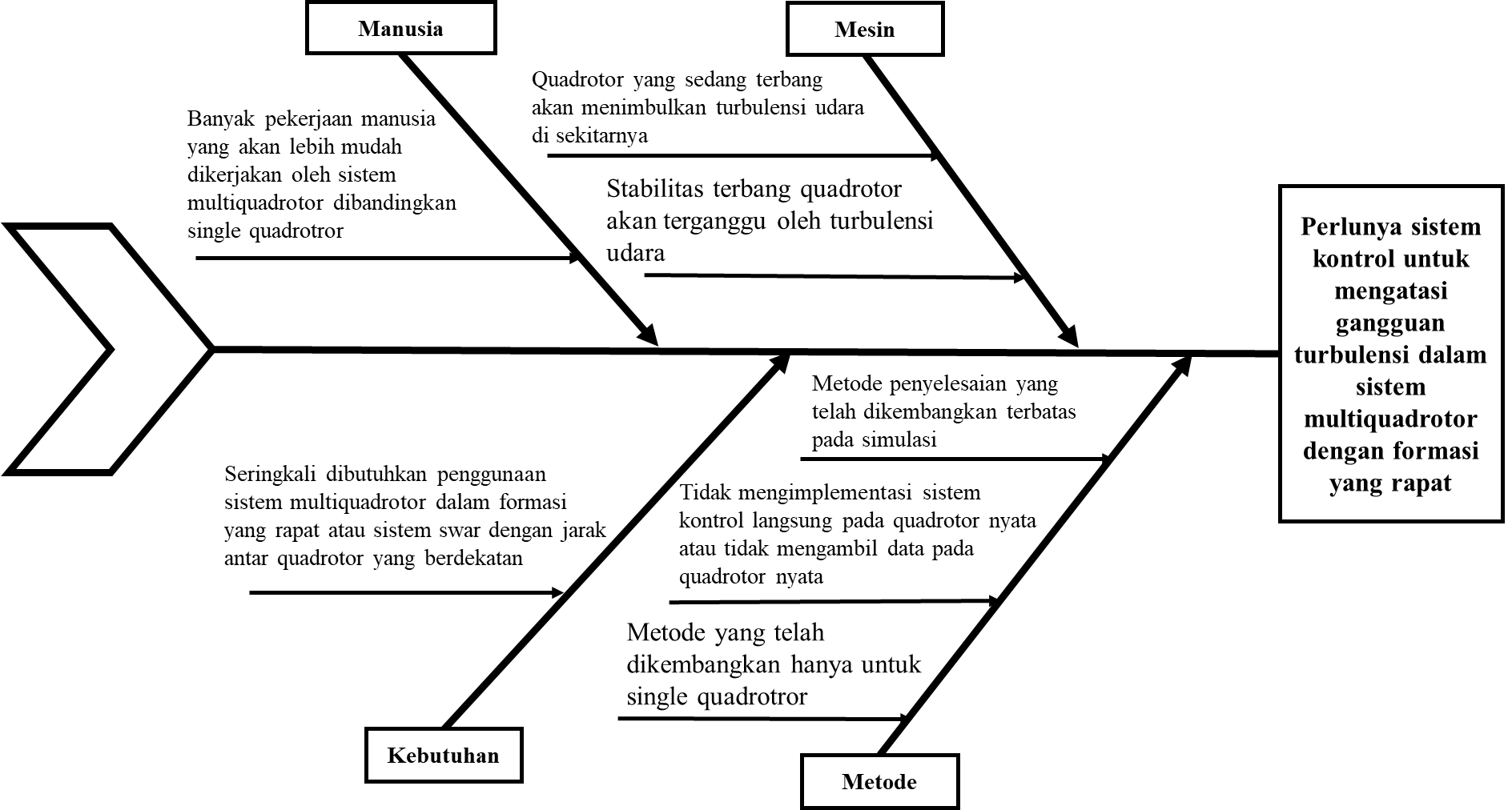
Penelitian mengenai kontrol *quadrotor* akan gangguan udara kini mulai dilakukan dengan menggunakan simulasi [10] . Salah satunya penelitian yang dilakukan oleh Dounia dkk (2020) yang memodelkan satu buah sistem pergerakan *quadrotor* dalam alat simulasi Simulink pada aplikasi MATLAB. Gangguan udara disimulasikan dengan *Dryden Wind Turbulence Model* pada *toolbox aeroblocks*. Blok tersebut akan menerima *input* parameter seperti ketinggian, kecepatan *quadrotor*, kecepatan udara, *Direction Cosine Matrix* (DCM), dan model turbulensi [11].

Metode tersebut dapat diaplikasikan pada simulasi dalam penelitian yang akan dilakukan. Untuk parameter-parameter *Dryden Wind Turbulence Model,* kita perlu melakukan karakterisasi turbulensi udara dari *quadrotor*. Sesuai dengan riset yang dilakukan oleh Abichandani dkk (2020) pengukuran pengaruh udara dapat dilakukan dengan menggunakan Anemometer [12]. Kontrol yang digunakan dalam simulasi tersebut adalah kontrol *backstepping-integral*. Kontrol tersebut telah terbukti dapat mengatur pergerakan sebuah *quadrotor* agar dapat mengatasi gangguan turbulensi udara [10].

Penelitian ini akan fokus pada mengatasi gangguan aerodinamika yang muncul akibat interaksi antar *quadrotor* dalam jarak dekat. Penelitian ini akan merancang model matematis yang memadai untuk pergerakan *quadrotor* dan gangguan udara yang dihasilkan *quadrotor* dalam kawanan. Berdasarkan model ini akan dirancang sistem kontrol menggunakan metode PID, LQR, *Backstepping Integral*, dan *Feed Forward Control.* Sistem kontrol ini dirancang melalui perangkat ‘simulink’ pada aplikasi MATLAB dan diimplementasikan pada tiga buah *quadrotor* Parrot AR *Drone* 2.0 Power Edition . Diharapkan hasil studi ini dapat memberikan kontribusi untuk peningkatan kinerja kontrol konfigurasi *multiquadrotor*.

## Permasalahan

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan, Pencarian akar masalah dilakukan dengan menggunakan analisis sebab-akibat (*fishbone diagram*), seperti pada Gambar 1.2.1 berikut.



Gambar 1.2.1 Diagram tulang ikan rumusan permasalahan

Berdasarkan analisis pada Gambar 1.2.1 di atas, kita dapat menyimpulkan permasalahan yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik gangguan yang muncul akibat interaksi antar *quadrotor* dalam jarak dekat ?
2. Bagaimana algoritma sistem kontrol yang memungkinkan *quadrotor* untuk tetap stabil ketika terbang dalam jarak yang dekat dengan mengompensasi gangguan yang muncul ?
3. Bagaimana memastikan kinerja sistem kontrol yang dikembangkan melalui simulasi dan eksperimen bekerja dengan baik dalam situasi dunia nyata ?

## Tujuan dan Sasaran

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan sistem kontrol kestabilan yang dapat memungkinkan *drone* dalam *swarm* untuk terbang dalam jarak yang sangat dekat satu sama lain tanpa mengalami gangguan yang signifikan. Sasaran yang ingin dicapai melalui pemenuhan tujuan tersebut adalah:

1. Menganalisis karakteristik gangguan yang muncul akibat interaksi antar *quadrotor* dalam jarak dekat.
2. Mengembangkan pemodelan sistem sesuai dengan karakteristik setiap *quadrotor* yang digunakan dalam *swarm quadrotor*.
3. Merancang algoritma kontrol yang efektif untuk mengkompensasi gangguan yang muncul, sehingga *quadrotor* dalam *swarm* dapat terbang dalam jarak yang sangat dekat satu sama lain tanpa mengalami gangguan yang signifikan.
4. Menguji dan memvalidasi sistem kontrol yang dikembangkan melalui simulasi dan eksperimen untuk memastikan kinerja yang baik dalam situasi dunia nyata.

## Batasan dan Asumsi

Batasan dan asumsi pada pelaksanaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. *Quadrotor* yang digunakan dalam *swarm quadrotor* Parrot AR *Quadrotor* 2.0 Power Edition sebanyak 3 buah.
2. Kondisi lingkungan dianggap stabil dan tidak berubah-ubah selama penerbangan *quadrotor*.
3. *Quadrotor* dalam *swarm quadrotor* akan memiliki sensor yang memadai untuk deteksi dan menghindari tabrakan.
4. *Quadrotor* dalam *swarm quadrotor* akan berkomunikasi secara terus-menerus untuk berkoordinasi.

## Sistematika

Laporan Kemajuan tugas akhir ini terdiri dari tiga bab dengan sistematika sebagai berikut.

Bab I Pendahuluan

Bab ini berisi penjelasan mengenai penelitian yang dilakukan, mulai dari latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian, lingkup permasalahan, asumsi-asumsi yang digunakan dan sistematika.

Bab II Metodologi dan Rencana Pelaksanaan

Bab ini berisi penjelasan alur metodologi yang digunakan dan perancangan penelitian yang terdiri dari lokasi pelaksanaan, alat dan bahan, jadwal pelaksanaan, dan biaya yang dibutuhkan.

Bab II Penutup

Bab ini berisi penutup Laporan Kemajuan tugas akhir dan harapan jika penelitian ini dilakukan.

BAB II  
STUDI LITERATUR

# PERSAMAAN, GAMBAR, DAN TABEL

## Sistem Dinamik *Quadrotor*

*Quadrotor* adalah salah satu jenis robot terbang dengan 4 motor. Kelebihan *quadrotor* ada pada kemampuan manuvernya yang memungkinkan untuk bergerak leluasa di udara. Pergerakan *quadrotor* dapat dikendalikan dengan kontrol manual menggunakan remote control atau dengan sebuah sistem kontrol otomatis. Pengendalian pergerakan *quadrotor* dengan sistem kontrol otomatis memerlukan sebuah dinamika yang menggambarkan karakter dari *quadrotor* atau dinamika *quadrotor*. Dinamika *quadrotor* berdasarkan penelitian Kucherov dkk. (2021) dapat diidentifikasi berdasarkan earth frame (EF) dan body frame (BF) seperti yang ditunjukkan Gambar II.1. EFadalah sistem posisi tetap (𝑋YZ) sedangkan BF adalah sistem posisi bergerak (𝑋’𝑌’𝑍’) yang berasal dari pusat gravitasi *quadrotor*. Variabel 𝜑, 𝜃, 𝜓 adalah sudut roll, pitch, dan yaw dalam EF.



Gambar 2.1.1 Dinamika pada *Quadrotor*

Persamaan untuk dinamika *quadrotor* pada ruang 3 dimensi dapat dituliskan dalam bentuk:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.1) |

adalah vektor linier, dan adalah vektor kecepatan sudut, adalah massa *quadrotor*, adalah matriks inersia dari objek yang di kontrol, adalah matriks identitas, adalah gaya resultan, adalah momen resultan yang bekerja pada pusat massa dari *quadrotor*.

Jika gaya dari luar diabaikan, maka gaya yang dihasilkan menentukan pergerakan *quadrotor* pada sumbu zdapat ditulis:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.2) |

Pada sistem koordinat Euler, orientasi *quadrotor* relatif terhadap sistem koordinat inersia XYZ dapat dituliskan sebagai matriks rotasi

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | (II.3) | |
|  | | (II.4) | |

Matriks pada persamaan (II.4) menggunakan notasi dan. Jika persamaan (II.3) dan (II.4) dikombinasikan maka dapat dihasilkan:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.5) |
|  | (II.6) |
|  | (II.7) |

Dimisalkan , , masing- masing adalah momen inersia *quadrotor* untuk sumbu X, Y, dan Z yang melalui pusat massanya. Kemudian adalah kecepatan sudut terhadap sumbu X, Y, dan Z. Jika gaya dari luar diabaikan, persamaan diferensial dari kecepatan sudut dapat dituliskan dalam bentuk:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.8) |
|  | (II.9) |
|  | (II.10) |

Persamaan (II.8) – (II.10) adalah persamaan dinamika Euler. Jika menggunakan kerja motor - maka persamaannya adalah:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.11) |
|  | (II.12) |
|  | (II.13) |

Pada persamaan (II.11) – (II.13) adalah jarak antara pusat massa *quadrotor* dan motor dengan , adalah inersia rotor, adalah gaya mekanik yang memberikan gerakan rotasi drone, ditulis pada persamaan:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.14) |
|  | (II.15) |
|  | (II.16) |
|  | (II.17) |

adalah faktor yang menghubungkan momen dengan kecepatan sudut dari motor ke pada persamaan (II.14) – (II.17). Mempertimbangkan identitas dari semua motor, lokasi yang simetris, dan struktur yang *rigid*, maka dapat ditentukan momen dan pada ketinggian tetap (sumbu Z) dalam persamaan (II.11) – (II.13) adalah:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.8) |

Dinamika rotasi dari *quadrotor* pada persamaan (II.11) – (II.13) dapat ditulis dalam bentuk:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.11) |
|  | (II.12) |
|  | (II.13) |

Jika diberikan kondisi dan momen diketahi, maka posisi dapat diketahui dengan melakukan 2 kali diferensial:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (II.13) |

Demikian juga dengan posisi.

## Arsitektur Komunikasi *Quadrotor*

Swarm *quadrotor* merujuk pada kelompok *quadrotor* yang bekerja secara kolektif dalam suatu sistem. *Quadrotor* dalam swarm berkomunikasi dan berkoordinasi untuk mencapai tujuan tertentu, meniru prinsip kerja kelompok serangga atau burung dalam alam. Protokol komunikasi berupa jaringan nirkabel pada swarm *quadrotor* mengatur pertukaran informasi antara *quadrotor* dalam suatu kelompok menggunakan teknologi jaringan nirkabel.

Secara umum, jaringan nirkabel didefinisikan sebagai media transmisi yang dapat beroperasi tanpa menggunakan kabel dalam suatu sistem komunikasi. Jenis jaringan ini lebih fleksibel dan sederhana dibandingkan jenis jaringan lainnya karena banyak pengguna dapat dengan mudah terhubung ke jaringan pada saat yang bersamaan. Jaringan nirkabel adalah jenis jaringan yang menggunakan komunikasi radio nirkabel untuk menghubungkan perangkat jaringan seperti router, komputer, server, dan banyak lainnya. Jaringan nirkabel diterapkan pada lapisan fisik, yang merupakan lapisan 1 dari model Open System Interconnection (OSI). OSI adalah sebuah model referensi untuk vendor atau developer agar pembuatan perangkat lunak memiliki sifat interpolasi. Selain lapisan fisik atau application layer, lapisan lain yang ada pada model OSI adalah presentation, session, transport, network, dan data-link.

Jaringan nirkabel memiliki Access point yang bekerja secara efektif dengan transceiver radio untuk mengembangkan koneksi yang memungkinkan sinyal radio ditransmisikan dan diterima. Sinyal ini dikenali oleh perangkat client, dan setelah mengonfirmasi saluran komunikasi akan menyediakan akses tambahan ke jaringan. Access point nirkabel mengadopsi standar komunikasi nirkabel umum, yaitu protokol IEEE 802.11. Aplikasi yang paling umum dari standar ini adalah WiFi, yang dikenal sebagai Wireless Fidelity (Nazir dkk., 2021).

### TCP/IP

TCP/IP adalah Transmission Control Protocol/Internet Protocol. TCP/IP merupakan jenis protokol yang memungkinkan komunikasi antar perangkat jaringan. Satu komputer dengan TCP/IP dapat berkomunikasi dengan komputer lain pada satu lingkup jaringan nirkabel. TCP/IP adalah protokol yang berada di lapisan transport pada model OSI. Pada protokol ini proses transfer data akan dilakukan dengan cara membagi data yang akan dikirimkan ke perangkat lain menjadi paket-paket kecil yang ditambahkan informasi untuk verifikasi data tersebut. Proses verifikasi pada saat penerimaan data merupakan salah satu keunggulan TCP/IP untuk memastikan bahwa data yang dikirimkan tidak mengalami kerusakan (Forouzan, 2005).

### UDP

UDP adalah User Datagram Protocol yang merupakan salah satu protokol dengan posisi lapisan yang sama dengan TCP/IP pada model OSI yaitu pada lapisan transport. Tidak seperti TCP/IP data yang dikirimkan melalui protokol UDP berupa datagram dan tidak memiliki informasi verifikasi sehingga memiliki kemungkinan data akan rusak saat pengiriman. Tetapi, protokol UDP memiliki keunggulan dalam ukuran data yang kecil saat data dikirimkan. Hal tersebut membuat proses pengiriman data pada protokol UDP memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan TCP/IP (AL-Dhief dkk., 2018).

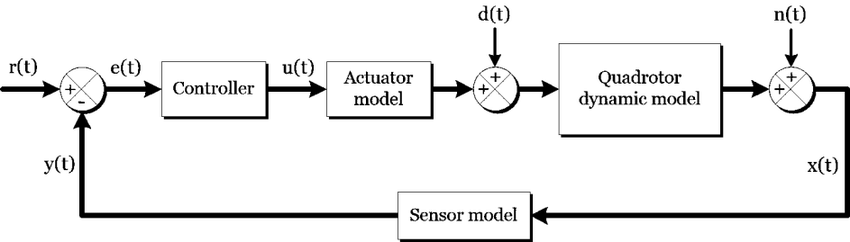
## Gangguan Turbulensi Udara

karakteristik dari gangguan turbulensi udara pada *quadrotor*. pengukuran dan analisis gangguan turbulensi udara pada *quadrotor* serta dampaknya bagaimana gangguan ini mempengaruhi pergerakan dan kinerja *quadrotor*.

## Sistem Kontrol pada *Quadrotor*

Sistem kontrol pada *quadrotor* adalah serangkaian elemen dan algoritma yang bertujuan mengatur dan menjaga kestabilan, posisi, dan gerakan *quadrotor*. Sistem ini memanfaatkan sensor dan aktuator untuk memonitor dan mengendalikan kondisi *quadrotor* secara real-time [1].

Cara kerja sistem kontrol pada *quadrotor* dibagi menjadi tiga elemen dasar yaitu elemen sensing (sensor), elemen algoritma kontrol, dan elemen aktuator. *Quadrotor* dilengkapi dengan sensor seperti gyroscopes, accelerometers, dan magnetometers untuk mengukur orientasi dan percepatan. Algoritma kontrol seperti PID (Proportional, Integral, Derivative) atau metode canggih seperti backstepping digunakan untuk menerjemahkan data sensor menjadi sinyal kontrol yang sesuai. Motor dan propeller pada *quadrotor* berperan sebagai aktuator yang menerapkan sinyal kontrol untuk menghasilkan gerakan yang diinginkan [2].



Gambar 2.4.1 Cara Kerja Sistem Kontrol Pada Umumnya

Dengan adanya sistem kontrol pada *quadrotor*, terdapat banyak keuntungan atau kelebihan. *Quadrotor* mampu menjaga kestabilan *quadrotor* dalam berbagai kondisi. Memungkinkan *quadrotor* untuk melakukan manuver dengan presisi. Dapat diterapkan pada sistem swarm untuk menjaga formasi. Namun tidak sedikit juga kekurangan sistem kontrol pada *quadrotor*. Beberapa metode kontrol memiliki kompleksitas yang tinggi. Beberapa sistem kontrol sensitif terhadap perubahan parameter dinamika.

Langkah-langkah secara umum yang dapat dilakukan untuk mengimplementasikan sistem kontrol pada *quadrotor* dibagi menjadi lima tahap. Tahap yang pertama adalah pemahaman sistem dinamika *quadrotor* dengan melakukan studi mendalam tentang karakteristik dinamika *quadrotor*. tahap kedua adalah pemilihan metode kontrol dengan memilih metode kontrol yang sesuai berdasarkan karakteristik sistem dan tujuan. Tahap keetiga adalah implementasi algoritma dengan menerapkan algoritma kontrol ke dalam mikrokontroler atau sistem komputasi *quadrotor*. Tahap yang keempat adalah verifikasi dan validasi dengan menguji sistem kontrol menggunakan simulasi dan eksperimen untuk memastikan kinerja yang baik. Tahap yang kelima adalah optimasi dan fine-tuning dengan melakukan optimasi parameter dan fine-tuning algoritma untuk meningkatkan kinerja.

### PID Control

Kontrol PID (Proporsional-Integral-Derivatif) adalah metode pengendalian yang digunakan dalam sistem otomatis untuk meminimalkan kesalahan antara output yang diinginkan dengan output aktual. Tujuan utama dari kontrol PID adalah menjaga sistem agar tetap stabil dan responsif terhadap perubahan lingkungan atau input yang diberikan. Kontrol ini dapat diterapkan dalam berbagai bidang, termasuk kendali proses industri, sistem kendaraan, dan robotika [1] [2].

Kelebihan dari kontrol PID terletak pada kemampuannya yang relatif mudah diimplementasikan dan dapat berfungsi baik pada sistem yang kompleks. Selain itu, PID memiliki karakter responsif yang baik terhadap perubahan input dan mampu bekerja stabil dalam berbagai kondisi. Meskipun demikian, terdapat kekurangan pada kontrol PID, di antaranya adalah rentan terhadap overshooting dan membutuhkan penyetelan parameter secara manual untuk mencapai kinerja optimal [1] [3].

Cara kerja kontrol PID dapat dijelaskan sebagai berikut. Elemen proporsional memberikan respons sebanding dengan kesalahan saat ini, elemen integral merespon terhadap kesalahan selama waktu, sementara elemen derivatif mengurangi overshooting dengan mengevaluasi laju perubahan kesalahan. Persamaan umum kontrol PID dapat dirumuskan sebagai

\( u(t) = K\_p e(t) + K\_i \int e(t) dt + K\_d \frac{de(t)}{dt} \)

dengan \(u(t)\) sebagai sinyal kontrol, \(e(t)\) sebagai kesalahan saat ini, dan \(K\_p\), \(K\_i\), dan \(K\_d\) sebagai konstanta kontrol proporsional, integral, dan derivatif [4].

Jenis-jenis kontrol PID melibatkan variasi dalam penyetelan parameter. Ada PID klasik dengan konstanta kontrol tetap, PID adaptif yang dapat menyesuaikan parameter secara otomatis, dan PID digital yang mengimplementasikan kontrol menggunakan pemrosesan digital. Langkah-langkah implementasi kontrol PID melibatkan identifikasi jenis sistem, penyetelan konstanta Kp, Ki dan Kd, simulasi dan uji kinerja, dan akhirnya implementasi pada hardware sistem fisik jika diperlukan [2] [5].

Referensi:

1. Åström, K. J., & Hägglund, T. (1995). PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. Instrument Society of America.

2. Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2007). Modern Control Systems. Pearson Education.

3. Ogata, K. (2010). Modern Control Engineering. Pearson.

4. Åström, K. J., & Wittenmark, B. (1995). Adaptive Control (2nd ed.). Addison-Wesley.

5. Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (2014). Feedback Control of Dynamic Systems (7th ed.). Pearson.

### Backstepping-Integral Control

Kontrol Backstepping-Integral adalah metode kontrol yang dikembangkan untuk mengatasi gangguan pada sistem nonlinier. Tujuannya adalah untuk mencapai pelacakan referensi yang baik dan mengompensasi gangguan dengan merancang kontrol berdasarkan prinsip gerak mundur (backstepping) dan integrasi kesalahan (integral). Kontrol ini diterapkan pada sistem yang kompleks dan nonlinier, seperti *quadrotor*, untuk meningkatkan kinerja dan ketahanan terhadap gangguan [1] [2].

Cara kerja kontrol Backstepping-Integral dapat dijelaskan sebagai berikut. Pertama, sistem dinamik aslinya dipecah menjadi beberapa subsistem virtual, dan kontrol dirancang untuk masing-masing subsistem ini secara berurutan. Selanjutnya, elemen integral digunakan untuk menangani kesalahan statis dan merancang kontrol yang mengompensasi kesalahan dinamis pada setiap langkahnya. Ini memungkinkan sistem untuk mencapai pelacakan referensi yang akurat dan responsif terhadap gangguan [3]. Rumus umum kontrol Backstepping-Integral mencakup unsur integrasi kesalahan dan kontrol berbasis backstepping untuk masing-masing subsistem virtual. Penggunaan integral membantu menghilangkan kesalahan statis, sedangkan prinsip backstepping membantu mengatasi kesalahan dinamis [4].

Kelebihan dari kontrol Backstepping-Integral terletak pada kemampuannya mengatasi sistem nonlinier dan merancang kontrol yang stabil dan akurat. Kontrol ini mampu menangani gangguan yang kompleks dan variabel, membuatnya cocok untuk aplikasi pada *quadrotor* yang rentan terhadap turbulensi udara dan perubahan lingkungan. Meskipun demikian, kontrol ini dapat menjadi rumit dalam implementasinya dan memerlukan pengetahuan mendalam tentang dinamika sistem [1] [3].

Referensi:

1. Slotine, J. J. E., & Li, W. (1991). Applied Nonlinear Control. Prentice-Hall.

2. Nonami, K. (2003). Advanced Backstepping Control of Flight Dynamics for an Unmanned Air Vehicle. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 26(2), 308–316.

3. Lewis, F. L., & Jagannathan, S. (2009). Optimal and Adaptive Control of Integrated Process Systems. Springer Science & Business Media.

4. Krstic, M., Kanellakopoulos, I., & Kokotovic, P. V. (1995). Nonlinear and Adaptive Control Design. John Wiley & Sons..

### Feed Forward Control

Kontrol Feed Forward adalah suatu metode pengendalian di mana tindakan pengendalian langsung diterapkan pada sistem berdasarkan prediksi sebelumnya mengenai gangguan atau perubahan yang akan terjadi. Tujuannya adalah untuk meminimalkan efek gangguan tanpa menunggu sistem memberikan respons terhadap gangguan tersebut. Dalam hal ini, tindakan kontrol dilakukan sebelum gangguan benar-benar memengaruhi sistem [1].

Cara kerja kontrol Feed Forward dapat dijelaskan sebagai berikut. Pertama, sistem dikarakterisasi dengan baik sehingga respon sistem terhadap gangguan dapat diantisipasi. Prediksi ini kemudian digunakan untuk menghasilkan tindakan kontrol yang diterapkan pada sistem. Misalnya, pada *quadrotor*, kontrol Feed Forward dapat digunakan untuk mengkompensasi gangguan turbulensi udara atau perubahan kecepatan angin yang diketahui dapat memengaruhi kinerja *quadrotor* [2]. Rumus atau formula kontrol Feed Forward dapat dinyatakan sebagai jumlah tertimbang dari gangguan yang diantisipasi [3].

Kelebihan dari kontrol Feed Forward terletak pada kemampuannya untuk mengatasi gangguan tanpa menunggu sistem memberikan respons. Hal ini membuatnya sangat responsif dan efektif dalam merespons perubahan kondisi seketika. Kelebihan lainnya adalah pengurangan beban pada sistem umpan balik (feedback), karena sebagian besar tugas dikendalikan sebelum terjadinya gangguan. Namun, kelemahan utamanya adalah kurangnya respons terhadap ketidakpastian dan variasi yang tidak dapat diprediksi dalam sistem [4].

Referensi:

1. Åström, K. J., & Murray, R. M. (2010). Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton University Press.

2. Grewal, M. S., & Andrews, A. P. (2001). Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB (2nd ed.). Wiley.

3. Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (2014). Feedback Control of Dynamic Systems (7th ed.). Pearson.

4. Åström, K. J., & Wittenmark, B. (1995). Adaptive Control. Addison-Wesley.

## Simulasi Menggunakan MATLAB/Simulink

MATLAB/Simulink adalah perangkat lunak pemrograman yang digunakan secara luas di berbagai industri, termasuk robotika dan kendaraan tanpa awak seperti *quadrotor*. MATLAB digunakan untuk analisis dan perhitungan numerik, sedangkan Simulink adalah alat pengembangan sistem dinamika dan kontrol. Tujuan penggunaan MATLAB/Simulink dalam simulasi *quadrotor* adalah untuk merancang, menguji, dan memvalidasi algoritma kontrol pada lingkungan yang aman dan efisien sebelum diimplementasikan pada *quadrotor* fisik. MATLAB/Simulink menyediakan platform yang kuat untuk pemodelan sistem dinamis, simulasi, dan analisis performa kontrol.

Kelebihan penggunaan MATLAB/Simulink dalam simulasi *quadrotor* adalah pemrograman mudah dan ramah pengguna. Simulink menyediakan antarmuka grafis untuk merancang dan memvisualisasikan model sistem kontrol secara intuitif. MATLAB memiliki banyak toolbox yang mendukung berbagai jenis analisis dan simulasi, termasuk kontrol, simulasi sistem dinamis, dan pengolahan sinyal. Mudah diintegrasikan dengan perangkat keras fisik melalui dukungan untuk perangkat keras eksternal. Kekurangan penggunaan MATLAB/Simulink dalam simulasi *quadrotor* adalah Untuk simulasi sistem yang sangat kompleks, MATLAB/Simulink mungkin kurang efisien dalam hal kecepatan eksekusi dibandingkan dengan bahasa pemrograman lainnya. Penggunaan komprehensif MATLAB/Simulink kadang-kadang memerlukan lisensi yang mahal.

Cara Kerja penggunaan MATLAB/Simulink dalam simulasi *quadrotor* dibagi menjadi empat tahap. Tahap yang pertama adalah pemoodelan *quadrotor* yang dilakukan dengan mendefinisikan parameter dinamis dan karakteristik fisiknya menggunakan blok-blok Simulink yang sesuai. Tahap kedua melakukan simulasi gangguan udara. Gangguan udara, seperti yang dihasilkan oleh model Turbulensi Angin Dryden, dapat diintegrasikan ke dalam model Simulink untuk mengevaluasi respons *quadrotor* terhadap kondisi lingkungan yang realistis. Tahap ketiga adalah melakukan desain kontrol. Algoritma kontrol, seperti PID atau Backstepping-Integral, dapat dirancang dan diimplementasikan dalam Simulink dengan menambahkan blok kontrol ke model sistem. Tahap yang terakhir adalah melakukan analisis performa. MATLAB/Simulink memungkinkan analisis performa sistem kontrol, seperti respons transien, stabilitas, dan kinerja sistem.

\*\*Referensi:\*\*

[1] K. F. Wakeman et al., "MATLAB/Simulink and LabVIEW for real-time control of a mobile robot," 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tokyo, Japan, 2013, pp. 1287-1292.

[2] M. Abdeldayem, "Quadcopter simulation and control made easy with MATLAB and Simulink," 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Hamburg, Germany, 2015, pp. 363-368.

[3] MathWorks. "Quadcopter Simulation and Control Made Easy with MATLAB and Simulink." [Online]. Available: https://www.mathworks.com/videos/quadcopter-simulation-and-control-made-easy-with-matlab-and-simulink-93385.html. [Accessed: 07-Dec-2023].

### Dryden Wind Turbulence Model

Model Turbulensi Angin Dryden adalah model matematis yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik turbulensi udara yang memengaruhi pesawat atau kendaraan udara, seperti *quadrotor*. Model ini dinamai sesuai dengan John C. Dryden, seorang insinyur penerbangan Amerika Serikat yang berkontribusi pada penelitian dinamika pesawat[1].

Model Turbulensi Angin Dryden dirancang untuk memodelkan variasi kecepatan angin dengan mempertimbangkan spektrum daya (power spectrum) dari fluktuasi kecepatan angin. Dengan demikian, tujuannya adalah untuk memberikan representasi yang akurat terhadap efek turbulensi udara yang dapat memengaruhi kinerja pesawat, terutama pada *quadrotor* yang sensitif terhadap perubahan kecepatan angin [2].

Kelebihan dari model ini terletak pada kemampuannya untuk memodelkan turbulensi udara dengan mempertimbangkan variasi frekuensi dan amplitudo fluktuasi kecepatan angin. Namun, kekurangannya mungkin terletak pada asumsi-asumsi tertentu yang digunakan dalam pembentukan model, yang mungkin tidak selalu sesuai dengan kondisi atmosfer sebenarnya [3].

Model Turbulensi Angin Dryden bekerja dengan merancang suatu spektrum daya yang menggambarkan fluktuasi kecepatan angin pada berbagai frekuensi. Dengan menggunakan spektrum daya ini, fluktuasi kecepatan angin dapat dihasilkan dan diaplikasikan pada sistem kontrol *quadrotor* selama simulasi. Model ini sering digunakan dalam simulasi untuk menguji dan mengembangkan algoritma kontrol yang dapat mengatasi dampak turbulensi udara [4].

[1] Tennekes, H., & Lumley, J. L. (1972). A First Course in Turbulence. MIT Press.

[2] Dalamagna, L. (2015). Atmospheric Turbulence and Its Measurement for Atmospheric Propagation. IOP Publishing.

[3] Mann, J. (1994). Wind field simulation. Probabilistic Engineering Mechanics, 9(3), 189-197.

[4] Bar-Shalom, Y., Li, X. R., & Kirubarajan, T. (2001). Estimation with Applications to Tracking and Navigation. Wiley.

BAB III  
METODOLOGI DAN KEMAJUAN

1. HASIL PENELITIAN

## Metodologi

Metodologi yang akan dilakukan untuk mencapai tujuan dari proyek tugas akhir ini dijelaskan melalui Gambar 3.1.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian.

A black background with white text

Description automatically generated

Gambar 3.1.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian

Berdasarkan Gambar 3.1.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian , dapat kita lihat bahwa dapat kita lihat bahwa langkah pertama yang perlu dilakukan adalah mencari literatur-literatur yang telah ada sebagai referensi terkait perancangan sistem kontrol yang optimal pada *quadrotor* untuk mengatasi pengaruh gangguan turbulensi udara. Berdasarkan Gambar 3.1.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian secara umum alur perancangan terdiri dari 3 tahap utama yaitu akuisisi dan analisis data, simulasi, dan implementasi.

### Akuisisi dan Analisis Data

A black and white background with circles and circles

Description automatically generated with medium confidence

Gambar 3.1.2 Skema akuisisi data karakteristik turbulensi udara

Pada tahap akuisisi dan analisis data, akan dilakukan dua proses pengukuran. Proses pengukuran yang pertama adalah pengukuran gangguan turbulensi udara yang dihasilkan tiap *quadrotor* pada variasi jarak radius dari *quadrotor*. sesuai pada **Error! Reference source not found.** di atas, proses pengambilan data dilakukan pada tiap *quadrotor* yang sedang terbang secara *steady* menggunakan sensor Anemometer. Data pengukuran divariasikan titik pengukuran pada beberapa radius dari *quadrotor* yang sedang terbang. Data hasil pengukuran tersebut akan dianalisis untuk mendapatkan karakteristik gangguan turbulensi udara yang muncul akibat interaksi antar *quadrotor* dalam jarak dekat.



Gambar 3.1.3 Karakteristik dinamik *quadrotor*

Proses pengukuran yang kedua adalah pengukuran respons dari tiap *quadrotor* atas *input* yang diberikan. Data hasil pengukuranrn tersebut akan dianalisis untuk menentukan karakteristik sistem dinamik dari setiap *quadrotor* yang akan digunakan. Berdasarkan pada **Error! Reference source not found.** di atas, karakteristik dinamik terbang dari sebuah *quadrotor* meliputi roll (θ), pitch (φ) and yaw (ψ). Sistem dinamik tersebut nantinya akan berguna untuk mengembangkan pemodelan sistem sesuai dengan karakteristik setiap *quadrotor* yang digunakan dalam *swarm quadrotor.* Kedua proses pengukuran ini menjadi penting sebelum tahap pembuatan kontrol dalam simulasi.

Berikan persamaan gerak *quadrotor*, tunjukkan pada bagian mana turbulensi udara mengganggu pergerakannya.

### Simulasi

Pada tahap yang kedua, yaitu tahap simulasi akan didesain pemodelan gangguan udara, pemodelan sistem, dan juga sistem kontrol yang akan coba diimplementasikan. Simulasi akan menggunakan paket perangkat lunak MATLAB yaitu Simulink. Berdasarkan data yang telah diperoleh dari tahap akuisisi dan analisis data, maka dapat dilakukan pemodelan gangguan dan pemodelan respon *quadrotor*.



Gambar 3.1.4 Skema kontrol pergerakan *quadrotor*

Perancangan sistem kontrol dilakukan sesuai diagram pada **Error! Reference source not found.** di atas. Sistem kontrol akan didesain menggunakan beberapa pilihan metode kontrol yang telah banyak dikembangkan. Pada akhir tahap simulasi, performa sistem kontrol dalam mengatasi gangguan udara akan didapatkan. Hasil performa tersebut, dapat digunakan dalam menentukan batas-batas jarak ideal antar *quadrotor* dalam skema *swarm quadrotor*.

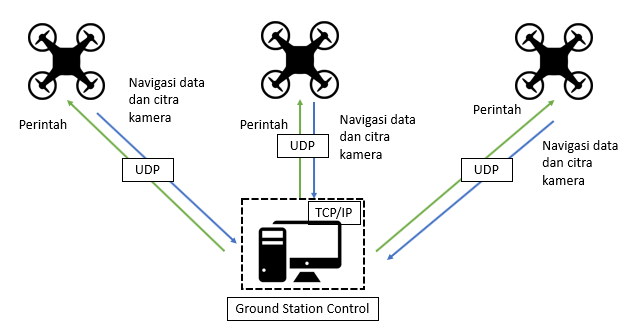
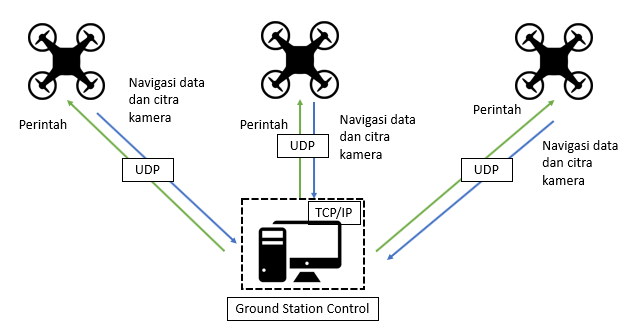
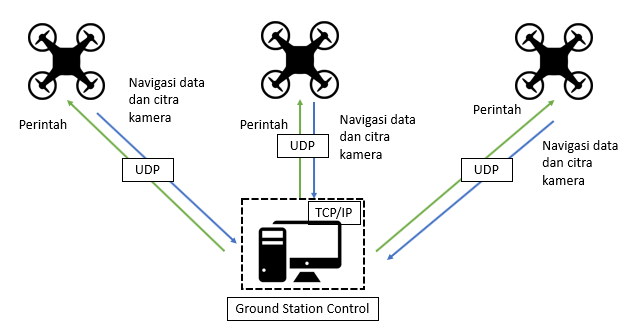
Buat illustrasi lagi untuk feed forward

Buat persamaan PID, Backstepping, Feed Forward Control

Buat arsitektur komunikasi *quadrotor*

### Implementasi dan Validasi

Tahap yang terakhir adalah implementasi dan validasi sistem kontrol yang dikembangkan melalui simulasi dan eksperimen untuk memastikan kinerja yang baik dalam situasi dunia nyata. Validasi akan digunakan dua buah cara, yaitu statis dan dinamis. Pada validasi statis, *quadrotor* akan terbang secara tunak dengan *altitude* yang seragam. Namun, pada validasi ini akan divariasikan jarak antar *quadrotor*. Dari proses tersebut akan didapatkan rentang jarak antar *quadrotor* yang membuat formasi *swarm* *quadrotor* akan tetap stabil.



Gambar 3.1.5 Skema Validasi performa implementasi sistem kontrol

Pada validasi dinamis, dapat dilihat sesuai pada **Error! Reference source not found.**, *swarm* *quadrotor* akan dijalankan pada rute lurus saja. Namun pada validasi ini akan coba divariasikan kecepatan gerak *swarm* *quadrotor*. Dari proses tersebut akan didapatkan *range* kecepatan yang membuat formasi *swarm* *quadrotor* akan tetap stabil. Rentang jarak antar *quadrotor* dan rentangkecepatan *swarm* *quadrotor* akan menjadi karakteristik sistem kontrol yang dirancang.

## Kemajuan

### Flowchart Pelaksanaan Tugas Akhir

Pada Gambar 3.2.1 ditampilkan bagian dari diagram alir proses pengerjaan tugas akhir yang dilakukan sejauh ini.

A black background with white text

Description automatically generated

Gambar 3.2.1 *Update* Diagram Alir Proses Pengerjaan Tugas Akhir

Berdasarkan gambar Gambar 3.2.1 di atas, dari tiga tahap besar proses pengerjaan tugas akhir, dilakukan tahap yangn pertama yaitu tahap Akuisisi dan Analisis Data. Pada tahap tersebut terdapat lima langkah yang harus dikerjakan. Pertama ada Set Up tiga buah *quadrotor* untuk dapat terbang dengan stabil. Langkah tersebut telah dilakukan dan akan dijelaskan lebih detail kemajuannya pada bagian Set up *Quadrotor* dan Medan Terbang di bawah.

Langkah kedua adalah pengukuran gangguan udara menggunakan anemometer pada variasi radius dari *quadrotor*. langkah tersebut telah dilakukan, namun baru dilakukan untuk satu buah *quadrotor* dan baru dilakukan beberapa variasi radius. Hal tersebut membuat langkah yang ketiga yaitu analisis karakteristik gangguan udara yang dihasilkan tiap *quadrotor* belum dapat dilakukan.

Langkah yang keempat adalah pengukuran respon pergerakan tiap *quadrotor* atas variasi input yang diberikan. Langkah tersebut telah dilakukan namun baru untuk satu buah *quadrotor* dan satu jenis arah terbang saja. Hal tersebut membuat langkah yang kelima yaitu analisis karakteristik sistem dinamik dari setiap *quadrotor* belum bisa dilakukan.

### Set up *Quadrotor* dan Medan Terbang

Sistem yang akan dikontrol pada tugas akhir ini adalah *Quadrotor* Parrot AR.Drone 2.0. Berdasarkan hasil penelusuran, *quadrotor* ini memiliki empat mesin motor brushless 35.000rpm, daya 15W. *Quadrotor* ini memiliki baterai lithium polymer battery 3 sel, 11,1volt, 1000 mAh, dengan discharge capacity 10C dan waktu charging 90 menit. *Quadrotor* ini juga memiliki perangkat input yaitu SB 2.0 high speed, dan memiliki dua buah kamera. Kamera horizontal HD 720p 30fps dengan sensor CMOS, lensa lebar 90 derajat. Kamera vertikal QVGA 360p 30fps. Pada Gambar 3.2.2 di bawah diberikan detail bentuk dari *quadrotor*. Berdasarkan gambar tersebut, pada gambar di sebelah kanan merupakan pengaturan *quadrotor* ketika terbang di medan outdoor, sedangkan sesuai pada gambar di sebelah kiri, merupakan pengaturan *quadrotor* ketika terbang di medan indoor yaitu diberikan pengaman.

A black drone with four propellers

Description automatically generated

Gambar 3.2.2 *Quadrotor* Parrot AR.Drone 2.0

Pada langkah ini perlu dilakukan identifikasi fisik dari setiap *quadrotor* yang akan digunakan. Pada penyedia fasilitas tugas akhir ini, yaitu Laboratorium CITA, memiliki beberapa persediaan *Quadrotor* Parrot AR.Drone 2.0. Namum tidak semua *quadrotor* yang ada masih memiliki kondisi yang optimal untuk digunakan. Karena itu dilakukan pemeriksaan kelengkapan komponen dan performa dari setiap *quadrotor*. kelengkapan komponen dan performa dari setiap *quadrotor* digambarkan pada Gambar 3.2.2 di bawah ini.



Gambar 3.2.3 Komponen pada *quadrotor* Parrot AR.Drone 2.0

Pemeriksaan dilakukan meliputi uji koneksi dengan *quadrotor*. hal tersebut dilakukan untuk melihat apakah *quadrotor* masih dapat dikontrol atau tidak. Dilakukan uji mesin untuk melihat apakah mesin rotor masih dapat berputar dengan baik atau tidak. Dilakukan uji sensor ultrasonik untuk melihat apakah quadrotror masih dapat membaca ketinggian dengan baik atau tidak. Dilakukan uji ketahanan penggunaan baterai *quadrotor* untuk terbang, setelah dilakukan pengisian baterai. Dilakukan uji kamera pada *quadrotor* apakah masih dapat menangkap citra dan mengirimkannya.

Berdasarkan hasil pemeriksaan pada delapan set *quadrotor*, didapatkan bahwa hampir semua baterai *quadrotor* sudah tidak layak digunakan lagi, dikarenakan ketahanannya yang sangat mudah habis ketika digunakan menyuplai daya *quadrotor* untuk terbang. Didapatkan rata-rata lama terbang dengan baterai yang ada hanya sekitar 1-4 menit saja. Hampir semua propeller pada *quadrotor* juga mengalami deformasi atau perubahan bentuk sehingga memengaruhi performa *quadrotor* ketika terbang. Selain itu juga terdapat banyak set *quadrotor* yang mengalami kerusakan pada sensor dan juga kamera. Karena untuk tugas akhir ini hanya diperlukan tiga buah *quadrotor*, dipilih tiga buah *quadrotor* yang dianggap memiliki kelengkapan dan performa yang paling baik, yaitu *quadrotor* dengan label seri 018167, label seri 221751, dan label seri 018458.

Oleh karena itu dilakukan pembelian bagian *quadrotor* yang perlu diganti meliputi baterai LiPo 1500 mAh 11.1volt 3S, charger baterai LiPo B3 3S, konektor baterai LiPo, dan set propeller. Proses pembelian meliputi survei pasar online melalui toko belanja online maupun secara offline dengan mengunjungi toko yang ada disekitar Kota Bandung, kemudian mencari komponen dengan spesifikasi yang paling cocok untuk digunakan serta cara dan lama pengiriman komponen yang dibeli. Namun dalam prosesnya, terdapat kendala saat dalam proses pembelian barang. Sparepart *quadrotor*, sudah sangat jarang dijual, sehingga memakan waktu yang lama dalam pencarian barang.

Sembari menunggu pembelian komponen *quadrotor*, dilakukan juga set up medan terbang. Uji terbang *quadrotor* dilakukan di salah satu ruangan laboratorium CITA sebagai tempat pengujian. Berdasarkan hasil pengukuran, dimensi ruangan berukuran 5.9m x 4.7m seperti yang ditunjukan pada Gambar 3.2.4 di bawah ini.

A grey rectangular object with text and numbers

Description automatically generated

Gambar 3.2.4 Medan terbang *quadrotor*

### Konsultasi dengan Alumni

Objek utama yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *quadrotor*. objek tersebut sebelumnya belum pernah dipelajari, oleh karena itu dibutuhkan waktu lebih untuk memahami sistem dan cara kerja dari objek tersebut. Salah satu langkah yang dilakukan adalah dengan berkonsultasi dengan alumni. Dilakukan konsultasi dengan alumni yaitu Giga Verian Pratama (23819304) yang sebelumnya pernah melakukan thesis menggunakan *quadrotor* yang sama.

Pada sesi konsultasi tersebut dibahas mengenai teknis penggunaan *quadrotor*, karakteristik *quadrotor* secara kasar, hal-hal yang penting diketahui mengenai *quadrotor* dan program yang dapat digunakan. Didapatkan bahwa memang beberapa *quadrotor* yang ada memiliki kerusakan pada sebagain komponennya sehingga perlu dilakukan pemilihan *quadrotor* dengan kondisi terbaik. Quadrotor parrot AR.Drone 2.0 memiliki dua buah sarana komunikasi yang digunakan untuk fungsi yang berbeda. Untuk kontrol quadrotor menggunakan komunikasi TCP/IP, namun untuk pengiriman NavData dan MetaData digunakan protokol komunikasi UDP.

Quadrotor dapat terbang normalnya selama 10-12 menit. Performa quadrotor yang sebaiknya diambil untuk proses karakterisasi sistem adalah ketika baterai yang baru diisi penuh, kemudian digunakan untuk quadrotor terbang tanpa melakukan landing lagi kecuali proses selesai, karena pada saat tersebut performa terbang yang diberikan quadrotor akan maksimal. Bila quadrotor dengan baterai yang baru diisi dilakukann take off kemudian landing kembali dan ketika dilakukan take off lagi karena baterai memang masih memiliki daya, namun performa terbang yang dihasilkan oleh quadrotor tidak sebaik saat take off yang pertama.

Untuk pemrograman, dahulu alumni telah mencoba beberapa library yang dapat digunakan untuk mengontrol quadrotor parrot AR.Drone 2.0 dalam bahasa Python. Didapatkan library yang terbaik untuk digunakan adalah PyArDrone, karena memiliki command yang lengkap untuk digunakan. Alumni memberikan source code yang digunakan dalam proyek thesis nya dahulu dalam bentuk repository Github seperti pada Gambar 3.2.5 di bawah ini.

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Gambar 3.2.5 Repository github source code alumni untuk pemrograman quadrotor

### Set Up Aplikasi, Library dan Pemrograman

dilakukan untuk mencapai tujuan dari proyek tugas akhir ini.........................

### Uji Terbang

dilakukan untuk mencapai tujuan dari proyek tugas akhir ini.........................

BAB IV  
RENCANA SELANJUTNYA DAN PENUTUP

1. HASIL PENELITIAN

## Rencana Selanjutnya

Metodologi yang akan dilakukan untuk mencapai tujuan dari proyek tugas akhir ini dijelaskan melalui

akhir. Penulis berharap Laporan Kemajuan ini dapat diterima, sehingga dapat berlanjut menjadi tugas akhir.

## Penutup

Demikian Laporan Kemajuan penelitian tugas akhir dengan judul “Perancangan Sistem Kontrol Pergerakan Untuk Mengatasi Pengaruh Turbulensi Udara Dalam Formasi Multi*quadrotor*” telah ditulis dan disusun dengan sebaik- baiknya. Dengan demikian, Laporan Kemajuan ini diharapkan dapat memberikan gambaran terkait pendahuluan yang berisi latar belakang, rumusan masalah, hingga metode penelitian ditulis berdasarkan studi literatur yang sudah dilakukan oleh penulis dari beberapa jurnal, tugas akhir dan tesis. Laporan Kemajuan ini pun diharapkan dapat menjelaskan terkait metodologi dan metode yang dilakukan pada penelitian tugas akhir. Penulis berharap Laporan Kemajuan ini dapat diterima, sehingga dapat berlanjut menjadi tugas akhir.

DAFTAR PUSTAKA

[1] K. Martin, B. Stefan, Y. Kaloyan, C. Denis, Kambushev, and C. Nayden, “Influence of atmospheric turbulence on the control of flying robotics systems,” 2019.

[2] H. H. Hady, M. N. Elya, A. B. Azrena, and S. N. Makhtar, “Development of *Quadrotor* Control under Wind Disturbance,” Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/ISMSIT52890.2021.9604649.

[3] P. Aleix, T. L. Brett, and P. H. Jonathan, “Dynamic Landing of an Autonomous *Quadrotor* on a Moving Platform in Turbulent Wind Conditions,” Paris, Perancis, Aug. 2020.

[4] G. Valerian, “Kontrol Formasi *Quadrotor* Menggunakan Metode Cyclic Leader Follower SFM Sebagai Media Pelacakan Lokasi Tesis,” Bandung, 2022.

[5] S. R. Nekoo, J. A. Acosta, G. Heredia, and A. Ollero, “Soft-Landing of Multi-Rotor *Drone*s using a Robust Nonlinear Control and Wind Modeling,” in *2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2021, pp. 1070–1079. doi: 10.1109/ICUAS51884.2021.9476763.

[6] G. Regula and B. Lantos, “Formation Control of a Large Group of UAVs with Safe Path Planning,” Budapest, 2013.

[7] W. Zhikai, H. Deqing, H. Tianpeng, and Q. Na, “Active disturbance rejection control for a *quadrotor* UAV,” Chengdu, Nov. 2020.

[8] F. Mukhlish, E. Ekawati, M. Fakhruroji, and I. A. Prakosa, “Compensating Wind Disturbance on Gesture Commanded *Quadrotor*s Flight,” 2015.

[9] M. J. Kamran, D. Hazry, S. A. Faiz, M. T. Hassan, A. W. Faizan, and Hussain, “*Altitude* and Horizontal Motion Control of *Quadrotor* UAV in the Presence of Air Turbulence,” Dec. 2013.

[10] M. Dounia, B. Z. Abdeslem, and H. Ramdane, “Trajectory Tracking *Performance* with two Nonlinear Controllers of *Quadrotor* under Wind Effect,” in *Proceedings of the International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies, IC\_ASET 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020, pp. 50–55. doi: 10.1109/IC\_ASET49463.2020.9318319.

[11] MathWorks, “*Dryden Wind Turbulence Model* (Continuous),” https://www.mathworks.com/help/aeroblks/drydenwindturbulencemodelcontinuous.html.

[12] P. Abichandani, D. Lobo, G. Ford, D. Bucci, and M. Kam, “Wind Measurement and Simulation Techniques in Multi-Rotor Small Unmanned Aerial Vehicles,” *IEEE Access*, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977693.