

TUGAS AKHIR - TM234802

ANALISIS KECEPATAN ROTOR PADA *MULTI-BICOPTER AERIAL CABLE TOWED SYSTEM (ACTS)*

AHMAD WAHYU RAMDANI

NRP 5007211138

Dosen Pembimbing

Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc

NIP 198611162020122012

Program Studi Sarjana Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025



TUGAS AKHIR - TM234802

ANALISIS KECEPATAN ROTOR PADA MULTI-BICOPTER *AERIAL CABLE TOWED SYSTEM* (ACTS)

AHMAD WAHYU RAMDANI

NRP 5007211138

Dosen Pembimbing

Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc, Ph.D

NIP 198611162020122012

Program Studi Sarjana Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025



FINAL PROJECT - TM184835

ANALYSIS OF ROTOR SPEED FOR MULTI-BICOPTER AERIAL CABLE TOWED SYSTEM (ACTS)

AHMAD WAHYU RAMDANI

NRP 5007211138

Advisor

Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc, Ph.D

NIP 198611162020122012

Study Program Bachelor of Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and System Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KECEPATAN ROTOR PADA MULTI-BICOPTER AERIAL CABLE TOWED SYSTEM (ACTS)

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana pada
Program Studi S-1 Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **AHMAD WAHYU RAMDANI**

NRP. 5007211138

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc
NIP 198611162020122012
2. Dr. Eng. Unggul Wasiwitomo, S.T., M.Eng.Sc.,
IPM., A.Eng.
NIP 197805102001121001
3. Ir. Suwarmin, PE., MT
NIP 196103141987011001
4. Ir. Mohammad Khoirul Effendi, ST, MSc.Eng,
PhD, IPM, AEng
NIP 198204142010121001

Pembimbing

Penguji

Penguji

Penguji

SURABAYA

Januari, 2026

APPROVAL SHEET

ANALYSIS OF ROTOR SPEED FOR MULTI-BICOPTER AERIAL CABLE TOWED SYSTEM (ACTS)

FINAL PROJECT

Proposed to fulfill one of the requirements
To obtain a Bachelor's Degree of Engineering In
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **AHMAD WAHYU RAMDANI**

NRP. 5007211138

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP 198611162020122012
2. Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng.Sc., IPM., A.Eng.
NIP 197805102001121001
3. Ir. Suwarmin, PE., M.T.
NIP 196103141987011001
4. Ir. Mohammad Khoirul Effendi, S.T., MSc.Eng., Ph.D., IPM.,
A.Eng.
NIP 198204142010121001

Advisor

Examiner

Examiner

Examiner

SURABAYA

January, 2026

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Ahmad Wahyu Ramdani /
5007211138
Program studi : TEKNIK MESIN
Dosen Pembimbing / NIP : Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D /
198611162020122012

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS KECEPATAN ROTOR PADA *MULTI-BICOPTER AERIAL CABLE TOWED SYSTEM (ACTS)*” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

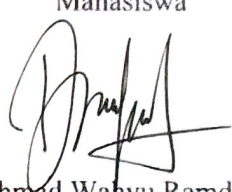
Surabaya, 29 Januari 2026

Mengetahui
Dosen Pembimbing



Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D
NIP. 198611162020122012

Mahasiswa



Ahmad Wahyu Ramdani
NRP. 5007211138

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of Student / NRP : Ahmad Wahyu Ramdani /
5007211138
Departement : Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D /
198611162020122012

hereby declare that the Final Project with the title of "ANALYSIS OF ROTOR SPEED FOR MULTI-BICOPTER AERIAL CABLE TOWED SYSTEM (ACTS)" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29 Januari 2026

Acknowledged

Advisor

Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D
NIP. 198611162020122012



Student

Ahmad Wahyu Ramdani
NRP. 5007211138

ABSTRAK

ANALISIS KECEPATAN ROTOR PADA MULTI-BICOPTER AERIAL CABLE TOWED SYSTEM (ACTS)

Nama Mahasiswa / NRP : Ahmad Wahyu Ramdani / 5007211138
Departemen : Teknik Mesin FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc.

Abstrak

Aerial Cable Towed System (ACTS) merupakan suatu sistem manipulator yang terdiri dari satu atau lebih *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) yang terhubung ke muatan menggunakan kabel. Pada umumnya, *Aerial Cable Towed System* (ACTS) menggunakan konfigurasi UAV berupa quadcopter, tetapi pada penelitian ini menggunakan konfigurasi 3 *bicopter* yang terhubung ke sebuah muatan. *Bicopter* adalah salah satu varian UAV yang menggunakan dua buah *rotor* dengan susunan paralel statis dan dilengkapi dengan mekanisme *tilt-rotor*. Mekanisme *tilt-rotor* (*tilting mechanism*) merupakan salah satu konfigurasi dari aktuator yang menghasilkan UAV dengan aktuasi penuh, memungkinkan kontrol independen terhadap gerak translasi dan rotasi. *Quadcopter* tidak memiliki mekanisme tilt-rotor ini, sedangkan *bicopter* memilikinya dikarenakan *bicopter* hanya memiliki dua buah rotor saja, sehingga untuk menjaga keseimbangan dan melakukan pergerakan yang fleksibel dibutuhkan sistem yang dapat mengatur kemiringan sudut rotornya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mencari kecepatan dan kemiringan dari masing-masing rotor dari *bicopter*. Kecepatan dari masing-masing rotor ini sangat berpengaruh terhadap stabilitas dari ACTS, dapat menghemat daya dikarenakan kecepatan rotor yang berlebihan dan kontrol *thrust* yang diperlukan untuk mengikuti trajektori yang telah ditentukan.

Kata kunci: *Aerial Cable Towed System, Bicopter, UAV*

ABSTRACT

ANALYSIS OF ROTOR SPEED FOR MULTI-BICOPTER AERIAL CABLE TOWED SYSTEM (ACTS)

Student Name / NRP : Ahmad Wahyu Ramdani / 5007211138
Department : Teknik Mesin FTIRS - ITS
Advisor : Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc.

Abstract

The Aerial Cable Towed System (ACTS) is a manipulator system consisting of one or more Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) connected to a payload using cables. Generally, the Aerial Cable Towed System (ACTS) uses a quadcopter UAV configuration, but this research employs a configuration of 3 bicopters connected to a single payload. A bicopter is a variant of UAV that utilizes two rotors in a static parallel arrangement and is equipped with a tilt-rotor mechanism. The tilt-rotor mechanism (tilting mechanism) is one of the actuator configurations that produces a fully actuated UAV, enabling independent control of translational and rotational motion. Quadcopters do not have this tilt-rotor mechanism, whereas bicopters do because they only have two rotors, thus requiring a system that can adjust the tilt angle of their rotors to maintain balance and achieve flexible movement. This research aims to analyze and determine the speed and tilt angle of each bicopter's rotor. The speed of each rotor significantly influences the stability of the ACTS, as it can optimize power consumption by avoiding excessive rotor speed and ensuring the necessary thrust control to follow the predetermined trajectory.

Keywords: *Aerial Cable Towed System, Bicopter, UAV*

KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puji syukur ke Hadirat Allah SWT atas segala Rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul “ANALISIS KECEPATAN ROTOR PADA AERIAL CABLE TOWED SYSTEM (ACTS)” sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi pada Program Studi Teknik Mesin. Penulis menyadari bahwa terselesaikannya laporan ini tidak lepas dari bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Keluarga penulis, Bapak Suhar, Ibu Niti, dan kedua adikku yang telah memberikan doa, dukungan moral, dan dukungan material di setiap proses pengerjaan tugas akhir.
2. Ibu Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing penulis yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing selama mengerjakan tugas akhir dan membagikan banyak ilmunya kepada penulis.
3. Teman-teman Laboratorium Rekayasa Sistem Kontrol yang telah menjadi rekan dalam berbagi pengalaman, saling mendukung, serta berjuang bersama dalam menjalankan program-program dan menyelesaikan tugas akhir di laboratorium ini.
4. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu oleh penulis.

Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca serta dapat menjadi dasar untuk pengembangan lebih lanjut guna menambah nilai kebermanfaatannya di masa mendatang.

Surabaya, 29 Januari 2026

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
APPROVAL SHEET	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
STATEMENT OF ORIGINALITY	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Manfaat	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	4
2.1.1 <i>Cooperative Manipulation and Transportation with Aerial Robots</i>	4
2.1.2 <i>Wrench Analysis of Cable-Suspended Parallel Robots Actuated by Aerial Robot UAV's</i>	4
2.1.3 <i>Control and Configuration Planning of an Aerial Cable Towed System</i>	5
2.2 <i>Aerial Cable Towed System (ACTS)</i>	6
2.3 Parameterisasi ACTS	7
2.4 Kondisi Keseimbangan ACTS	8
2.4.1 <i>Platform</i>	8
2.4.2 <i>Quadrotors</i>	8
2.5 <i>Bicopter</i>	9
2.6 Tilt-Rotor Mechanism	10
2.7 <i>Dynamic Model of Bicopter</i>	11
2.7.1 <i>Kinematics</i>	11
2.7.2 <i>Moment and Thrust Forces</i>	12
2.7.3 <i>Equation of Motion</i>	12
2.8 <i>Bicopter Movement Attitude</i>	13

2.9	Singular Value Decomposition	15
BAB 3	METODOLOGI.....	17
3.1	Skema Tahapan Penelitian.....	17
3.2	Analisis Dinamika dan Kinematika	17
3.2.1	Trajektori ACTS	17
3.2.2	Desain dan Konfigurasi ACTS	18
3.2.3	Parameterisasi.....	20
3.2.4	Thrust Force & Moment	20
3.2.5	Matriks Rotasi.....	21
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	23
4.1	Pemodelan Multi-Bicopter ACTS dan Formulasi SVD.....	23
4.1.1	Pemodelan Kinematika dan Dinamika Sistem Multi-Bicopter ACTS	23
4.1.2	Singular Value Decomposition.....	27
4.1.3	Mencari Nilai Kecepatan dan Kemiringan Rotor	28
4.2	Analisis Quasi-Static pada Multi-Bicopter ACTS	29
4.2.1	Kecepatan Sudut Rotor pada Kondisi <i>Quasi-Static</i>	29
4.2.2	Kemiringan Sudut Rotor pada Kondisi <i>Quasi-Static</i>	33
4.3	Analisis Quasi-Dynamic pada Multi-Bicopter ACTS	36
4.3.1	Kecepatan Sudut Rotor pada Kondisi Quasi-Dynamic	36
4.3.2	Kemiringan Sudut Rotor pada Kondisi Quasi-Dynamic	40
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	44
5.1	Kesimpulan	44
5.2	Saran	44
	DAFTAR PUSTAKA	46
	LAMPIRAN.....	48
	Lampiran 1. Tabel Sudut <i>Roll</i> dan <i>Pitch</i> pada Trajektori <i>Quasi-Static</i> (dari penelitian terdahulu)	48
	Lampiran 2. Tabel Sudut <i>Roll</i> dan <i>Pitch</i> pada Trajektori <i>Quasi-Dinamic</i> (dari penelitian terdahulu)	49
	Lampiran 3. Tabel Tegangan Kabel Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori <i>Quasi-Static</i> pada beban 1.5 kg	50
	Lampiran 4. Tabel Tegangan Kabel Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori <i>Quasi-Static</i> pada beban 2 kg	52
	Lampiran 5. Tabel Tegangan Kabel Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori <i>Quasi-Static</i> pada beban 2.5 kg	53
	Lampiran 6. Tabel Tegangan Kabel Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori <i>Quasi-Dinamic</i> pada beban 1.5 kg	55
	Lampiran 7. Tabel Tegangan Kabel Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori <i>Quasi-Dinamic</i> pada beban 2 kg	56

Lampiran 8. Tabel Tegangan Kabel Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori <i>Quasi-Dinamic</i> pada beban 2 kg	57
Lampiran 9. Tabel Kecepatan dan Percepatan Sudut Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori <i>Quasi-Static</i> pada beban 1.5 kg.....	59
Lampiran 10. Tabel Kecepatan dan Percepatan Sudut Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori <i>Quasi-Static</i> pada beban 2 kg.....	60
Lampiran 11. Tabel Kecepatan dan Percepatan Sudut Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori <i>Quasi-Static</i> pada beban 2.5 kg.....	61
Lampiran 12. Tabel Kecepatan dan Percepatan Sudut Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori <i>Quasi-Dinamic</i> pada beban 1.5 kg.....	63
Lampiran 13. Tabel Kecepatan dan Percepatan Sudut Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori <i>Quasi-Dinamic</i> pada beban 2 kg.....	64
Lampiran 14. Tabel Kecepatan dan Percepatan Sudut Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori <i>Quasi-Dinamic</i> pada beban 2.5 kg.....	66
Lampiran 15. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut ωR dan ωL Bicopter pada Trajektori <i>Quasi-Static</i> dengan beban 1.5 kg.....	67
Lampiran 16. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut ωR dan ωL Bicopter pada Trajektori <i>Quasi-Static</i> dengan beban 2 kg.....	68
Lampiran 17. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut ωR dan ωL Bicopter pada Trajektori <i>Quasi-Static</i> dengan beban 2.5 kg.....	70
Lampiran 18. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut λR dan λL Bicopter pada Trajektori <i>Quasi-Static</i> dengan beban 1.5 kg.....	71
Lampiran 19. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut λR dan λL Bicopter pada Trajektori <i>Quasi-Static</i> dengan beban 2 kg.....	73
Lampiran 20. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut λR dan λL Bicopter pada Trajektori <i>Quasi-Static</i> dengan beban 2.5 kg.....	74
Lampiran 21. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut ωR dan ωL Bicopter pada Trajektori <i>Quasi-dinamic</i> dengan beban 1.5 kg.....	76
Lampiran 22. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut ωR dan ωL Bicopter pada Trajektori <i>Quasi-dinamic</i> dengan beban 2 kg.....	77
Lampiran 23. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut ωR dan ωL Bicopter pada Trajektori <i>Quasi-dinamic</i> dengan beban 2.5 kg.....	78
Lampiran 24. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut λR dan λL Bicopter pada Trajektori <i>Quasi-Static</i> dengan beban 1.5 kg.....	80
Lampiran 25. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut λR dan λL Bicopter pada Trajektori <i>Quasi-Static</i> dengan beban 2 kg.....	81
Lampiran 26. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut λR dan λL Bicopter pada Trajektori <i>Quasi-Static</i> dengan beban 2.5 kg.....	82
BIODATA PENULIS	84

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Multiple Aerial Robot.....	4
Gambar 2.2	Wrench Analysis pada Aerial Cable Towed System.....	5
Gambar 2.3	Capacity Margin ATCS dengan berbagai variasi massa payload	6
Gambar 2.4	Prototype ACTS	6
Gambar 2.5	Parameter <i>Aerial Cable Towed System</i>	7
Gambar 2.6	<i>Free Body Diagram</i> dari Platform dan <i>ith Quadrotor</i>	8
Gambar 2.7	<i>Motion Mechanism of Bicopter</i>	10
Gambar 2.8	<i>Tilt-Rotor Mechanism</i>	11
Gambar 2.9	Body and Inertia Reference of the BI-Copter.....	11
Gambar 2.10	<i>Body Coordinate System and Inertial Coordinate System.</i>	13
Gambar 2.11	Bi-copter Movement Attitude (Pitch).....	14
Gambar 2.12	Bi-copter Movement Attitude (Roll)	14
Gambar 2.13	Bi-copter movement altitude	14
Gambar 2.14	Bi-copter movement heading (z-axis)	15
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	17
Gambar 3.2	Tampak Atas Trajektori ACTS.....	18
Gambar 3.3	Skema Konfigurasi ACTS tampak atas.....	19
Gambar 3.4	Skema Konfigurasi ACTS tampak perspektif	19
Gambar 3.5	Komponen gaya dorong <i>FR</i> dan <i>FL</i> , serta momen pada <i>bicopter</i>	21
Gambar 3.6	Rotasi <i>Eular Angles</i> terhadap Sumbu <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> dan <i>Yaw</i>	21

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter ACTS	20
Tabel 4.1 Parameter Model Bicopter.....	23

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Aerial Cable Towed System (ACTS) merupakan suatu sistem manipulator yang terdiri dari satu atau lebih *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) yang terhubung ke muatan menggunakan kabel. ACTS ini dikembangkan sebagai bentuk lanjutan dari teknologi *Cable Drive Parallel Robot* (CDPR). (Chriette, et al., 2020) UAV dibagi menjadi beberapa jenis berdasarkan ukurannya yaitu UAV berukuran besar, menengah dan kecil. Pada umumnya UAV berukuran kecil digunakan dalam penelitian akademik dan aplikasi di bidang sipil. UAV yang berukuran kecil lebih menarik dikarenakan memiliki harga yang murah dan memiliki manuver terbang yang tinggi. (Uddin, et al., 2021) ATCS juga pada umumnya menggunakan jenis UAV dengan empat buah *propeller* sebagai penggerak utama seperti *quadrotor*. *Quadrotor* sering digunakan untuk aplikasi komersial seperti fotografi, inspeksi infrastruktur, transportasi dan manipulasi muatan. (Chriette, et al., 2020)

Quadrotor dalam beberapa dekade juga sering menarik perhatian dalam bidang penelitian dan komersial yang intensif dikarenakan kesederhanaan mekanisnya, kelincahan dan memiliki bentuk yang kecil. Tantangan operasional pada lingkungan *indoor* muncul akibat ketidakmampuan *quadrotor* mempertahankan performa terbang yang optimal dalam durasi lama di area sempit. *Bicopter* menjadi UAV yang cocok untuk pengaplikasian di ruangan yang sempit dan waktu yang lama, dikarenakan hanya menggunakan dua rotor sehingga mengurangi ukurannya menjadi setengah jika dibandingkan dengan multi-rotor lainnya dengan berat sama, *bicopter* 30% lebih efisien dalam daya dan ukuran. (Li, et al., 2020). Dimensi dari *bicopter* tersebut memiliki keunggulan tetapi berbanding terbalik dengan kemudahan operasionalnya. *Bicopter* memiliki kontrol yang lebih rumit dibandingkan *quadrotor*. Penelitian ini menetapkan *bicopter* sebagai konfigurasi UAV yang diimplementasikan pada sistem ACTS.

ACTS memiliki potensi yang bagus dalam manipulasi udara maupun pembagian muatan yang berat. ACTS memiliki beberapa keterbatasan untuk desain saat ini, yaitu ukuran yang umumnya besar sehingga akan mengalami kesulitan saat bergerak di area yang padat. Kabel yang pendek juga bisa menyebabkan tabrakan dengan diri sendiri, terutama saat lepas landas yang dimana kontinuitas tegangan kabel menyebabkan kontrol yang buruk. (Chriette, et al., 2020) ACTS memiliki potensi yang sangat besar dalam pengaplikasiannya, tetapi performanya sangat bergantung pada konfigurasi sistem. Konfigurasi *bicopter* pada ACTS dipilih dengan tujuan meningkatkan efisiensi energi serta menyederhanakan struktur mekanis dibandingkan dengan penggunaan *quadrotor*. Aspek fundamental dalam operasional *Multi-Bicopter ACTS* adalah kestabilan sistem demi tercapainya penelusuran trajektori yang aman. Validasi kestabilan melalui analisis tegangan kabel dan beban telah diselesaikan secara komprehensif pada penelitian Sutedja (2025), yang menyediakan basis data kondisi stabil bagi penelitian ini. Tujuan dari penelitian ini dilakukan untuk menentukan kecepatan dari masing-masing rotor dan sudut kemiringan rotor (*tiltrotor mechanism*) pada *Multi-Bicopter Aerial Cable Towed System* berdasarkan variasi beban dan trajektori yang telah ditentukan menggunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD). Kecepatan dari masing-masing rotor ini sangat berpengaruh terhadap stabilitas dari ACTS, dapat menghemat daya dikarenakan kecepatan rotor yang berlebihan dan kontrol *thrust* yang diperlukan untuk mengikuti trajektori yang telah ditentukan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan diatas, maka perumusan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana profil kecepatan sudut rotor pada masing-masing *bicopter* dalam sistem *Multi-Bicopter Aerial Cable Towed System* (ACTS) berdasarkan variasi beban dan trajektori yang telah ditentukan menggunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD)?
2. Bagaimana profil kemiringan sudut rotor pada masing-masing *bicopter* dalam sistem *Multi-Bicopter Aerial Cable Towed System* (ACTS) berdasarkan variasi beban dan trajektori yang telah ditentukan menggunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD)?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang ditetapkan dalam tugas akhir ini untuk mempermudah penelitian adalah sebagai berikut:

1. Beban berbentuk titik massa (point mass) dengan variasi massa 1.5 kg, 2 kg, dan 2.5 kg.
2. Masing-masing *bicopter* terhubung dengan payload oleh 1 kabel.
3. Panjang kabel 1 meter.
4. Konfigurasi posisi tiga *bicopter* dengan jarak antar sudut yang sama membentuk segitiga sama sisi.
5. Gaya hambatan pada *bicopter* diabaikan.
6. Nilai dari koefisien thrust pada rotor dianggap konstan.
7. Sudut inklinasi setiap kabel sebesar 35° .
8. Desain geometris *bicopter* dan rotor belum ditentukan secara spesifik.
9. Simulasi dan analisis sistem dibatasi pada dua variasi kecepatan operasional, yaitu kondisi *quasi-static* dan kondisi *quasi-dinamic*.

1.4 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dibuat, maka tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis kecepatan sudut rotor yang dibutuhkan oleh setiap unit *bicopter* pada *Multi-Bicopter Aerial Cable Towed System* berdasarkan variasi beban dan trajektori yang telah ditentukan menggunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD).
2. Menganalisis kemiringan sudut rotor yang dibutuhkan oleh setiap unit *bicopter* pada *Multi-Bicopter Aerial Cable Towed System* berdasarkan variasi beban dan trajektori yang telah ditentukan menggunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD).

1.5 Manfaat

Manfaat yang dapat diperoleh setelah menjawab tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Sebagai bahan untuk riset lanjutan dalam keperluan bidang Mekatronika, Robotika, dan industri transportasi khususnya pada robot *Aerial Cable Towed System*.

2. Menjadi dasar pengembangan dan evaluasi desain sistem *Aerial Cable Towed System* pada penelitian selanjutnya.
3. Memberikan acuan awal parameter kecepatan dan sudut kemiringan rotor yang dapat digunakan sebagai referensi dalam perancangan dan pengembangan sistem Multi-Bicopter Aerial Cable Towed System.

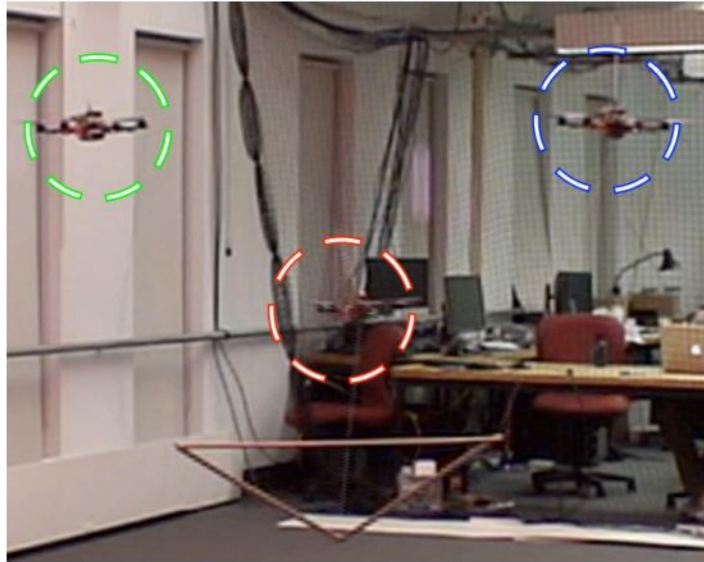
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

2.1.1 *Cooperative Manipulation and Transportation with Aerial Robots*

Perancangan sistem manipulasi udara dikembangkan oleh Nathan Michael, Jonathan Fink, dan Vijay Kumar dari *University of Pennsylvania* pada tahun 2011. Desain ini berfokus pada pengendalian dan manipulasi *payload* secara tiga dimensi menggunakan kabel yang terhubung ke beberapa robot udara. Visualisasi rancangan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1. Penelitian ini hadir sebagai solusi atas keterbatasan teknik *aerial towing* konvensional yang hanya menggunakan satu kabel. Melalui pendekatan *cooperative aerial towing*, stabilitas perpindahan *payload* dapat ditingkatkan, sekaligus memungkinkan penyesuaian posisi dan orientasi sesuai kebutuhan.



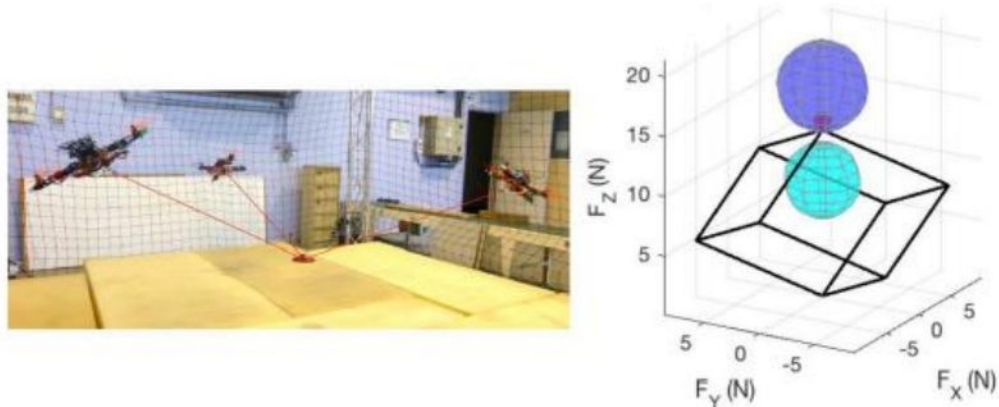
Gambar 2.1 Multiple Aerial Robot (Michael et al., n.d.).

Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis kondisi kesetimbangan statis sistem dan dilengkapi dengan evaluasi stabilitas untuk berbagai konfigurasi robot. Fokus utama analisis berada pada sistem yang melibatkan tiga robot udara, yang kemudian divalidasi melalui simulasi dan uji eksperimental. Demonstrasi yang dilakukan mencakup pengembangan serta pengujian pengendali (*controller*), batasan ruang kerja (*workspace*), dan eksplorasi stabilitas *payload* pada berbagai konfigurasi. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan beberapa robot secara bersamaan terbukti efektif dalam mengangkat dan memanipulasi *payload* secara stabil dan tangguh, bahkan saat terjadi perubahan kondisi dinamis seperti kegagalan aktuator (Michael et al., n.d.).

2.1.2 *Wrench Analysis of Cable-Suspended Parallel Robots Actuated by Aerial Robot UAV's*

Istilah *Aerial Cable Towed System* (ACTS) pertama kali dikenalkan pada penelitian yang dilakukan oleh Erskine, Caro dan Chriette pada tahun 2019. Penelitian ini berfokus pada analisis *wrench* dengan menggunakan formulasi *Available Wrench Set* (AWS) untuk mengetahui gaya dan torsi yang dihasilkan oleh ACTS. Analisis ini dilakukan dengan memetakan ruang tegangan kabel (*tension space*) ke dalam ruang gaya dan momen

(*wrench space*), sambil mempertimbangkan batasan aktuator serta karakteristik dinamika UAV.

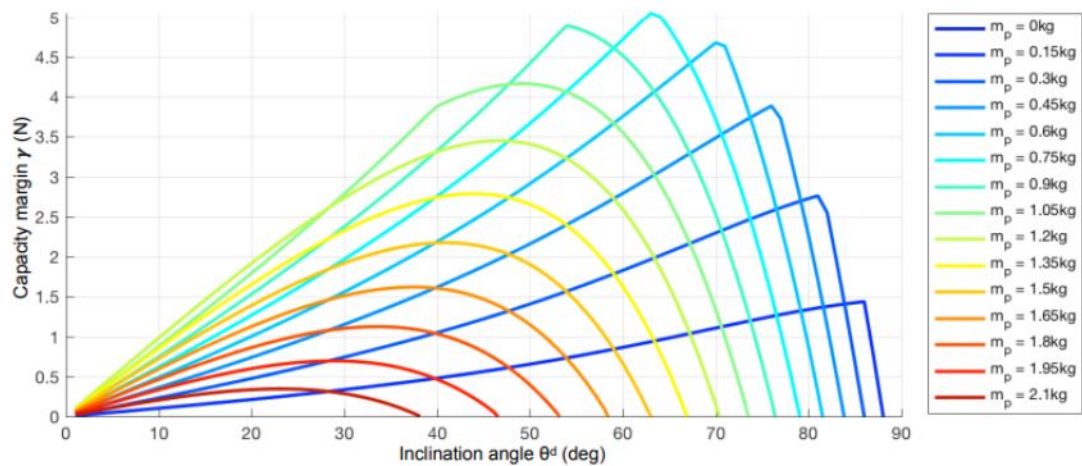


Gambar 2.2 Wrench Analysis pada Aerial Cable Towed System (Erskine et al., 2019).

Proses perolehan AWS dimulai dengan menetapkan parameter geometrik, karena sistem memiliki DOF yang diketahui dan melibatkan beberapa Aerial Robot serta kabel yang terhubung ke payload. Parameter ini mencakup posisi, orientasi, panjang, dan titik pemasangan kabel, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung AWS. Perhitungan dilakukan dengan memetakan *tension space* dan *thrust* ke dalam *wrench space*, serta menentukan jarak terdekat ke *external wrench* untuk memperoleh indeks ketahanan yang disebut *capacity margin*. Hasil dari penelitian ini yaitu *capacity margin* ini dapat digunakan sebagai indeks untuk mengevaluasi seberapa kokoh sistem terhadap gangguan eksternal. (Erskine et al., 2019)

2.1.3 Control and Configuration Planning of an Aerial Cable Towed System

Penelitian ini juga dilakukan oleh Erskine, Chriette dan Caro pada tahun 2019, dimana pada penelitian ini berfokus pada perencanaan kontrol dan konfigurasi dari *Aerial Cable Towed System* (ACTS) untuk mengangkut beban titik massa menggunakan tiga quadrotor. Pada penelitian ini, kapabilitas dari ACTS diperjelas dengan membagi menjadi tiga komponen yaitu dinamika dari setiap quadrotor, hubungan kinematika dari semua quadrotornya dan payload. *Capacity margin* sebagai indikator utama digunakan untuk menilai ketahanan sistem dalam berbagai konfigurasi operasional. Berikut merupakan grafik dari *capacity margin* ACTS dengan berbagai variasi massa payload yang dipengaruhi oleh sudut inklinasi.

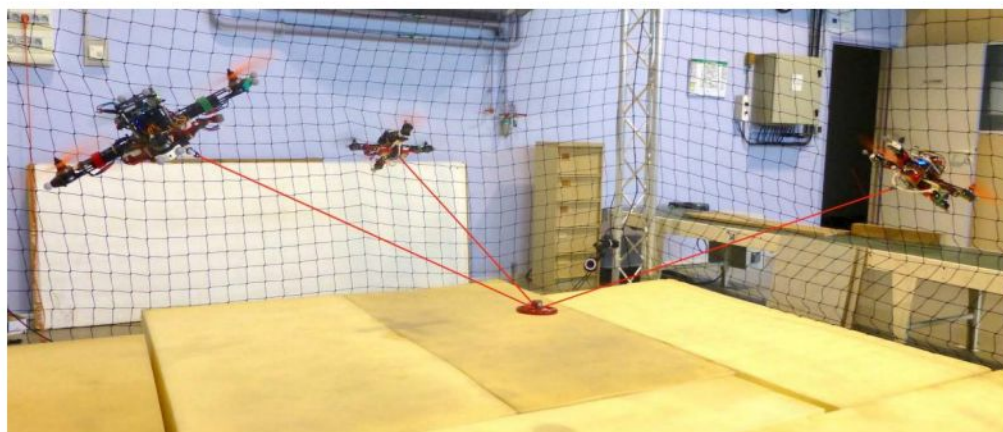


Gambar 2.3 Capacity Margin ATCS dengan berbagai variasi massa payload (Erskine et al., 2019).

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh hasil yang menunjukkan bahwa capacity margin bisa digunakan sebagai indikator yang akurat untuk mengetahui konfigurasi ACTS dapat mengikuti lintasan yang telah ditentukan. (Erskine et al., 2019)

2.2 Aerial Cable Towed System (ACTS)

Aerial Cable Towed System (ACTS) merupakan suatu tipe aerial manipulator yang menggunakan prinsip lanjutan dari *Cable Driven Parallel Robot* (CDPR) yang berguna sebagai transportasi dan manipulasi muatan. Pada umumnya ACTS ini digunakan dalam keperluan logistik militer dan sipil menggunakan helikopter. *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) mengalami peningkatan kemampuan dan performa seiring berjalan waktu, sehingga memungkinkan penggunaan UAV kecil untuk mengerjakan suatu tugas dibandingkan dengan UAV besar. (Erskine et al., 2019).



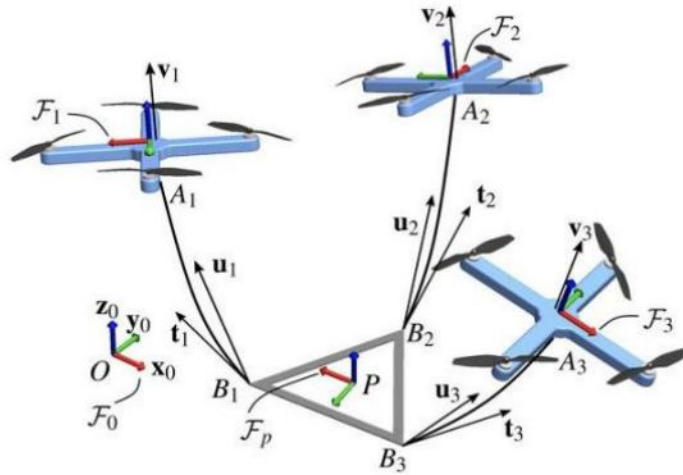
Gambar 2.4 Prototype ACTS (Erskine et al., 2019).

Aerial Cable Towed System (ACTS) memiliki kabel dengan panjang tetap, sementara *cable driven manipulators* harus menyesuaikan panjang kabel untuk mencapai posisi platform yang tepat. Pada umumnya mengendalikan gerakan beban secara penuh dalam enam derajat kebebasan (6-D) diperlukan setidaknya tujuh kabel tetapi jumlah ini dapat dikurangi apabila terdapat gaya eksternal yang membantu. Pada sistem crane, gaya

gravitasi dapat berfungsi layaknya kabel tambahan, sehingga hanya diperlukan enam kabel fisik saja untuk mencapai manipulasi 6-D yang komprehensif. (Manubens, et al., 2013)

2.3 Parameterisasi ACTS

Parameterisasi dari model fisik sistem perlu dilakukan sebelum menganalisis ACTS. Sistem dari ACTS dapat dianalisis secara matematis dan digunakan baik dalam perumusan kinematikanya, maupun dinamika sistemnya. Parameterisasi geometris dari sistem ACTS pada kasus ini yaitu n quadrotor, m kabel, dan d derajat kebebasan (DOF) untuk beban. Pose dari quadrotors dan payload diasumsikan pada parameterisasi diketahui relatif terhadap kerangka acuan inersia $\mathcal{F}_0$ yang berpusat di titik O . Pada payload juga terdapat kerangka tambahan yaitu kerangka platform $\mathcal{F}_p$ yang dinotasikan sebagai P dan ditempatkan dipusat massa dan inersia dari payload. Kabel ke- j memiliki panjang l_j menghubungkan antara titik B_j di payload dan titik A_i di quadrotor ke- i , dengan A_i sekaligus berperan sebagai pusat massa dan pusat geometris quadrotor. Quadrotor masing-masing memiliki sistem koordinat local $\mathcal{F}_i$ pada titik A_i dimana orientasi sumbu z -nya tegak lurus terhadap bidang rotasi rotor.



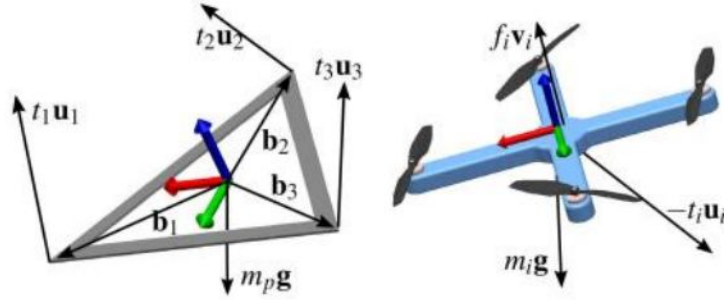
Gambar 2.5 Parameter Aerial Cable Towed System

Posisi payload direpresentasikan melalui vektor $x_p = \overrightarrow{OP}$ dalam sistem koordinat inersia $\mathcal{F}_0$. Payload dengan sifat *rigid body*, perlu ditransformasi orientasinya dari $\mathcal{F}_0$ menuju $\mathcal{F}_p$ dengan cara dikalikan dengan matriks rotasi R_p seperti pada persamaan (2.1).

$$l_j u_j = x_i - x_p - R_p b_j \quad (2.1)$$

Setiap quadrotor ke- i memiliki vektor posisi $x_i = \overrightarrow{OA_i}$ dalam kerangka $\mathcal{F}_0$, sedangkan untuk orientasinya dinyatakan dalam matriks rotasi R_i . Titik b_j pada beban didefinisikan dalam $\mathcal{F}_p$ sebagai $b_j = \overrightarrow{PB_j}$. Konfigurasi dari ACTS dikarakterisasi oleh kumpulan vektor kabel $u_1, \dots, u_m$ dengan u_j mempresentasikan vektor satuan sepanjang kabel $\overrightarrow{B_j A_i}$ dalam kerangka $\mathcal{F}_0$. (Erskine et al., 2019)

2.4 Kondisi Keseimbangan ACTS



Gambar 2.6 Free Body Diagram dari Platform dan i^{th} Quadrotor

Available wrench set (AWS) dari sebuah ACTS bergantung pada kemampuan *thrust* masing-masing *quadrotor*, konfigurasi relatif antara *quadrotor* dan *payload*, serta percepatan yang diinginkan. Pada $\mathcal{F}_0$ terdapat *wrench* eksternal $w_e = [f_e^T \ m_e^T]^T$ yang bekerja pada *payload*. Pada sistem ACTS ini, persamaan gerak dari *payload* dan setiap *quadrotor* dinyatakan secara terpisah untuk menentukan total gaya eksternal dan internal. Sistem ini dibagi menjadi tiga komponen yaitu *quadrotor*, *payload* dan kabel yang menyatukan keduanya.

2.4.1 Platform

Kabel pada kasus ini diasumsikan tidak bermassa dan tidak elastis, yang dimana kabel dianggap sebagai garis lurus dan vektor tegangan kabel ke- i dapat didefinisikan sebagai $\mathbf{t}_i = t_i \mathbf{u}_i$. Gaya pada beban merupakan hasil dari penjumlahan m vektor tegangan dan momen-momen yang sesuai, bersama dengan gravitasi yang bekerja pada pusat massa sehingga terdapat $m + 1$ gaya yang mempengaruhi beban. Momen yang dihasilkan oleh kabel dapat diabaikan karena beban dianggap sebagai massa titik atau *point mass*. Persamaan platform yang dinyatakan pada kerangka global $\mathcal{F}_0$ adalah sebagai berikut.

$$m_p \mathbf{g} + \sum_{j=1}^m (t_j \mathbf{u}_j) + \mathbf{f}_e = m_p \ddot{\mathbf{x}}_p \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^m (\mathbf{R}_p \mathbf{b}_j \times t_j \mathbf{u}_j) + \mathbf{m}_e = \mathbf{J}_p \dot{\boldsymbol{\omega}}_p + \boldsymbol{\omega}_p \times \mathbf{J}_p \boldsymbol{\omega}_p \quad (2.3)$$

Massa platform yaitu m_p , $\mathbf{g}$ merupakan vektor gravitasi $[0 \ 0 \ -9.81]^T \text{ m/s}^2$ dan $\boldsymbol{\omega}_p$ merupakan vektor kecepatan angular dari platform, serta matriks $\mathbf{J}_p$ merupakan tensor inersia dari platform yang diekspresikan pada kerangka $\mathcal{F}_p$. (Erskine et al., 2019)

2.4.2 Quadrotors

Gaya aktuasi dari *quadrotor* ke- i didefinisikan dalam $\mathcal{F}_i$ sebagai ${}^i \mathbf{w}_i = [{}^i \mathbf{f}_i^T \ {}^i \boldsymbol{\tau}_i^T]^T$, dimana ${}^i \mathbf{f}_i$ merupakan vektor *thrust* $[0 \ 0 \ f_i]^T$ dan ${}^i \boldsymbol{\tau}_i$ merupakan vektor momen $[\tau_{i,x} \ \tau_{i,y} \ \tau_{i,z}]^T$. Gaya dorong (*thrust*) yang diperoleh dihasilkan dari:

$$f_i = \sum_{i=1}^4 C_F \omega_i^2 \quad (2.4)$$

Variabel ω_i merupakan kecepatan sudut dari baling-baling, C_F merupakan koefisien *thrust*. Momen gaya yang dihasilkan di sumbu x, y dan z pada *quadrotor* dituliskan sebagai berikut:

$$\tau_{x,i} = C_F r_i (\omega_1^2 - \omega_3^2) \quad (2.5)$$

$$\tau_{y,i} = C_F r_i (\omega_2^2 - \omega_4^2) \quad (2.6)$$

$$\tau_{z,1} = C_M r_i (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \quad (2.7)$$

Jarak pusat massa baling-baling ke pusat massa dari *quadrotor* yaitu r_i , dan C_M merupakan koefisien *drag* dari *propeller*. Kombinasi *thrust* dan momen ini memungkinkan *quadrotor* memiliki empat DOF atau derajat kebebasan untuk mengubah orientasi dari unit vektor $\mathbf{v}_i = \mathbf{R}_i [0 \ 0 \ 1]^T$ dan besarnya *thrust* f_i sepanjang $\mathbf{v}_i$. (Erskine et al., 2019)

Kabel diasumsikan melewati pusat massa dari *quadrotor* tepat mereka terpasang sehingga dinamika rotasi *quadrotor* sepenuhnya terpisah dari tegangan kabel. Persamaan *quadrotor* ke- i yang di nyatakan pada kerangka global $\mathcal{F}_0$ dituliskan sebagai berikut:

$$f_i \mathbf{v}_i + m_i \mathbf{g} - \sum_{j=1}^k t_j \mathbf{u}_j = m_i \ddot{\mathbf{x}}_i \quad (2.8)$$

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{J}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{J}_i \boldsymbol{\omega}_i \quad (2.9)$$

Konstanta $k \in [1,2]$ merupakan jumlah dari kabel yang terhubung ke *quadrotor* ke- i , m_i merupakan massa dari *quadrotor* ke- i , $\boldsymbol{\omega}_i$ merupakan kecepatan sudut dari *quadrotor* ke- i , dan $\mathbf{J}_i$ merupakan tensor inersia dari *quadrotor* ke- i dalam $\mathcal{F}_i$. (Erskine et al., 2019)

2.5 Bicopter

Bicopter adalah salah satu varian UAV yang menggunakan dua buah rotor dengan susunan paralel statis, memberikan kemampuan kombinasi antara operasi VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*) dan *hover* layaknya helikopter, serta performa terbang translasional menyerupai pesawat bersayap tetap (*fixed-wing aircraft*). *Bicopter* memiliki 6 *degree of freedom* (DOF) tapi hanya memiliki 4 kontrol input yaitu kemiringan dan kecepatan rotor kiri dan kanan, sehingga menjadi sistem *under-actuated*. Prinsip dari penerbangan *bicopter* ini yaitu arah dan panah mempresentasikan arah putaran dan kecepatan rotasi dari baling-baling, sedangkan garis putus-putus menunjukkan posisi horizontal motor seat dalam sistem koordinat badan pesawat. (Fahmizal, et al., 2023) Mekanisme penerbangan (*flight mechanism*) pada *bicopter* yaitu pada gerak vertikal, perubahan ketinggian dihasilkan dengan dua baling-baling yang kecepatannya meningkat dan berkurang secara bersamaan. *Pitch motion* dihasilkan oleh baling-baling yang berputar searah dengan translasi bersamaan, *yaw motion* dihasilkan oleh dua baling-baling yang berputar dalam arah yang berlawanan, dan *roll motion* oleh dua baling-baling dengan kecepatan berbeda (*differential propellers*). (Zhang, et al., 2016)

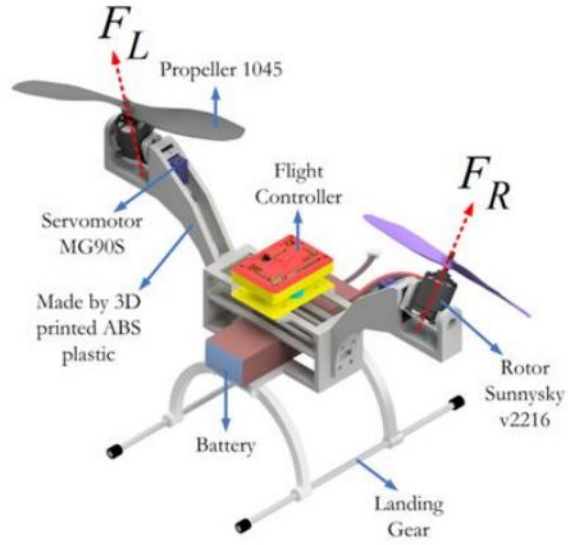


Gambar 2.7 *Motion Mechanism of Bicopter* (Zhang, et al., 2016)

Bicopter memiliki keunggulan utama yang terletak pada penggunaan motor dan baling-baling yang lebih sedikit dibanding *quadcopter*, yang berdampak pada pengurangan biaya produksi secara keseluruhan, minimisasi getaran, serta efisiensi kebutuhan daya yang lebih baik. (Albayrak, et al., 2019) UAV *bicopter* dapat memiliki waktu penerbangan yang lebih lama dibandingkan UAV multi-rotor lainnya. UAV *bicopter* memiliki tantangan utama dalam pengembangannya yang terletak pada karakteristik non-minimum phase yang muncul pada sumbu sejajar dengan rotasi servo, umumnya pada sumbu *pitch* atau *roll*. Batasan fundamental yang melekat pada sistem *non-minimum phase* menantang pengendalian dan stabilitas sistem tersebut. Desain pengontrol khusus atau penyetelan yang hati-hati dapat membantu mengurangi masalah ini, hal itu sangat menghambat pengembangan UAV *bicopter*. Sifat differential flatness harus diperiksa kembali pada UAV *bicopter* dengan mempertimbangkan dinamika servo, yang secara langsung menyebabkan *non-minimum phase* dan tidak dipertimbangkan dalam derivasi sebelumnya. (He, et al., 2022)

2.6 Tilt-Rotor Mechanism

Bicopter dan *quadcopter* memiliki perbedaan, salah satunya yaitu pada mekanisme kemiringan dari rotornya (*Tilting Mechanism* atau *Tilt-Rotor Mechanism*). *Tilt-rotor mechanism* merupakan salah satu konfigurasi dari aktuator yang menghasilkan UAV dengan aktuasi penuh, memungkinkan kontrol independen terhadap gerak translasi dan rotasi. *Tilt-rotor mechanism* ini memiliki tujuan untuk meningkatkan kemampuan dalam *tracking* cepat dan performa agresif dari kendaraan, serta menyediakan aktuasi penuh secara alami. Mekanisme kemiringan rotor apabila diberikan pada kendaraan umumnya akan membutuhkan jumlah aktuator tambahan yang pada akhirnya akan berdampak pada peningkatan konsumsi daya dan pengurangan durasi penerbangan sehingga *bicopter* merupakan solusi paling efisien dibandingkan dengan multirotor tradisional lainnya karena memiliki jumlah aktuator yang minimum. (Vundela, et al., 2024)

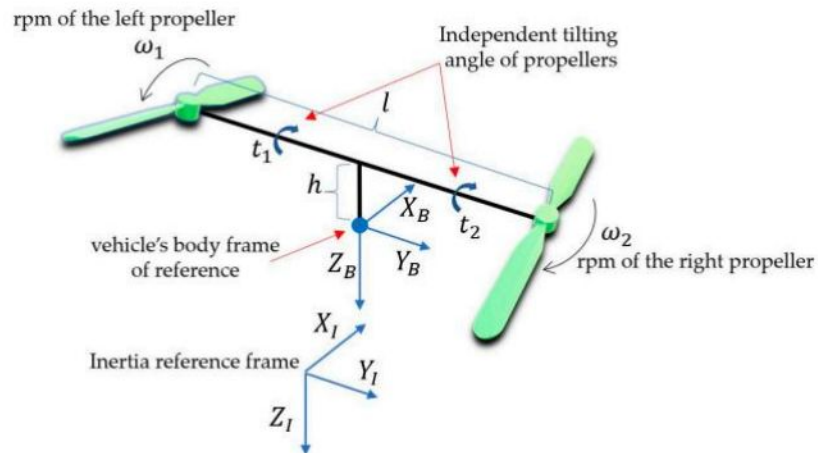


Gambar 2.8 Tilt-Rotor Mechanism

Gaya dan momen yang dibentuk oleh *rotor* yang dimiringkan pada sudut tertentu dalam dua sistem koordinat berbeda menjadi penentu utama posisi dan kemampuan manuver *bicopter* dalam kerangka acuan global. Hubungan kompleks antara kedua sistem referensi ini merupakan aspek kunci dalam analisis dan pengendalian penerbangan *bicopter*. (Jadoon, et al., 2025)

2.7 Dynamic Model of Bicopter

2.7.1 Kinematics



Gambar 2.9 Body and Inertia Reference of the BI-Copter (Taherinezhad, et al., 2022)

Kinematika dari kerangka badan dan inersia perlu di formulasikan sebelum menurunkan persamaan gerak *bicopter*. Posisi dan kecepatan dari *bicopter* dalam kerangka inersia (global) secara berturut-turut didefinisikan sebagai $x = (x, y, z)^T$ dan $\dot{x} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T$. Sudut *pitch*, *roll*, *yaw* berturut-turut didefinisikan sebagai $\theta = (\phi, \theta, \psi)^T$ dan kecepatan sudut yang sesuai didefinisikan sebagai $\dot{\theta} = (\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})^T$. Vektor kecepatan sudut tidak sama

dengan turunan dari sudut *pitch*, *roll* dan *yaw* ($\omega \neq \dot{\theta}$). Perbedaan antara keduanya yaitu vektor kecepatan sudut (ω) merupakan vektor yang mengarah sepanjang sumbu rotasinya, sedangkan $\dot{\theta}$ merupakan turunan dari sudut *pitch*, *roll* dan *yaw*. (Zlatanov, 2016) Persamaan untuk mendapatkan nilai dari ω dituliskan sebagai berikut:

$$\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi\cos\theta \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi\cos\theta \end{bmatrix} \dot{\theta} \quad (2.10)$$

Vektor kecepatan sudut di *fixed body* yaitu ω (Zlatanov, 2016). Variabel ω_1 dan ω_2 masing-masing mewakili kecepatan angular dari rotor kiri dan kanan seperti pada gambar (2.9), sedangkan t_1 dan t_2 masing masing mewakili sudut kemiringan dari rotor tersebut. Turunan model dinamika sistem dari *bicopter* dapat diperoleh menggunakan Newton-Eular. *Inertial reference frame* atau *global frame* dituliskan sebagai $X_1Y_1Z_1$, dan $X_BY_BZ_B$ sebagai *body reference frame* atau *body fixed frame* seperti ditunjukkan pada gambar 2.14. Matriks rotasi yang digunakan dinotasikan dengan R_B dituliskan pada persamaan (2.3). (Taherinezhad, et al., 2022)

$$R_B = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ -\cos\varphi\sin\psi + \sin\varphi\sin\theta\cos\psi & \cos\varphi\cos\psi + \sin\varphi\sin\theta\sin\psi & \sin\varphi\cos\theta \\ \sin\varphi\sin\psi + \cos\varphi\sin\theta\cos\psi & -\sin\varphi\cos\psi + \cos\varphi\sin\theta\sin\psi & \cos\varphi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Kecepatan sudut di *inertial frame* (*global frame*) diperoleh berdasarkan persamaan (2.10) sehingga didapatkan persamaan seperti berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tan\theta\sin\varphi & \tan\theta\cos\varphi \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \frac{\sin\varphi}{\cos\theta} & \frac{\cos\varphi}{\cos\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Persamaan gerak disederhanakan menggunakan asumsi yaitu pusat massa dari UAV yang digunakan sama dengan *fixed body frame*, gaya yang dihasilkan oleh baling-baling (*propellers*) sama dengan kuadrat dari kecepatan rotor. (Taherinezhad, et al., 2022)

2.7.2 Moment and Thrust Forces

Gaya dan momen aerodinamis diturunkan menggunakan kombinasi teori momentum dan teori elemen rotor. Gaya dorong *Thrust* merupakan resultan dari gaya vertikal yang bekerja pada semua elemen rotor. (Bouabdallah, et al., 2007) Setiap rotor memiliki kecepatan sudut berupa ω_i dan menghasilkan gaya F_i . (Mellinger, et al., 2012) Persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$F_i = k_F \omega_i^2 \quad (2.13)$$

Kecepatan sudut ω_i pada rotor tidak hanya menghasilkan gaya berupa F_i , tetapi juga menghasilkan momen gaya berupa M_i . (Mellinger, et al., 2012) Persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$M_i = k_M \omega_i^2 \quad (2.14)$$

2.7.3 Equation of Motion

Percepatan dari *bicopter* pada kerangka global disebabkan oleh gaya dorong (*thrust*), gravitasi, dan gesekan linear. Vektor dari gaya dorong di kerangka inersia global diperoleh dengan menggunakan matriks R_i yang telah diketahui untuk memetakan vektor gaya

dorong dari kerangka badan *bicopter* ke kerangka inersia global. Persamaan gerak translasi dapat dituliskan sebagai berikut:

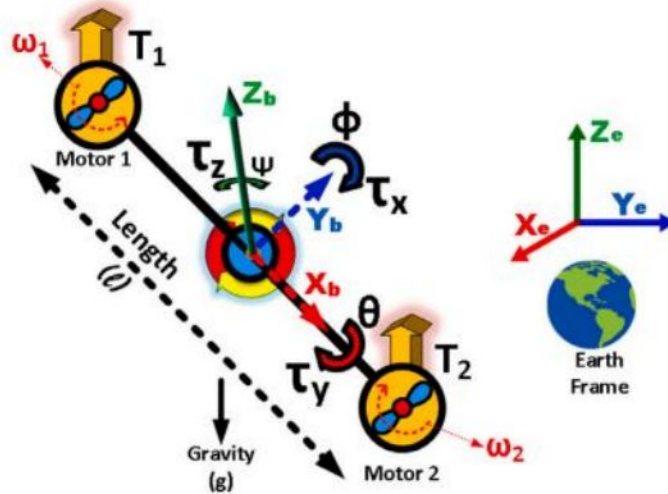
$$m\ddot{x} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} + R_i F_{i\ total} + F_D \quad (2.15)$$

Massa dari *bicopter* yaitu m , $\ddot{x}$ merupakan percepatan quadrotor, F_i merupakan vektor *thrust* pada kerangka badan *bicopter* dan F_D merupakan gaya hambat (*drag*) dari *bicopter*. Pada persamaan diatas gaya hambat diasumsikan tidak ada. Persamaan gerak linear umumnya lebih sederhana jika ditinjau dari kerangka inersia. Formulasi gerak rotasi sebaliknya lebih relevan jika dideskripsikan menggunakan kerangka acuan benda (*body frame*). Perhitungan rotasi dan momen pada pendekatan ini mengacu pada pusat massa *bicopter* sebagai titik referensi, bukan pada pusat koordinat inersia. Dinamika rotasi *bicopter* yang didefinisikan terhadap pusat massanya sendiri menjadikan model simulasi ini lebih representatif terhadap kondisi riil. Persamaan gerak rotasi (*angular motion*) dari persamaan euler untuk *rigid body*, dalam bentuk vektor dituliskan sebagai berikut:

$$I\dot{\omega} + \omega \times (I\omega) = M_{i\ total} \quad (2.16)$$

Kecepatan angular vektor yaitu ω , I merupakan matriks inersia, dan τ merupakan vektor torsi eksternal. (Zlatanov, 2016)

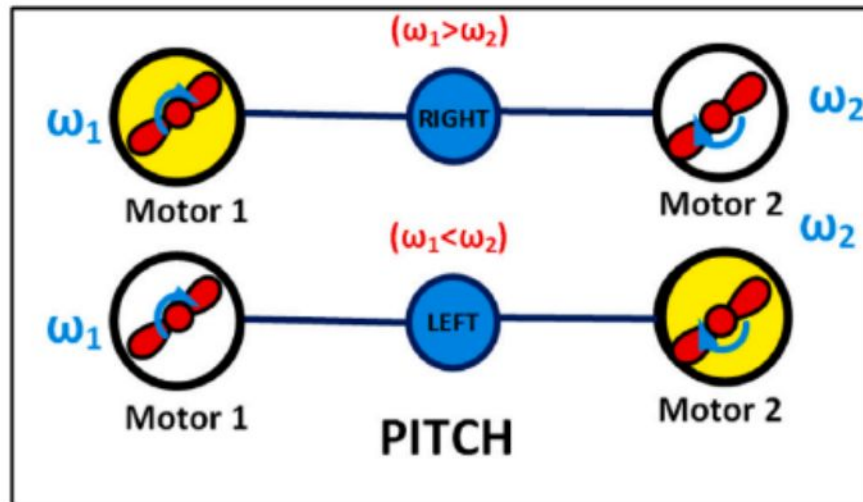
2.8 Bicopter Movement Attitude



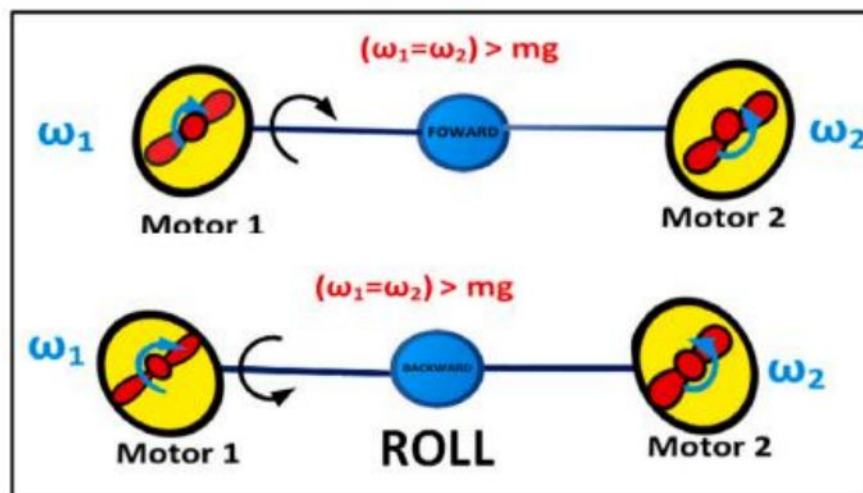
Gambar 2.10 Body Coordinate System and Inertial Coordinate System.

Sistem koordinat yang digunakan perlu ditetapkan sebelum menentukan gerak dari *bicopter*, yaitu kerangka badan (*body frame*) *bicopter* dan kerangka global atau inersia (*inertial frame*). Kemampuan manuver dari *bicopter* digambarkan menjadi tiga manuver dasar yaitu *pitch*, *roll* dan *yaw*. *Pitch* mengindikasikan kemiringan *bicopter* pada sumbu memanjangnya, yang menyebabkan pergerakan ke depan atau belakang. *Roll* merepresentasikan pembelokan *bicopter* sepanjang sumbu melintang, menghasilkan pergerakan lateral ke samping sedangkan *yaw* menggambarkan rotasi *bicopter* terhadap sumbu tegaknya. Ketiga manuver ini dihasilkan dari koordinasi yang tepat antara sudut kemiringan rotor dengan sistem referensi koordinat bodi tetap dan global tetap. Hubungan

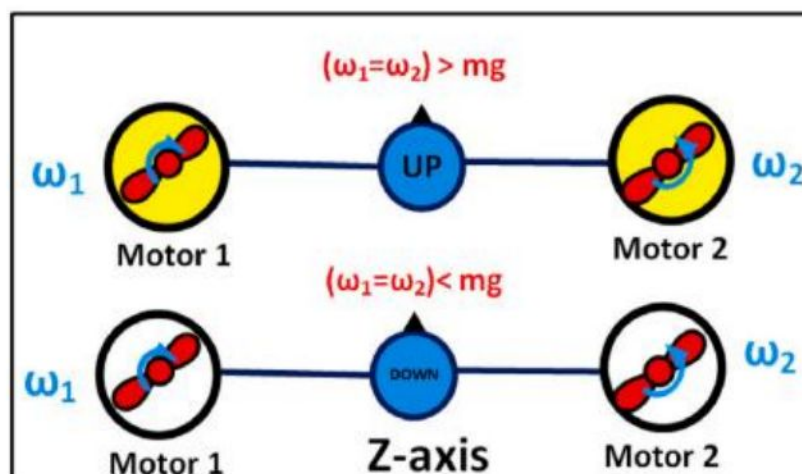
dinamis antara gaya dan torsi yang kompleks inilah yang membentuk dasar pengendalian *bicopter*, memungkinkan gerakan yang stabil dan akurat. (Jadoon, et al., 2025)



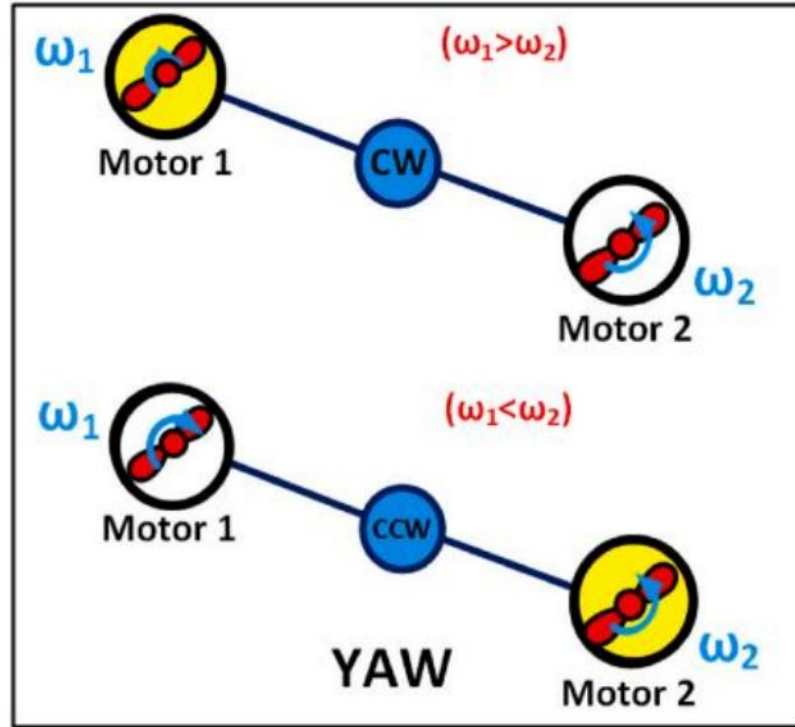
Gambar 2.11 Bi-copter Movement Attitude (Pitch)



Gambar 2.12 Bi-copter Movement Attitude (Roll)



Gambar 2.13 Bi-copter movement altitude



Gambar 2.14 Bi-copter movement heading (z-axis)

Sudut euler merupakan deskriptor fundamental dari orientasi *bicopter* dalam ruang tiga dimensi. Sudut *yaw* (ψ) menggambarkan perpindahan sudut antara arah depan dan proyeksi sumbu longitudinal *bicopter* pada bidang horizontal, yang berfungsi penting sebagai referensi dengan nilai positif apabila dilihat dari atas yang menunjukkan rotasi searah jarum jam. Sudut *pitch* (θ) yang menggambarkan kemiringan sumbu longitudinal dari *bicopter* terhadap bidang horizontal. Nilai sudut *pitch* positif menunjukkan kemiringan kearah atas berarti untuk mengontrol manuver gerak *bicopter* untuk naik dan turun. Sudut *roll* (ϕ) menunjukkan rotasi disekitar sumbu longitudinal *bicopter* setelah gerakan *yaw* dan *pitch*, yang dimana sumbu *roll* positif menunjukkan rotasi ke kanan, yang digunakan untuk melakukan gerakan lateral dan menjaga stabilitas dari *bicopter*. Sudut Euler ini secara kolektif memberikan kerangka kerja komprehensif untuk memahami dan memanipulasi dinamika orientasi *bicopter*, memfasilitasi kontrol dan navigasi yang presisi di lingkungan udara yang kompleks. (Jadoon, et al., 2025)

2.9 Singular Value Decomposition

Singular Value Decomposition (SVD) merupakan suatu dekomposisi nilai singular dari suatu matriks $A \in R^{m \times n}$ yang dimana merupakan suatu faktorisasi. (Septian, 2016). Metode SVD juga dapat diartikan sebagai suatu metode yang mendekomposisikan suatu matriks A menjadi tiga komponen, yaitu dapat dilihat pada persamaan berikut. (Aryani & Yulianti, 2012)

$$A = U \Sigma V^T \quad (2.17)$$

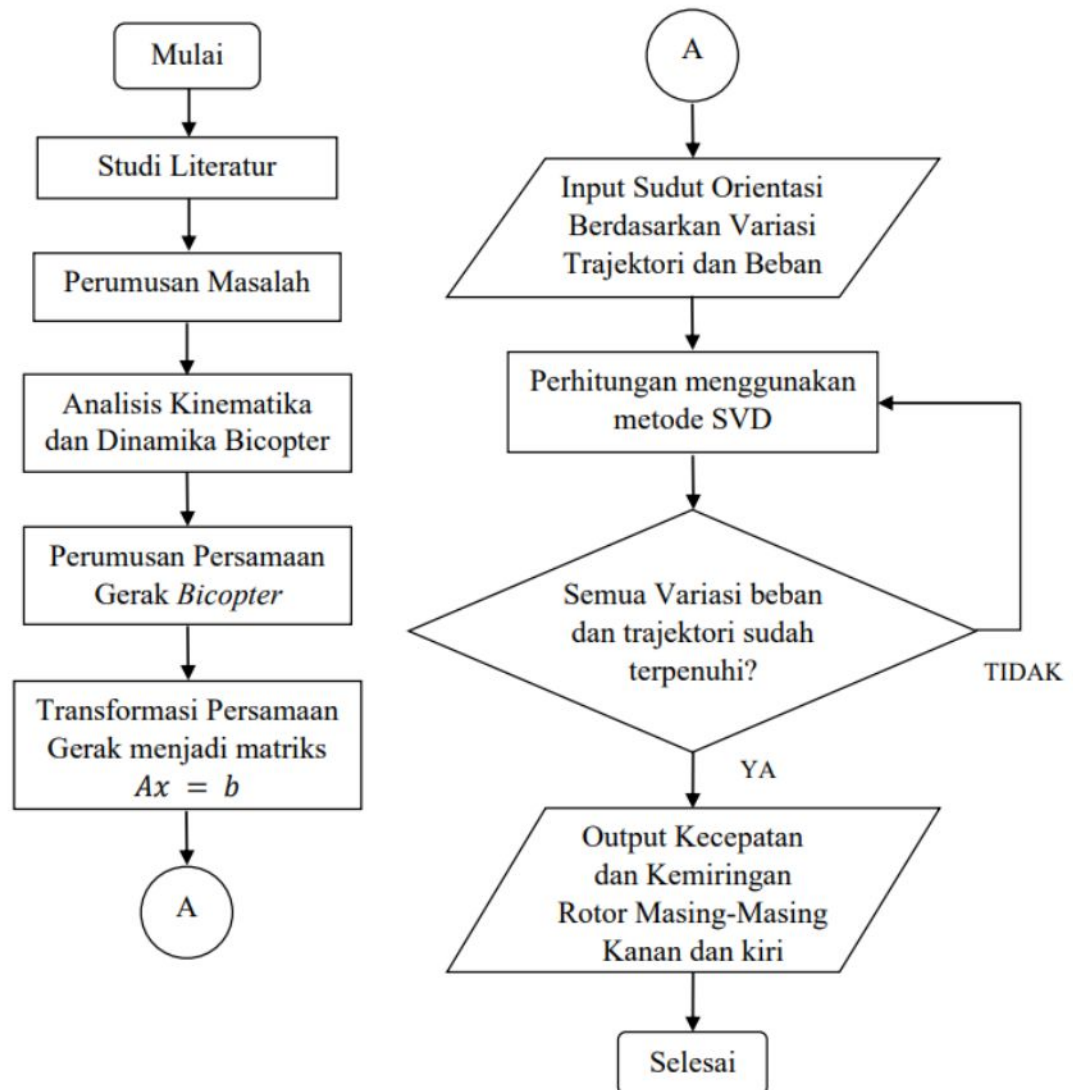
$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_p \end{pmatrix}$$

U merupakan matriks orthogonal yang berukuran $m \times m$ dan V merupakan matriks orthogonal yang berukuran $n \times n$, serta σ_i merupakan nilai singular dari A, dengan $i = 1, 2, \dots, p$. (Septian, 2016). Metode SVD merupakan suatu metode yang dapat menyelesaikan sistem persamaan linear riil maupun sistem persamaan linear kompleks yang berbentuk konsisten. Metode SVD ini juga memiliki kelebihan yaitu dapat menyelesaikan sistem persamaan linear dalam bentuk yang tidak konsisten juga, dimana solusi yang diberikan merupakan solusi pendekatan yang paling baik. (Aryani & Yulianti, 2012)

BAB 3 METODOLOGI

3.1 Skema Tahapan Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan menurut alur metodologi sebagaimana tertulis pada diagram alir pada gambar (3.1). Berikut untuk diagram alir dari penelitian ini.

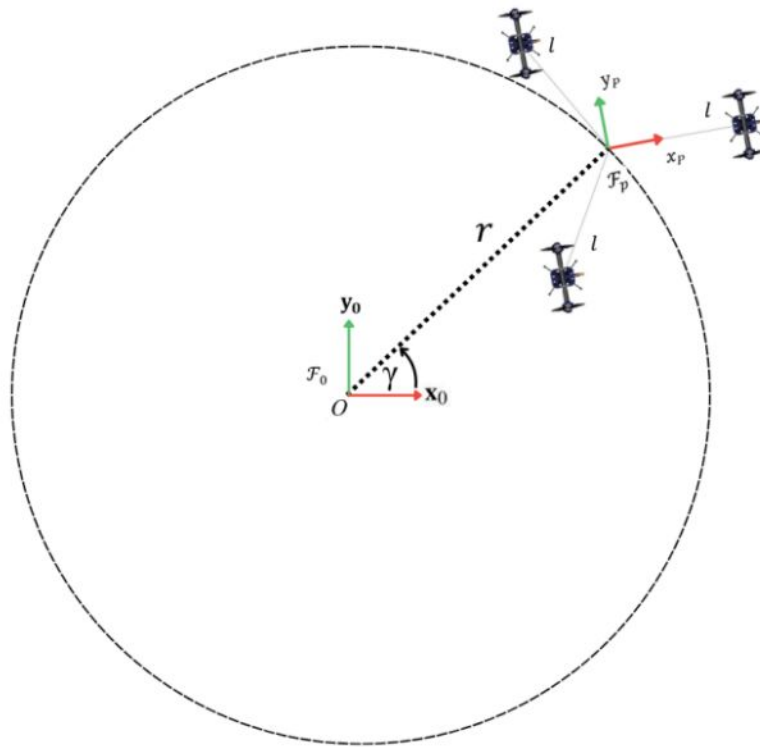


Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Analisis Dinamika dan Kinematika

3.2.1 Trajektori ACTS

Analisis kinematika pada sistem *multi-bicopter* ACTS ini dilakukan untuk memodelkan gerakan sistem ACTS tersebut. Analisis ini berfokus pada hubungan geometris antara *bicopter*, kabel, dan *payload*. Analisis ini menjadi dasar untuk menentukan kecepatan rotor yang dibutuhkan agar sistem bergerak sesuai trajektori yang diinginkan.



Gambar 3.2 Tampak Atas Trajektori ACTS

Analisis pada penelitian ini dilakukan dalam dua skenario berbeda untuk mengkaji pengaruh kecepatan operasional terhadap kinerja sistem:

1. Trajektori *Quasi-Static* (Kuasi-Statis)

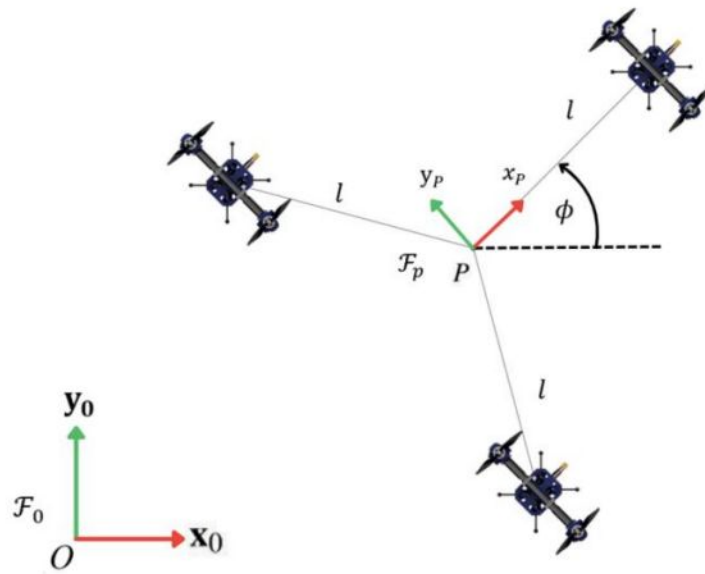
Skenario ini mensimulasikan pergerakan sistem secara lambat dan stabil dengan durasi satu putaran penuh selama 60 detik. Asumsi dasar pada kondisi ini menempatkan efek inersia pada tingkat yang minimal sehingga dapat diabaikan.

2. Trajektori *Quasi-Dinamic* (Kuasi-Dinamis)

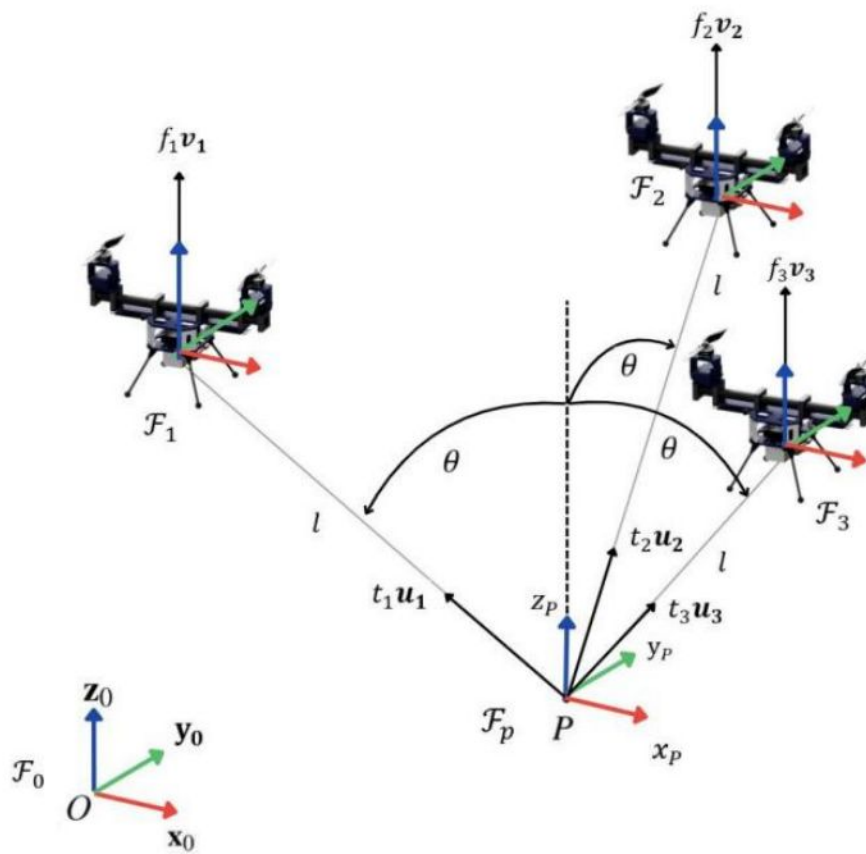
Simulasi manuver cepat dan agresif menjadi fokus utama pada skenario ini, di mana satu putaran ditempuh hanya dalam waktu 5 detik. Faktor inersia, khususnya gaya sentripetal dan percepatan sudut (*angular acceleration*), memberikan pengaruh signifikan terhadap stabilitas sistem pada kondisi tersebut.

3.2.2 Desain dan Konfigurasi ACTS

Desain dari ACTS yang digunakan pada penelitian ini adalah sistem yang terdiri dari tiga *bicopter* yang dimana masing-masing dari *bicopter* terhubung ke sebuah kabel dan kabel tersebut terhubung dengan sebuah *payload*. Pada penelitian ini *payload* diasumsikan sebagai point mass.



Gambar 3.3 Skema Konfigurasi ACTS tampak atas



Gambar 3.4 Skema Konfigurasi ACTS tampak perspektif

3.2.3 Parameterisasi

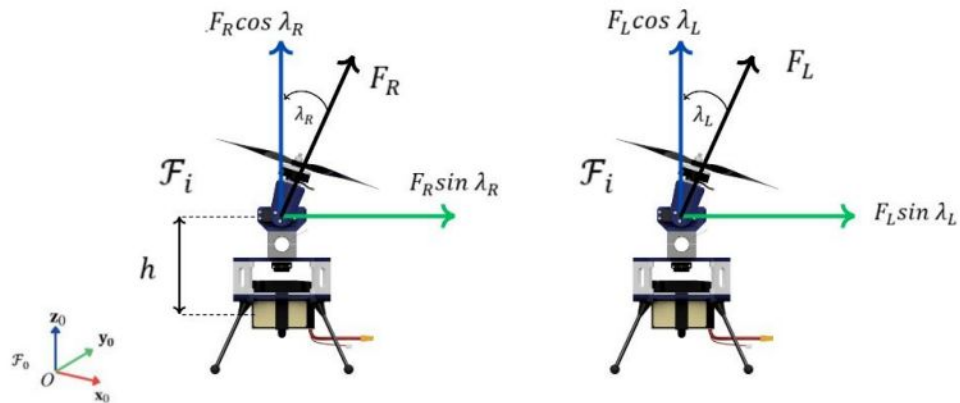
Formulasi kinematika kerangka badan *bicopter*, *payload*, dan global diperlukan sebagai langkah awal sebelum menentukan persamaan gerak. Pada penelitian ini, kerangka global atau inersia dinyatakan dengan $\mathcal{F}_0$, kerangka badan *bicopter* ke- i dinyatakan dengan $\mathcal{F}_i$ dan kerangka *payload* dinyatakan dengan $\mathcal{F}_p$. Posisi dan kecepatan dari *bicopter* di global frame didefinisikan berturut-turut yaitu z_i . Parameterisasi sistem ACTS yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada tabel berikut.

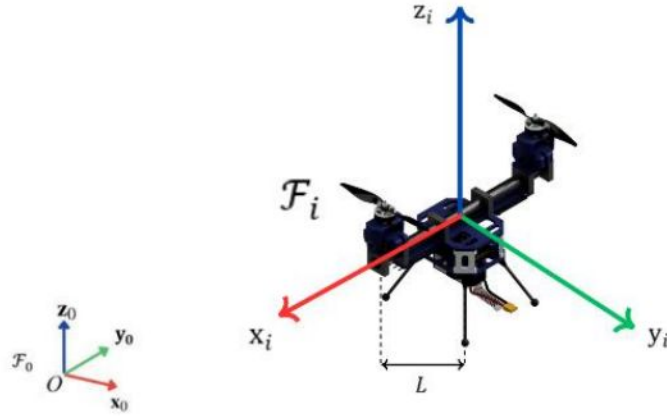
Tabel 3.1 Parameter ACTS

Parameter	Nilai
Sudut antar <i>Bicopter</i>	120°
Panjang kabel (l)	1 m
Radius Trajektori (r)	1 m
Sudut Rotasi ACTS pada Trajektori (γ)	$0 \leq \gamma \leq 360^\circ$
Sudut Rotasi ACTS pada sumbu-z (ϕ)	$0 \leq \phi \leq 360^\circ$
Sudut Rotasi <i>Bicopter</i> ke- i terhadap sumbu Yaw (ζ_i)	$\zeta_i = 0^\circ$
Sudut Inklinasi Kabel terhadap sumbu-z <i>Payload</i> (θ)	$\theta = 35^\circ$
Variasi Massa <i>Payload</i>	$1\text{ kg}, 1.5\text{ kg}, \& 2\text{ kg}$

3.2.4 Thrust Force & Moment

Gaya dorong (*thrust force*) F_R dan F_L pada *bicopter* masing-masing dihasilkan oleh *propeller* kanan dan *propeller* kiri. Sudut kemiringan *propeller* sisi kanan dan kiri secara berturut-turut dinotasikan sebagai λ_R dan λ_L . Rotasi dari motor menghasilkan momen hambat (*drag moments*) yaitu M_R dan M_L berdasarkan rotasi motor *brushless*.





Gambar 3.5 Komponen gaya dorong F_R dan F_L , serta momen pada *bicopter*

Persamaan dari total gaya yang terdapat pada *bicopter* untuk sumbu x, y dan z berdasarkan hukum kedua Newton adalah sebagai berikut:

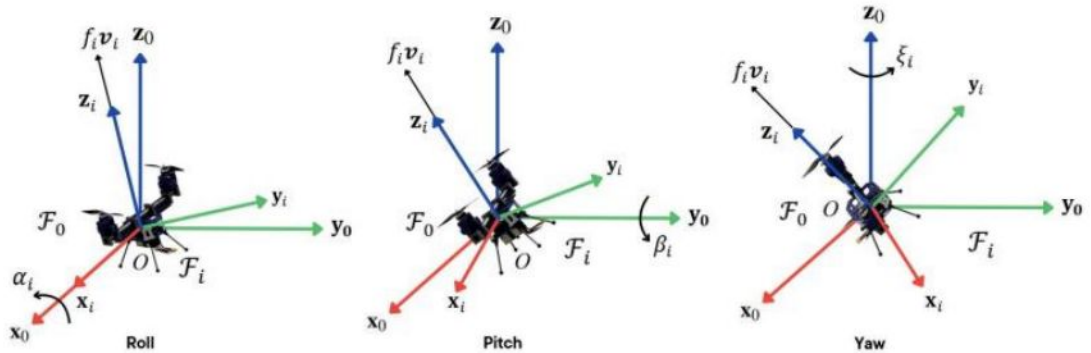
$$F_i = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_R \sin \lambda_R + F_L \sin \lambda_L \\ F_R \cos \lambda_R + F_L \cos \lambda_L \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Persamaan torsi total (momen gaya total) pada *bicopter* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$M_i = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_R \sin \lambda_R h + F_L \sin \lambda_L h \\ -F_R \cos \lambda_R L + F_L \cos \lambda_L L \\ F_R \sin \lambda_R L + F_L \sin \lambda_L L \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

3.2.5 Matriks Rotasi

Penelitian ini menggunakan konversi sudut *euler angles* dengan urutan rotasi XYZ. Sudut rotasi dari masing-masing *bicopter* terhadap sumbu roll (α_i), pitch (β_i), dan yaw (ζ_i) terhadap kerangka inersia global $\mathcal{F}_0$.



Gambar 3.6 Rotasi *Euler Angle* terhadap Sumbu *Roll*, *Pitch* dan *Yaw*

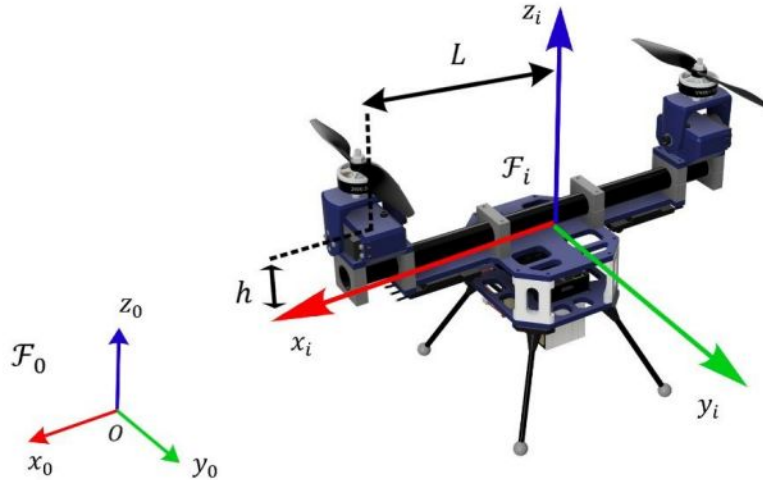
Matriks rotasi yang digunakan untuk mentransformasi dari kerangka badan *bicopter* ($\mathcal{F}_i$) ke kerangka inersia global ($\mathcal{F}_0$) adalah sebagai berikut:

$$R_i = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\zeta & -\cos\alpha\sin\zeta + \sin\alpha\sin\beta\cos\zeta & \sin\alpha\sin\zeta + \cos\alpha\sin\beta\cos\zeta \\ \cos\beta\sin\zeta & \cos\alpha\cos\zeta + \sin\alpha\sin\beta\sin\zeta & -\sin\alpha\cos\zeta + \cos\alpha\sin\beta\sin\zeta \\ -\sin\beta & \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Multi-Bicopter ACTS dan Formulasi SVD

4.1.1 Pemodelan Kinematika dan Dinamika Sistem Multi-Bicopter ACTS



Gambar 4. 1 Model Bicopter

Penelitian ini mengimplementasikan konsep dasar *Aerial Cable-Towed System (ACTS)* yang terdiri dari sejumlah i unit *bicopter*, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.4. Pada sistem ini, beberapa *bicopter* dihubungkan melalui kabel ke sebuah *platform* atau *payload*. Parameter-parameter yang digunakan dalam pemodelan dinamika bicopter dirangkum pada Tabel 4.1. Parameter ini mencakup sifat fisik, geometri, serta karakteristik inersia sistem yang berperan penting dalam pembentukan persamaan gerak dan simulasi dinamika *bicopter*. Nilai koefisien gaya dorong (*coefficient thrust*) secara spesifik dirujuk dari literatur (Fahmizal et al., 2023), sedangkan nilai inersia dan parameter geometris ditentukan berdasarkan estimasi dari model 3D sementara yang dibuat untuk mendekati karakteristik fisik *bicopter* yang diadopsi dari penelitian Sutedja (2025).

Tabel 4. 1 Parameter Model Bicopter

Parameter	Simbol	Value	Unit
Massa Bicopter	m_i	0.8	kg
Jarak vertical dari pusat massa bicopter ke pusat massa rotor	h	0.032	m
Jarak horizontal dari pusat massa bicopter ke pusat massa rotor	L	0.185	m
Momen inersia terhadap sumbu x	I_{xx}	0.1628×10^{-3}	$kg.m^2$
Momen inersia terhadap sumbu y	I_{yy}	0.5903×10^{-3}	$kg.m^2$
Momen inersia terhadap sumbu z	I_{zz}	0.4883×10^{-3}	$kg.m^2$
<i>Coefficient Thrust</i>	C_T	0.1222	-

Analisis dinamika sistem disederhanakan dengan memodelkan *payload* sebagai massa titik (*point mass*). Pendekatan ini diambil untuk memusatkan perhatian pada evaluasi tegangan kabel dan gerak kinematik. Parameter sistem meliputi posisi dan orientasi setiap

bicopter X_i serta posisi payload X_p dalam kerangka inersia $\mathcal{F}_0$. Kabel diasumsikan tidak bermassa dan tidak elastis. Semua besaran vektor seperti posisi, kecepatan, percepatan, arah gaya dorong, dan orientasi dianggap sebagai fungsi waktu (t). Vektor kabel ke- j yang menghubungkan bicopter dengan *payload* dinyatakan sebagai berikut:

$$l_j \mathbf{u}_j = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_p - \mathbf{R}_p \mathbf{b}_j \quad (4.1)$$

Variabel $\mathbf{u}_j$ menyatakan vektor satuan yang menunjukkan arah kabel, sedangkan l_j merepresentasikan panjang kabel ke- j . Persamaan (4.1) digunakan untuk menggambarkan posisi absolut *bicopter* dan diturunkan guna menjelaskan dinamika pergerakan sistem. Arah gaya dorong yang dihasilkan oleh tiap bicopter dipresentasikan menggunakan pendekatan rotasi berdasarkan *Euler angles*. Pendekatan ini memodelkan orientasi *bicopter* melalui rangkaian rotasi berurutan terhadap sumbu-sumbu kartesian. Orientasi pada permodelan ini dinyatakan menggunakan tiga sudut rotasi, yaitu sebagai berikut:

- 1) Sudut α yang merepresentasikan rotasi terhadap sumbu-x (*roll*)
- 2) Sudut β sebagai rotasi terhadap sumbu-y (*pitch*)
- 3) Sudut ζ sebagai rotasi terhadap sumbu-z (*yaw*)

Rotasi dari masing masing sumbu tersebut kemudian dinyatakan dalam bentuk matriks rotasi baku sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (4.2) sampai dengan (4.4).

$$\mathbf{R}_{(x,\alpha)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\mathbf{R}_{(y,\beta)} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\mathbf{R}_{(z,\zeta)} = \begin{bmatrix} \cos\zeta & -\sin\zeta & 0 \\ \sin\zeta & \cos\zeta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Orientasi total sistem diperoleh dengan mengalikan ketiga matriks rotasi secara berurutan sesuai dengan urutan rotasi diatas. Hasil perkalian matriks tersebut merepresentasikan orientasi keseluruhan bicopter sebagaimana dirumuskan pada persamaan (4.5).

$$\mathbf{R}_{(x,y,z)t} = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\zeta & -\cos\alpha\sin\zeta + \sin\alpha\sin\beta\cos\zeta & \sin\alpha\sin\zeta + \cos\alpha\sin\beta\cos\zeta \\ \cos\beta\sin\zeta & \cos\alpha\cos\zeta + \sin\alpha\sin\beta\sin\zeta & -\sin\alpha\cos\zeta + \cos\alpha\sin\beta\sin\zeta \\ -\sin\beta & \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Pada kerangka inersia global, percepatan dari *bicopter* disebabkan oleh gaya dorong (*thrust*), gravitasi, dan gesekan linear. Vektor dari gaya dorong di kerangka inersia global dapat diperoleh dengan menggunakan matriks $\mathbf{R}_i$ yang telah diketahui untuk memetakan vektor gaya dorong dari kerangka badan *bicopter* ke kerangka inersia global. Persamaan gerak translasi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$m_i \ddot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{(x,y,z)t} \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_{cable} \quad (4.6)$$

Variabel m merupakan massa dari *bicopter*, $\ddot{x}$ merupakan percepatan quadrotor, F_i merupakan vektor *thrust* pada kerangka badan *bicopter*. Pada umumnya, $\tau = \vec{r} \times \vec{F}$ yaitu vektor posisi dikalikan silang dengan gaya. Pada kasus *bicopter* ini, torsi (τ) sebanding dengan gaya dorong (T) dikali dengan C_T yang ditentukan oleh konfigurasi dan parameter rotor *bicopter*, sehingga diperoleh bahwa gaya dorong tersebut sebanding dengan kuadrat kecepatan sudut rotor (ω^2). Persamaan dari *thrust bicopter* untuk persamaan linear adalah sebagai berikut:

$$F_i = C_T \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_R^2 \sin \lambda_R + \omega_L^2 \sin \lambda_L \\ \omega_R^2 \cos \lambda_R + \omega_L^2 \cos \lambda_L \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Persamaan gerak translasi dari *bicopter* berdasarkan parameter yang telah diketahui adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \ddot{x} = & \frac{\cos \zeta \sin \beta \sin \alpha - \sin \zeta \cos \alpha}{m} C_T (\omega_R^2 \cos \lambda_R + \omega_L^2 \cos \lambda_L) \\ & + \frac{\sin \alpha \sin \zeta + \cos \zeta \sin \beta \cos \alpha}{m} C_T (\omega_R^2 \sin \lambda_R + \omega_L^2 \sin \lambda_L) + \frac{F_{cable(x)}}{m} \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y} = & \frac{\sin \alpha \sin \zeta \sin \beta + \cos \alpha \cos \zeta}{m} C_T (\omega_R^2 \cos \lambda_R + \omega_L^2 \cos \lambda_L) \\ & + \frac{\sin \zeta \sin \beta \cos \alpha - \sin \alpha \cos \zeta}{m} C_T (\omega_R^2 \sin \lambda_R + \omega_L^2 \sin \lambda_L) + \frac{F_{cable(y)}}{m} \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \ddot{z} = & \frac{\cos \beta \sin \alpha}{m} C_T (\omega_R^2 \cos \lambda_R + \omega_L^2 \cos \lambda_L) \\ & + \frac{\cos \beta \cos \alpha}{m} C_T (\omega_R^2 \sin \lambda_R + \omega_L^2 \sin \lambda_L) + g + \frac{F_{cable(z)}}{m} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Variabel $\ddot{x}$, $\ddot{y}$, dan $\ddot{z}$ masing-masing merepresentasikan percepatan linear *bicopter* pada sumbu x, y dan z. Persamaan gerak linear umumnya lebih sederhana jika ditinjau dari kerangka inersia. Formulasi gerak rotasi sebaliknya lebih relevan jika dideskripsikan menggunakan kerangka acuan benda (*body frame*). Perhitungan rotasi dan momen pada pendekatan ini mengacu pada pusat massa *bicopter* sebagai titik referensi, bukan pada pusat koordinat inersia. Dinamika rotasi *bicopter* yang didefinisikan terhadap pusat massanya sendiri menjadikan model simulasi ini lebih representatif terhadap kondisi riil. Persamaan gerak rotasi (*angular motion*) dari persamaan euler untuk *rigid body*, dalam bentuk vektor dituliskan sebagai berikut:

$$I \dot{\omega} + \omega \times (I \omega) = M_i + M_{cable} \quad (4.11)$$

Variabel ω merupakan kecepatan angular vektor, I merupakan matriks inersia, dan τ merupakan vektor torsi eksternal. Persamaan untuk menentukan percepatan sudut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{\omega} = I^{-1} (M_i + M_{cable} - \omega \times (I \omega)) \quad (4.12)$$

Matriks inersia yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Persamaan gerak rotasi (*angular motion*) pada kerangka badan *bicopter* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{\omega} = \begin{bmatrix} M_i(x)I_{xx}^{-1} \\ M_i(y)I_{yy}^{-1} \\ M_i(z)I_{zz}^{-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \omega_y \omega_z \\ \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \omega_x \omega_z \\ \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \omega_x \omega_y \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Torsi untuk persamaan angular dari *bicopter* berdasarkan torsi (τ) sebanding dengan gaya dorong (T) dikali dengan C_T yang ditentukan oleh konfigurasi dan parameter rotor *bicopter*, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$M_i = C_T \begin{bmatrix} \omega_R^2 \sin \lambda_R h + \omega_L^2 \sin \lambda_L h \\ -\omega_R^2 \cos \lambda_R L + \omega_L^2 \cos \lambda_L L \\ \omega_R^2 \sin \lambda_R L + \omega_L^2 \sin \lambda_L L \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Persamaan *angular motion* dari *bicopter* di *body frame* berdasarkan parameter yang telah diketahui yaitu sebagai berikut:

$$\dot{\omega}_x = \frac{h(\omega_R^2 \sin \lambda_R + \omega_L^2 \sin \lambda_L)}{I_{xx}} + \frac{M_{cable(x)}}{I_{xx}} - \frac{\omega_y \omega_z}{I_{xx}} (I_{yy} - I_{zz}) \quad (4.16)$$

$$\dot{\omega}_y = -\frac{L(\omega_R^2 \cos \lambda_R - \omega_L^2 \cos \lambda_L)}{I_{yy}} + \frac{M_{cable(y)}}{I_{yy}} - \frac{\omega_x \omega_z}{I_{yy}} (I_{zz} - I_{xx}) \quad (4.17)$$

$$\dot{\omega}_z = \frac{L(\omega_R^2 \sin \lambda_R - \omega_L^2 \sin \lambda_L)}{I_{zz}} + \frac{M_{cable(z)}}{I_{zz}} - \frac{\omega_y \omega_z}{I_{zz}} (I_{xx} - I_{yy}) \quad (4.18)$$

Hasil dari penurunan matematis diatas menghasilkan 6 persamaan yaitu 3 persamaan untuk gerak translasi dan 3 persamaan untuk gerak rotasi. Variabel yang akan dicari pada penelitian ini yaitu ω_R , ω_L , λ_R dan λ_L . Kondisi ini menuntut penggunaan metode komputasi yang mampu menyelesaikan sistem persamaan *overdetermined*, salah satunya adalah *Singular Value Decomposition* (SVD).

4.1.2 Singular Value Decomposition

Sistem ini dikategorikan sebagai sistem *overdetermined* berdasarkan persamaan gerak yang telah dijabarkan. Jumlah persamaan yang tersedia terbukti melebihi jumlah variabel yang menjadi target solusi. Total enam persamaan gerak menyusun model ini, yang terdiri dari tiga persamaan translasi dan tiga persamaan rotasi, sedangkan jumlah variabel yang dicari hanya terdiri dari 4 yaitu ω_R , ω_L , λ_R dan λ_L .

Sistem persamaan yang telah diperoleh dapat disusun dalam bentuk matriks linear sebagai berikut:

$$Ax = b \quad (4.19)$$

Matriks A adalah matriks koefisien, x adalah vektor variabel yang akan dicari, dan b adalah vektor hasil. Matriks x yang digunakan pada penelitian ini dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$x = \begin{bmatrix} \omega_R^2 \cos \lambda_R \\ \omega_L^2 \cos \lambda_L \\ \omega_R^2 \sin \lambda_R \\ \omega_L^2 \sin \lambda_L \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Vektor variabel x merepresentasikan gaya dorong yang dihasilkan oleh masing-masing rotor pada sistem bicopter. Matriks koefisien A merupakan matriks berukuran 6×4 yang dibentuk dari hubungan kinematika dan dinamika sistem, termasuk sudut α , β , dan ζ , konstanta *coefficient thrust* (CT), serta parameter geometris sistem seperti jarak rotor dan momen inersia. Matriks ini merepresentasikan pengaruh gaya dorong rotor terhadap percepatan translasi dan rotasi sistem. Matriks A secara sistematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} \cos \zeta \sin \beta \sin \alpha - \sin \zeta \cos \alpha & \cos \zeta \sin \beta \sin \alpha - \sin \zeta \cos \alpha & \sin \alpha \sin \zeta + \cos \zeta \sin \beta \cos \alpha & \sin \alpha \sin \zeta + \cos \zeta \sin \beta \cos \alpha \\ \sin \alpha \sin \zeta \sin \beta + \cos \alpha \cos \zeta & \sin \alpha \sin \zeta \sin \beta + \cos \alpha \cos \zeta & \sin \zeta \sin \beta \cos \alpha - \sin \alpha \cos \zeta & \sin \zeta \sin \beta \cos \alpha - \sin \alpha \cos \zeta \\ \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha & \cos \beta \cos \alpha \\ 0 & 0 & h/I_{xx} & h/I_{xx} \\ -L/I_{yy} & L/I_{yy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L/I_{zz} & -L/I_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Vektor b merupakan vektor berukuran 6×1 yang memuat besaran percepatan translasi dan rotasi sistem, termasuk pengaruh gaya eksternal berupa gaya kabel, momen kabel, dan gaya gravitasi. Vektor ini diperoleh dari hasil pengukuran atau perhitungan pada tahap sebelumnya dan digunakan sebagai masukan dalam proses estimasi gaya dorong rotor.

$$b = \begin{bmatrix} \ddot{x}m - F_{cable(x)} \\ \ddot{y}m - F_{cable(y)} \\ \ddot{z}m + gm - F_{cable(z)} \\ \dot{\omega}_x + M_{cable(x)} - \frac{\omega_y \omega_z}{I_{xx}} (I_{yy} - I_{zz}) \\ \dot{\omega}_y + M_{cable(y)} - \frac{\omega_x \omega_z}{I_{yy}} (I_{zz} - I_{xx}) \\ \dot{\omega}_z + M_{cable(z)} - \frac{\omega_x \omega_y}{I_{zz}} (I_{xx} - I_{yy}) \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Penelitian ini juga mengasumsikan bahwa sudut roll (α_i) dan pitch (β_i) memiliki nilai yang sama pada ketiga bicopter, yaitu $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$ dan $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$, guna menyederhanakan proses analisis.

4.1.3 Mencari Nilai Kecepatan dan Kemiringan Rotor

Penyelesaian sistem persamaan overdetermined menggunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD) diperoleh vektor solusi x yang merepresentasikan besaran gaya dorong rotor dalam bentuk komponen proyeksi terhadap sudut kemiringan rotor. Vektor solusi tersebut dinyatakan sebagai:

$$x = \begin{bmatrix} Ur_1 \\ Ur_2 \\ Ur_3 \\ Ur_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_R^2 \cos \lambda_R \\ \omega_L^2 \cos \lambda_L \\ \omega_R^2 \sin \lambda_R \\ \omega_L^2 \sin \lambda_L \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Variabel ω_R dan ω_L masing-masing menyatakan kecepatan sudut rotor kanan dan kiri, sedangkan λ_R dan λ_L merepresentasikan sudut kemiringan rotor kanan dan kiri terhadap sumbu referensi. Bentuk vektor solusi tersebut menunjukkan bahwa hasil estimasi menggunakan metode SVD tidak secara langsung menghasilkan nilai kecepatan sudut dan sudut kemiringan rotor, melainkan komponen kuadrat kecepatan sudut rotor yang terproyeksi pada arah kosinus dan sinus dari sudut kemiringannya. Nilai kecepatan sudut rotor dan sudut kemiringan rotor secara eksplisit diperoleh dengan transformasi matematis. Nilai kecepatan sudut rotor diperoleh dari hasil estimasi SVD menggunakan persamaan berikut.

$$\omega_R = \sqrt[4]{((\omega_R^2 \cos \lambda_R)^2 + (\omega_R^2 \sin \lambda_R)^2)} \quad (4.24)$$

$$\omega_R = \sqrt[4]{((Ur_1)^2 + (Ur_3)^2)} \quad (4.25)$$

$$\omega_L = \sqrt[4]{((\omega_L^2 \cos \lambda_L)^2 + (\omega_L^2 \sin \lambda_L)^2)} \quad (4.26)$$

$$\omega_L = \sqrt[4]{((Ur_2)^2 + (Ur_4)^2)} \quad (4.27)$$

Nilai sudut kemiringan rotor ditentukan dari hasil estimasi SVD menggunakan persamaan berikut.

$$\lambda_R = \sin^{-1} \left(\frac{\omega_R^2 \sin \lambda_R}{\sqrt{(\omega_R^2 \cos \lambda_R)^2 + (\omega_R^2 \sin \lambda_R)^2}} \right) \quad (4.28)$$

$$\lambda_R = \sin^{-1} \left(\frac{Ur_3}{\sqrt{(Ur_1)^2 + (Ur_3)^2}} \right) \quad (4.29)$$

$$\lambda_L = \sin^{-1} \left(\frac{\omega_L^2 \sin \lambda_L}{\sqrt{(\omega_L^2 \cos \lambda_L)^2 + (\omega_L^2 \sin \lambda_L)^2}} \right) \quad (4.30)$$

$$\lambda_L = \sin^{-1} \left(\frac{Ur_4}{\sqrt{(Ur_2)^2 + (Ur_4)^2}} \right) \quad (4.31)$$

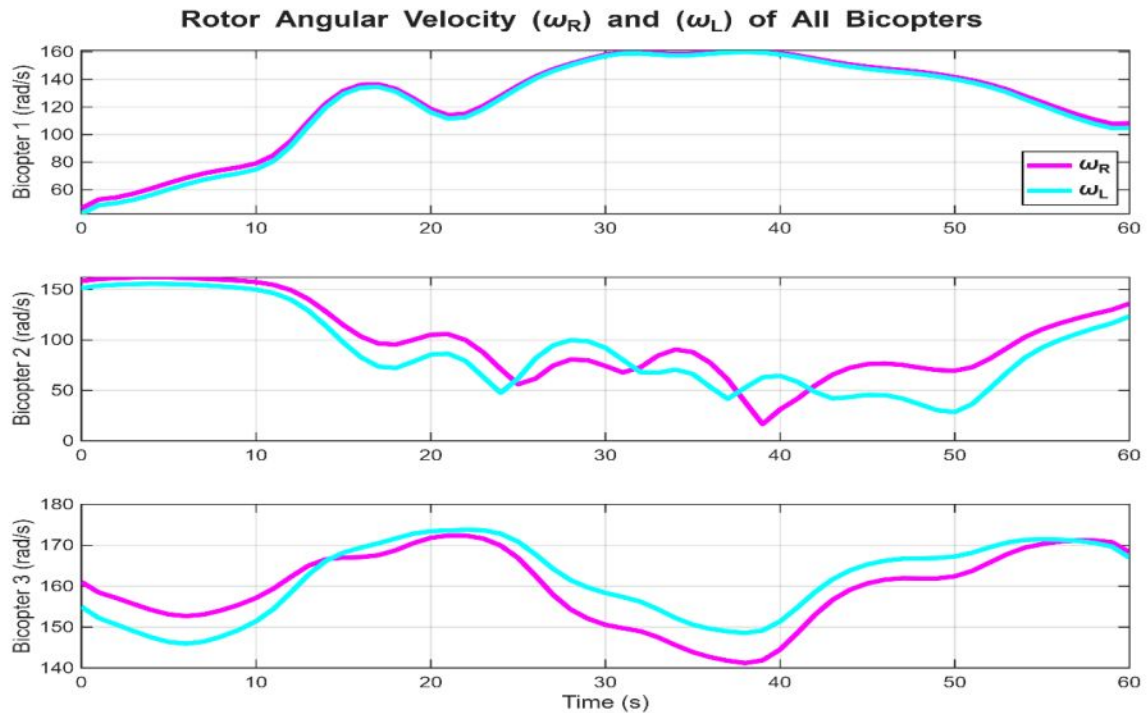
Kecepatan sudut rotor kanan dan kiri diperoleh dengan menghitung magnitudo dari pasangan komponen proyeksi $\omega^2 \cos \lambda$ dan $\omega^2 \sin \lambda$, sedangkan sudut kemiringan rotor ditentukan berdasarkan rasio antara komponen sinus terhadap magnitudo total proyeksi tersebut.

4.2 Analisis Quasi-Static pada Multi-Bicopter ACTS

Analisis pada penelitian ini difokuskan pada evaluasi karakteristik operasi sistem ACTS pada konfigurasi multi-bicopter berdasarkan pendekatan *quasi-static* dan *quasi-dynamic*. Pembahasan diarahkan pada respons kecepatan sudut rotor serta kemiringan sudut rotor yang dihasilkan akibat variasi kondisi pembebanan dan dinamika sistem. Analisis *quasi-static* pada sistem *multi-bicopter* ACTS difokuskan untuk mengkaji respons operasi rotor pada kondisi pergerakan yang berlangsung secara perlahan. Sistem pada pendekatan ini diasumsikan bergerak mengikuti lintasan berbentuk lingkaran dengan jari-jari tertentu yang ditempuh dalam durasi waktu yang relatif panjang. Kecepatan sudut dan percepatan sudut sistem terhadap sumbu koordinat payload diasumsikan bernilai nol. Dengan asumsi tersebut, respons sistem terutama ditentukan oleh kebutuhan keseimbangan gaya dan momen, bukan oleh pengaruh percepatan dinamis. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang lebih terfokus terhadap kecepatan sudut rotor dan kemiringan sudut rotor yang diperlukan untuk mempertahankan kestabilan sistem pada setiap variasi kondisi pembebanan.

4.2.1 Kecepatan Sudut Rotor pada Kondisi *Quasi-Static*

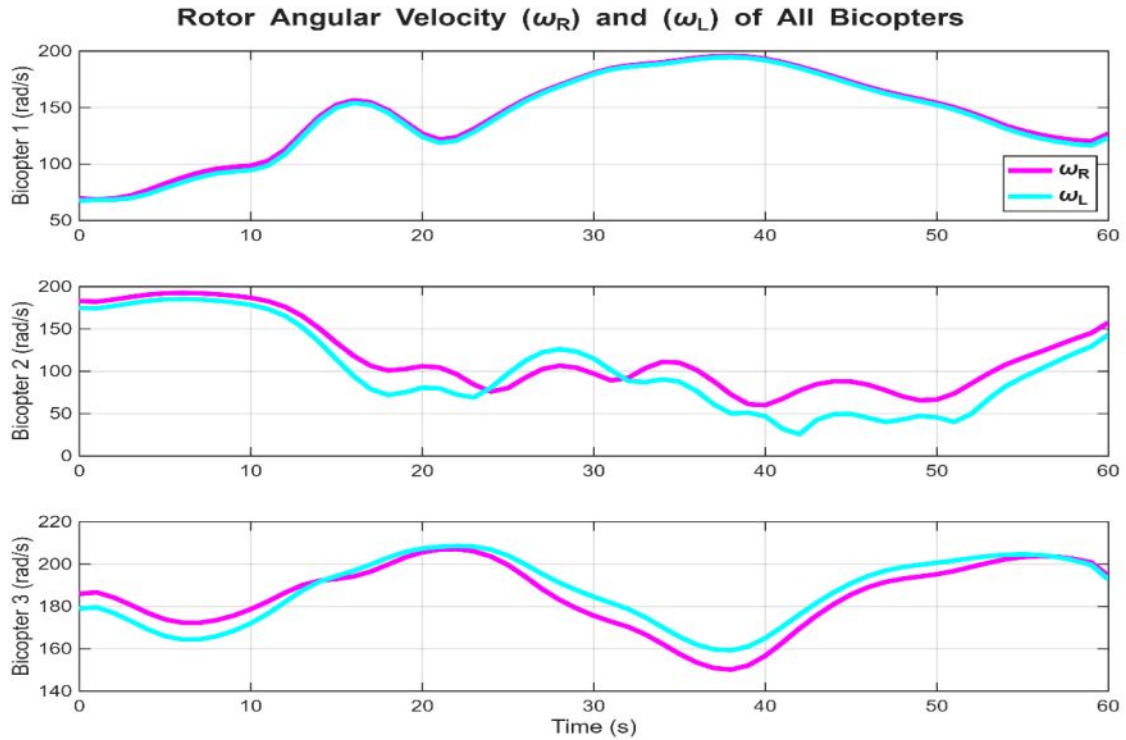
Analisis karakteristik kecepatan sudut rotor pada kondisi *quasi-static* untuk setiap *bicopter* dalam sistem ACTS dilakukan terhadap rotor kanan dan kiri dari masing-masing *bicopter* selama sistem mengikuti lintasan yang telah ditetapkan. Nilai kecepatan sudut rotor yang dianalisis diperoleh dari data hasil perhitungan pada tahap sebelumnya, yang kemudian disubstitusikan ke dalam formulasi sistem aktuasi rotor dan diselesaikan menggunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD).



Gambar 4. 2 Hasil SVD Kecepatan Sudut Rotor Kanan dan Kiri Semua Bicopter pada *quasi-static* dengan beban 1.5 kg

Pada simulasi dengan beban 1.5 kg, grafik kecepatan rotor memperlihatkan respons sistem yang adaptif terhadap perubahan geometri kabel di sepanjang lintasan lingkaran dengan profil yang relatif stabil. Fase awal pergerakan yang berlangsung dari detik ke-0 hingga detik ke-15, ditandai oleh transisi peran yang signifikan antar *bicopter*. *Bicopter* 1, yang memulai operasi dengan kecepatan rendah sekitar 50 rad/s, mengalami akselerasi linear hingga mencapai 135 rad/s. Kenaikan ini mengindikasikan bahwa saat *payload* bergerak menyusuri busur awal lingkaran, posisi *bicopter* 1 menjadi semakin dominan dalam menahan vektor gravitasi, sedangkan *bicopter* 2 yang mengawali lintasan dengan kecepatan tinggi sekitar 150 rad/s untuk mengangkat beban awal dan mengalami deselerasi pada fase detik ke-10 hingga ke-25. Penurunan ini mencerminkan fenomena geometris di mana sudut kabel *bicopter* 2 menjadi kurang efektif untuk memberikan gaya tarik, sehingga algoritma SVD secara otomatis mereduksi *thrust* pada unit tersebut untuk meminimalkan norma energi total sistem.

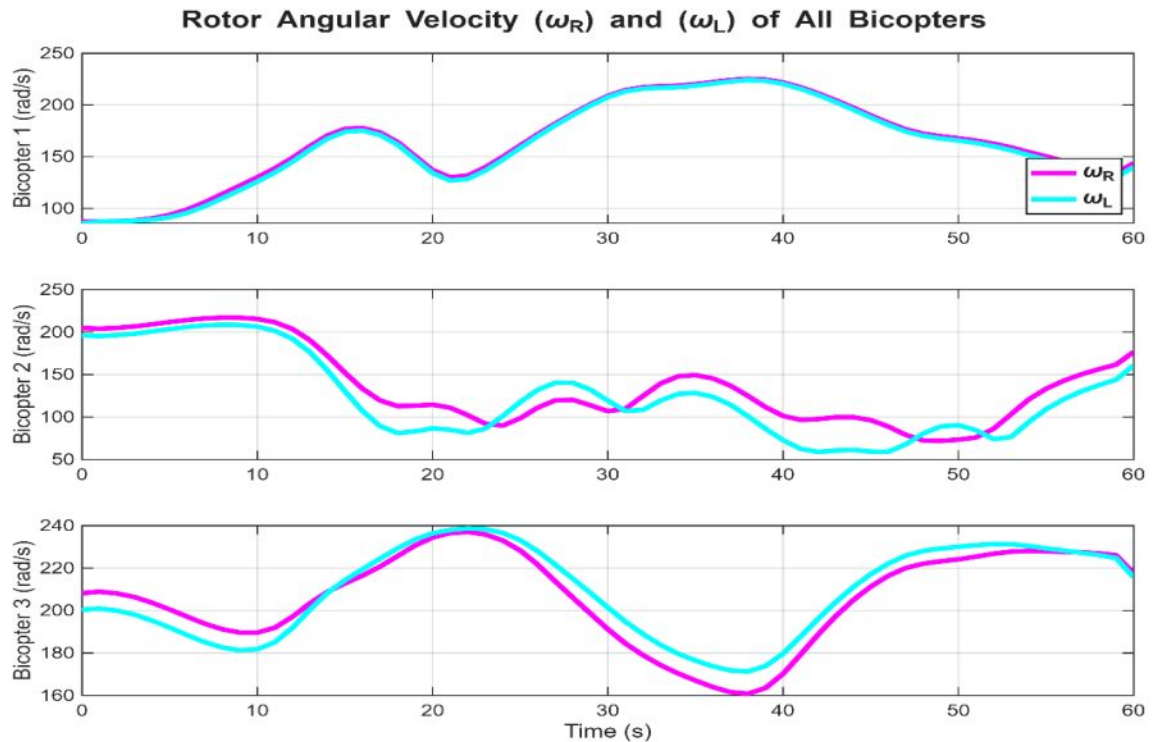
Fase pertengahan yang krusial pada detik ke-30 hingga 45, terjadi fenomena lembah curam yang sangat signifikan pada *bicopter* 2 dan *bicopter* 3. Pada detik ke-39, kecepatan *bicopter* 2 turun hingga titik minimum sekitar 16.5 rad/s, yang terjadi hampir bersamaan dengan penurunan tajam pada *bicopter* 3. Dalam konteks trajektori lingkaran, titik ini merepresentasikan posisi di mana *payload* berada pada area terjauh atau sudut tertentu di mana tegangan kabel yang dibutuhkan dari *bicopter* 2 dan 3 sangat minimal (hampir *slack*). Beban sistem hampir sepenuhnya ditransfer ke *bicopter* 1 pada momen ini yang terlihat mencapai puncak performanya (160 rad/s) di rentang waktu yang sama. Pola distribusi gaya ini menegaskan efisiensi metode SVD dalam mengalokasikan beban saat satu atau dua unit kehilangan efektivitas geometris, unit lain akan mengompensasi secara penuh. Pada detik ke-50 hingga 60, grafik menunjukkan tren konvergensi di mana kecepatan ketiga *bicopter* kembali menyeimbangkan diri, menandakan selesainya satu putaran siklus lingkaran.



Gambar 4. 3 Hasil SVD Kecepatan Sudut Rotor Kanan dan Kiri Semua Bicopter pada *quasi-static* dengan beban 2 kg

Pada variasi beban 2 kg, karakteristik grafik mengalami eskalasi magnitudo dan mulai menunjukkan kompleksitas dalam stabilitas kontrol. Fase awal pada detik ke-0 hingga 10 memperlihatkan bahwa *bicopter* 2 dan 3 harus bekerja lebih keras dengan kecepatan awal di kisaran 180 rad/s untuk mengatasi inersia beban yang lebih besar. Perbedaan karakteristik yang mencolok dibandingkan beban ringan terlihat pada fase pertengahan, khususnya antara detik ke-20 hingga 35 pada *bicopter* 2. Pada fase ini, grafik tidak lagi menurun secara mulus, melainkan mengalami osilasi atau fluktuasi naik-turun di kisaran 75 hingga 120 rad/s. Ketidakstabilan ini mengindikasikan bahwa dengan beban 2 kg, margin stabilitas pada geometri lintasan tersebut menipis, memaksa sistem kontrol untuk terus-menerus mencari titik keseimbangan torsi yang optimal. Pada garis kecepatan rotor kanan (ω_R) dan kiri (ω_L) terlihat adanya separasi (*split*) pada momen fluktuatif ini, yang menandakan bahwa bicopter tidak hanya menghasilkan gaya angkat (*lift*), tetapi juga harus memproduksi momen *yaw* atau *roll* untuk mempertahankan orientasi hadap bicopter agar tetap segaris dengan vektor tarikan kabel.

Pada titik kritis di detik ke-40 hingga 42, *bicopter* 2 kembali mengalami penurunan ekstrem hingga menyentuh angka sekitar 30 rad/s. Fenomena menarik lainnya terlihat pada perilaku *bicopter* 3 di fase detik ke-20 hingga 30. *Bicopter* 3 mengalami lonjakan drastis mencapai puncak lokal sekitar 210 rad/s sebelum mengalami penurunan bersamaan dengan *bicopter* 2. Lonjakan ini terjadi tepat saat *bicopter* 2 mulai kehilangan efektivitasnya, yang menunjukkan adanya mekanisme transfer beban (*load transfer*) yang sangat responsif. Analisis trajektori mengimplikasikan bahwa pada detik-detik ini, resultan gaya gravitasi dan sentrifugal dari gerakan melingkar memberatkan sisi *bicopter* 3, sehingga SVD memerintahkan lonjakan *thrust* yang besar untuk mencegah penyimpangan lintasan. Sudut curam pada grafik kecepatan ini merepresentasikan sensitivitas geometri sistem, di mana perubahan posisi yang kecil pada lingkaran dapat menyebabkan perubahan drastis pada distribusi gaya yang dibutuhkan.



Gambar 4. 4 Hasil SVD Kecepatan Sudut Rotor Kanan dan Kiri Semua Bicopter pada *quasi-static* dengan beban 2.5 kg

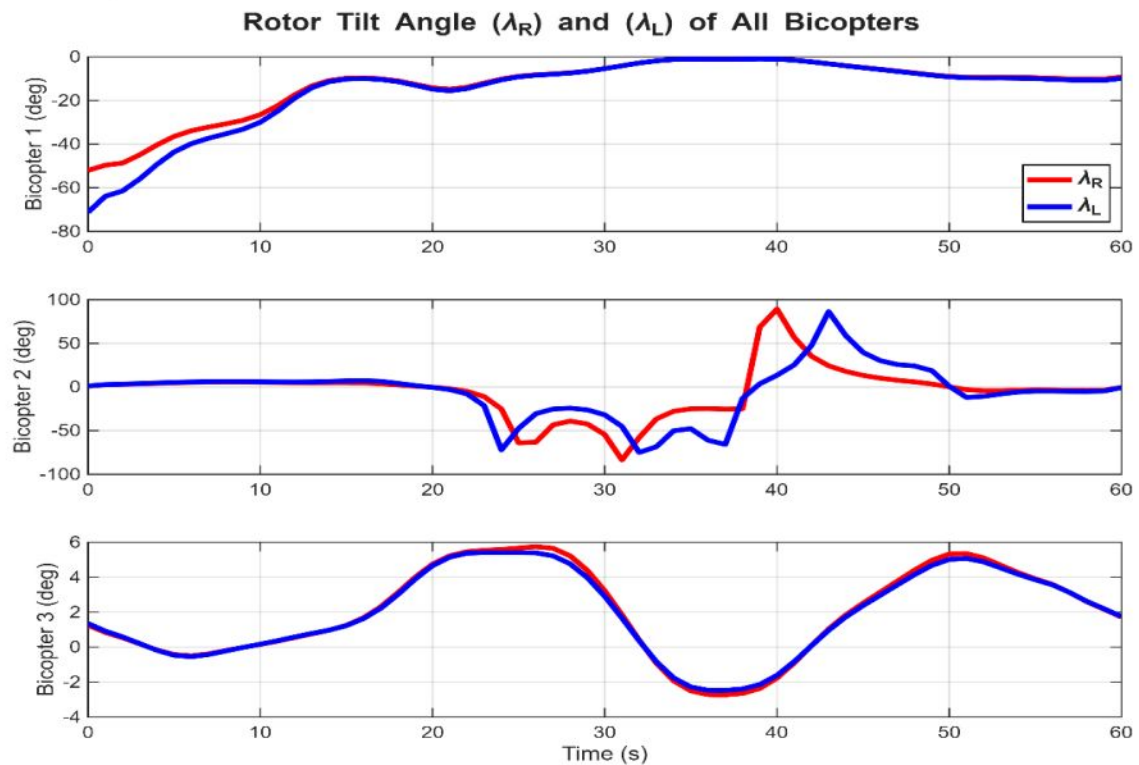
Pada skenario beban terberat 2.5 kg, sistem didorong mendekati batas saturasi operasionalnya. Indikasi paling jelas terlihat pada grafik *bicopter 1* selama fase detik ke-30 hingga 40, di mana kurva kecepatan membentuk dataran konstan pada kecepatan sangat tinggi, yaitu sekitar 225 rad/s. *Bicopter 1* harus mempertahankan *thrust* maksimum secara kontinu untuk menjaga *payload* tetap pada lintasannya yang ditunjukkan oleh terbentuknya dataran pada grafik dan tidak ada ruang untuk fluktuasi karena penurunan gaya sedikit saja dapat mengakibatkan kegagalan dalam mempertahankan ketinggian beban. Fase awal pada *bicopter 2* menunjukkan perilaku yang sangat agresif. Pada detik ke-10 hingga ke-20, kecepatan rotor *bicopter 2* mengalami penurunan tajam (*steep drop*) dari 200 rad/s menjadi sekitar 100 rad/s dengan gradien kemiringan yang sangat curam.

Penurunan ekstrem pada *bicopter 2* tersebut dikompensasi secara langsung oleh *bicopter 3*. Pada fase yang sama, yakni detik ke-15 hingga 25, *bicopter 3* mencatatkan kecepatan tertinggi dalam seluruh rangkaian simulasi, melonjak hingga hampir menyentuh 240 rad/s. Fase ini merepresentasikan kondisi tegangan puncak (*peak tension*) yang terjadi pada sistem. *Bicopter 3* secara dominan harus menopang mayoritas beban 2,5 kg tanpa bantuan signifikan dari unit lain. Konfigurasi geometris Bicopter 2 yang tidak optimal pada segmen lintasan tersebut menjadi penyebab utama terjadinya pemusatan beban ini. Pada fase detik ke-40 hingga 50, *bicopter 2* tertahan cukup lama di area kecepatan rendah (di bawah 80 rad/s), sementara *bicopter 1* mengambil alih beban sepenuhnya. Dinamika ekstrem pada beban 2.5 kg ini di mana satu rotor bekerja maksimum sementara yang lain hampir non-aktif menunjukkan karakteristik optimasi SVD yang tegas. Algoritma ini akan memutus daya pada aktuator yang tidak efisien secara geometris dan membebaskan seluruh kerja pada aktuator yang memiliki *leverage* terbaik, meskipun hal tersebut memaksa motor bekerja mendekati batas kemampuannya. Hasil perhitungan kecepatan sudut rotor menggunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD) pada kondisi

quasi-static menunjukkan bahwa nilai yang diperoleh masih berada jauh di bawah batas saturasi kecepatan motor, sehingga memvalidasi kelayakan operasional sistem untuk mempertahankan ekuilibrium beban pada sistem ACTS.

4.2.2 Kemiringan Sudut Rotor pada Kondisi *Quasi-Static*

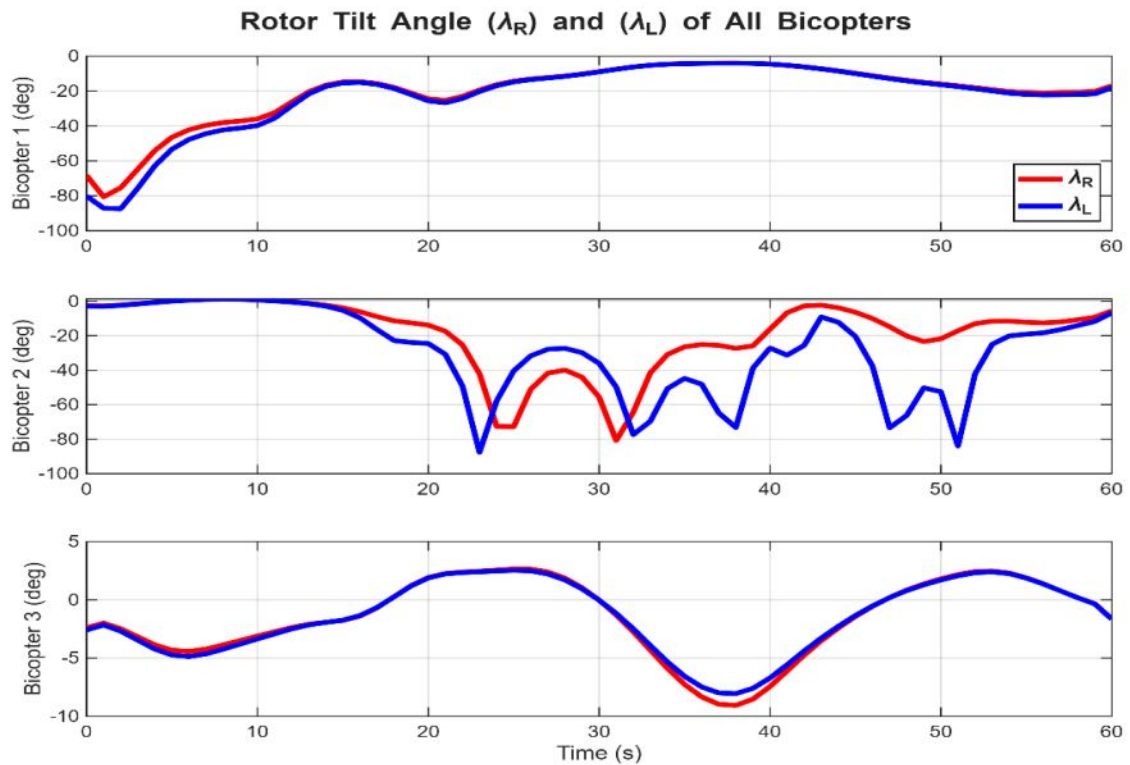
Analisis pada kemiringan sudut rotor sebagai respons sistem ACTS dalam mempertahankan keseimbangan pada kondisi *quasi-static*. Sudut kemiringan rotor kanan dan kiri pada masing-masing bicopter diperoleh melalui proses perhitungan yang memanfaatkan data hasil analisis sebelumnya, dengan penyelesaian sistem persamaan dilakukan menggunakan metode SVD sebagaimana telah dijelaskan pada subbab sebelumnya.



Gambar 4. 5 Hasil SVD Kemiringan Rotor Kanan dan Kiri Semua Bicopter pada *quasi-static* dengan beban 1.5 kg

Pada simulasi dengan beban 1.5 kg, profil kemiringan rotor menunjukkan karakteristik adaptasi geometris yang sangat khas antar-unit. Fase awal lintasan, dari detik ke-0 hingga detik ke-20, didominasi oleh manuver orientasi awal *bicopter 1*. Grafik memperlihatkan bahwa unit ini memulai dengan sudut kemiringan negatif yang sangat ekstrem, berkisar antara -70 hingga -50 derajat. Fenomena ini mengindikasikan perlunya defleksi vektor gaya dorong (*thrust vector*) yang signifikan ke arah horizontal pada *Bicopter 1* saat berada di posisi awal lintasan. Gaya horizontal tersebut krusial untuk membangkitkan tegangan kabel awal sekaligus mengompensasi inersia diam sistem. Sudut pada bicopter 1 mulai melandai seiring berjalan waktu menandakan bahwa *bicopter 1* telah mencapai posisi stabil di mana gaya angkat vertikal mulai mendominasi. *Bicopter 2* dan *bicopter 3* menunjukkan perilaku yang relatif tenang pada fase awal ini, dengan sudut kemiringan yang mendekati nol, mengisyaratkan bahwa kontribusi vektor arah dari kedua unit tersebut belum krusial pada segmen awal busur lingkaran.

Pada fase pertengahan situasi berubah drastis yaitu pada detik ke-20 hingga 40, yang merupakan fase paling kritis bagi *bicopter 2*. Pada rentang waktu ini, grafik *bicopter 2* menunjukkan fluktuasi yang sangat volatil dan ekstrem. Lonjakan sudut negatif tajam terjadi hingga -80 derajat pada detik ke-30, yang kemudian diikuti oleh pembalikan arah sudut secara mendadak (*singularity*) menjadi positif ekstrem (+80 derajat) tepat pada detik ke-40. Fenomena pembalikan nilai dari negatif ke positif dalam waktu singkat ini merepresentasikan manuver "*flip*" atau reorientasi cepat. Lintasan lingkaran pada titik tertentu memaksa terjadinya perubahan sudut tarikan kabel secara drastis hingga 180 derajat terhadap kerangka *body Bicopter 2*. Kompensasi gaya wajib dilakukan oleh aktuator melalui pemutaran arah dorong sepenuhnya demi menjaga kontinuitas tegangan kabel. *Bicopter 3* menunjukkan pola osilasi harmonik yang halus menyerupai gelombang sinus dengan amplitudo rendah (+6 derajat hingga -4 derajat), yang mencerminkan pergerakan *payload* yang mengikuti kelengkungan lingkaran secara teratur tanpa gangguan gaya lateral yang berlebihan.

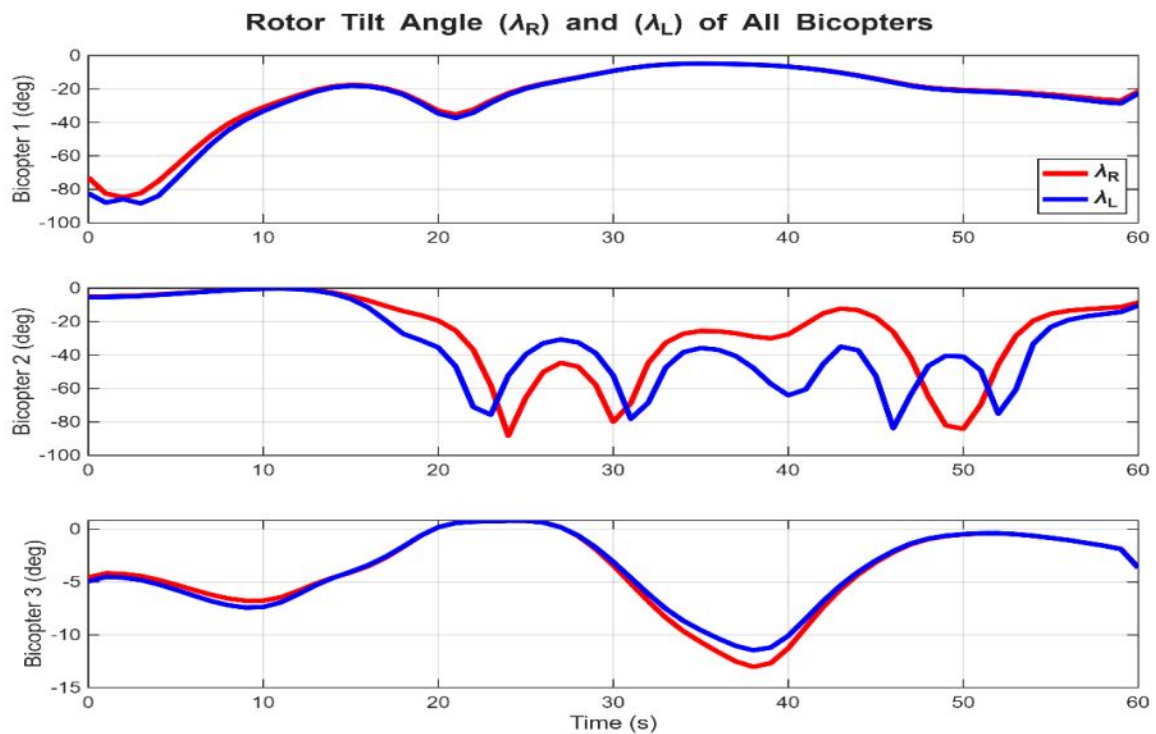


Gambar 4. 6 Hasil SVD Kemiringan Rotor Kanan dan Kiri Semua Bicopter pada *quasi-static* dengan beban 2 kg

Peningkatan beban menjadi 2 kg berdampak langsung pada magnitudo kemiringan yang diperlukan untuk memanipulasi vektor gaya tiap unit. Karakteristik *bicopter 1* pada fase awal (detik 0-10) tetap konsisten dengan pola sebelumnya, yaitu dimulai dari sudut negatif ekstrem (-90 derajat) untuk inisiasi gerak. Perbedaan signifikan mulai terlihat pada perilaku *bicopter 2*. Pada beban ringan fase kacau baru dimulai di detik ke-20, sedangkan pada beban 2 kg, instabilitas sudut dimulai lebih awal dengan intensitas yang lebih tinggi. Grafik *bicopter 2* membentuk pola "gerigi" tajam dengan sudut yang menyentuh -90 derajat berulang kali antara detik ke-20 hingga 35. Sudut -90 derajat ini secara fisik bermakna bahwa rotor berada pada posisi tegak lurus terhadap sumbu vertikal, atau dengan kata lain, unit tersebut menarik sepenuhnya ke arah horizontal. Beban yang lebih berat

membutuhkan komponen gaya sentripetal yang lebih besar untuk mempertahankan *payload* agar tetap pada radius putar yang ditentukan.

Pada fase detik ke-30 hingga 50, terlihat adanya fenomena separasi atau percabangan antara garis merah (λ_R) dan garis biru (λ_L) pada grafik *bicopter 2*. Celah antara kedua garis ini mengindikasikan adanya *differential tilt*, di mana sudut kemiringan rotor kanan dan kiri pada satu unit tidak sama. Mekanisme ini digunakan oleh sistem kontrol SVD untuk menghasilkan momen *yaw* (putaran pada sumbu vertikal). Kebutuhan momen *yaw* yang besar ini menunjukkan bahwa selain menarik kabel, *bicopter 2* juga harus berjuang mempertahankan arah hadapnya agar tidak terputar oleh torsi kabel yang semakin besar akibat beban 2 kg. *Bicopter 3* memperlihatkan peningkatan amplitudo gelombang sinusnya, dengan lembah terdalam mencapai -8 derajat pada detik ke-38. Penurunan sudut ini sinkron dengan titik kritis pada *bicopter 2*, menandakan adanya koordinasi sistemik di mana unit *bicopter 3* menyesuaikan sudutnya untuk mengompensasi perubahan vektor gaya yang drastis dari *bicopter 2*.



Gambar 4. 7 Hasil SVD Kemiringan Rotor Kanan dan Kiri Semua Bicopter pada *quasi-static* dengan beban 2.5 kg

Pada skenario beban maksimum 2.5 kg, sistem bekerja pada batas orientasi mekanisnya. Grafik *bicopter 1* memperlihatkan pola lengkung yang lebih tegas pada detik ke-20, di mana terjadi penurunan sudut sesaat sebelum kembali stabil. Unit *Bicopter 1* diharuskan melakukan koreksi sudut dinamis guna mengompensasi gaya tarik beban yang mengarah ke vertikal bawah pada posisi angular tertentu. Manuver kompensasi ini krusial untuk mencegah penurunan ketinggian sistem akibat beban tersebut. Perilaku ekstrem terjadi pada *bicopter 2* pada fase detik ke-20 hingga detik ke-50. Grafik menunjukkan pola yang sangat kacau dengan separasi (λ_R) dengan (λ_L) yang sangat lebar dan tajam. Rotor kanan dan kiri memiliki selisih kemiringan antara rotor sangat signifikan pada beberapa titik yang menandakan bahwa unit tersebut mengerahkan upaya maksimal untuk

menghasilkan torsi koreksi. Bentuk grafik yang menyerupai "gigi gergaji" (*sawtooth*) pada fase ini mengindikasikan bahwa kontroler SVD secara agresif mengubah-ubah sudut kemiringan untuk mencari posisi kesetimbangan energi terendah yang sangat sulit dicapai akibat beratnya beban.

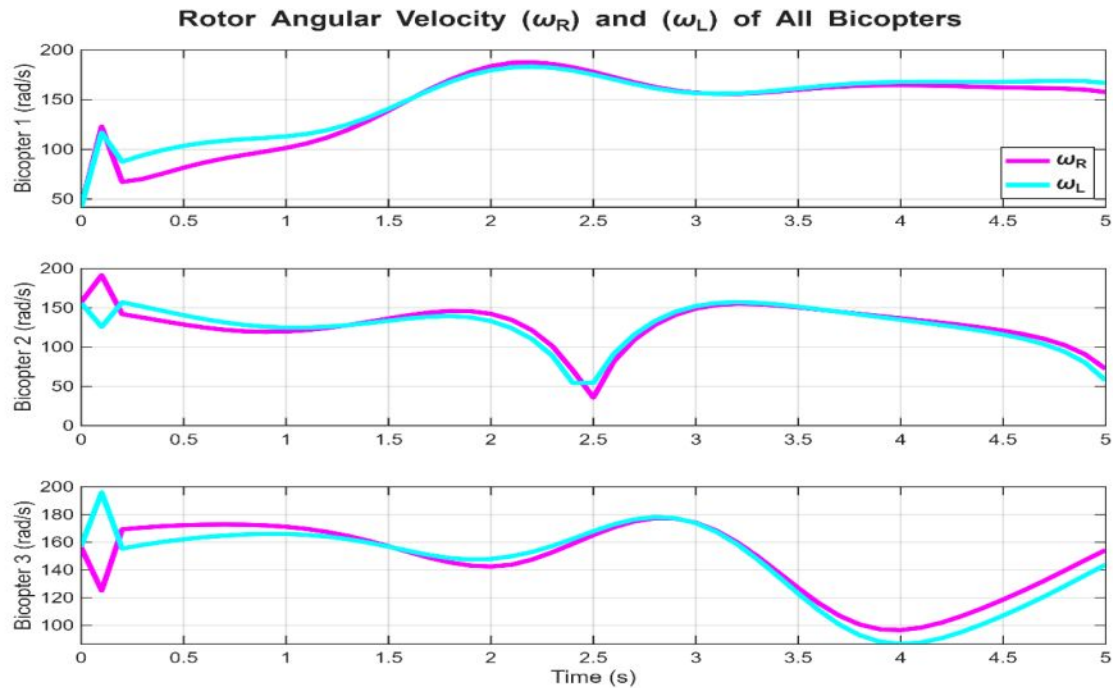
Bicopter 3 pada beban 2.5 kg menunjukkan respons yang paling teratur dengan amplitudo terbesar dibandingkan skenario beban lainnya. Pada detik ke-38 hingga 40, sudut kemiringan *bicopter 3* mencapai titik terendah hingga -13 derajat. Peningkatan sudut negatif ini (dibandingkan hanya -4 derajat pada beban 1.5 kg) menegaskan hukum fisika bahwa semakin berat benda yang diputar pada lintasan melingkar, semakin besar gaya ke arah dalam (sentripetal) yang dibutuhkan. Posisi unit *bicopter 3* berada di bawah sehingga harus memiringkan rotornya lebih curam untuk memberikan kontribusi vektor gaya horizontal yang cukup guna menahan *payload* agar tidak terlempar keluar dari lintasan lingkaran. Grafik ini secara keseluruhan memvalidasi bahwa pada beban terberat, strategi kontrol tidak lagi hanya soal mengangkat beban, melainkan didominasi oleh upaya stabilisasi orientasi (*attitude stabilization*) melalui manipulasi sudut kemiringan rotor yang ekstrem dan diferensial pada tiap unit. Nilai kemiringan sudut rotor yang dihasilkan dari metode SVD pada fase *quasi-static* terkonfirmasi masih berada dalam batasan mekanik servo yang tersedia, sehingga menegaskan bahwa konfigurasi orientasi ini layak diterapkan secara fisik untuk menjaga stabilitas posisi *payload* pada sistem ACTS.

4.3 Analisis Quasi-Dynamic pada Multi-Bicopter ACTS

Trajektori dinamis merepresentasikan kondisi manuver sistem ACTS dengan tingkat agresivitas yang lebih tinggi, di mana lintasan yang sama ditempuh dalam waktu yang jauh lebih singkat. Kondisi tersebut menyebabkan munculnya komponen kecepatan sudut dan percepatan sudut terhadap sumbu koordinat *payload* yang bernilai signifikan. Analisis trajektori dinamis melibatkan komponen kecepatan sudut dan percepatan sudut terhadap sumbu koordinat *payload* yang tidak dapat diabaikan. Nilai percepatan angular yang digunakan pada analisis ini mengacu pada hasil penelitian sebelumnya dan berkontribusi terhadap tambahan beban dinamis yang harus dikompensasi oleh sistem, selain pengaruh gaya berat *payload*. Pada trajektori ini menggunakan hasil optimasi sudut roll (α) dan pitch (β) untuk setiap variasi massa *payload* dari studi terdahulu, yang selanjutnya dimanfaatkan sebagai dasar dalam penentuan kecepatan sudut rotor dan kemiringan sudut rotor.

4.3.1 Kecepatan Sudut Rotor pada Kondisi Quasi-Dynamic

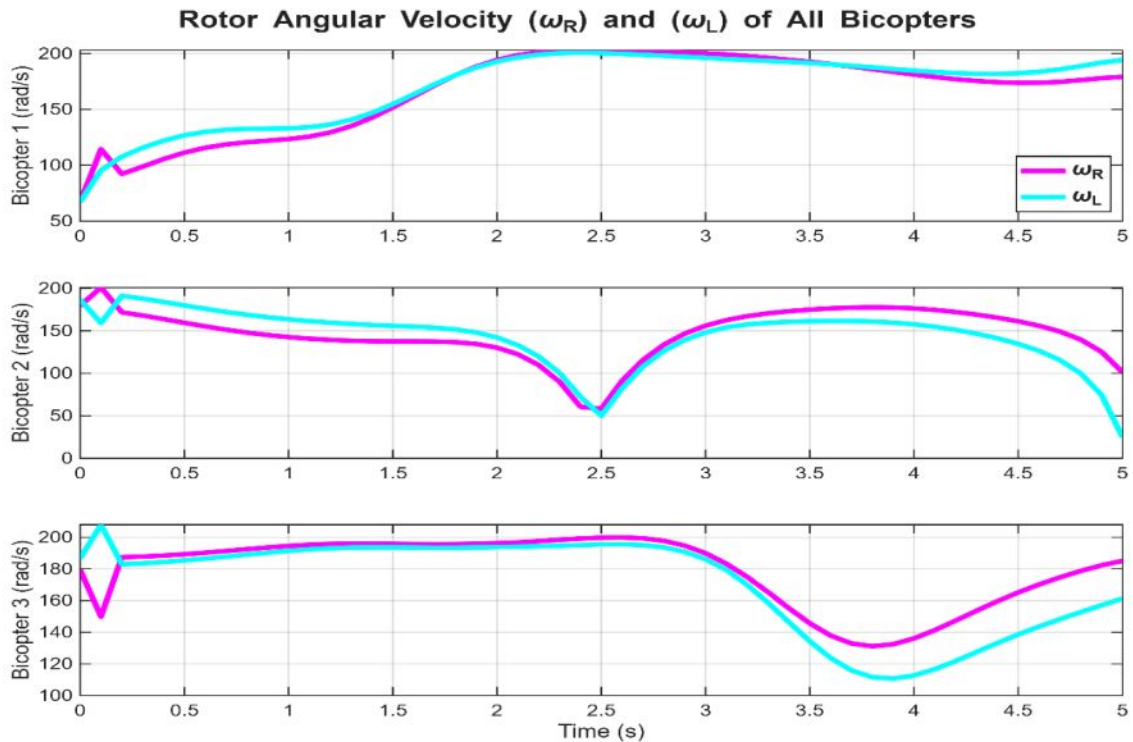
Analisis karakteristik kecepatan sudut rotor pada kondisi *quasi-dynamic* untuk setiap *bicopter* dalam sistem ACTS. Pembahasan difokuskan pada respons rotor kanan dan kiri dari masing-masing *bicopter* selama sistem bergerak mengikuti lintasan yang sama dengan durasi waktu yang lebih singkat. Pada kondisi ini, nilai kecepatan sudut rotor diperoleh berdasarkan data hasil perhitungan yang telah mempertimbangkan pengaruh kecepatan sudut dan percepatan sudut sistem terhadap *payload*.



Gambar 4. 8 Hasil SVD Kecepatan Rotor Kanan dan Kiri Semua Bicopter pada *quasi-dynamic* dengan beban 1.5 kg

Pada pengujian dengan beban 1.5 kg dalam kondisi *quasi-dynamic* (Gambar 4.8), grafik kecepatan rotor memperlihatkan respons transien yang sangat cepat dan fluktuatif, berbeda signifikan dengan kondisi *quasi-static*. Fase inisiasi gerak pada rentang detik ke-0 hingga 0.5 ditandai oleh lonjakan ekstrem (*spike*) pada ketiga unit *bicopter*. *Bicopter 2* dan *bicopter 3* secara spesifik mengalami lonjakan kecepatan instan mencapai hampir 200 rad/s sebelum turun kembali secara drastis. Fenomena lonjakan awal ini terjadi karena sistem harus mengatasi inersia diam dari beban titik massa untuk memulai akselerasi pada lintasan lingkaran. Pada fase ini, *bicopter 1* justru memulai dengan kecepatan rendah (50 rad/s) dan baru mulai menanjak naik, menunjukkan adanya pembagian tugas inisiasi di mana *bicopter 2* dan 3 bertugas memberikan gaya tarik awal yang besar.

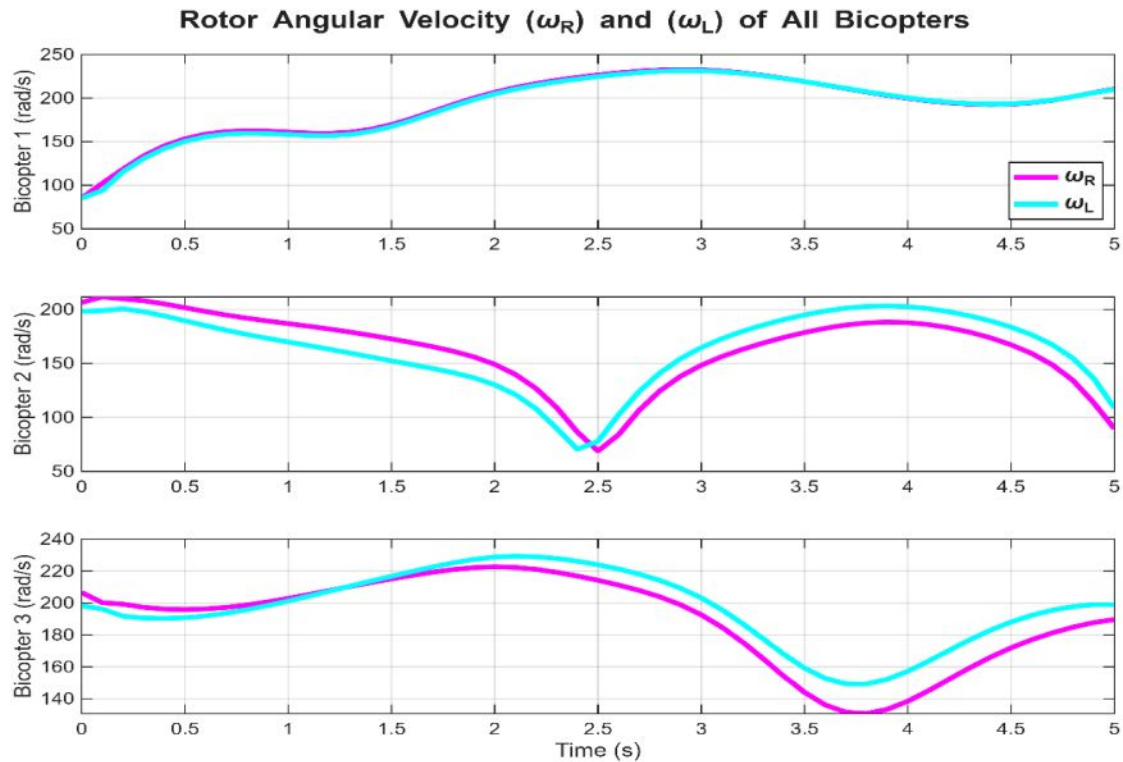
Pola distribusi beban yang sangat dinamis terjadi pada fase pertengahan trajektori pada detik ke-1.5 hingga 3. *Bicopter 1* menunjukkan kenaikan kecepatan yang konsisten hingga mencapai puncak sekitar 180 rad/s pada detik ke-2, mengambil alih peran penopang utama beban. *Bicopter 2* mengalami penurunan tajam membentuk pola "huruf V" yang sangat curam, dengan titik minimum terjadi tepat pada detik ke-2.5 di angka sekitar 40 rad/s. Titik 2.5 detik ini merupakan titik tengah siklus 5 detik, yang mengindikasikan bahwa pada posisi geometris tersebut, vektor tegangan kabel pada *bicopter 2* menjadi sangat minimal akibat kombinasi posisi sudut dan gaya inersia beban yang mengarah menjauh dari unit tersebut. Fase akhir pada detik ke-3.5 hingga 5 memperlihatkan giliran *bicopter 3* yang mengalami penurunan performa. Kecepatan rotor *bicopter 3* turun drastis hingga titik terendah sekitar 90 rad/s pada detik ke-4, sementara *bicopter 1* dan *bicopter 2* bergerak stabil di kisaran 150 rad/s. Penurunan bergantian antara unit 2 (detik 2.5) dan unit 3 (detik 4) ini menegaskan karakteristik trajektori lingkaran dinamis, di mana beban berayun dan memindahkan pusat massanya secara bergilir ke setiap *bicopter*, memaksa algoritma SVD untuk mematikan *thrust* pada unit yang kehilangan *leverage* geometris demi efisiensi energi.



Gambar 4. 9 Hasil SVD Kecepatan Rotor Kanan dan Kiri Semua Bicopter pada *quasi-dinamic* dengan beban 2 kg

Peningkatan beban menjadi 2 kg (Gambar 4.9) mempertegas karakteristik grafik dengan amplitudo kecepatan yang lebih tinggi untuk mengompensasi massa tambahan. Pada fase inisiasi (0 - 0.5 detik) terjadi lonjakan awal yang lebih agresif, di mana *bicopter* 3 bahkan menyentuh batas kecepatan di atas 200 rad/s sesaat setelah *start*. Gaya dorong rotor yang dibutuhkan memiliki korelasi positif terhadap total massa sistem sebagaimana didalilkan dalam Hukum Newton II ($F = ma$). Peningkatan beban secara langsung mewajibkan penambahan gaya dorong agar sistem mampu mempertahankan laju percepatan awal yang konstan selama durasi 5 detik. Analisis pada fase pertengahan (detik 2 - 3) terlihat titik kritis pada *bicopter* 2. Penurunan kecepatan pada detik ke-2.5 menjadi semakin tajam dan dalam dibandingkan variasi beban 1.5 kg. Grafik menunjukkan penurunan dari 140 rad/s menjadi sekitar 50 rad/s dalam waktu kurang dari 0.5 detik. Gradien deselerasi yang sangat curam ini mengindikasikan bahwa sistem kontrol harus melakukan perubahan *thrust* yang ekstrem untuk menjaga kestabilan *payload* 2 kg yang bergerak cepat. Pada momen-momen transisi cepat ini, terlihat adanya celah kecil antara ω_R dan ω_L pada setiap unit *bicopter*, yang menandakan bahwa selain gaya angkat, unit juga aktif memproduksi momen torsi (*yaw/roll*) untuk mempertahankan orientasi segitiga sama sisi terhadap kabel yang bergerak dinamis.

Pada fase akhir (detik 3.5 - 5), *bicopter* 3 kembali mengalami penurunan signifikan di detik ke-3.8 hingga 4. Pemulihan kecepatan (*recovery*) setelah titik minimum terlihat lebih lambat dibandingkan beban 1.5 kg. *Bicopter* 1 sebagai penyeimbang utama pada fase ini, harus mempertahankan kecepatan tinggi secara konstan di angka 200 rad/s (saturasi) dari detik ke-2 hingga detik ke-3.5. Kondisi dataran pada grafik *bicopter* 1 ini menunjukkan bahwa *bicopter* tersebut bekerja pada kapasitas maksimalnya untuk menahan gaya sentrifugal yang dihasilkan oleh beban 2 kg yang berputar cepat, mencegah beban tersebut terlempar keluar dari lintasan yang ditentukan.



Gambar 4. 10 Hasil SVD Kecepatan Rotor Kanan dan Kiri Semua Bicopter pada *quasi-dinamic* dengan beban 2.5 kg

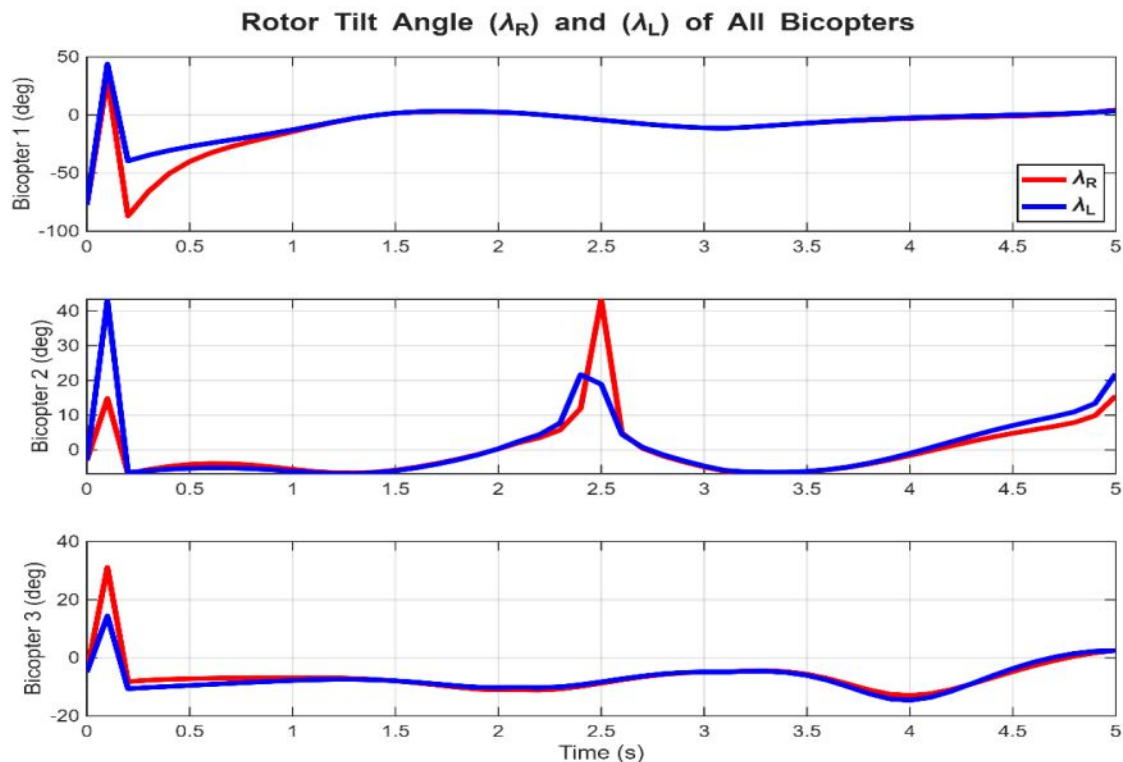
Pada skenario beban terberat 2.5 kg (Gambar 4.10), sistem *quasi-dynamic* beroperasi mendekati batas fisik kemampuannya. Fase inisiasi (0 - 1 detik) tidak lagi hanya berupa lonjakan sesaat, tetapi diikuti oleh kebutuhan daya yang tinggi secara berkelanjutan. *Bicopter* 1 harus berakselerasi lebih cepat pada beban berat mencapai 150 rad/s hanya dalam waktu 0.5 detik pertama. Inersia beban 2.5 kg terlalu besar untuk hanya ditangani oleh lonjakan awal *bicopter* 2 dan 3, sehingga memerlukan kontribusi total dari ketiga unit sejak awal pergerakan.

Fase kritis di pertengahan trajektori (detik 2 - 3) menunjukkan fenomena yang paling ekstrem. *Bicopter* 2 mengalami jatuh bebas kecepatan rotor dari 170 rad/s menjadi 70 rad/s tepat di detik ke-2.5. Bentuk kurva "V" pada grafik ini sangat tajam, menyerupai sudut lancip. Ketajaman sudut ini merepresentasikan respon sistem yang ekstrem terhadap posisi geometris yang tidak menguntungkan. *Bicopter* 1 pada saat yang sama dipaksa bekerja di area 220-230 rad/s, yang merupakan nilai tertinggi dalam seluruh simulasi untuk menanggung beban yang dilepas oleh *bicopter* 2. Pada fase akhir (detik 3.5 - 5), *bicopter* 3 mengalami penurunan terdalamnya di detik ke-3.8, menyentuh angka 130 rad/s. Respons *bicopter* 1 dan *bicopter* 2 pada fase akhir ini keduanya tidak sekadar stabil, tetapi menunjukkan tren kenaikan kecepatan yang signifikan menjelang detik ke-5. Momentum beban yang besar pada muatan 2,5 kg menuntut pembangkitan gaya pengereman (*deceleration force*) yang tinggi dari sistem saat fase penyelesaian manuver. Energi kinetik beban harus diredam melalui mekanisme penyeimbangan akhir yang kuat agar trajektori lingkaran dapat diakhiri dengan presisi. Keseluruhan grafik pada beban 2.5 kg ini memperlihatkan bahwa dalam kondisi dinamis, distribusi energi menjadi sangat polar satu unit bekerja sangat keras sementara unit lain direduksi dayanya secara ekstrem dalam hitungan sepersekian detik. Profil kecepatan rotor pada kondisi *quasi-dynamic* memperlihatkan bahwa fluktuasi nilai yang terjadi akibat manuver beban masih berada di

bawah ambang batas maksimum sistem propulsi, yang mengindikasikan ketersediaan margin daya yang memadai untuk mendukung operasional sistem ACTS saat bergerak mengikuti trajektori.

4.3.2 Kemiringan Sudut Rotor pada Kondisi Quasi-Dynamic

Analisis selanjutnya difokuskan pada kemiringan sudut rotor sebagai bagian dari mekanisme pengendalian orientasi sistem ACTS pada kondisi quasi-dynamic. Sudut kemiringan rotor kanan dan kiri pada masing-masing bicopter diperoleh melalui proses perhitungan yang memanfaatkan hasil optimasi sudut orientasi sistem pada lintasan dinamis.

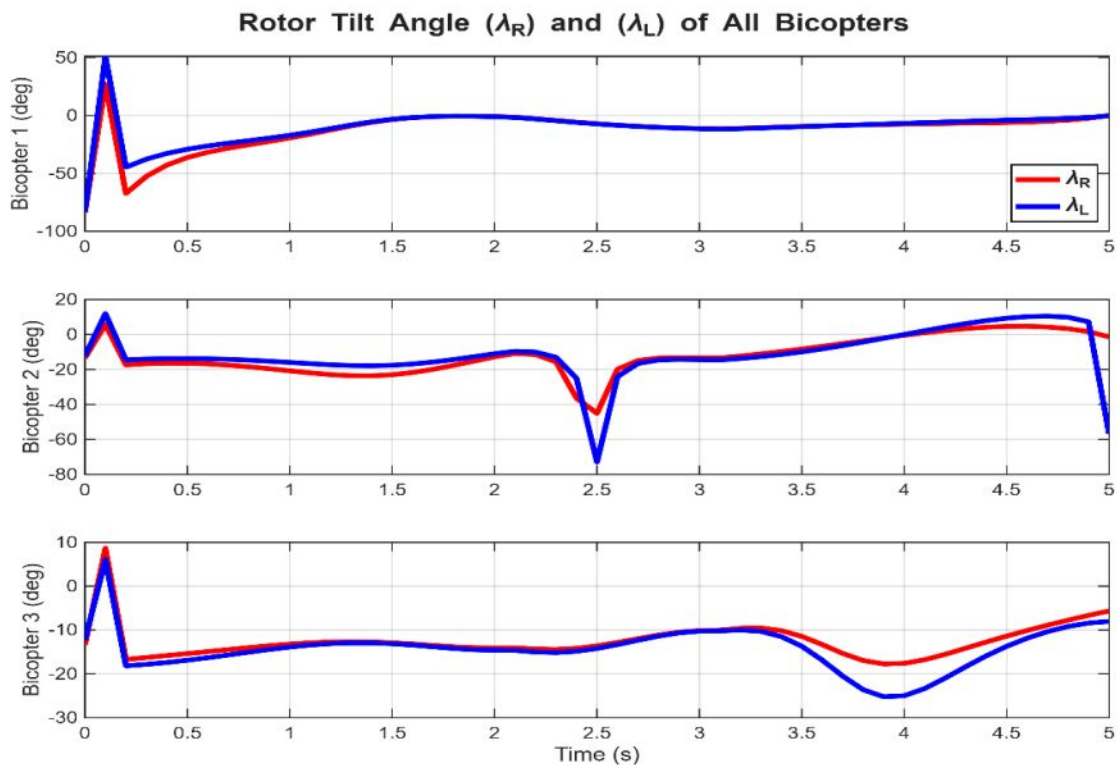


Gambar 4. 11 Hasil SVD Kemiringan Rotor Kanan dan Kiri Semua Bicopter pada *quasi-dynamic* dengan beban 1.5 kg

Pada simulasi dengan beban 1.5 kg dalam kondisi *quasi-dynamic*, grafik kemiringan rotor memperlihatkan respons sistem yang sangat agresif pada fase awal untuk mengatasi inersia beban dari posisi diam. Fase inisiasi yang berlangsung pada rentang detik ke-0 hingga 0.5 ditandai dengan fluktuasi sudut yang ekstrem pada ketiga unit *bicopter*. *Bicopter* 1 dan 2 mengalami lonjakan sudut positif hingga mencapai 40-50 derajat, yang kemudian diikuti oleh penurunan tajam hingga menyentuh -90 derajat sebelum kembali naik. Fenomena "zig-zag" yang ekstrem ini mengindikasikan bahwa rotor harus memiringkan vektor dorongnya sepenuhnya ke arah horizontal untuk membangkitkan gaya tangensial yang besar untuk memindahkan beban titik massa ke kecepatan operasional dalam waktu singkat.

Pada saat sistem memasuki fase pertengahan pada detik ke-0.5 hingga 3, *bicopter* 1 dan 3 cenderung stabil dengan sudut kemiringan landai mendekati 0 derajat. *Bicopter* 2 mengalami gerakan signifikan tepat di detik ke-2.5, di mana grafik membentuk lonjakan

tajam positif (*spike*) hingga mencapai 40 derajat. Durasi total trajektori adalah 5 detik, sehingga detik ke-2.5 merepresentasikan posisi setengah putaran lingkaran (180 derajat). Pada titik ini, posisi geometris *bicopter* 2 terhadap *payload* mengharuskan perubahan orientasi *thrust* yang drastis untuk menjaga ketegangan kabel agar tidak kendur (*slack*) saat beban berayun melintasi sumbu simetri lintasan. Pada fase akhir pada detik ke-3 hingga 5, *bicopter* 2 kembali stabil, sementara *bicopter* 3 menunjukkan penurunan sudut kemiringan kearah negatif sekitar -15 derajat pada detik ke-4. Fenomena transfer beban dinamis teramati antar-unit UAV pada segmen akhir lintasan ini. *Bicopter* 3 secara efektif mengambil alih peran dominan dalam menstabilkan *payload* dari *Bicopter* 2 seiring dengan penurunan laju sistem.

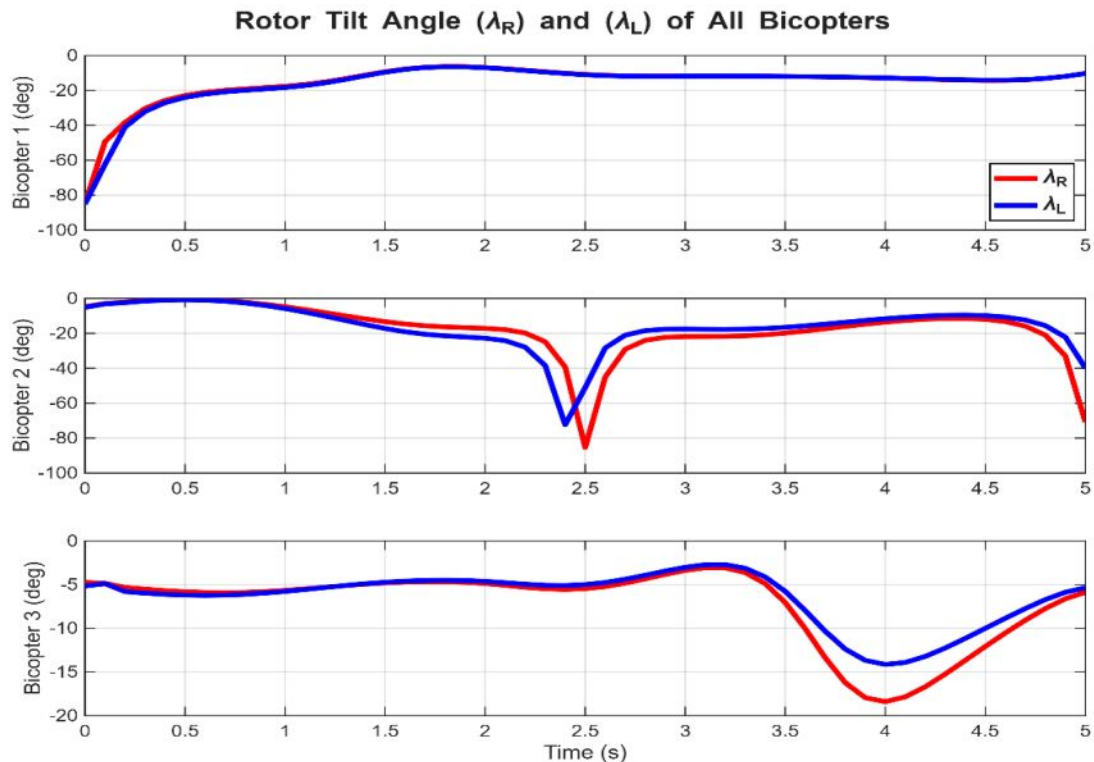


Gambar 4. 12 Hasil SVD Kemiringan Rotor Kanan dan Kiri Semua Bicopter pada *quasi-dinamic* dengan beban 2 kg

Peningkatan beban menjadi 2 kg mengubah karakteristik respons sudut secara fundamental, terutama pada momen kritis di pertengahan lintasan. Fase inisiasi pada detik ke-0 hingga 0.5 tetap menunjukkan karakteristik *overshoot* awal dengan pola lonjakan positif yang diikuti penurunan tajam ke negatif, serupa dengan beban 1.5 kg. Proses pemulihan (*recovery*) menuju kestabilan pada *bicopter* 1 terlihat lebih lambat dan baru mencapai stabilitas di detik ke-1. Keterlambatan ini menandakan bahwa inersia beban 2 kg membutuhkan durasi penyesuaian sudut vektor gaya yang lebih lama dibandingkan beban yang lebih ringan.

Perbedaan paling mencolok terlihat pada perilaku *bicopter* 2 di fase kritis detik ke-2 hingga 3. Pada beban 1.5 kg terjadi lonjakan sudut positif, sedangkan pada beban 2 kg ini terjadi pembalikan polaritas berupa penurunan tajam (*deep dive*) hingga sudut mencapai -70 derajat tepat pada detik ke-2.5. Perubahan drastis dari positif ke negatif ekstrem ini mengindikasikan adanya perubahan solusi SVD yang mendasar akibat beban yang lebih

berat *bicopter* 2 dipaksa menarik ke arah yang berlawanan untuk melawan gaya sentrifugal yang lebih besar agar beban tetap berada pada radius lintasan yang ditentukan. Garis kemiringan rotor kanan (λ_R) dan rotor kiri (λ_L) didasar lembah penurunan terlihat adanya separasi yang mengindikasikan mulai munculnya kebutuhan torsi *roll* atau *yaw* tambahan. Pada fase akhir detik ke-3.5 hingga 5, *bicopter* 3 kembali mengalami penurunan sudut pada detik ke-4 dengan kedalaman mencapai -25 derajat, lebih dalam dibandingkan beban 1.5 kg, yang menegaskan bahwa semakin berat beban, semakin besar sudut kemiringan yang diperlukan untuk menghasilkan gaya penyeimbang.



Gambar 4. 13 Hasil SVD Kemiringan Rotor Kanan dan Kiri Semua Bicopter pada *quasi-dinamic* dengan beban 2.5 kg

Pada skenario beban terberat 2.5 kg, sistem *quasi-dynamic* menunjukkan indikasi keterbatasan kinerja mekanis dan kompleksitas kontrol orientasi yang tinggi. Fase inisiasi pada *bicopter* 1 tidak lagi berbentuk pola "zig-zag" tajam, melainkan berupa kurva yang menanjak dari sudut -80 derajat menuju stabilitas secara lebih gradual hingga detik ke-1. *Bicopter* 1 harus mempertahankan sudut tarikan horizontal dengan beban 2.5 kg yang besar dalam durasi yang lebih lama untuk dapat menggerakkan beban dari posisi diam.

Fenomena singularitas pada detik ke-2 hingga 3 menjadi sangat ekstrem pada *bicopter* 2. Sudut kemiringan jatuh hingga mendekati batas fisik -90 derajat. Poin analisis yang paling krusial pada fase ini adalah terlihatnya separasi yang jelas dan lebar (*split*) antara kemiringan rotor kanan (λ_R) dan rotor kiri (λ_L) dengan selisih sekitar 10-15 derajat. Perbedaan sudut ini merepresentasikan mekanisme *differential tilt*, yang membuktikan bahwa pada beban 2.5 kg, gaya kabel tidak hanya menarik bicopter ke bawah tetapi juga memberikan torsi puntir yang kuat. Sistem kontrol merespons kondisi ini dengan memiringkan rotor kanan dan kiri secara asimetris untuk menghasilkan momen lawan (*counter-torque*) guna mempertahankan arah hadap (*heading*) *bicopter*. Pada fase

penyeimbangan akhir di detik ke-3.5 hingga 5, *bicopter* 3 mengalami penurunan sudut yang signifikan pada detik ke-4 hingga -18 derajat. Pola grafik pada fase ini terlihat lebih lebar dibandingkan variasi beban sebelumnya, menandakan bahwa sistem membutuhkan usaha dan waktu yang lebih besar untuk melakukan pengereman atau stabilisasi posisi beban saat mendekati akhir manuver. Grafik ini secara keseluruhan menegaskan bahwa tantangan utama pada kondisi dinamis dengan beban berat adalah manajemen momentum sudut yang memerlukan manuver kemiringan ekstrem dan diferensial. Respons kemiringan sudut rotor hasil perhitungan SVD pada skenario *quasi-dynamic* terverifikasi tetap berada dalam jangkauan sudut operasional mekanisme *tilting*, sehingga validitas solusi ini terjamin untuk diaplikasikan dalam pengendalian orientasi sistem ACTS meskipun menghadapi gaya inersia beban yang signifikan.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah disajikan pada bab-bab sebelumnya, dapat dirumuskan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Profil kecepatan sudut rotor yang ditentukan menggunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD) menunjukkan karakteristik distribusi gaya yang adaptif pada kondisi *quasi-static* maupun *quasi-dynamic* untuk setiap unit bicopter pada sistem *Multi-Bicopter Aerial Cable Towed System* (ACTS). Hasil analisis memperlihatkan hubungan yang lurus, di mana peningkatan massa beban dari 1.5 kg hingga 2.5 kg menuntut kenaikan kecepatan dasar rotor yang besar pada beban maksimum. Algoritma SVD bekerja secara adaptif dengan menurunkan kecepatan pada unit bicopter yang berada di posisi kurang menguntungkan untuk menarik kabel, lalu memindahkan beban kerja tersebut ke unit lain yang memiliki posisi tarikan lebih kuat. Secara khusus, kondisi *quasi-dynamic* menuntut respons sistem yang jauh lebih agresif berupa lonjakan kecepatan tinggi di awal pergerakan untuk melawan berat beban saat mulai bergerak, berbeda dengan perubahan yang lebih halus pada kondisi *quasi-static*.
2. Profil kemiringan sudut rotor yang dihasilkan melalui metode *Singular Value Decomposition* (SVD) memperlihatkan peran krusial orientasi vektor gaya dalam menyeimbangkan gaya berat dan gaya sentrifugal pada sistem *Multi-Bicopter Aerial Cable Towed System* (ACTS). Hasil dari kemiringan rotor menunjukkan hasil yang cukup bagus, dimana kemiringan rotor mempresentasikan sudut yang dibutuhkan untuk menyeimbangkan gaya berat dan gaya sentrifugal yang bekerja pada sistem. Analisis menunjukkan bahwa semakin berat beban dan semakin dinamis pergerakannya, semakin tajam sudut kemiringan yang diperlukan, bahkan mendekati batas fisik kemiringan pada manuver tertentu. Berdasarkan analisis pada grafik ditemukan adanya mekanisme perbedaan sudut kemiringan antara rotor kanan dan kiri pada satu unit bicopter (*differential tilt*). Mekanisme ini berfungsi penting untuk menghasilkan gaya putar tambahan guna menjaga arah hadap bicopter agar tetap stabil dan tidak terpuntir oleh tarikan kabel, terutama saat beroperasi dengan beban berat pada lintasan lingkaran.

5.2 Saran

Berdasarkan temuan penelitian serta keterbatasan yang diidentifikasi, beberapa saran pengembangan dapat dirumuskan sebagai acuan untuk penelitian selanjutnya.

1. Mengingat metode SVD memiliki keterbatasan dalam menangani lonjakan transien pada beban ringan, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi dan membandingkan metode alokasi lain, seperti *Optimization-Based Control Allocation* atau *Weighted Pseudo-Inverse*. Diharapkan metode alternatif tersebut mampu menghasilkan profil nilai kecepatan sudut rotor ω yang lebih baik, minim osilasi, dan memiliki karakteristik respons yang lebih halus dibandingkan hasil SVD saat ini.
2. Nilai kecepatan sudut (ω) dan kemiringan rotor (λ) yang diperoleh dalam penelitian ini direkomendasikan untuk digunakan sebagai data referensi atau titik

- acuan (*setpoint*) dalam penelitian lanjutan di bidang sistem kendali (*control systems*). Data karakteristik ini sangat penting sebagai landasan dalam merancang algoritma kendali umpan balik (*closed-loop control*) yang presisi guna menjamin kestabilan terbang *Multi-Bicopter ACTS*.
3. Penelitian ini berfokus pada analisis model dan simulasi numerik. Oleh karena itu, saran utama untuk pengembangan selanjutnya adalah merealisasikan desain mekanik dan memanufaktur purwarupa (*prototype*) fisik dari *Multi-Bicopter ACTS*. Implementasi pada perangkat keras diperlukan untuk memvalidasi akurasi hasil simulasi serta menguji performa sistem secara nyata di lingkungan operasional.

DAFTAR PUSTAKA

- Albayrak, Ö. B., Ersan, Y., Bağbaşı, A. S., Başaranoğlu, A. T., & Arıkan, K. B. (2019). Design of a Robotic Bicopter. <https://doi.org/10.1109/ICCMA46720.2019.8988694>
- Aryani, F., & Yulianti, D. (2012). APLIKASI METODE SINGULAR VALUE DECOMPOSITION(SVD) PADA SISTEM PERSAMAAN LINIER KOMPLEKS. *Jurnal Sains, Teknologi dan Industri*, Vol. 10.
- Bouabdallah, S., & Siegwart, R. (2007, October). Full control of a quadrotor. *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 153–158. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IROS.2007.4399042>
- Chriette, A; Erskine, Julian B C; Caro, S; Li, Z. (2020). Design and Control of a Variable Aerial Cable Towed System
- Czapalay Erskine, J. B., Chriette, A., & Caro, S. (2019). Wrench analysis of cable-suspended parallel robots actuated by quadrotors UAVs. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 11(2), 020909-1–020909-12. <https://doi.org/10.1115/1.4042513>
- Erskine, J., Chriette, A., & Caro, S. (2019, May). Control and configuration planning of an aerial cable towed system. In 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794396>
- Fahmizal, Nugroho, H. A., Cahyadi, A. I., & Ardiyanto, I. (2023). Attitude control and low cost design of UAV bicopter.
- He, X., & Wang, Y. (2022, October). Design and Trajectory Tracking Control of a New Bi-Copter UAV. 7. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3190090>
- Jadoon, A. N., Mughees, A., Ahmad, I., & Sherazi, H. I. (2025). Optimal novel nonlinear control law for attitude and heading control of a bi-copter system with controller-in-loop. *Expert Systems with Applications*, 272, 126554.
- Li, Z., Erskine, J., Caro, S., & Chriette, A. (2020). Design and Control of a Variable Aerial Cable Towed System. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 636–643. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2964165>
- Li, Y., Qin, Y., Xu, W., & Zhang, F. (2020). Modeling, Identification, and Control of Non-minimum Phase Dynamics of Bi-copter UAVs. *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. <https://doi.org/10.1109/AIM43001.2020.9158910>
- Mellinger, D., Kushleyev, A., & Kumar, V. (2012, May). *Mixed-integer quadratic program trajectory generation for heterogeneous quadrotor teams*. Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)
- Michael, N., Fink, J., & Kumar, V. (n.d.). *Cooperative Manipulation and Transportation with Aerial Robots*.
- Montserrat Manubens, Didier Devaurs, Lluís Ros, Juan Cortés. Motion planning for 6-D manipulation with aerial towed-cable systems. Robotics: Science and Systems (RSS), Jun 2013, Berlin, Germany. 8p. fhal-00872234f. <https://hal.science/hal-00872234v1>

- Septian, F. (2016, Desember). PENERAPAN METODE SINGULAR VALUE DECOMPOSITION (SVD) PADA APLIKASI PENGENALAN WAJAH MANUSIA. *JURNAL INFORMATIKA UNIVERSITAS PAMULANG*, vol. 01.
- Sutedja, G. G. C. (2025). *Optimasi sudut roll dan pitch untuk meminimalkan pengaruh disturbance pada Aerial Cable-Towed System (ACTS) berdasarkan capacity margin*. [Unpublished undergraduate thesis]. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Taherinezhad, M.; Ramirez-Serrano, A.; Abedini, A. Robust Trajectory-Tracking for a Bi-Copter Drone Using INDI: A Gain Tuning Multi-Objective Approach. *Robotics* 2022, 11, 86. <https://doi.org/10.3390/robotics11050086>.
- Uddin, N; H, Hendra G.; Sasongko, Adhy, R. (2021) Altitude Control System Design of Bicopter Using Lyapunov Stability Approach. *International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD)*
- Vundela , V. R., & Muralidharan, V. (2024). Nonlinear Attitude and Altitude Trajectory Tracking Control of a Bicopter UAV in Geometric Framework. *Journal of Robotics*, 16. <https://doi.org/10.1155/2024/5552493>
- Zhang, Q., Liu, Z., Zhao, J., Zhang, S., & University, B. (2016). Modeling and Attitude Control of Bi-copter. <https://doi.org/10.1109/AUS.2016.7748042>
- Zlatanov, N. (2016). *Multirotor Aircraft Dynamics, Simulation and Control*. Technical Report.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabel Sudut *Roll* dan *Pitch* pada Trajektori *Quasi-Static* (dari penelitian terdahulu)

Waktu (s)	Massa Payload					
	1.5 kg		2 kg		2.5 kg	
	α (deg)	β (deg)	α (deg)	β (deg)	α (deg)	β (deg)
0	0	0	0	0	0	0
1	4.628230931	4.463095387	-1.319784298	1.376726941	-0.980356141	1.8898474
2	6.725742151	5.461816168	0.754115624	1.473118033	-0.689949759	2.387719271
3	9.196322586	6.490080418	3.863991731	1.818097004	0.304093197	3.062496271
4	11.72098901	7.616920994	7.164699524	2.73934566	2.092008017	3.969901731
5	13.88222957	8.937611625	9.843952996	4.34182723	4.264619217	4.973497719
6	15.26628148	10.44761962	11.50243106	6.433982393	6.620917785	6.124865414
7	15.72147798	11.99760939	12.23355826	8.789141569	9.025346883	7.515338998
8	15.38508647	12.96806193	12.10356234	10.63778675	11.17635617	8.994551199
9	14.55025196	13.24413744	11.14893695	11.38249536	12.85179204	10.44761957
10	13.4063005	13.07103988	9.555700756	11.12279315	13.88964567	12.02741917
11	12.0593299	12.93429113	7.823325302	10.54707634	13.91916592	13.62642231
12	10.44986524	13.18984489	6.200279247	10.36014082	12.57219535	15.16271893
13	8.541600347	14.19465703	4.760792278	10.88585833	9.994668719	16.57254086
14	6.024389716	15.53454248	3.154704026	11.99999989	6.639247199	17.82938559
15	2.75546111	16.55279122	0.980568615	13.08447639	2.858294203	18.8433411
16	-1.021970666	16.61901895	-2.208439135	13.63985896	-1.271757525	19.39872368
17	-4.908876665	15.74776657	-6.301740705	13.39359333	-5.624176753	19.19555972
18	-8.700146397	14.33365138	-10.66182959	12.43896791	-9.903427931	17.90552873
19	-12.10131664	12.73112702	-14.3890746	10.69950732	-13.80065063	15.29819219
20	-14.84089477	10.75883741	-17.02269975	7.999654395	-16.86303885	11.31422002
21	-16.95217881	7.999654395	-18.63793135	4.019058652	-18.76778251	6.273045875
22	-18.47489398	4.019058647	-19.48547307	-1.055156937	-19.64851047	0.676489161
23	-19.28230907	-1.17157147	-19.73750563	-6.588862286	-19.82425507	-4.876821088
24	-19.39872357	-6.897979288	-19.5448032	-11.66307787	-19.57446822	-9.784622883
25	-18.87300606	-12.21846051	-18.90267117	-15.55692414	-18.78625662	-13.65457104
26	-17.80196618	-16.23209773	-17.80196621	-18.03665526	-17.2600202	-16.46731723
27	-16.03284059	-18.59203792	-16.03284059	-19.30972843	-14.62639504	-18.32881442
28	-13.33298773	-19.61884548	-13.44940222	-19.82425506	-10.69598606	-19.36905855
29	-9.352392026	-19.94066967	-9.77792346	-19.97033464	-5.484834236	-19.82425505
30	-4.161761943	-19.99999979	-5.142675936	-19.99999972	0.453880893	-19.9703346
31	1.797474877	-19.99999979	0.1413874	-19.76717073	6.413117731	-19.88358514
32	7.736190007	-19.76717075	5.524719975	-18.79969332	11.6334129	-19.57446819
33	12.74417788	-18.79969329	10.45641992	-16.52874832	15.55692424	-18.90267112
34	16.14534815	-16.41233373	14.35940959	-12.54477617	18.03665536	-17.68555166
35	17.72753831	-12.1192446	17.02269983	-7.021130992	19.30972852	-15.60730909
36	17.99242294	-6.040216828	18.52151693	-0.676489271	19.82425512	-12.35207362

37	17.72919953	0.979598386	19.05994168	5.595240943	19.73750564	-7.696304391
38	17.47941269	7.806711154	18.75659165	10.98551381	19.03252224	-1.950291736
39	17.13016914	13.38968644	17.77230119	14.88512704	17.61264011	4.201647502
40	16.24944113	17.09659721	16.26566961	17.21540218	15.4740815	9.94766015
41	14.40402753	18.90115481	14.18405059	18.32881438	12.7206654	14.54634496
42	11.51738389	19.33939349	11.4306345	18.41780953	9.508932916	17.34862962
43	7.958943196	18.75659155	8.015882872	17.77230107	5.717663204	18.31258583
44	4.264739679	17.49284918	4.031910735	16.54512141	1.43815551	17.59993282
45	0.646824107	15.82670146	-0.290843402	15.08867662	-3.030421671	15.80709655
46	-2.957510061	14.28365204	-4.570094541	13.61523136	-7.399798703	13.3824023
47	-6.634755763	13.01634585	-8.583731734	12.48148494	-11.30733811	10.91200199
48	-10.24220986	11.99647864	-12.07165142	11.92947882	-14.10962278	8.650345115
49	-13.40478417	10.77267543	-14.72448011	11.95337697	-15.7053943	6.985114226
50	-15.4862584	9.126792886	-16.52664724	12.22236737	-16.31004681	5.95401344
51	-15.89795195	7.22781613	-17.4939799	12.29288839	-16.1434882	5.519338654
52	-14.81347546	5.476092303	-17.62622156	11.82411048	-15.13867605	5.585566433
53	-12.93766748	3.98880907	-17.07083902	10.24431088	-13.56596157	5.845413478
54	-11.09126801	2.872020461	-16.15971664	7.720347393	-11.8130644	6.124720568
55	-9.674505789	1.951422445	-14.91869906	4.63431756	-10.32695456	5.905729474
56	-8.890843965	0.598540131	-13.47921211	1.623800345	-9.321580972	4.965808308
57	-7.931387003	-1.215795902	-11.57896771	-0.637426664	-8.474067791	3.540968512
58	-6.66832004	-2.855264593	-9.442513984	-1.855021079	-7.797504777	2.212538739
59	-5.227883124	-3.583694891	-7.161774282	-2.160385911	-6.853444084	1.213451833
60	0	0	0	0	0	0

Lampiran 2. Tabel Sudut *Roll* dan Pitch pada Trajektori *Quasi-Dinamic* (dari penelitian terdahulu)

Waktu (s)	Massa Payload					
	1.5 kg		2 kg		2.5 kg	
	α (deg)	β (deg)	α (deg)	β (deg)	α (deg)	β (deg)
0	0	0	0	0	0	0
0.1	3.756554892	5.164388934	3.961126029	4.052378164	5.326760812	5.418012865
0.2	6.742442804	9.252222769	6.967126157	7.237570815	9.444613039	9.715057551
0.3	9.020329763	12.34640816	9.101826419	9.617308502	12.45572133	12.97120321
0.4	10.6528818	14.52985176	10.44905285	11.25332177	14.46225032	15.26651901
0.5	11.70276493	15.88546023	11.0926315	12.20734117	15.56636467	16.68107409
0.6	12.23264519	16.49614022	11.11638839	12.54109726	15.87022902	17.29493762
0.7	12.30518861	16.44479839	10.60414956	12.31632057	15.476008	17.18817875
0.8	11.98306121	15.81434139	9.639741044	11.59474165	14.48586628	16.44086663
0.9	11.32892902	14.68767587	8.306988887	10.43809106	13.00196849	15.13307042
1	10.40545806	13.1477085	6.689719122	8.908099342	11.12647928	13.34485927
1.1	9.275314371	11.27734592	4.871757785	7.066497043	8.961563291	11.15630235
1.2	8.001163971	9.159494788	2.936930912	4.975014713	6.609385174	8.647468807
1.3	6.645672889	6.877061765	0.969064541	2.695382899	4.172109572	5.898427794

1.4	5.271507152	4.512953503	-0.948015292	0.289332149	1.75190113	2.989248469
1.5	3.941332788	2.150076656	-2.730482551	-2.181406989	-0.549075505	-1.20702E-08
1.6	2.717815823	-0.128662119	-4.294511198	-4.655103966	-2.62865569	-2.989248494
1.7	1.663622284	-2.24035617	-5.556275198	-7.070028235	-4.384674777	-5.898427822
1.8	0.841418199	-4.10209884	-6.431948513	-9.364449247	-5.714968123	-8.647468839
1.9	0.313869594	-5.630983474	-6.837705107	-11.47663645	-6.517371081	-11.15630239
2	0.143642497	-6.744103418	-6.689718944	-13.34485931	-6.689719006	-13.34485932
2.1	0.367058363	-7.380120627	-5.94116199	-14.91570379	-6.171873584	-15.14641533
2.2	0.915060357	-7.563971496	-4.693198225	-16.16902202	-5.071801828	-16.54762557
2.3	1.692247073	-7.342161029	-3.083989633	-17.09298262	-3.539497081	-17.54849003
2.4	2.603217103	-6.761194233	-1.251698197	-17.67575425	-1.724952687	-18.14900871
2.5	3.552569041	-5.867576112	0.6655141	-17.90550553	0.221838011	-18.3491816
2.6	4.444901481	-4.707811672	2.529485273	-17.77040511	2.150881668	-18.14900872
2.7	5.184813014	-3.328405917	4.202053339	-17.25862164	3.91218494	-17.54849006
2.8	5.676902236	-1.775863853	5.545056316	-16.35832374	5.355754485	-16.54762562
2.9	5.825767739	-0.096690485	6.420332219	-15.05768007	6.331596958	-15.1464154
3	5.536008115	1.662609182	6.689719065	-13.34485925	6.689719016	-13.3448594
3.1	4.742133038	3.457772965	6.256045958	-11.22374107	6.323484674	-11.15630247
3.2	3.498296492	5.253509975	5.186106353	-8.761049818	5.299687386	-8.647468914
3.3	1.888563541	7.016772141	3.587684791	-6.039220921	3.728477966	-5.89842789
3.4	-0.003000752	8.714511397	1.568565814	-3.14068981	1.720007228	-2.989248553
3.5	-2.092331323	10.31367967	-0.763466035	-0.147891911	-0.615574015	-5.76568E-08
3.6	-4.295363109	11.7812289	-3.300626215	2.856737347	-3.16811495	2.989248439
3.7	-6.528031045	13.08411102	-5.935130184	5.790762536	-5.827464762	5.89842778
3.8	-8.706270068	14.18927795	-8.5591934	8.571748229	-8.483472638	8.64746881
3.9	-10.74601512	15.06368163	-11.06503132	11.117259	-11.02598776	11.15630237
4	-12.56320112	15.67427399	-13.34485941	13.34485941	-13.34485933	13.34485931
4.1	-14.07376303	15.98800696	-15.29089311	15.17211404	-15.32993651	15.13307047
4.2	-15.19363576	15.97183248	-16.7953479	16.51658747	-16.87106851	16.44086669
4.3	-15.83875427	15.59270247	-17.75043922	17.29584426	-17.8581045	17.18817882
4.4	-15.92505348	14.81756887	-18.04838254	17.42744898	-18.18089368	17.2949377
4.5	-15.36846833	13.6133836	-17.58139331	16.82896621	-17.72928522	16.68107417
4.6	-14.08493376	11.94709861	-16.24168699	15.41796052	-16.39312832	15.26651909
4.7	-11.99038471	9.785665826	-13.92147904	13.11199649	-14.06227216	12.97120328
4.8	-9.000756106	7.096037173	-10.51298492	9.828638671	-10.62656593	9.715057604
4.9	-5.031982891	3.845164587	-5.90842009	5.485451652	-5.975858815	5.418012896
5	0	0	0	0	0	0

Lampiran 3. Tabel Tegangan Kabel Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori *Quasi-Static* pada beban 1.5 kg

Waktu (s)	Bicopter 1	Bicopter 2	Bicopter 3
0	12.05382233	12.05382233	12.05382233
1	12.05385135	12.05504371	12.05257193
2	12.05383785	12.05616112	12.05146802

3	12.05377062	12.05718373	12.05051265
4	12.05362398	12.05812709	12.04971592
5	12.05336221	12.05900967	12.04909511
6	12.05294746	12.05984722	12.04867232
7	12.05235926	12.06064382	12.04846392
8	12.05158948	12.06139622	12.04848129
9	12.05062069	12.06210029	12.04874602
10	12.04948052	12.06274197	12.0492445
11	12.04825728	12.06332575	12.04988396
12	12.04706677	12.06391626	12.05048397
13	12.045924	12.06460962	12.05093338
14	12.04468055	12.06542549	12.05136096
15	12.04310179	12.06624816	12.05211704
16	12.04102936	12.06682331	12.05361433
17	12.03852835	12.06676102	12.05617763
18	12.03593107	12.06549299	12.06004294
19	12.03394248	12.06239137	12.06513315
20	12.0333595	12.05765321	12.07045428
21	12.03417174	12.05238751	12.07490774
22	12.03578291	12.04745896	12.07822512
23	12.03777937	12.04306161	12.08062601
24	12.04017215	12.03897823	12.08231662
25	12.04285344	12.03525627	12.08335728
26	12.04580926	12.03188211	12.08377562
27	12.04953038	12.02855774	12.08337888
28	12.0544936	12.02524443	12.08172897
29	12.06055142	12.0224519	12.07846368
30	12.06717405	12.02085059	12.07344236
31	12.07385369	12.02106135	12.06655195
32	12.07958937	12.02361806	12.05825956
33	12.08321861	12.02830527	12.04994311
34	12.08443551	12.03421269	12.0428188
35	12.08363474	12.04035825	12.03747401
36	12.08140377	12.04625639	12.03380684
37	12.07814355	12.05176925	12.0315542
38	12.07410826	12.05679674	12.03056199
39	12.06935195	12.06140427	12.03071078
40	12.06399765	12.0653888	12.03208055
41	12.05853267	12.06824945	12.03468487
42	12.05360788	12.06966056	12.03819856
43	12.04971503	12.06968826	12.0420637
44	12.0469627	12.06870089	12.04580341
45	12.0452065	12.06709937	12.04916113
46	12.04425762	12.06520159	12.05200778
47	12.04391461	12.06323998	12.05431241
48	12.0439907	12.0613533	12.056123

49	12.04434255	12.05956129	12.05756316
50	12.04491533	12.05784822	12.05870344
51	12.04570277	12.05620086	12.05956336
52	12.04670679	12.05464792	12.06011229
53	12.04785833	12.05333792	12.06027074
54	12.04904553	12.05237925	12.06004222
55	12.05011407	12.05187909	12.05947383
56	12.05105314	12.05174786	12.05866599
57	12.05187159	12.05192129	12.05767412
58	12.05258393	12.05235437	12.05652869
59	12.05322135	12.05300159	12.05524405
60	12.05382233	12.05382233	12.05382233

Lampiran 4. Tabel Tegangan Kabel Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori *Quasi-Static* pada beban 2 kg

Waktu (s)	Bicopter 1	Bicopter 2	Bicopter 3
0	16.07176311	16.07176311	16.07176311
1	16.07180181	16.07339161	16.07009591
2	16.0717838	16.07488149	16.06862403
3	16.07169416	16.07624497	16.0673502
4	16.07149864	16.07750279	16.0662879
5	16.07114962	16.07867956	16.06546015
6	16.07059661	16.07979629	16.06489643
7	16.06981235	16.08085842	16.06461856
8	16.06878597	16.08186163	16.06464172
9	16.06749426	16.08280038	16.06499469
10	16.06597403	16.08365596	16.06565934
11	16.06434304	16.08443434	16.06651195
12	16.0627557	16.08522167	16.06731196
13	16.061232	16.08614616	16.06791117
14	16.05957406	16.08723399	16.06848128
15	16.05746906	16.08833088	16.06948939
16	16.05470581	16.08909775	16.07148577
17	16.05137113	16.08901469	16.07490351
18	16.04790809	16.08732399	16.08005725
19	16.04525664	16.08318849	16.0868442
20	16.04447933	16.07687095	16.09393905
21	16.04556232	16.06985001	16.09987699
22	16.04771055	16.06327862	16.10430016
23	16.05037249	16.05741548	16.10750135
24	16.05356287	16.05197097	16.10975549
25	16.05713792	16.04700836	16.11114304
26	16.06107901	16.04250948	16.11170083
27	16.0660405	16.03807698	16.11117184

28	16.07265813	16.03365924	16.10897196
29	16.08073522	16.02993587	16.10461824
30	16.0895654	16.02780079	16.09792314
31	16.09847159	16.0280818	16.08873594
32	16.10611916	16.03149075	16.07767942
33	16.11095815	16.03774036	16.06659081
34	16.11258067	16.04561692	16.05709174
35	16.11151298	16.05381101	16.04996534
36	16.10853836	16.06167519	16.04507578
37	16.1041914	16.06902566	16.04207226
38	16.09881101	16.07572899	16.04074932
39	16.09246926	16.08187236	16.0409477
40	16.08533019	16.08718506	16.04277407
41	16.07804356	16.09099927	16.0462465
42	16.07147717	16.09288074	16.05093142
43	16.06628671	16.09291768	16.05608494
44	16.06261693	16.09160118	16.06107121
45	16.06027533	16.08946583	16.06554817
46	16.05901016	16.08693546	16.06934371
47	16.05855281	16.08431997	16.07241655
48	16.05865426	16.0818044	16.07483066
49	16.0591234	16.07941505	16.07675087
50	16.05988711	16.07713096	16.07827126
51	16.06093703	16.07493448	16.07941781
52	16.06227571	16.07286389	16.08014972
53	16.06381111	16.07111723	16.08036098
54	16.06539404	16.069839	16.08005629
55	16.06681876	16.06917213	16.07929844
56	16.06807086	16.06899714	16.07822133
57	16.06916212	16.06922838	16.07689883
58	16.07011191	16.06980582	16.07537159
59	16.07096181	16.07066878	16.07365874
60	16.07176311	16.07176311	16.07176311

Lampiran 5. Tabel Tegangan Kabel Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori *Quasi-Static* pada beban 2.5 kg

Waktu (s)	Bicopter 1	Bicopter 2	Bicopter 3
0	20.08970389	20.08970389	20.08970389
1	20.08975226	20.09173951	20.08761989
2	20.08972975	20.09360187	20.08578004
3	20.0896177	20.09530621	20.08418774
4	20.08937329	20.09687849	20.08285987
5	20.08893702	20.09834945	20.08182519
6	20.08824576	20.09974536	20.08112053

7	20.08726544	20.10107303	20.0807732
8	20.08598246	20.10232704	20.08080215
9	20.08436782	20.10350048	20.08124336
10	20.08246754	20.10456995	20.08207417
11	20.0804288	20.10554292	20.08313993
12	20.07844462	20.10652709	20.08413994
13	20.07654	20.1076827	20.08488896
14	20.07446758	20.10904248	20.0856016
15	20.07183632	20.1104136	20.08686174
16	20.06838226	20.11137219	20.08935721
17	20.06421391	20.11126836	20.09362939
18	20.05988511	20.10915499	20.10007156
19	20.0565708	20.10398561	20.10855524
20	20.05559916	20.09608869	20.11742381
21	20.05695291	20.08731252	20.12484623
22	20.05963819	20.07909827	20.1303752
23	20.06296562	20.07176936	20.13437668
24	20.06695358	20.06496372	20.13719436
25	20.0714224	20.05876045	20.13892881
26	20.07634877	20.05313685	20.13962604
27	20.08255063	20.04759623	20.1389648
28	20.09082266	20.04207405	20.13621495
29	20.10091903	20.03741984	20.13077279
30	20.11195675	20.03475098	20.12240393
31	20.12308948	20.03510225	20.11091992
32	20.13264895	20.03936343	20.09709927
33	20.13869769	20.04717546	20.08323851
34	20.14072584	20.05702115	20.07136467
35	20.13939123	20.06726376	20.06245668
36	20.13567295	20.07709398	20.05634473
37	20.13023926	20.08628208	20.05259033
38	20.12351376	20.09466124	20.05093665
39	20.11558658	20.10234045	20.05118463
40	20.10666274	20.10898133	20.05346759
41	20.09755445	20.11374908	20.05780812
42	20.08934646	20.11610093	20.06366427
43	20.08285839	20.1161471	20.07010617
44	20.07827116	20.11450148	20.07633902
45	20.07534416	20.11183228	20.08193522
46	20.0737627	20.10866932	20.08667964
47	20.07319101	20.10539996	20.09052069
48	20.07331783	20.1022555	20.09353833
49	20.07390425	20.09926881	20.09593859
50	20.07485888	20.09641371	20.09783907
51	20.07617129	20.0936681	20.09927227
52	20.07784464	20.09107986	20.10018715

53	20.07976389	20.08889654	20.10045123
54	20.08174255	20.08729875	20.10007036
55	20.08352345	20.08646516	20.09912305
56	20.08508857	20.08624643	20.09777666
57	20.08645265	20.08653548	20.09612354
58	20.08763989	20.08725728	20.09421449
59	20.08870226	20.08833598	20.09207342
60	20.08970389	20.08970389	20.08970389

Lampiran 6. Tabel Tegangan Kabel Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori *Quasi-Dinamic* pada beban 1.5 kg

Waktu (s)	Bicopter 1	Bicopter 2	Bicopter 3
0	12.05382233	12.05382233	12.05382233
1	12.06648155	12.25862129	11.83636415
2	12.09680097	12.42752942	11.63713661
3	12.13079522	12.56909664	11.46157513
4	12.15306711	12.69420481	11.31419507
5	12.14861481	12.81422162	11.19863057
6	12.1039833	12.93901118	11.11847252
7	12.00797035	13.07506494	11.0784317
8	11.85219161	13.22390847	11.08536692
9	11.63180043	13.38087725	11.14878932
10	11.3465542	13.53436131	11.28055148
11	11.00224258	13.66567922	11.49354519
12	10.61227927	13.7498123	11.79937543
13	10.19904599	13.75725493	12.20516607
14	9.79441983	13.65716064	12.70988652
15	9.438870728	13.4217559	13.30084037
16	9.178643927	13.0316617	13.95116137
17	9.060869664	12.48136958	14.61922775
18	9.12694486	11.78377799	15.25074415
19	9.405109423	10.97254962	15.78380795
20	9.903629087	10.101224	16.15661391
21	10.6065032	9.238319459	16.31664434
22	11.47363695	8.458802048	16.229028
23	12.44335941	7.835352317	15.88275526
24	13.43873798	7.428538721	15.29419029
25	14.37704833	7.277961155	14.50645751
26	15.18058262	7.396393101	13.58449127
27	15.78680659	7.7681156	12.6065448
28	16.15598392	8.351751875	11.6537312
29	16.27495348	9.08695124	10.79956227
30	16.15660959	9.903496864	10.10136054
31	15.83546958	10.73147898	9.594518434

32	15.35980453	11.51113915	9.290523313
33	14.78329509	12.19687158	9.181300327
34	14.15859039	12.75894267	9.243933931
35	13.53242719	13.18332428	9.445715522
36	12.94251935	13.46976144	9.749186205
37	12.41620626	13.62873396	10.11652678
38	11.97059116	13.67796445	10.51291138
39	11.613756	13.63901584	10.90869516
40	11.34660183	13.53435992	11.28050525
41	11.16490823	13.38513043	11.61142833
42	11.06129824	13.20963206	11.8905367
43	11.02690583	13.02257691	12.11198426
44	11.05264582	12.83496635	12.27385483
45	11.13006074	12.65452389	12.37688237
46	11.25175342	12.48660518	12.42310839
47	11.41139383	12.33555485	12.41451831
48	11.60320112	12.20653154	12.35173433
49	11.82063801	12.10785037	12.23297861
50	12.05382233	12.05382233	12.05382233

Lampiran 7. Tabel Tegangan Kabel Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori *Quasi-Dinamic* pada beban 2 kg

Waktu (s)	Bicopter 1	Bicopter 2	Bicopter 3
0	16.07176311	16.07176311	16.07176311
1	16.08864207	16.34482838	15.78181887
2	16.12906795	16.57003922	15.51618215
3	16.17439363	16.75879552	15.28210017
4	16.20408948	16.92560642	15.08559343
5	16.19815308	17.08562882	14.93150743
6	16.13864439	17.2520149	14.82463003
7	16.01062714	17.43341992	14.77124227
8	15.80292214	17.63187796	14.78048922
9	15.50906724	17.84116966	14.86505242
10	15.12873893	18.04581509	15.04073531
11	14.66965678	18.22090563	15.32472692
12	14.14970569	18.33308306	15.73250057
13	13.59872799	18.34300658	16.27355476
14	13.05922644	18.20954753	16.94651536
15	12.58516097	17.89567453	17.73445383
16	12.2381919	17.37554893	18.6015485
17	12.08115955	16.64182611	19.49230366
18	12.16925981	15.71170398	20.33432553
19	12.5401459	14.63006616	21.04507727
20	13.20483878	13.46829867	21.54215188

21	14.14200426	12.31775928	21.75552579
22	15.2981826	11.27840273	21.638704
23	16.59114588	10.44713642	21.17700702
24	17.91831731	9.904718295	20.39225372
25	19.16939777	9.703948206	19.34194335
26	20.24077683	9.861857468	18.11265503
27	21.04907545	10.35748747	16.80872641
28	21.54131189	11.13566917	15.53830827
29	21.69993798	12.11593499	14.39941636
30	21.54214612	13.20466249	13.46848072
31	21.11395944	14.30863864	12.79269125
32	20.47973937	15.34818554	12.38736442
33	19.71106011	16.26249544	12.24173377
34	18.87812052	17.01192356	12.32524524
35	18.04323626	17.57776571	12.59428736
36	17.25669246	17.95968193	12.99891494
37	16.55494167	18.17164528	13.48870237
38	15.96078822	18.23728593	14.01721518
39	15.485008	18.18535445	14.54492688
40	15.12880243	18.04581322	15.04067367
41	14.88654431	17.84684058	15.48190444
42	14.74839765	17.61284275	15.85404893
43	14.7025411	17.36343587	16.14931235
44	14.73686109	17.11328846	16.36513977
45	14.84008098	16.87269852	16.50250982
46	15.00233789	16.64880691	16.56414452
47	15.21519177	16.44740647	16.55269109
48	15.47093483	16.27537539	16.46897911
49	15.76085068	16.14380049	16.31063815
50	16.07176311	16.07176311	16.07176311

Lampiran 8. Tabel Tegangan Kabel Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori *Quasi-Dinamic* pada beban 2 kg

Waktu (s)	Bicopter 1	Bicopter 2	Bicopter 3
0	20.08970389	20.08970389	20.08970389
1	20.11080259	20.43103548	19.72727359
2	20.16133494	20.71254903	19.39522769
3	20.21799204	20.94849441	19.10262522
4	20.25511185	21.15700802	18.85699179
5	20.24769135	21.35703603	18.66438428
6	20.17330549	21.56501863	18.53078754
7	20.01328392	21.7917749	18.46405284
8	19.75365268	22.03984745	18.47561153
9	19.38633406	22.30146208	18.58131553

10	18.91092366	22.55726886	18.80091914
11	18.33707097	22.77613203	19.15590865
12	17.68713211	22.91635383	19.66562572
13	16.99840999	22.92875822	20.34194345
14	16.32403305	22.76193441	21.1831442
15	15.73145121	22.36959316	22.16806728
16	15.29773988	21.71943616	23.25193562
17	15.10144944	20.80228264	24.36537958
18	15.21157477	19.63962998	25.41790691
19	15.67518237	18.2875827	26.30634659
20	16.50604848	16.83537333	26.92768985
21	17.67750533	15.3971991	27.19440723
22	19.12272825	14.09800341	27.04838
23	20.73893236	13.05892053	26.47125877
24	22.39789663	12.38089787	25.49031716
25	23.96174721	12.12993526	24.17742919
26	25.30097104	12.32732184	22.64081878
27	26.31134432	12.94685933	21.01090801
28	26.92663987	13.91958646	19.42288533
29	27.12492247	15.14491873	17.99927045
30	26.92768265	16.50582811	16.8356009
31	26.3924493	17.8857983	15.99086406
32	25.59967422	19.18523192	15.48420552
33	24.63882514	20.3281193	15.30216721
34	23.59765065	21.26490445	15.40655655
35	22.55404532	21.97220714	15.7428592
36	21.57086558	22.44960241	16.24864367
37	20.69367709	22.7145566	16.86087796
38	19.95098527	22.79660741	17.52151897
39	19.35626	22.73169306	18.1811586
40	18.91100304	22.55726653	18.80084208
41	18.60818039	22.30855072	19.35238055
42	18.43549706	22.01605344	19.81756116
43	18.37817638	21.70429484	20.18664044
44	18.42107637	21.39161058	20.45642471
45	18.55010123	21.09087316	20.62813728
46	18.75292237	20.81100864	20.70518065
47	19.01898971	20.55925809	20.69086386
48	19.33866854	20.34421924	20.58622388
49	19.70106336	20.17975062	20.38829769
50	20.08970389	20.08970389	20.08970389

**Lampiran 9. Tabel Kecepatan dan Percepatan Sudut Multi-Bicopter ACTS
pada Trajektori *Quasi-Static* pada beban 1.5 kg**

<i>Waktu (s)</i>	$\omega_x(\text{rad/s})$	$\omega_y(\text{rad/s})$	$\omega_z(\text{rad/s})$	$\dot{\omega}_x(\text{rad/s}^2)$	$\dot{\omega}_y(\text{rad/s}^2)$	$\dot{\omega}_z(\text{rad/s}^2)$
0	0	0	0	0	0	0
1	0.080777868	0.07764171	-0.006285409	0.080777868	0.077133988	-0.012557141
2	0.036608477	0.017311008	-0.002041461	-0.044169391	-0.060123368	0.006447716
3	0.043119763	0.017715921	-0.002868186	0.006511286	0.000385328	-0.000846313
4	0.044063742	0.019256989	-0.003995288	0.000943979	0.001508559	-0.001198044
5	0.037720764	0.022377119	-0.005530412	-0.006342978	0.003075887	-0.001655832
6	0.024156263	0.025424624	-0.00693931	-0.013564501	0.003019986	-0.00148418
7	0.007944678	0.0260404	-0.00733016	-0.016211585	0.000613473	-0.000395963
8	-0.00587114	0.016330625	-0.004493631	-0.013815817	-0.00972598	0.002779397
9	-0.014570611	0.004663888	-0.001210529	-0.008699471	-0.011712837	0.003112642
10	-0.019965719	-0.002938798	0.000700462	-0.005395109	-0.007639909	0.001758962
11	-0.023509072	-0.002334045	0.000498643	-0.003543353	0.000608683	-0.000187414
12	-0.028090458	0.004386277	-0.000808979	-0.004581386	0.006756131	-0.001118657
13	-0.033305505	0.017342762	-0.002604768	-0.005215048	0.013018732	-0.001364688
14	-0.043933613	0.023256262	-0.002454341	-0.010628108	0.005923663	0.00040796
15	-0.057053567	0.017751245	-0.000854349	-0.013119954	-0.005558386	0.001282637
16	-0.065928622	0.001155708	2.06163E-05	-0.008875055	-0.016614617	-0.000220164
17	-0.067839307	-0.015150447	-0.001301216	-0.001910686	-0.016213826	-0.002427923
18	-0.06617014	-0.024396974	-0.003733325	0.001669168	-0.009118687	-0.003047533
19	-0.059361619	-0.027347804	-0.005863518	0.006808521	-0.00286722	-0.002312785
20	-0.047814659	-0.033274626	-0.008816948	0.011546961	-0.005816754	-0.003244018
21	-0.036848858	-0.046064339	-0.014041252	0.010965801	-0.012619718	-0.005701853
22	-0.026576393	-0.065893967	-0.022015711	0.010272464	-0.019633918	-0.008506562
23	-0.014092052	-0.085511554	-0.029916082	0.012484341	-0.019512787	-0.00817904
24	-0.002031816	-0.094270818	-0.033195635	0.012060236	-0.008752777	-0.003297411
25	0.009175502	-0.087867568	-0.03003755	0.011207318	0.006428254	0.003097947
26	0.018693172	-0.066697057	-0.021416607	0.009517671	0.021316279	0.008220047
27	0.030877066	-0.039586631	-0.011375844	0.012183894	0.027388558	0.009193792
28	0.047121322	-0.01743813	-0.004132802	0.016244255	0.022445663	0.006187438
29	0.069474501	-0.005542229	-0.000912779	0.022353179	0.012077312	0.002384565
30	0.090593585	-0.001032775	-7.51493E-05	0.021119084	0.004562497	0.000426046
31	0.104008303	-6.62288E-12	2.0784E-13	0.013414718	0.001034996	-3.24804E-05
32	0.103650132	0.004026648	-0.000547014	-0.000358171	0.00396995	-0.000964377
33	0.087405877	0.016469684	-0.00372495	-0.016244255	0.012180577	-0.004268066
34	0.05936162	0.040023901	-0.01158663	-0.028044258	0.023116414	-0.009267032
35	0.027614428	0.071370577	-0.022815059	-0.031747192	0.031051828	-0.012098608
36	0.004623109	0.100910528	-0.032773065	-0.022991319	0.029494676	-0.010094817
37	-0.004594115	0.116700027	-0.037309271	-0.009217224	0.015811405	-0.004464012
38	-0.004359603	0.113653579	-0.035789944	0.000234512	-0.003051962	0.001505693
39	-0.00609545	0.093118615	-0.028700707	-0.001735847	-0.020576063	0.006963406
40	-0.015371604	0.062113288	-0.018103715	-0.009276154	-0.031157201	0.010117056
41	-0.032208543	0.030505433	-0.00783475	-0.01683694	-0.031906288	0.009241879

42	-0.050381436	0.007494695	-0.001527181	-0.018172892	-0.023289648	0.005138963
43	-0.062106506	-0.010073833	0.001408424	-0.011725071	-0.017736338	0.00184184
44	-0.064476015	-0.021995393	0.00164023	-0.002369508	-0.0119575	-0.000534373
45	-0.063144539	-0.02907791	0.000328281	0.001331476	-0.00704358	-0.001756825
46	-0.062907499	-0.026895422	-0.00138953	0.00023704	0.002233021	-0.001581073
47	-0.064180045	-0.021970534	-0.002555584	-0.001272546	0.004944414	-0.00085402
48	-0.062961952	-0.017516395	-0.003165021	0.001218093	0.004449083	-0.000334973
49	-0.055197335	-0.020777491	-0.00495173	0.007764617	-0.003189063	-0.001972024
50	-0.036328579	-0.027683156	-0.007670069	0.018868756	-0.006820581	-0.002972645
51	-0.007185408	-0.031875698	-0.0090788	0.029143171	-0.004183135	-0.001439056
52	0.018927685	-0.029557191	-0.007816784	0.026113093	0.002336675	0.001216542
53	0.032739025	-0.025299025	-0.005811758	0.01381134	0.004307923	0.001861602
54	0.03222575	-0.019127573	-0.003749653	-0.000513275	0.006224737	0.001860348
55	0.024727166	-0.01583896	-0.00270015	-0.007498584	0.003308707	0.000967087
56	0.013677479	-0.02332854	-0.003649333	-0.011049687	-0.007504044	-0.00084699
57	0.016745683	-0.03136322	-0.00436952	0.003068204	-0.008050014	-0.000586134
58	0.022044677	-0.028420552	-0.003322717	0.005298994	0.002958116	0.000980926
59	0.025140367	-0.012660621	-0.001158419	0.00309569	0.015805353	0.001767113
60	0.091243773	0.062547275	0	0.066103407	0.075260782	-0.005707049

Lampiran 10. Tabel Kecepatan dan Percepatan Sudut Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori *Quasi-Static* pada beban 2 kg

<i>Waktu (s)</i>	$\omega_x(\text{rad/s})$	$\omega_y(\text{rad/s})$	$\omega_z(\text{rad/s})$	$\dot{\omega}_x(\text{rad/s}^2)$	$\dot{\omega}_y(\text{rad/s}^2)$	$\dot{\omega}_z(\text{rad/s}^2)$
0	0	0	0	0	0	0
1	-0.023034581	0.024022044	0.000553436	-0.023034581	0.024009295	0.001106773
2	0.036196382	0.001682196	-2.2142E-05	0.059230963	-0.022344942	0.000233217
3	0.054277577	0.006007332	-0.000405746	0.018081195	0.004306791	-0.000618439
4	0.057608219	0.015953275	-0.002005382	0.003330641	0.009863743	-0.002173469
5	0.046761795	0.027556799	-0.004781659	-0.010846424	0.011491106	-0.003321342
6	0.028945903	0.035781638	-0.007281438	-0.017815892	0.008164005	-0.002739969
7	0.012760577	0.040171861	-0.008710096	-0.016185326	0.004374904	-0.001485285
8	-0.002268857	0.031547702	-0.006765293	-0.015029434	-0.008628469	0.001925213
9	-0.016661356	0.012752324	-0.00251322	-0.0143925	-0.018861839	0.003938002
10	-0.027807217	-0.004469767	0.00075245	-0.011145861	-0.017307961	0.002785845
11	-0.030235656	-0.009954631	0.001367744	-0.002428438	-0.005505515	0.000449778
12	-0.028327498	-0.003243555	0.000352379	0.001908158	0.006735839	-0.000824746
13	-0.025123787	0.009143845	-0.000761529	0.00320371	0.012414361	-0.000802587
14	-0.028031528	0.019415971	-0.001070124	-0.002907741	0.010284371	-2.09175E-05
15	-0.037945821	0.018924914	-0.000323915	-0.009914293	-0.000505386	0.000726982
16	-0.055658685	0.009686055	0.000373529	-0.017712864	-0.009248363	0.000183264
17	-0.07144159	-0.004272175	-0.000471784	-0.015782905	-0.013873154	-0.00184097
18	-0.076097907	-0.016373719	-0.00308255	-0.004656317	-0.0119152	-0.003533348
19	-0.065052697	-0.02940696	-0.007544447	0.011045209	-0.012777474	-0.005317016
20	-0.04596543	-0.045056883	-0.013794793	0.019087267	-0.015393562	-0.006978146

21	-0.02819111	-0.065831054	-0.022203126	0.017774321	-0.020554982	-0.008999629
22	-0.014792394	-0.083489491	-0.029541359	0.013398716	-0.017557077	-0.007601908
23	-0.004398798	-0.090907191	-0.032616639	0.010393595	-0.007404981	-0.003108196
24	0.003363292	-0.083458856	-0.029627797	0.00776209	0.007457874	0.002963608
25	0.011207318	-0.064295349	-0.022016567	0.007844026	0.01924356	0.007394617
26	0.019210926	-0.041207204	-0.013231746	0.008003608	0.02324502	0.00833729
27	0.030877067	-0.021355066	-0.006136715	0.011666141	0.020051505	0.00647595
28	0.045089506	-0.008733909	-0.00208867	0.014212439	0.012781883	0.003473053
29	0.064079393	-0.002512533	-0.000432993	0.018989887	0.006309453	0.001253112
30	0.080900331	-0.000515669	-4.64094E-05	0.016820938	0.002019883	0.000223842
31	0.092224303	0.00406362	-1.00277E-05	0.011323972	0.004580447	-0.00038607
32	0.093956878	0.016807228	-0.001625671	0.001732575	0.012609729	-0.002813599
33	0.086074402	0.03897725	-0.007193346	-0.007882476	0.021752838	-0.00748375
34	0.06812002	0.067361144	-0.017244544	-0.017954381	0.027789226	-0.012003447
35	0.046483184	0.092182146	-0.02822285	-0.021636837	0.024383167	-0.012151819
36	0.026159293	0.104999311	-0.03517613	-0.02032389	0.012666726	-0.007298498
37	0.009397285	0.103461338	-0.035745711	-0.016762008	-0.001538694	-0.000556697
38	-0.005294457	0.089081822	-0.030250634	-0.014691742	-0.014407159	0.005418448
39	-0.017179109	0.064813015	-0.020774625	-0.011884653	-0.024418425	0.009054703
40	-0.026295682	0.039043048	-0.011391597	-0.009116572	-0.025994231	0.008698404
41	-0.036331106	0.018840275	-0.004761743	-0.010035424	-0.020417787	0.00588866
42	-0.048056176	0.00152245	-0.000307827	-0.011725071	-0.017510025	0.003616538
43	-0.059598659	-0.011156171	0.001571051	-0.011542483	-0.012787885	0.001122757
44	-0.069533431	-0.021365316	0.001505966	-0.009934772	-0.010231667	-0.00077179
45	-0.075446292	-0.025419429	-0.000129035	-0.005912861	-0.003991645	-0.001938114
46	-0.074687022	-0.025634708	-0.002049054	0.000759271	-0.000142733	-0.001938222
47	-0.070051184	-0.019565963	-0.002953391	0.004635838	0.006069342	-0.000485709
48	-0.060875683	-0.009421279	-0.002014872	0.009175501	0.010051419	0.001549878
49	-0.046300595	0.000403403	0.000106015	0.014575087	0.009716421	0.002573461
50	-0.03145375	0.004500816	0.00133548	0.014846845	0.00405894	0.001358398
51	-0.01688314	0.001173897	0.000369993	0.01457061	-0.003309978	-0.001021462
52	-0.002308052	-0.007797604	-0.002477474	0.014575088	-0.008964926	-0.002868172
53	0.009693254	-0.026357921	-0.008094073	0.012001306	-0.018615127	-0.005436804
54	0.015902085	-0.042310982	-0.012260224	0.006208831	-0.016022649	-0.00391347
55	0.021659843	-0.052045828	-0.013866514	0.005757757	-0.009779584	-0.001398238
56	0.025123787	-0.051096105	-0.012247484	0.003463944	0.000973937	0.001590931
57	0.033165521	-0.038662687	-0.007921521	0.008041734	0.012548718	0.003907178
58	0.037288152	-0.020963095	-0.003486401	0.004122631	0.017838025	0.003769962
59	0.039806417	-0.005288041	-0.000664451	0.002518265	0.015770743	0.002195441
60	0.124996542	0.037705847	0	0.085190124	0.043035469	-0.004713101

Lampiran 11. Tabel Kecepatan dan Percepatan Sudut Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori *Quasi-Static* pada beban 2.5 kg

<i>Waktu (s)</i>	$\omega_x(\text{rad/s})$	$\omega_y(\text{rad/s})$	$\omega_z(\text{rad/s})$	$\dot{\omega}_x(\text{rad/s}^2)$	$\dot{\omega}_y(\text{rad/s}^2)$	$\dot{\omega}_z(\text{rad/s}^2)$
------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------

0	0	0	0	0	0	0
1	-0.017110442	0.032979231	0.000564344	-0.017110442	0.032969575	0.001128634
2	0.005068548	0.008688873	0.000104636	0.02217899	-0.024292264	-0.000336585
3	0.017349322	0.011776914	-6.25057E-05	0.012280775	0.003086449	-0.000220709
4	0.031205	0.015826657	-0.000578127	0.013855678	0.004039386	-0.000642083
5	0.037919219	0.017467557	-0.001302545	0.006714218	0.001624802	-0.0007872
6	0.041125168	0.019961137	-0.002316968	0.003205949	0.002466616	-0.001118275
7	0.041965204	0.023967877	-0.003807009	0.000840036	0.003961755	-0.00166047
8	0.037542194	0.025327507	-0.005004121	-0.00442301	0.001331543	-0.00125105
9	0.029241872	0.024725505	-0.005641006	-0.008300322	-0.000609819	-0.000621526
10	0.018113963	0.026766475	-0.0066189	-0.011127909	0.002027307	-0.001015814
11	0.000515226	0.027088385	-0.006713315	-0.017598737	0.000321864	-9.45814E-05
12	-0.023509071	0.026170515	-0.00583647	-0.024024297	-0.000930983	0.00085347
13	-0.044986326	0.024232611	-0.004270538	-0.021477255	-0.001981784	0.001473245
14	-0.058563153	0.021788971	-0.002536196	-0.013576827	-0.002503523	0.001584725
15	-0.065990079	0.017674846	-0.000882471	-0.007426925	-0.004175708	0.001377757
16	-0.072083001	0.009690867	0.000215137	-0.006092922	-0.008017144	0.00052091
17	-0.075964046	-0.003528811	-0.000347506	-0.003881045	-0.013149005	-0.001565536
18	-0.074687023	-0.022179789	-0.00387236	0.001277023	-0.018397531	-0.004919054
19	-0.068019368	-0.044192903	-0.01085535	0.006667655	-0.021589222	-0.008490426
20	-0.053448757	-0.066543558	-0.020170599	0.01457061	-0.0219156	-0.010526489
21	-0.033244048	-0.083306948	-0.028307736	0.020204709	-0.016529523	-0.008705973
22	-0.015371603	-0.091990834	-0.03284425	0.017872445	-0.008623978	-0.004673394
23	-0.003067322	-0.091179596	-0.032870283	0.012304281	0.000810886	-2.36995E-05
24	0.004359603	-0.080706894	-0.028697915	0.007426925	0.010490024	0.004126401
25	0.013756888	-0.06394507	-0.021751563	0.009397284	0.016849736	0.006713081
26	0.026637851	-0.046880989	-0.014565924	0.012880963	0.017232737	0.006723573
27	0.04596543	-0.031436374	-0.008204029	0.019327579	0.015687289	0.005637351
28	0.068598578	-0.017840245	-0.003369655	0.022633147	0.013853382	0.003884094
29	0.090951757	-0.007908303	-0.00075937	0.022353179	0.010095191	0.001695265
30	0.103650132	-0.002549489	2.01968E-05	0.012698375	0.005397033	0.000221517
31	0.104008304	0.001504589	-0.000169116	0.000358171	0.004020615	-0.000610383
32	0.091111339	0.005284281	-0.001087919	-0.012896965	0.003702198	-0.001264067
33	0.068478191	0.011295517	-0.003144613	-0.022633147	0.005882723	-0.002471165
34	0.043279473	0.020198845	-0.006577292	-0.025198719	0.008765298	-0.003821108
35	0.022219318	0.034231678	-0.011994289	-0.021060154	0.013917445	-0.005730457
36	0.008980183	0.053447591	-0.019267879	-0.013239135	0.019151974	-0.007446641
37	-0.001514064	0.076484539	-0.027441928	-0.010494248	0.023049386	-0.008139191
38	-0.012304281	0.094804522	-0.03270402	-0.010790217	0.018390527	-0.005038731
39	-0.024781618	0.102338438	-0.032488515	-0.012477337	0.007557768	0.000392406
40	-0.037324889	0.096651566	-0.026756773	-0.012543271	-0.005829248	0.005497739
41	-0.048056177	0.078292171	-0.017673578	-0.010731287	-0.018683822	0.008171811
42	-0.056055307	0.048237076	-0.00807985	-0.00799913	-0.030469383	0.007883519
43	-0.066170139	0.016740508	-0.001676137	-0.010114833	-0.031814348	0.004304226
44	-0.0746915	-0.012434223	0.000312171	-0.00852136	-0.02927645	-0.000194307
45	-0.077991385	-0.031247139	-0.00165423	-0.003299885	-0.018697375	-0.003433681

46	-0.076260015	-0.04196645	-0.00545034	0.001731369	-0.010520514	-0.004620682
47	-0.068199428	-0.042279706	-0.00845395	0.008060587	-0.000205682	-0.003039862
48	-0.048909094	-0.038282491	-0.009622732	0.019290334	0.004003986	-0.000984216
49	-0.027851467	-0.027978703	-0.007867301	0.021057627	0.010240084	0.002038537
50	-0.010553177	-0.01727187	-0.005053936	0.01729829	0.010675587	0.002925913
51	0.002906996	-0.007287358	-0.002109381	0.013460173	0.009992998	0.002915509
52	0.01753728	0.001115779	0.000301869	0.014630284	0.008444302	0.002263564
53	0.027449046	0.004408657	0.001063794	0.009911766	0.003314213	0.000671649
54	0.030593827	0.004771583	0.000997971	0.003144781	0.00036298	-7.64498E-05
55	0.02593751	-0.0037602	-0.000685172	-0.004656317	-0.008573832	-0.001461528
56	0.017547079	-0.016188091	-0.002657163	-0.00839043	-0.012463073	-0.00175402
57	0.014791895	-0.024596652	-0.003664614	-0.002755184	-0.008425235	-0.000883354
58	0.011808252	-0.022971095	-0.003145629	-0.002983643	0.00162997	0.000499541
59	0.016476967	-0.01731276	-0.002080802	0.004668715	0.00567276	0.000971185
60	0.119615164	-0.02117873	0	0.103138197	-0.003741374	0.002533297

Lampiran 12. Tabel Kecepatan dan Percepatan Sudut Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori *Quasi-Dinamic* pada beban 1.5 kg

<i>Waktu (s)</i>	$\omega_x(\text{rad/s})$	$\omega_y(\text{rad/s})$	$\omega_z(\text{rad/s})$	$\dot{\omega}_x(\text{rad/s}^2)$	$\dot{\omega}_y(\text{rad/s}^2)$	$\dot{\omega}_z(\text{rad/s}^2)$
0	0	0	0	0	0	0
0.1	0.655642514	0.899419285	-0.059054395	6.55642514	8.994192851	-0.590543949
0.2	0.521135752	0.708527262	-0.083764967	-1.345067624	-1.865948243	0.22059997
0.3	0.397566274	0.533358464	-0.084669687	-1.235694774	-1.712795908	0.271903238
0.4	0.284934082	0.374514894	-0.070446388	-1.126321924	-1.562148728	0.293840746
0.5	0.183239174	0.231680148	-0.047990312	-1.016949074	-1.414810918	0.293064459
0.6	0.092481552	0.104163816	-0.022583145	-0.907576223	-1.270626091	0.27547698
0.7	0.012661215	-0.008754977	0.001909724	-0.798203373	-1.128901159	0.246247352
0.8	-0.056221838	-0.107637724	0.022845847	-0.688830523	-0.988721489	0.20985375
0.9	-0.114167605	-0.192808811	0.03862825	-0.579457673	-0.849172823	0.170127391
1	-0.161176087	-0.264354809	0.048544218	-0.470084822	-0.709484733	0.13028468
1.1	-0.197247284	-0.322171733	0.052615126	-0.360711972	-0.569108881	0.092943398
1.2	-0.222381196	-0.366036447	0.051450651	-0.251339122	-0.427744085	0.060124372
1.3	-0.236577824	-0.395683065	0.04610176	-0.141966272	-0.285319515	0.033243101
1.4	-0.239837166	-0.410869581	0.037909147	-0.032593421	-0.14194727	0.013096856
1.5	-0.232159223	-0.411424463	0.028346299	0.076779429	0.002144143	-0.000147727
1.6	-0.213543995	-0.397267586	0.018858469	0.186152279	0.146683457	-0.006963129
1.7	-0.183991482	-0.368404789	0.010699893	0.295525129	0.291425157	-0.008464108
1.8	-0.143501684	-0.324900356	0.004771673	0.404897979	0.436200415	-0.00640629
1.9	-0.092074601	-0.266836704	0.001461762	0.51427083	0.580938149	-0.003182445
2	-0.029710233	-0.194275469	0.000487056	0.62364368	0.725643996	-0.001819218
2.1	0.038993425	-0.111003666	0.000711141	0.687036577	0.832684272	-0.005334562
2.2	0.095644391	-0.032083938	0.00051245	0.566509664	0.789078496	-0.012603299
2.3	0.135644671	0.038696345	-0.00114324	0.400002798	0.707703805	-0.020908312
2.4	0.158994264	0.101293194	-0.004605396	0.233495933	0.626199157	-0.02847077

2.5	0.165693171	0.155666076	-0.009664311	0.066989067	0.544630906	-0.033812651
2.6	0.155741391	0.201808275	-0.015687399	-0.099517799	0.463115852	-0.035999928
2.7	0.129138924	0.239766659	-0.021756397	-0.266024665	0.381777906	-0.03464248
2.8	0.085885771	0.269640745	-0.026803945	-0.432531531	0.300697832	-0.02989121
2.9	0.025981932	0.291557375	-0.0297478	-0.599038397	0.219871821	-0.022433673
3	-0.050572595	0.305623538	-0.029622064	-0.765545263	0.139194495	-0.0134912
3.1	-0.138557339	0.312242666	-0.025902197	-0.879847448	0.062380422	-0.005174789
3.2	-0.217090431	0.312831219	-0.019124241	-0.785330914	0.000998603	-6.10474E-05
3.3	-0.280951401	0.30758014	-0.010142023	-0.638609699	-0.056648505	0.001867905
3.4	-0.330140249	0.296311398	1.55187E-05	-0.491888485	-0.114359053	-5.98933E-06
3.5	-0.364656976	0.278921433	0.010190203	-0.34516727	-0.171924113	-0.006281129
3.6	-0.384501582	0.255416226	0.019184055	-0.198446056	-0.229073339	-0.017205468
3.7	-0.389674066	0.225921473	0.02585247	-0.051724841	-0.285534944	-0.032674112
3.8	-0.380174429	0.190665432	0.029197265	0.094996374	-0.341101872	-0.052234124
3.9	-0.35600267	0.149935927	0.028455422	0.241717588	-0.395694837	-0.0750965
4	-0.317158789	0.104016866	0.02318039	0.388438803	-0.449413202	-0.100152733
4.1	-0.263642788	0.053113126	0.013315242	0.535160017	-0.502565288	-0.125991048
4.2	-0.195454665	-0.002724305	-0.000739852	0.681881232	-0.555670497	-0.150906056
4.3	-0.11259442	-0.063658408	-0.018060028	0.828602447	-0.60942606	-0.172895494
4.4	-0.015062054	-0.130094238	-0.037119828	0.975323661	-0.664631046	-0.189639375
4.5	0.097142434	-0.202654593	-0.055700404	1.122044876	-0.722059074	-0.198460749
4.6	0.224019043	-0.282078345	-0.070774334	1.26876609	-0.782269105	-0.196273752
4.7	0.365567773	-0.369010719	-0.078370927	1.415487305	-0.845341321	-0.179534576
4.8	0.521788625	-0.46364834	-0.073440955	1.562208519	-0.910523971	-0.144225147
4.9	0.692681599	-0.565197541	-0.049766305	1.708929734	-0.975780142	-0.085918584
5	0.878246694	-0.671107823	0	1.855650949	-1.037235214	0

Lampiran 13. Tabel Kecepatan dan Percepatan Sudut Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori *Quasi-Dinamic* pada beban 2 kg

Waktu (s)	$\omega_x(\text{rad/s})$	$\omega_y(\text{rad/s})$	$\omega_z(\text{rad/s})$	$\dot{\omega}_x(\text{rad/s}^2)$	$\dot{\omega}_y(\text{rad/s}^2)$	$\dot{\omega}_z(\text{rad/s}^2)$
0	0	0	0	0	0	0
0.1	0.691346913	0.705583844	-0.048858187	6.913469129	7.022060484	-0.976385083
0.2	0.524645995	0.551816021	-0.067433129	-1.667009175	-1.537726766	-0.105917812
0.3	0.372575481	0.410112904	-0.065702853	-1.520705141	-1.412562824	0.069582334
0.4	0.235135371	0.280802977	-0.051785532	-1.374401107	-1.288694558	0.169388034
0.5	0.112325663	0.163397001	-0.032035395	-1.228097074	-1.171664292	0.210655744
0.6	0.004146359	0.057158486	-0.011231029	-1.08179304	-1.062298744	0.208484142
0.7	-0.089402541	-0.038560948	0.007219376	-0.935489006	-0.958821002	0.175942063
0.8	-0.168321039	-0.124161032	0.02108886	-0.789184972	-0.858390045	0.12429647
0.9	-0.232609132	-0.199755588	0.029166074	-0.642880939	-0.75816072	0.063242596
1	-0.282266823	-0.265215848	0.031107457	-0.496576905	-0.655947399	0.001045267
1.1	-0.31729411	-0.320259035	0.027296869	-0.350272871	-0.550559371	-0.055428303
1.2	-0.337690994	-0.364553073	0.018703051	-0.203968837	-0.441865951	-0.100760803
1.3	-0.343457474	-0.397813902	0.006729014	-0.057664803	-0.33064696	-0.131078364

1.4	-0.334593551	-0.419877594	-0.006947924	0.08863923	-0.218287734	-0.14413892
1.5	-0.311099225	-0.430735747	-0.020542658	0.234943264	-0.106383549	-0.139379994
1.6	-0.272974495	-0.430529374	-0.03233019	0.381247298	0.003677408	-0.117910116
1.7	-0.220219362	-0.419503489	-0.040809482	0.527551332	0.111082812	-0.082450869
1.8	-0.152833825	-0.397931409	-0.044859854	0.673855365	0.215850139	-0.037256932
1.9	-0.070817885	-0.366024169	-0.043890056	0.820159399	0.318903963	0.011946097
2	0.025828458	-0.323846399	-0.037984297	0.966463433	0.421918028	0.05796675
2.1	0.130647835	-0.272691469	-0.028377934	1.048193769	0.512527829	0.089349142
2.2	0.217810766	-0.218011866	-0.017897783	0.871629315	0.548431409	0.092829091
2.3	0.280859883	-0.161027999	-0.008675837	0.630491164	0.571568282	0.076152439
2.4	0.319795184	-0.101688566	-0.002221868	0.389353013	0.59463447	0.045527642
2.5	0.33461667	-0.040096459	0.000465758	0.148214862	0.616251013	0.006260422
2.6	0.325324341	0.023556496	-0.001040645	-0.09292329	0.63582734	-0.035767116
2.7	0.291918197	0.089082954	-0.006545053	-0.334061441	0.653758058	-0.074177857
2.8	0.234398238	0.156396331	-0.015183391	-0.575199592	0.671353533	-0.102181406
2.9	0.152764464	0.225581437	-0.025384074	-0.816337743	0.690475158	-0.1125945
3	0.047016874	0.29690829	-0.034824698	-1.057475895	0.712849587	-0.097762653
3.1	-0.075690236	0.368000333	-0.040341889	-1.227071102	0.711423104	-0.049800704
3.2	-0.186739689	0.428061171	-0.03885196	-1.110494532	0.600972214	0.026048689
3.3	-0.278977191	0.474117759	-0.029726652	-0.922375018	0.459687188	0.103966135
3.4	-0.352402741	0.505699549	-0.013847813	-0.734255504	0.313167988	0.16976791
3.5	-0.40701634	0.5222954	0.006959996	-0.54613599	0.161679143	0.214775014
3.6	-0.442817988	0.523536841	0.030192685	-0.358016476	0.007245499	0.233020431
3.7	-0.459807684	0.509339026	0.052950718	-0.169896962	-0.146913946	0.221455994
3.8	-0.457985429	0.479967783	0.072238684	0.018222552	-0.297213736	0.180064822
3.9	-0.437351222	0.436016351	0.085266688	0.206342066	-0.440632615	0.111815513
4	-0.397905065	0.378291698	0.089737158	0.394461579	-0.57558308	0.022456458
4.1	-0.339646955	0.307626258	0.084104468	0.582581093	-0.702565347	-0.07978594
4.2	-0.262576894	0.224645198	0.067804482	0.770700607	-0.824472717	-0.184489574
4.3	-0.166694882	0.129531194	0.041464357	0.958820121	-0.946437694	-0.279160332
4.4	-0.052000919	0.021839156	0.007116366	1.146939635	-1.075116751	-0.349074355
4.5	0.081504996	-0.099575734	-0.031551696	1.335059149	-1.217293271	-0.376782356
4.6	0.233822862	-0.236438546	-0.068878334	1.523178663	-1.377628811	-0.341348851
4.7	0.40495268	-0.390644737	-0.096830227	1.711298177	-1.555327103	-0.217611233
4.8	0.594894449	-0.563434519	-0.104558498	1.899417691	-1.739439707	0.023933113
4.9	0.80364817	-0.754002257	-0.078030545	2.087537205	-1.902633587	0.415541551
5	1.031213842	-0.957391923	0	2.275656719	-1.993627877	0.987275803

Lampiran 14. Tabel Kecepatan dan Percepatan Sudut Multi-Bicopter ACTS pada Trajektori *Quasi-Dinamic* pada beban 2.5 kg

Waktu (s)	$\omega_x(\text{rad/s})$	$\omega_y(\text{rad/s})$	$\omega_z(\text{rad/s})$	$\dot{\omega}_x(\text{rad/s}^2)$	$\dot{\omega}_y(\text{rad/s}^2)$	$\dot{\omega}_z(\text{rad/s}^2)$
0	0	0	0	0	0	0
0.1	0.929695146	0.941537917	-0.087787394	9.296951463	9.415379165	-0.877873941
0.2	0.718700795	0.739809624	-0.123066602	-2.109943515	-1.92993815	0.321043308
0.3	0.525537538	0.554928431	-0.122574817	-1.931632571	-1.773951542	0.391837531
0.4	0.350205375	0.387913866	-0.10004872	-1.753321627	-1.623825486	0.418808595
0.5	0.192704307	0.237830709	-0.06625305	-1.575010683	-1.480832713	0.412518989
0.6	0.053034333	0.103055621	-0.029298282	-1.396699738	-1.344203756	0.382151499
0.7	-0.068804546	-0.017957351	0.004971917	-1.218388794	-1.212121165	0.335604414
0.8	-0.172812331	-0.126284101	0.032626056	-1.04007785	-1.08243515	0.279651908
0.9	-0.258989022	-0.222401611	0.051353506	-0.861766906	-0.953149763	0.220086454
1	-0.327334618	-0.306235328	0.06022797	-0.683455962	-0.822721778	0.161806488
1.1	-0.37784912	-0.377312493	0.059500987	-0.505145018	-0.690205781	0.108843269
1.2	-0.410532527	-0.434963914	0.050399245	-0.326834074	-0.555273082	0.064339462
1.3	-0.42538484	-0.478526709	0.03490662	-0.14852313	-0.418130135	0.03050093
1.4	-0.422406059	-0.507510245	0.015522696	0.029787815	-0.279363438	0.008544603
1.5	-0.401596183	-0.521698325	-0.00499968	0.208098759	-0.139740624	-0.0013392
1.6	-0.362955213	-0.521173303	-0.023927542	0.386409703	-1.60885E-09	-7.38636E-11
1.7	-0.306483148	-0.506261521	-0.03881849	0.564720647	0.139338031	0.010683988
1.8	-0.232179989	-0.477413376	-0.047778157	0.743031591	0.278104877	0.027831936
1.9	-0.140045735	-0.435044293	-0.049700651	0.921342535	0.416531766	0.047585729
2	-0.030080388	-0.379374591	-0.04449726	1.099653479	0.555182323	0.065117941
2.1	0.090381076	-0.312608356	-0.033804873	1.204614638	0.671529055	0.072617875
2.2	0.191998742	-0.243599804	-0.021619866	1.016176653	0.695999434	0.061771045
2.3	0.26743763	-0.174350588	-0.010784383	0.754388882	0.697402344	0.043137531
2.4	0.316697741	-0.104762786	-0.003154953	0.492601112	0.698418563	0.021033017
2.5	0.339779075	-0.0349365	0.000135268	0.230813342	0.698729962	-0.002705359
2.6	0.336681632	0.034912144	-0.001311217	-0.030974429	0.698242912	-0.026224336
2.7	0.307405412	0.104566049	-0.007150939	-0.292762199	0.697107003	-0.047672931
2.8	0.251950415	0.173921189	-0.016304895	-0.55454997	0.695684763	-0.065219582
2.9	0.170316641	0.24306559	-0.026970377	-0.81633774	0.69447312	-0.07705822
3	0.06250409	0.312290059	-0.036628842	-1.078125511	0.693977913	-0.081397427
3.1	-0.063919951	0.379651265	-0.042071407	-1.264240413	0.671334558	-0.074394562
3.2	-0.178686335	0.436002236	-0.040444305	-1.147663844	0.556598603	-0.051631028
3.3	-0.274227776	0.47878264	-0.031200459	-0.955414407	0.418353767	-0.027262537
3.4	-0.350544273	0.507518809	-0.015240186	-0.76316497	0.279368154	-0.008389093
3.5	-0.407635826	0.521692173	0.005605169	-0.570915533	0.139738977	0.001501384
3.6	-0.445502436	0.520924923	0.028833433	-0.378666096	2.07098E-09	1.1463E-10
3.7	-0.464144102	0.505123619	0.051553228	-0.186416659	-0.139024847	-0.014188962
3.8	-0.463560824	0.474548441	0.070781802	0.005832779	-0.276435983	-0.041232117
3.9	-0.443752602	0.42979114	0.083745259	0.198082216	-0.411502154	-0.080181631
4	-0.404719437	0.371661324	0.088164321	0.390331653	-0.543894619	-0.129020957
4.1	-0.346461328	0.300996963	0.082512513	0.58258109	-0.673873794	-0.184729507

4.2	-0.268978275	0.218429527	0.066243506	0.774830527	-0.802394177	-0.243343489
4.3	-0.172270279	0.124146283	0.039997933	0.967079964	-0.931097113	-0.299984492
4.4	-0.056337339	0.017702712	0.005813815	1.159329401	-1.062162643	-0.348828866
4.5	0.078820545	-0.102050914	-0.032626084	1.351578838	-1.197988998	-0.383001854
4.6	0.233203372	-0.236849968	-0.069677871	1.543828275	-1.340660199	-0.394403043
4.7	0.406811144	-0.388602844	-0.097338303	1.736077712	-1.49115045	-0.373507442
4.8	0.599643859	-0.558558179	-0.104799398	1.928327149	-1.648204464	-0.309244127
4.9	0.811701517	-0.745900301	-0.078079543	2.120576587	-1.806839242	-0.189136781
5	1.04298412	-0.945621639	0	2.312826024	-1.956458567	0

Lampiran 15. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut ω_R dan ω_L Bicopter pada Trajektori *Quasi-Static* dengan beban 1.5 kg

Waktu (s)	Bicopter 1		Bicopter 2		Bicopter 3	
	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)
0	46.71327372	42.62828399	158.3743365	151.4375524	161.0197287	154.9768745
1	53.02589181	48.84606964	160.5469923	153.8212128	158.4436087	152.1850477
2	54.53231358	50.42758641	161.364175	154.8540887	157.1103237	150.6116432
3	57.29940583	52.89608842	161.9717952	155.5313615	155.6154556	149.0091747
4	60.95258892	56.3540913	162.2009102	155.8068803	154.1901108	147.486402
5	64.97098219	60.32533557	162.039309	155.6437662	153.1049364	146.352359
6	68.66257493	64.08129708	161.5626601	155.1236642	152.6814584	145.9403465
7	71.83886968	67.35912152	160.8323963	154.2878258	153.0787853	146.4399256
8	74.28858887	69.88710341	159.947717	153.2154679	154.0886762	147.6559452
9	76.30061756	71.93682776	158.93036	151.9248487	155.4270579	149.2938384
10	79.13398404	74.8155963	157.4561593	150.0290581	157.1241183	151.4339928
11	84.98176858	80.82965483	154.7325692	146.5709558	159.4006533	154.4343699
12	95.51728284	91.758707	149.4746143	140.0169224	162.2922872	158.499531
13	109.4819819	106.2637397	140.5216813	129.0373705	165.0025504	162.8268873
14	122.6055134	119.8993913	128.1933025	113.9975145	166.5726617	166.1846179
15	131.6988886	129.3820577	114.802455	97.43966449	166.9937766	168.1964563
16	136.0687077	133.9976478	103.5120632	83.00042942	167.0888184	169.4173753
17	136.4518858	134.4834076	96.57882784	73.72320985	167.5664551	170.4705439
18	133.1548252	131.1410372	95.52013239	72.26242866	168.7798066	171.6719638
19	126.3019167	124.0905082	100.1432364	78.60741804	170.5049605	172.8258336
20	118.5476837	116.084863	105.2669806	85.55264551	171.8166976	173.4144517
21	114.1155306	111.5057867	105.7921611	86.52019807	172.378797	173.6060625
22	115.1628654	112.598342	99.93314173	79.23180752	172.3709149	173.765934
23	120.7133595	118.3520063	87.81069106	63.53604079	171.6496002	173.666195
24	127.9523394	125.8519361	71.29072899	47.61417623	169.9400717	172.8297419
25	135.4245021	133.6082828	56.14679735	62.01464651	166.9079984	170.8794049
26	142.1120279	140.5814542	61.74075725	81.82401932	162.5436504	167.7479915
27	147.3313528	146.0454454	74.5093191	94.59351918	157.9088299	164.2496749
28	151.3252237	150.2115234	80.63666894	99.89378048	154.3402716	161.4877245

29	154.8401401	153.8295422	79.96148706	98.79017275	152.0565353	159.662253
30	157.9178412	156.9495951	74.26747613	92.264888	150.5603499	158.3421035
31	159.7858316	158.7883223	67.86423979	80.36890077	149.7291947	157.3606113
32	159.9218113	158.8345076	72.89594147	68.22768836	148.9946611	156.2236917
33	159.0598111	157.8753948	84.43676136	67.50449662	147.5261405	154.3689264
34	158.4214174	157.1749576	90.57226104	70.60446605	145.6053955	152.2498579
35	158.7825486	157.5312693	87.98766172	66.35205203	143.8868691	150.5842558
36	159.7499687	158.536326	77.48289365	53.52143526	142.6494154	149.5633489
37	160.5749645	159.4135844	60.88006836	41.67178153	141.7759941	148.9426256
38	160.9043188	159.7872082	38.51948821	52.78057103	141.198039	148.5637024
39	160.4344368	159.3188216	16.55136968	62.98844863	141.8731148	149.1752786
40	159.1721348	157.9982864	31.17617175	64.51979657	144.5114694	151.3834242
41	157.3249064	156.0504299	41.87843056	58.53872297	148.6087143	154.81961
42	155.0816733	153.6943815	54.8252675	48.57470101	153.0114155	158.5509934
43	152.8057998	151.32795	65.61384167	42.12598685	156.634011	161.6685452
44	150.8237309	149.2866242	72.54759861	43.46136943	159.1144245	163.8575962
45	149.1837655	147.6147855	76.0929385	45.72514113	160.6878342	165.3066422
46	147.8446333	146.265051	76.81112546	45.3996908	161.58874	166.2206671
47	146.659793	145.0914435	75.33829874	42.02731754	161.9502742	166.6969683
48	145.4369046	143.8891849	72.57386285	36.26764331	161.9002336	166.8099996
49	143.7692304	142.2255717	70.16376705	30.37313609	161.8959639	166.8773481
50	141.6765751	140.0936665	69.62234812	28.51129491	162.3982876	167.2519616
51	139.3385124	137.6569135	73.02114641	36.57398596	163.7295557	168.1728684
52	136.3790671	134.5307582	81.46931051	51.88457305	165.7747276	169.4981952
53	132.6540886	130.5995786	92.13797001	67.89847308	167.8185961	170.6565191
54	127.9479359	125.6610828	102.7298312	82.26691805	169.4008037	171.3063885
55	123.4825637	120.9932227	110.6472971	92.49427174	170.2829015	171.4224101
56	118.844195	116.1639326	116.5222236	99.96208685	170.900482	171.3665276
57	114.5280957	111.659945	121.4748037	106.1739928	171.2348759	171.1003357
58	110.8442349	107.8004219	125.9524826	111.6810913	171.1823419	170.5364142
59	107.9004891	104.7075228	130.0187652	116.574039	170.7373865	169.6760094
60	108.2199101	104.9457687	136.1224589	123.5307005	168.3457652	166.9742643

Lampiran 16. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut ω_R dan ω_L Bicopter pada Trajektori *Quasi-Static* dengan beban 2 kg

Waktu (s)	Bicopter 1		Bicopter 2		Bicopter 3	
	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)
0	69.556454	67.54303174	182.9581171	174.9601589	185.9887553	179.0182602
1	68.83952235	68.41784974	182.2251183	174.3545639	186.7076846	179.6018845
2	69.50916456	68.41091022	184.7355077	177.1201941	184.2787304	176.9286749
3	72.13669004	69.70726074	187.8436605	180.424884	180.7410866	173.1737404
4	77.01243521	73.47647707	190.5361543	183.2583796	176.924489	169.1558592
5	82.80669484	78.75934376	192.1616248	184.9465457	173.9049267	166.000694

6	88.0428498	83.86855471	192.645023	185.4178249	172.3625134	164.4204857
7	92.55236113	88.39330468	192.1823742	184.8497704	172.3136397	164.4661061
8	95.86070462	91.74755206	190.9892767	183.4399943	173.5393127	165.9366168
9	97.48348518	93.39505759	189.2758829	181.4033055	175.7212618	168.4951608
10	98.68473648	94.5797409	186.7998746	178.4242821	178.7421553	172.0767727
11	102.7740232	98.65221525	182.8615331	173.6235773	182.4131166	176.6294325
12	112.6772094	108.7186285	176.118209	165.3824408	186.5422444	182.144999
13	127.5500226	124.0182999	165.3530213	152.3062593	190.1108195	187.5924762
14	142.3355439	139.3066886	150.5456828	134.392774	192.1804846	191.7332006
15	152.6156393	149.9994597	133.7943668	113.9073354	193.0325943	194.4222889
16	156.5824459	154.222724	118.1685976	94.23338356	194.2042501	196.8811372
17	154.6909257	152.4248679	106.3720898	78.87485651	196.546198	199.853586
18	147.8436675	145.5008604	100.9393926	71.99663818	199.8277677	203.0908549
19	137.3211205	134.7376619	102.7465399	75.21969401	203.2019079	205.8017665
20	126.9711963	124.1022568	106.0616207	80.57632769	205.6260811	207.4088734
21	121.8424717	118.8064021	104.5297052	79.88144655	206.8919394	208.2588068
22	123.8529533	120.84012	96.53310384	72.58808639	207.1387328	208.6957307
23	131.1317661	128.3289497	84.38273498	69.12011694	206.0975139	208.3528408
24	140.0501831	137.5466543	76.07787411	80.77133479	203.6321365	206.8681487
25	149.0769869	146.9147155	80.26517248	97.42249371	199.6002582	204.0517048
26	157.3570284	155.5462125	92.45897306	112.4900757	194.1051486	199.9413916
27	164.2968581	162.7881244	102.6518493	122.524638	188.1816104	195.3038954
28	170.0854923	168.7874853	106.6700594	126.0817631	183.1308945	191.1912965
29	175.5925767	174.4201182	104.2554672	123.2831842	179.0797753	187.715514
30	180.8271048	179.7101199	97.10723289	115.0044554	175.6275951	184.5374642
31	184.9546693	183.8112938	89.22664203	101.4818985	172.89886	181.7139421
32	187.3663768	186.1318463	92.14220937	88.55562698	170.3789795	178.7988776
33	188.7729288	187.4450481	103.7634252	87.24185659	166.8234133	174.8670858
34	190.1909888	188.8123183	111.2082767	90.5970918	162.3162225	170.2163031
35	192.1833835	190.8157758	110.1426819	87.59694807	157.5675091	165.6432296
36	194.2097064	192.8928026	101.552074	76.66585995	153.5265886	161.9795842
37	195.5544891	194.2952025	88.06052327	60.85382178	150.9036448	159.7469083
38	195.9516057	194.735912	72.61639149	50.29485645	150.1872022	159.2844966
39	195.2041137	193.9840157	61.23572473	51.16949622	152.1250233	161.0915981
40	193.3008286	192.0102368	60.00049268	46.93428073	156.7177103	165.0897028
41	190.3251124	188.9173866	67.61630505	31.98202688	162.9758825	170.4834427
42	186.471667	184.9359984	77.50751973	25.7725854	169.6601275	176.2969187
43	182.1473768	180.5010906	84.7826255	42.67794775	175.8188011	181.7888189
44	177.6041143	175.8765458	88.17863921	49.42313041	181.1671606	186.7197083
45	172.9111867	171.1244326	87.85754123	49.59975155	185.6709075	191.0061923
46	168.4014305	166.5805849	84.13449276	44.98112526	189.1368262	194.4211207
47	164.2930848	162.4600128	77.68905123	40.1093728	191.5771037	196.9415303
48	160.7390257	158.9095865	70.27871446	43.16473559	193.1015995	198.6115401
49	157.5613861	155.7220863	65.70774751	47.24012092	194.1440802	199.7121162
50	154.2991508	152.4073182	66.58489633	45.58806776	195.2420933	200.6553655
51	150.4285459	148.4148816	73.67376263	40.13599515	196.7503882	201.7032793

52	145.5351071	143.31633	85.43535887	49.51112843	198.6792621	202.8324206
53	140.0467191	137.5766442	97.29868366	67.08411974	200.624712	203.7898215
54	134.1521953	131.4029915	107.8312244	82.1326727	202.3169326	204.4401137
55	129.7170724	126.734992	115.6567627	92.87091981	203.3625273	204.6319774
56	126.0544361	122.8628694	122.7726207	102.212709	203.8557811	204.3817925
57	123.2940334	119.9180308	130.4702026	111.8082767	203.5501295	203.4078399
58	121.2764798	117.7516871	138.1379232	121.0334364	202.5016092	201.7782053
59	120.1597532	116.531263	145.1843649	129.3115275	200.8648912	199.6592443
60	126.9404475	123.3794448	157.5401097	143.1550228	194.3949014	192.788275

Lampiran 17. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut ω_R dan ω_L Bicopter pada Trajektori *Quasi-Static* dengan beban 2.5 kg

Waktu (s)	Bicopter 1		Bicopter 2		Bicopter 3	
	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)
0	87.21083644	85.64083724	204.820845	195.917119	208.1830217	200.4189887
1	87.42173545	87.07792111	204.0610139	195.2994232	208.9114642	200.9925455
2	87.64350897	87.57263157	204.9625951	196.4034711	208.0532528	199.9363289
3	88.44971803	88.06715657	206.6613364	198.2510282	206.3644292	198.0996062
4	90.35671056	89.074803	209.1539602	200.8826689	203.6894294	195.2737799
5	93.7828201	91.43366795	211.7792061	203.6094349	200.5264737	191.9777432
6	98.93983622	95.68166719	214.2037802	206.0879907	197.1318673	188.4774179
7	105.8987715	102.0317192	216.1015785	207.955769	193.8265358	185.1384289
8	113.9193714	109.7652725	217.0590456	208.7568576	191.2171466	182.6331274
9	121.9481589	117.7268047	216.9691395	208.3840688	189.6555475	181.3314904
10	130.0937998	125.9222129	215.4709955	206.3981025	189.6217424	181.809268
11	138.7838682	134.7424012	211.6005227	201.6363414	191.961255	185.1188603
12	148.8587367	145.0371172	203.6972624	192.1229699	197.0712531	191.8811921
13	160.2165143	156.7195855	190.4769607	176.3628287	203.4158347	200.4755795
14	170.5384888	167.4206369	172.3720272	154.8012139	208.8404483	208.3216007
15	176.9286074	174.1500579	152.0996852	130.332796	212.8055714	214.3766407
16	177.8482056	175.2948992	133.4415466	107.1339041	216.461784	219.4603824
17	173.46583	170.9936646	119.5566893	89.35366731	220.730515	224.4098258
18	164.2226284	161.6687672	112.8841277	81.24522191	225.6619122	229.2717102
19	150.6134425	147.8198944	113.3578396	83.20804424	230.66139	233.5234272
20	137.1307269	134.0864454	114.5815061	86.66330826	234.4215774	236.3767433
21	130.1247214	126.9315668	111.0219824	85.10163238	236.4933096	237.9921856
22	131.6878772	128.4464085	102.2433515	81.35522519	237.0276431	238.7343162
23	139.6511615	136.5481367	92.25829661	86.31928946	235.8700202	238.339168
24	149.8859263	147.0732596	89.96877035	101.1368993	233.0272531	236.5667131
25	160.869312	158.4320579	98.58196038	117.7556717	228.2801158	233.1498495
26	171.8050555	169.7723837	111.1947395	132.1529612	221.5584194	227.9555633
27	182.0460175	180.3660923	119.6898258	140.4107187	213.7506772	221.5960511
28	191.5899029	190.1587473	120.2513141	140.3139599	206.1066995	215.0645316

29	200.7601577	199.4805783	113.9199802	132.3110338	198.6646577	208.3891659
30	208.8127122	207.6033027	106.8981236	119.290239	191.215443	201.4164476
31	214.4596712	213.2277475	109.8232122	107.2080466	184.5327853	194.7983189
32	217.1862349	215.8594312	124.6981809	108.4288782	179.0551348	188.9825179
33	218.1218048	216.6935662	139.4493578	119.2807731	174.3614759	183.8753338
34	218.7693089	217.2815226	147.9262563	127.1763768	170.4419378	179.7334672
35	220.1704565	218.6856541	149.4071084	128.3892738	167.0697423	176.480357
36	222.2452156	220.8073908	145.4179724	123.8413927	163.9641075	173.7489139
37	224.2385269	222.8593149	136.9501369	114.4018999	161.5875826	171.7935949
38	225.3616539	224.0305853	124.791425	100.9275996	160.8777808	171.3619501
39	224.6682985	223.3337187	111.6589964	86.15015193	163.5733528	173.8704199
40	221.831549	220.4216177	101.33224	72.81019086	170.2569263	179.7949166
41	217.1830783	215.6459449	96.63213621	62.55055253	179.375805	187.8420344
42	211.3175066	209.6371767	97.59587271	58.9993913	188.7540163	196.1734371
43	204.6278776	202.8168329	99.81125965	60.60664679	197.3954471	204.0186997
44	197.4184686	195.5030195	99.86609169	61.35667681	204.9412064	211.0619673
45	189.9830491	187.9849068	96.34134805	59.31675505	211.2967424	217.1484689
46	182.780113	180.7270136	88.84291068	59.1203265	216.3847371	222.1545275
47	176.4888854	174.410249	79.01705219	68.04733692	220.0626616	225.9000003
48	172.2630685	170.1907059	72.37846278	80.74265259	222.1166509	228.1058657
49	169.7088514	167.6343961	71.99471736	88.95674411	223.2156508	229.274381
50	167.8336751	165.7148328	73.39066503	90.43659431	224.1413741	230.0440217
51	165.6026182	163.3657998	75.97604782	84.62574795	225.3890701	230.8049063
52	162.6394958	160.2017908	86.20819923	74.0941403	226.7782557	231.3386476
53	158.9797389	156.2972914	103.189135	76.42545041	227.7414818	231.2393736
54	154.5042184	151.5598875	120.5625703	93.93645775	228.0745913	230.4374625
55	150.3778278	147.219315	133.3189651	109.304479	227.8704672	229.2883773
56	145.7675749	142.4093458	142.6705729	120.8254592	227.7039534	228.2879875
57	141.1691654	137.6213573	150.2224545	130.122378	227.4021073	227.2347056
58	136.8149307	133.096704	156.2682816	137.5168504	226.9871134	226.1736451
59	133.8971655	130.0500519	161.7504015	144.0924774	226.0564048	224.713227
60	143.8139893	140.0265708	176.7019869	160.8359552	217.5233755	215.7110503

Lampiran 18. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut λ_R dan λ_L Bicopter pada Trajektori *Quasi-Static* dengan beban 1.5 kg

Waktu (s)	Bicopter 1		Bicopter 2		Bicopter 3	
	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$
0	-52.04993538	-71.24788996	1.092663079	1.195071495	1.250617102	1.350064293
1	-49.6603057	-63.8882507	2.541439351	2.770521824	0.842406698	0.914968559
2	-48.67990487	-61.4697345	3.065555533	3.327243358	0.541428885	0.587296739
3	-44.92107093	-55.95335431	3.667486653	3.978034985	0.185822346	0.202712741
4	-40.39200265	-49.29428016	4.294126358	4.654680584	-0.168913132	-0.184490944
5	-36.4746152	-43.59252823	4.885455943	5.296555484	-0.426343541	-0.466335601
6	-33.87036663	-39.77890289	5.363360609	5.819601081	-0.502141486	-0.549334395

7	-32.19767447	-37.30569457	5.678766181	6.172636825	-0.387705787	-0.423596024
8	-30.7383329	-35.28079194	5.773299152	6.29311039	-0.201054412	-0.219701347
9	-29.09338801	-33.16673848	5.68132225	6.218571987	-0.016944559	-0.019193157
10	-26.53320911	-29.98731052	5.471240857	6.027823223	0.156661143	0.168178381
11	-22.42760781	-24.94298793	5.239528157	5.841304554	0.342752492	0.365186945
12	-17.41723606	-18.92538465	5.043629966	5.750611228	0.552027837	0.579058963
13	-13.31374174	-14.14787494	4.995700616	5.928251823	0.761249797	0.782156679
14	-10.89020295	-11.39363093	5.053051528	6.395110049	0.968488803	0.973123871
15	-9.839001749	-10.19840798	5.07220971	7.049222472	1.24589807	1.228056976
16	-9.672196244	-9.976428819	4.715522774	7.346258403	1.681395289	1.635540831
17	-10.0933566	-10.39373928	3.759685137	6.462952282	2.308863591	2.231145223
18	-11.06681587	-11.41325278	2.374593541	4.153441239	3.120792591	3.016763811
19	-12.60938163	-13.07033424	1.031871429	1.675738551	4.007827526	3.900921299
20	-14.21860106	-14.84116122	-0.274348195	-0.413828784	4.749366032	4.662431261
21	-14.86418211	-15.58342988	-1.975454417	-2.95082954	5.225988964	5.153010618
22	-13.92882001	-14.58098476	-4.924685387	-7.842377688	5.460214481	5.374038392
23	-12.02518745	-12.51437831	-10.97578753	-21.31433956	5.540026981	5.413160977
24	-10.22138555	-10.56808638	-25.10669049	-71.99962258	5.590482878	5.405177404
25	-8.947914877	-9.195753018	-63.94379752	-47.4311749	5.669040988	5.407302535
26	-8.257737521	-8.442035925	-63.09606483	-30.52025881	5.750510086	5.396613694
27	-7.85057401	-7.992652129	-43.32601855	-25.20185331	5.655905467	5.224574792
28	-7.351293747	-7.462801005	-38.97862804	-24.20111752	5.217532869	4.763531942
29	-6.524189391	-6.611101046	-42.37838087	-26.20614841	4.378855195	3.970433394
30	-5.394279653	-5.461327703	-54.456626	-31.81678054	3.218797051	2.909831641
31	-4.090328061	-4.141962041	-83.45713948	-45.10345165	1.84464319	1.670020532
32	-2.823663103	-2.8623427	-57.75809163	-74.90421689	0.400444837	0.364390052
33	-1.830284699	-1.857130093	-36.4559271	-68.37416513	-0.920877064	-0.840277366
34	-1.259523646	-1.277824718	-27.78274593	-50.07619427	-1.930509392	-1.763755174
35	-1.110852768	-1.126045784	-24.90042172	-47.74350171	-2.505893039	-2.285057679
36	-1.175541399	-1.191281683	-24.6544982	-60.91617788	-2.719819629	-2.471391538
37	-1.204871918	-1.221320895	-25.30463698	-65.78165389	-2.733357088	-2.475131594
38	-1.087797003	-1.103315892	-24.91554316	-12.96885312	-2.648969906	-2.392950663
39	-0.967637712	-0.982777817	68.56892574	3.675249271	-2.366730721	-2.142344139
40	-1.077980622	-1.096306919	89.23716136	13.48727971	-1.770078692	-1.615427808
41	-1.538693864	-1.566016723	56.75947285	25.32762926	-0.905036526	-0.835986542
42	-2.294106693	-2.336962168	35.31427176	47.40759963	0.085146244	0.078144483
43	-3.18646932	-3.24970861	24.29440027	86.35366284	1.032163722	0.968320481
44	-4.07074973	-4.155347765	17.85279593	58.66991866	1.838762041	1.733657559
45	-4.914325398	-5.019573253	13.30796314	39.60352885	2.5171768	2.378428826
46	-5.735046925	-5.859989553	10.11035961	30.16543061	3.14754887	2.974434752
47	-6.57154837	-6.715145496	7.750140614	25.67834893	3.782033477	3.569347104
48	-7.423836403	-7.585521985	5.849861277	24.08373943	4.414565165	4.157917571
49	-8.279809953	-8.461535256	3.43572165	18.65766052	4.973056526	4.680128703
50	-9.003136501	-9.208845	0.149472965	0.906894481	5.326705395	5.021675346
51	-9.398479509	-9.63127641	-2.975128571	-11.93447295	5.356202868	5.076420597
52	-9.482380658	-9.74749725	-4.309982901	-10.67977187	5.103395563	4.880935911

53	-9.421680458	-9.723707925	-4.280169588	-7.90084655	4.683933479	4.528881674
54	-9.456232093	-9.807425924	-3.676199907	-5.739310416	4.266200659	4.171373772
55	-9.583952862	-9.986635957	-3.258315125	-4.665864503	3.908622526	3.856623552
56	-9.883810455	-10.34962723	-3.404536422	-4.627618771	3.582393539	3.563141832
57	-10.08519211	-10.61536891	-3.800165759	-4.976423995	3.120440127	3.125570502
58	-10.14576774	-10.73372954	-3.986752802	-5.073511214	2.59493474	2.614552924
59	-10.15490443	-10.79182596	-3.652537543	-4.545984404	2.162278556	2.189115116
60	-9.300815183	-9.895562697	-0.514620793	-0.624603238	1.723476901	1.752068811

Lampiran 19. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut λ_R dan λ_L Bicopter pada Trajektori *Quasi-Static* dengan beban 2 kg

Waktu (s)	Bicopter 1		Bicopter 2		Bicopter 3	
	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$
0	-68.29489707	-80.16951032	-2.676396846	-2.92689065	-2.396238406	-2.586602267
1	-80.57229556	-87.08318568	-2.752974916	-3.007476895	-2.003197409	-2.165033524
2	-75.38745014	-87.41042178	-2.235441389	-2.431968649	-2.480851775	-2.691458827
3	-64.75208457	-75.6055088	-1.503763551	-1.629941497	-3.178871782	-3.463027319
4	-54.03924178	-62.76933837	-0.707795176	-0.76488602	-3.869256476	-4.233159917
5	-46.4807066	-53.27824555	0.008296578	0.009344001	-4.323125564	-4.745064769
6	-42.15479753	-47.69551393	0.56861039	0.614124658	-4.42922173	-4.868045186
7	-39.61654828	-44.35074658	0.983066778	1.062798202	-4.22722409	-4.64088692
8	-38.03694793	-42.27412899	1.177312386	1.275889636	-3.871140248	-4.235037005
9	-37.1972516	-41.20041174	1.071315919	1.165643449	-3.489616384	-3.796576961
10	-35.99601608	-39.78347385	0.68094863	0.745833339	-3.111281457	-3.357843184
11	-32.42324564	-35.58545953	0.143419365	0.158944202	-2.744475493	-2.927444895
12	-26.37581543	-28.50212226	-0.481936318	-0.546374154	-2.38110366	-2.497394335
13	-20.46930429	-21.70942938	-1.236640474	-1.457361905	-2.099604462	-2.156209287
14	-16.65739229	-17.4123083	-2.280067221	-2.8613637	-1.927013226	-1.935936168
15	-14.85017482	-15.38542548	-3.848234861	-5.312923663	-1.77129721	-1.746073746
16	-14.64816241	-15.11036887	-6.117138061	-9.646333004	-1.390794648	-1.353179874
17	-15.71708074	-16.20020663	-8.953846944	-16.44201231	-0.681001727	-0.658409242
18	-17.94084946	-18.54337232	-11.38785926	-22.83377103	0.268098689	0.259910544
19	-21.17863352	-22.03931801	-12.55963841	-23.93291644	1.223370679	1.193171928
20	-24.41933573	-25.63975785	-13.86921677	-24.53409467	1.914691259	1.882631139
21	-25.35773471	-26.76818483	-17.40874813	-30.80943258	2.257350275	2.228829458
22	-23.06056221	-24.29485516	-25.31832209	-49.12966234	2.381531804	2.347014531
23	-19.39070701	-20.2826452	-42.09871675	-87.57931978	2.453742736	2.401261885
24	-16.3583043	-16.97798694	-72.58545028	-57.8374091	2.557130589	2.477320119
25	-14.34330789	-14.78011849	-72.76348697	-40.41965183	2.649063116	2.533684736
26	-13.14311967	-13.45859625	-51.00024379	-31.67371264	2.638267382	2.485239588
27	-12.30514704	-12.53936539	-41.70635759	-27.84213923	2.39167965	2.219397882
28	-11.43242808	-11.61205381	-39.91497821	-27.34208451	1.862931164	1.708599202
29	-10.28212167	-10.42258413	-44.07553584	-29.83224428	1.0373492	0.943899792
30	-8.911417233	-9.02349653	-55.6202796	-36.04558177	-0.027537579	-0.024975865

31	-7.474568562	-7.56837949	-80.77106295	-49.73384095	-1.297585877	-1.174716988
32	-6.18332701	-6.265697928	-64.3210487	-77.34243499	-2.742603877	-2.489941741
33	-5.199387026	-5.272736675	-41.48624364	-69.55960792	-4.319129666	-3.929378103
34	-4.599477346	-4.665681713	-30.89265781	-50.6708624	-5.880316412	-5.343844914
35	-4.29007737	-4.350512983	-26.45233477	-44.76078171	-7.265111602	-6.568906971
36	-4.125169199	-4.180990539	-25.11409829	-48.12437845	-8.332304289	-7.479082029
37	-4.021374077	-4.073805509	-25.58728032	-64.74229639	-8.965374068	-7.993608018
38	-3.994267196	-4.045175912	-27.34195708	-73.26854571	-9.064633519	-8.052878992
39	-4.139098712	-4.192723523	-25.92814129	-38.79400781	-8.528101194	-7.601261201
40	-4.537488372	-4.600104028	-16.20465914	-27.15850163	-7.449481431	-6.711253967
41	-5.211737071	-5.290817463	-6.66647048	-31.29507588	-6.103447129	-5.577089121
42	-6.133426867	-6.236744959	-2.734390169	-25.59634432	-4.74643847	-4.395776345
43	-7.231826958	-7.365393266	-2.309191363	-9.155208326	-3.514971153	-3.287949965
44	-8.471034537	-8.639638268	-3.81157231	-12.21780784	-2.418485021	-2.276799863
45	-9.832058843	-10.04051075	-6.393317165	-20.44886865	-1.425523347	-1.346940831
46	-11.23225916	-11.48241786	-10.05583393	-37.65168334	-0.558438738	-0.52845219
47	-12.613163	-12.90445286	-14.79985567	-73.41414527	0.197213932	0.186505239
48	-13.89110961	-14.2199879	-20.19768224	-66.25666163	0.838284012	0.792099941
49	-15.00236316	-15.36820683	-23.41279731	-50.25297782	1.363371724	1.288008499
50	-16.0043072	-16.41559009	-21.82594374	-52.48493557	1.803431307	1.707223483
51	-17.00380749	-17.48280233	-17.16731669	-83.96946933	2.170116254	2.064956545
52	-18.09839725	-18.68278696	-13.04695059	-42.22732702	2.429259712	2.331159898
53	-19.21184523	-19.93491477	-11.59357748	-25.00105072	2.472968972	2.397528103
54	-20.32519329	-21.22349996	-11.52916301	-20.14738405	2.298530382	2.251663018
55	-20.87954371	-21.92289626	-12.21371219	-19.15205672	1.890245858	1.8672021
56	-21.07951676	-22.24667537	-12.58574919	-18.32352395	1.368724022	1.361618884
57	-20.92231709	-22.179654	-12.01443538	-16.46729867	0.769816314	0.770487034
58	-20.65135161	-21.9708175	-10.78862229	-14.11407715	0.18941348	0.190316086
59	-20.28225385	-21.62832558	-9.31554831	-11.77461638	-0.342092829	-0.346541702
60	-17.04960803	-18.08120046	-5.601985248	-6.789294031	-1.614010424	-1.640935525

Lampiran 20. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut λ_R dan λ_L Bicopter pada Trajektori *Quasi-Static* dengan beban 2.5 kg

Waktu (s)	Bicopter 1		Bicopter 2		Bicopter 3	
	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$
0	-72.89843164	-82.37156521	-4.928835413	-5.388308217	-4.576947324	-4.939293814
1	-82.52159833	-87.93058842	-4.887668579	-5.3373975	-4.178493636	-4.515003159
2	-84.73094392	-85.85384552	-4.700814022	-5.120483043	-4.234461276	-4.585934728
3	-82.30049616	-88.40410348	-4.332321301	-4.708500854	-4.434495287	-4.813082435
4	-75.12097942	-83.9799116	-3.763793041	-4.080603969	-4.798872958	-5.222509728
5	-65.94752568	-73.88282031	-3.125310298	-3.38140229	-5.250791768	-5.730335688
6	-56.63570888	-63.2571051	-2.459603027	-2.657216332	-5.7369407	-6.277895554
7	-47.96360823	-53.13750657	-1.788656911	-1.931470968	-6.19998064	-6.798082144
8	-40.72318623	-44.64538416	-1.191285147	-1.287880918	-6.564288082	-7.198970425

9	-35.22555089	-38.23606932	-0.712564689	-0.772492129	-6.78047685	-7.420713728
10	-30.8890417	-33.22657184	-0.364210493	-0.396850973	-6.766846913	-7.36394292
11	-27.16070807	-28.96543492	-0.256504222	-0.282469694	-6.449609256	-6.937491412
12	-23.66669994	-25.01463857	-0.540540449	-0.607685031	-5.838003751	-6.159349219
13	-20.55749773	-21.5303935	-1.323687484	-1.544182244	-5.152462582	-5.305215654
14	-18.40150419	-19.11969463	-2.690677073	-3.33693458	-4.581081043	-4.604043317
15	-17.50969909	-18.09211956	-4.720888184	-6.435816219	-4.093789389	-4.033953494
16	-17.91815487	-18.46260486	-7.436499474	-11.58343793	-3.50245487	-3.407271934
17	-19.56856085	-20.16253981	-10.66001128	-19.33867243	-2.696024964	-2.608122844
18	-22.60176604	-23.36254856	-13.7580015	-27.32642723	-1.693961034	-1.640625732
19	-27.43642916	-28.57546153	-16.18111373	-31.13954501	-0.62772492	-0.611782701
20	-32.93583568	-34.65435837	-19.39779646	-35.48381841	0.184896601	0.18265225
21	-35.23318769	-37.31923137	-25.3920881	-46.86247304	0.585576932	0.578894172
22	-32.30939104	-34.17940858	-36.78600522	-71.04071633	0.713040865	0.703246244
23	-27.00534718	-28.35588823	-58.01106713	-75.66826618	0.759400153	0.743722761
24	-22.4762019	-23.39579245	-88.24014365	-52.27983566	0.818282834	0.793566141
25	-19.17066937	-19.79094819	-65.4484128	-39.6085271	0.821365456	0.786749619
26	-16.7879237	-17.20601299	-50.13180429	-32.9164645	0.657692836	0.620640706
27	-14.84231582	-15.12749948	-44.63547294	-30.70045959	0.187590865	0.174004973
28	-12.95216204	-13.1518202	-46.96137353	-32.46873788	-0.660744761	-0.607214004
29	-10.97390745	-11.11709692	-57.82721656	-38.86567748	-1.899080171	-1.726067355
30	-9.068727441	-9.175604851	-79.91238327	-52.24286624	-3.431517296	-3.092382855
31	-7.408413627	-7.494691858	-68.82806913	-78.11002626	-5.127605847	-4.600139323
32	-6.127349194	-6.203090398	-44.71491477	-68.52083739	-6.821623618	-6.120793847
33	-5.291473929	-5.361428316	-32.60133624	-47.42426841	-8.368509324	-7.519445852
34	-4.866770962	-4.933419443	-27.27988438	-38.32212198	-9.644219609	-8.66437271
35	-4.757571031	-4.821905225	-25.60059467	-35.81102929	-10.67771253	-9.557301694
36	-4.842257137	-4.904804778	-25.78610478	-36.85211836	-11.63560159	-10.34561012
37	-5.065539388	-5.127592508	-27.0024786	-40.58501403	-12.51135091	-11.04783322
38	-5.389772482	-5.453469593	-28.9193064	-47.6657355	-13.03191624	-11.46235289
39	-5.855773362	-5.925994625	-30.01574893	-57.17268316	-12.6767427	-11.19920038
40	-6.54545717	-6.630128725	-27.65989328	-64.05392213	-11.27078186	-10.09420614
41	-7.503072329	-7.611688802	-21.39236447	-60.5345818	-9.298298922	-8.473541032
42	-8.706315649	-8.848327574	-15.05990448	-45.32802759	-7.358124933	-6.810252281
43	-10.16330462	-10.34810859	-12.20044644	-34.978384	-5.674824233	-5.311758995
44	-11.85656427	-12.09362704	-13.18901841	-37.19049083	-4.284131888	-4.038921974
45	-13.74270594	-14.04213732	-17.47137256	-52.3688918	-3.136548428	-2.969457942
46	-15.74087909	-16.10986891	-26.11907472	-83.77967287	-2.190834728	-2.078238477
47	-17.6754934	-18.11372849	-41.65689989	-63.66667843	-1.435051042	-1.361769558
48	-19.11835802	-19.60585558	-64.60439593	-46.54474711	-0.944214885	-0.895354642
49	-20.01161181	-20.53275628	-82.08102233	-40.45069104	-0.661637472	-0.627442449
50	-20.54226267	-21.09655024	-84.15377184	-40.93264391	-0.504052762	-0.478869602
51	-20.96669392	-21.57399257	-69.65629719	-49.09451664	-0.408005936	-0.38941121
52	-21.36092512	-22.05029764	-45.53332672	-75.04709268	-0.398472981	-0.383174886
53	-21.82105035	-22.61770988	-28.60726634	-60.79539364	-0.488053718	-0.473487638
54	-22.52620815	-23.46169597	-19.45620793	-33.27604759	-0.640591674	-0.627527281

55	-23.25176794	-24.32334351	-15.35742137	-23.20246643	-0.838132166	-0.827619714
56	-24.23131233	-25.46730562	-13.52177032	-19.02558143	-1.040478764	-1.034928974
57	-25.23897934	-26.65748195	-12.60006239	-16.90200867	-1.297966102	-1.299738839
58	-26.29985624	-27.91568187	-11.98735783	-15.55723112	-1.551898739	-1.563115835
59	-26.88276847	-28.64089873	-11.3083944	-14.30586505	-1.861777296	-1.884194993
60	-21.42918433	-22.66757443	-8.618640068	-10.42117138	-3.612231396	-3.67330766

Lampiran 21. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut ω_R dan ω_L Bicopter pada Trajektori *Quasi-dinamic* dengan beban 1.5 kg

Waktu (s)	Bicopter 1		Bicopter 2		Bicopter 3	
	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)
0	41.78539809	41.78539809	157.2323013	156.0237479	156.2100192	157.4143203
0.1	122.9332697	116.7758922	191.4787119	125.8439248	125.1823823	195.948594
0.2	67.22069167	87.65871941	142.0396934	157.014637	169.3133001	155.4510317
0.3	70.21439232	94.086692	137.6429885	151.6454385	170.6107475	158.0884686
0.4	75.73455957	99.40392964	133.1017953	146.0538754	171.6021377	160.3339298
0.5	81.55870031	103.5619166	128.7792458	140.6111069	172.299574	162.1911955
0.6	86.69817903	106.6336534	125.0094773	135.6414741	172.7198793	163.6867022
0.7	90.96373813	108.7936594	122.072157	131.4090965	172.8621499	164.8376954
0.8	94.55073621	110.3172403	120.1785619	128.1141387	172.6968368	165.6353501
0.9	97.86273971	111.587526	119.465779	125.895643	172.1636192	166.039124
1	101.4296276	113.0916689	119.9961381	124.8365834	171.1774316	165.9810629
1.1	105.9059369	115.4563129	121.6867358	124.8954206	169.6444562	165.3814567
1.2	111.8516294	119.268469	124.3765004	125.9608161	167.4775764	164.164458
1.3	119.4893166	124.8353601	127.9055185	127.9196102	164.6281886	162.2908631
1.4	128.7003082	132.1321116	132.0350492	130.5698588	161.1259728	159.7986313
1.5	139.0485411	140.7828052	136.4270323	133.5921646	157.1134785	156.8370482
1.6	149.8811223	150.1466634	140.6248665	136.5256567	152.8695265	153.6881366
1.7	160.4479438	159.4488346	144.046892	138.7593143	148.806285	150.7600813
1.8	170.0103997	167.9063012	145.9997573	139.5438476	145.4234985	148.5375018
1.9	177.9338779	174.8326799	145.7086188	138.0176946	143.2130345	147.4850464
2	183.76399	179.7211168	142.3492306	133.226002	142.5330906	147.9269388
2.1	187.1419912	182.4286666	134.8630771	124.2762279	143.7542078	149.8677863
2.2	187.6845228	183.3184618	121.5493083	110.4281129	147.5038837	152.9547367
2.3	186.0099533	182.2047286	101.2758986	89.10254214	152.8126543	157.2999318
2.4	182.6054409	179.3231676	70.41723563	54.39839883	158.9350909	162.5291467
2.5	177.9716411	175.186496	35.88085217	54.54122276	165.1899833	167.9794182
2.6	172.7143204	170.4108944	82.01180817	91.64057137	170.8209102	172.8955605
2.7	167.4755181	165.647099	109.5240279	116.08218	175.0846603	176.5218071
2.8	162.8441044	161.4905089	128.2987227	133.2596942	177.3377305	178.1921291
2.9	159.2620818	158.3870338	141.0352636	144.9706585	177.1087913	177.405737
3	156.9538955	156.5626561	149.11348	152.2936056	174.1502836	173.8802195
3.1	155.8909322	155.9572869	153.5519717	156.1371164	168.4322681	167.5748519

3.2	155.8612871	156.264873	155.1003319	157.264626	160.1208751	158.706424
3.3	156.7553204	157.4755552	154.6737995	156.4418832	149.8646071	147.8023822
3.4	158.2649668	159.3141794	152.9937229	154.3333826	138.46359	135.5974968
3.5	160.0178974	161.4075659	150.5972702	151.4661132	126.8478787	122.9930783
3.6	161.6943081	163.4343395	147.8686058	148.2247412	116.0383315	111.0040155
3.7	163.0707682	165.1694991	145.0439788	144.8541885	107.0309649	100.668504
3.8	164.0297043	166.4947173	142.2365638	141.4810002	100.6164542	92.88504489
3.9	164.5452619	167.3850577	139.472674	138.1453899	97.17739241	88.18457347
4	164.658288	167.8847262	136.728033	134.833348	96.6053507	86.58295538
4.1	164.4502657	168.0815162	133.9544912	131.4998705	98.42557582	87.66270598
4.2	164.0217815	168.0853278	131.0917225	128.078201	102.0263194	90.80311999
4.3	163.4770732	168.0120931	128.0625393	124.4737129	106.8445382	95.38631211
4.4	162.9127467	167.9709853	124.7527296	120.5430239	112.4605796	100.9207376
4.5	162.4057901	168.0498764	120.9759923	116.0581702	118.6199938	107.0895487
4.6	161.9934862	168.2916112	116.4212002	110.6511443	125.2079081	113.7390254
4.7	161.6358518	168.6519226	110.5706431	103.7218657	132.1912253	120.8239539
4.8	161.1501281	168.9289761	102.5550916	94.2568155	139.5329525	128.3206653
4.9	160.1070043	168.6545616	90.83633566	80.36912812	147.0775346	136.1107635
5	157.679902	166.93687	72.28881592	57.63210403	154.4091888	143.8392711

Lampiran 22. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut ω_R dan ω_L Bicopter pada Trajektori *Quasi-dinamic* dengan beban 2 kg

Waktu (s)	Bicopter 1		Bicopter 2		Bicopter 3	
	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)
0	67.09508154	67.09508154	179.3983906	186.6116852	179.3983906	186.6116852
0.1	114.3067228	95.51633622	200.9865151	159.2441921	149.8664346	207.9450259
0.2	92.17884906	107.7170443	171.7288312	191.159958	187.422325	182.9620211
0.3	98.72293644	115.6471146	168.0183485	187.8122638	187.8046706	183.5680248
0.4	105.5318185	122.0109619	163.7993719	183.9165635	188.4334828	184.3971034
0.5	111.2847815	126.7199568	159.4330682	179.8440907	189.2617138	185.3946453
0.6	115.6188399	129.8780166	155.2065222	175.8722679	190.2480099	186.5268861
0.7	118.6135638	131.7076905	151.3199462	172.1822316	191.3413619	187.7571673
0.8	120.5769467	132.5366308	147.8922817	168.8712356	192.4746535	189.0332407
0.9	121.9763087	132.8058588	144.9803573	165.9759389	193.5662408	190.2844512
1	123.4105122	133.0733212	142.6050453	163.5006956	194.5288577	191.4279498
1.1	125.6305246	134.0495097	140.7180154	161.3908217	195.2869266	192.384953
1.2	129.3552564	136.4387712	139.2632694	159.5879841	195.7860249	193.0903984
1.3	135.0027104	140.6925836	138.2439571	158.0884088	196.009587	193.5112534
1.4	142.5880177	146.8982162	137.6529823	156.8753967	195.9946549	193.6649842
1.5	151.6957729	154.7181697	137.4361912	155.8791814	195.8305917	193.6217131
1.6	161.6065224	163.483412	137.4388033	154.9252518	195.6416826	193.4908005
1.7	171.4881484	172.3746939	137.3444671	153.6843799	195.5536189	193.3912824
1.8	180.5696185	180.6049178	136.6280621	151.6412889	195.6505065	193.4119343

1.9	188.2700158	187.5609768	134.546059	148.0947553	195.9353593	193.5729632
2	194.2841267	192.8990952	130.1672022	142.1857716	196.3086641	193.8032851
2.1	198.5584709	196.6235016	122.3704358	133.0185584	196.738062	194.0164795
2.2	201.1546303	199.0467317	109.6483824	119.7170962	197.5578992	194.3216479
2.3	202.4982178	200.2865701	90.02037923	100.3636297	198.4323988	194.703204
2.4	202.9552183	200.607532	60.6694275	72.37765722	199.2025313	195.1224607
2.5	202.8405521	200.3211188	58.22645742	49.98415036	199.7582767	195.4829814
2.6	202.4123279	199.6839993	91.29345367	82.3127522	199.9041313	195.5834233
2.7	201.8507767	198.8770257	115.7304579	108.0445203	199.3532115	195.1101994
2.8	201.2580711	198.0048954	133.66858	126.2930309	197.7485047	193.6619583
2.9	200.6675351	197.1051969	146.7061878	139.1837873	194.7142018	190.8079661
3	200.0495643	196.154696	155.996299	148.1499302	189.9324569	186.1728038
3.1	199.2063774	195.1446956	162.570691	154.1679299	183.2694349	179.3753199
3.2	197.7451127	194.2388835	167.2470913	157.4846876	174.9413788	169.932617
3.3	196.1239995	193.3838301	170.5949673	159.3784847	165.3166578	158.635665
3.4	194.4362981	192.503215	173.0614686	160.5222933	155.182781	146.3948665
3.5	192.6052469	191.5208364	174.9419152	161.2055264	145.6445962	134.3209458
3.6	190.5775211	190.3778219	176.3576352	161.5335132	137.8953941	123.7442925
3.7	188.3502061	189.0616312	177.2928637	161.4639423	132.915141	115.9185235
3.8	185.9752267	187.613099	177.6577573	160.8717548	131.1571943	111.5865474
3.9	183.5456216	186.1157604	177.354205	159.6176899	132.4357438	110.7180776
4	181.173376	184.6769026	176.3237213	157.597822	136.1001597	112.6890835
4.1	178.9692549	183.4102487	174.566754	154.7619115	141.3292818	116.6596805
4.2	177.0322658	182.4271407	172.1328492	151.0993965	147.356721	121.8195106
4.3	175.4515036	181.8381037	169.0867457	146.5980447	153.5804787	127.492761
4.4	174.3174139	181.760983	165.4558511	141.1802472	159.5905482	133.1848619
4.5	173.7335271	182.3260029	161.1608181	134.6156674	165.1541946	138.5962616
4.6	173.8133405	183.6620809	155.9237665	126.3933733	170.1838405	143.6115739
4.7	174.6400904	185.8426956	149.135658	115.4947828	174.6951403	148.2709836
4.8	176.1611148	188.7651654	139.6331471	99.85597006	178.7442029	152.7155948
4.9	177.987742	191.9376661	125.2289805	74.40076485	182.3136677	157.0753622
5	179.0823376	194.1557141	101.3006102	24.81651404	185.1042632	161.2547435

Lampiran 23. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut ω_R dan ω_L Bicopter pada Trajektori *Quasi-dinamic* dengan beban 2.5 kg

Waktu (s)	Bicopter 1		Bicopter 2		Bicopter 3	
	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)	ω_R (rad/s)	ω_L (rad/s)
0	85.26258202	85.26258202	206.5673265	198.2365889	206.5673265	198.2365889
0.1	102.1471866	93.89432451	211.6005	198.9395962	200.1791504	196.2155784
0.2	118.4829069	115.4019574	209.8542761	200.6262855	199.2923377	191.7412013
0.3	133.6418352	130.543148	208.1023414	197.9279694	197.2856963	190.5771004
0.4	145.1556078	142.1126572	205.1409999	193.9901856	196.1956849	190.3108317
0.5	153.3333657	150.3453597	201.6602453	189.5159273	195.8854318	190.7928008

0.6	158.6399398	155.6958503	198.1446815	185.0008646	196.261061	191.9240061
0.7	161.5487522	158.6395003	194.8742054	180.7337571	197.2428505	193.6242135
0.8	162.5439991	159.6647154	191.9489326	176.8220337	198.7455514	195.8106596
0.9	162.157109	159.3078987	189.3323499	173.2370261	200.6693651	198.3885504
1	161.0042751	158.1913138	186.9062512	169.8724914	202.9013323	201.2526231
1.1	159.8549892	157.0927958	184.4814806	166.554852	205.3264215	204.2985323
1.2	159.5499801	156.8626395	181.8863247	163.1382267	207.8360807	207.4313006
1.3	160.8218169	158.2401833	179.0537141	159.5986722	210.3412293	210.577639
1.4	164.1488794	161.702587	175.9837731	155.9882078	212.7806591	213.6928145
1.5	169.5739922	167.2795188	172.7137111	152.3932828	215.1150351	216.7522971
1.6	176.6647457	174.5169373	169.2565209	148.8578911	217.3089326	219.7310011
1.7	184.6612347	182.6338813	165.5245702	145.2931441	219.3047895	222.5746228
1.8	192.7262361	190.7798315	161.2629253	141.4020798	220.9967467	225.1718227
1.9	200.1796808	198.2711699	156.0163908	136.6421986	222.2136762	227.3371996
2	206.6544948	204.7458852	149.1428281	130.2345477	222.7180844	228.8119854
2.1	212.1132253	210.1862059	139.7934164	121.14783	222.3057462	229.35545
2.2	216.6430164	214.7173317	126.8063136	108.0165005	221.0828271	229.0044772
2.3	220.4366798	218.5223867	109.1051382	89.74480615	219.2190184	227.9027231
2.4	223.684644	221.7986201	86.43643547	70.48029283	216.88724	226.1891987
2.5	226.5047944	224.6751371	68.81786587	77.8983995	214.2176829	223.9701169
2.6	228.9168231	227.1775365	84.03867691	102.5002788	211.2437219	221.2812679
2.7	230.8517439	229.2372216	106.7140604	124.1568444	207.8659792	218.0564121
2.8	232.1833644	230.7236963	124.6765052	141.2573477	203.8506394	214.1237832
2.9	232.7618898	231.4796258	138.1402029	154.4612514	198.8734293	209.2423474
3	232.4338108	231.3424334	148.3130158	164.7104183	192.6083097	203.1792617
3.1	231.1030002	230.2145772	156.3877767	172.9591549	184.8283839	195.7891713
3.2	228.9084391	228.2498711	163.107711	179.7877925	175.5039572	187.0870636
3.3	226.0463923	225.6148356	168.9289839	185.6086032	164.993528	177.5015745
3.4	222.6725949	222.4523295	174.1038938	190.6564011	154.1095414	167.8472213
3.5	218.9230065	218.8949653	178.687919	194.9956666	144.0387173	159.2159413
3.6	214.9348449	215.0781072	182.5834926	198.5620588	136.137937	152.7579608
3.7	210.8562079	211.1488844	185.6090998	201.2208317	131.5485407	149.3479625
3.8	206.8460522	207.2655261	187.5720511	202.8303859	130.7393814	149.2734281
3.9	203.0661718	203.5888373	188.3266474	203.2934687	133.3456543	152.1677567
4	199.6702606	200.2709968	187.8057476	202.5846104	138.4607589	157.235205
4.1	196.7962643	197.4478836	186.022232	200.7501591	145.0596487	163.5646007
4.2	194.5667492	195.2395937	183.0433269	197.8832207	152.2567764	170.3445897
4.3	193.0983434	193.7601149	178.9430289	194.0781723	159.3917567	176.9518004
4.4	192.5161282	193.1319687	173.735944	189.3681653	166.029469	182.9600685
4.5	192.9628201	193.4956101	167.2907522	183.6449917	171.929649	188.1157874
4.6	194.5860433	194.9968159	159.2137578	176.5542764	177.0087162	192.3034537
4.7	197.4804601	197.7286743	148.6822131	167.3485772	181.2968651	195.5068133
4.8	201.5563436	201.5994903	134.2051449	154.6623849	184.8751975	197.7529526
4.9	206.3051623	206.0967679	113.5437195	136.1658383	187.7578445	199.0066723
5	210.4395612	209.9238168	89.61670711	108.8089134	189.6710782	198.9663496

Lampiran 24. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut λ_R dan λ_L Bicopter pada Trajektori *Quasi-Static* dengan beban 1.5 kg

Waktu (s)	Bicopter 1		Bicopter 2		Bicopter 3	
	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$
0	-77.45958848	-77.45958848	-2.987627487	-3.034133969	-4.984619996	-4.908454029
0.1	31.9232881	43.72402425	14.78891251	42.96226794	31.10930253	14.3723648
0.2	-86.85551943	-39.51296213	-6.83755029	-6.472577047	-8.185280583	-10.63243427
0.3	-65.81185598	-34.60604531	-5.630775863	-5.9634017	-7.70704769	-10.21909122
0.4	-50.41250248	-30.57521547	-4.73731758	-5.566262782	-7.401251812	-9.853680239
0.5	-40.02156529	-27.18081636	-4.1555376	-5.291378481	-7.200611034	-9.50209217
0.6	-32.77579709	-24.20231979	-3.896941954	-5.159288669	-7.061986364	-9.148732624
0.7	-27.29536371	-21.4398519	-3.96389553	-5.189848891	-6.96014222	-8.791564796
0.8	-22.71394927	-18.70878265	-4.325546922	-5.387220487	-6.883198735	-8.438318894
0.9	-18.50036195	-15.84828004	-4.901062602	-5.724331252	-6.829818522	-8.103965765
1	-14.3728677	-12.75498189	-5.56049063	-6.133770086	-6.807658067	-7.809136113
1.1	-10.26339953	-9.421388503	-6.155218705	-6.520452906	-6.83413196	-7.580797876
1.2	-6.348139566	-6.017698414	-6.549555879	-6.777645838	-6.933396189	-7.448996578
1.3	-2.938718021	-2.863851636	-6.642404807	-6.805330149	-7.133167937	-7.443518965
1.4	-0.279456773	-0.270991412	-6.39177608	-6.542696753	-7.463065936	-7.592332989
1.5	1.550798694	1.588028216	-5.813873308	-5.980193591	-7.946967921	-7.914022116
1.6	2.623770665	2.710806097	-4.9639644	-5.150510001	-8.588718611	-8.403953999
1.7	3.08843549	3.209709346	-3.90727726	-4.102323563	-9.350694718	-9.014620295
1.8	3.105760499	3.237856086	-2.689529182	-2.866649508	-10.13211282	-9.638093832
1.9	2.81508152	2.941224927	-1.311586479	-1.421301264	-10.76633087	-10.10887168
2	2.32574774	2.441356217	0.297570947	0.35741765	-11.0601239	-10.24475719
2.1	1.596312363	1.697728417	2.091235818	2.501383118	-11.03834331	-10.1195312
2.2	0.311490337	0.371511209	3.538482205	4.412755917	-11.10909431	-10.25684915
2.3	-1.160696198	-1.129296201	5.73311627	7.754063961	-10.71664553	-9.997889351
2.4	-2.707405944	-2.690079806	11.9634277	21.69019606	-9.851610198	-9.272011075
2.5	-4.321678007	-4.310724569	43.33598652	18.89865602	-8.741631231	-8.28744377
2.6	-5.967977506	-5.959973588	4.888572454	4.503313091	-7.592866631	-7.244108685
2.7	-7.572987178	-7.566915706	0.489131506	0.78901142	-6.555012514	-6.294407572
2.8	-9.029967976	-9.025769163	-1.738547612	-1.382993082	-5.722896955	-5.539613947
2.9	-10.22573377	-10.22306973	-3.414031565	-3.093126992	-5.156272039	-5.046692639
3	-11.08589868	-11.08256791	-4.891358095	-4.626827833	-4.904325489	-4.872090752
3.1	-11.40408149	-11.39535035	-6.070836582	-5.8718422	-4.863786848	-4.914746729
3.2	-10.61757066	-10.60544963	-6.40714887	-6.273565534	-4.538019728	-4.660827391
3.3	-9.445086934	-9.421983551	-6.490481065	-6.40824628	-4.422411442	-4.618704729
3.4	-8.225545935	-8.176792822	-6.444801366	-6.39658901	-4.763505083	-5.04976168
3.5	-7.062408171	-6.971267307	-6.204504722	-6.167886563	-5.645375835	-6.058585609
3.6	-6.013325493	-5.86232634	-5.726529331	-5.670778812	-7.105407267	-7.717962192
3.7	-5.098275639	-4.870348417	-4.996977475	-4.881575148	-9.024499588	-9.943851226
3.8	-4.314058857	-3.99363822	-4.032553818	-3.808037532	-11.0188957	-12.32507238
3.9	-3.646628496	-3.22091209	-2.87530882	-2.486492639	-12.50059983	-14.11296251
4	-3.078486566	-2.538989079	-1.583251325	-0.974096782	-12.98586672	-14.60012564

4.1	-2.591510139	-1.935998105	-0.220706368	0.66020047	-12.37783089	-13.60944139
4.2	-2.166501303	-1.401354453	1.149196514	2.343456651	-10.92697408	-11.52307436
4.3	-1.780700612	-0.92372414	2.469955697	4.005019614	-8.99250689	-8.90847537
4.4	-1.404212772	-0.487903057	3.696871276	5.582894239	-6.870007212	-6.215460079
4.5	-0.996025811	-0.071249216	4.804701652	7.032957331	-4.752366476	-3.711567121
4.6	-0.500049226	0.359943077	5.801921386	8.34566276	-2.758953484	-1.53993886
4.7	0.158911182	0.854059917	6.761379842	9.582597075	-0.972938092	0.215022832
4.8	1.08080248	1.478487075	7.901784695	10.9812456	0.537303036	1.493024777
4.9	2.403178289	2.327490963	9.881814664	13.39481204	1.715864581	2.25209378
5	4.337339669	3.542308039	15.51156865	21.90257694	2.530037227	2.476386114

Lampiran 25. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut λ_R dan λ_L Bicopter pada Trajektori *Quasi-Static* dengan beban 2 kg

Waktu (s)	Bicopter 1		Bicopter 2		Bicopter 3	
	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$
0	-83.55293463	-83.55293463	-13.37271655	-12.34220612	-13.37271655	-12.34220612
0.1	26.92947365	51.13822661	5.767856409	11.93951502	8.648785784	6.058677038
0.2	-67.31338299	-44.67735354	-17.43158282	-14.5060353	-16.7350233	-18.16028727
0.3	-52.57979175	-37.70524017	-16.71948848	-14.04562132	-16.27167928	-17.83697334
0.4	-42.82531006	-32.786336	-16.4097156	-13.80333536	-15.82606311	-17.41076862
0.5	-36.30614864	-29.15271665	-16.45896342	-13.7571595	-15.38059321	-16.89731463
0.6	-31.71825649	-26.31851253	-16.83656752	-13.89518956	-14.92730086	-16.31567781
0.7	-28.22587205	-23.94548173	-17.51257233	-14.20848548	-14.46825387	-15.69035228
0.8	-25.26805153	-21.76663925	-18.44534498	-14.68295199	-14.01489369	-15.05174456
0.9	-22.43646429	-19.55302772	-19.56916715	-15.29049134	-13.58659113	-14.43531734
1	-19.44015215	-17.11942208	-20.78318831	-15.98060186	-13.20842932	-13.87954606
1.1	-16.11864296	-14.35213262	-21.96406309	-16.68583986	-12.90869811	-13.42342227
1.2	-12.54159338	-11.30316593	-22.95886114	-17.31563906	-12.71435488	-13.10199036
1.3	-9.015178961	-8.223093518	-23.57767497	-17.75120497	-12.64565053	-12.94108575
1.4	-5.914759905	-5.449821883	-23.64294059	-17.87377699	-12.71120293	-12.95260481
1.5	-3.505899984	-3.255846324	-23.03826802	-17.59327347	-12.90225562	-13.12880935
1.6	-1.864880282	-1.752709718	-21.75223362	-16.8762325	-13.18824424	-13.43753376
1.7	-0.919761079	-0.903779631	-19.89058007	-15.75836638	-13.51634568	-13.82090826
1.8	-0.531980019	-0.592434317	-17.64286281	-14.33211279	-13.81761302	-14.20048841
1.9	-0.555029985	-0.681099767	-15.21837579	-12.71355027	-14.02001921	-14.48975801
2	-0.858025718	-1.038850677	-12.78525712	-11.00403483	-14.06489943	-14.61111389
2.1	-1.491439998	-1.707189627	-10.87687017	-9.601648268	-14.05434642	-14.65748183
2.2	-2.831888449	-3.052556336	-11.46145924	-10.04458538	-14.35096724	-15.0176948
2.3	-4.335180797	-4.544770045	-15.69114602	-13.02751456	-14.44499424	-15.14011629
2.4	-5.79616848	-5.985849527	-36.4158964	-25.09673103	-14.18488464	-14.85505645
2.5	-7.157138589	-7.32222786	-45.06568795	-72.91936608	-13.61989155	-14.21624037
2.6	-8.36198491	-8.502566504	-19.86655082	-24.12737513	-12.84321043	-13.33079144
2.7	-9.370904555	-9.492769476	-14.89781404	-16.58649124	-11.97623326	-12.33998612
2.8	-10.17239715	-10.28824366	-13.49251062	-14.58846313	-11.15102934	-11.39708419

2.9	-10.78900693	-10.91997971	-13.24045719	-14.19806145	-10.49887738	-10.65316481
3	-11.2763259	-11.45401622	-13.41357009	-14.40551348	-10.1501987	-10.25841413
3.1	-11.54187644	-11.78805325	-13.40720976	-14.54219627	-10.04024736	-10.19573715
3.2	-11.12778661	-11.39157355	-12.36945888	-13.7549479	-9.611493385	-10.00115723
3.3	-10.53986426	-10.80439654	-11.09336145	-12.67597148	-9.54092198	-10.31103901
3.4	-9.97063697	-10.22065723	-9.757785185	-11.42869899	-10.14449185	-11.49586932
3.5	-9.442009185	-9.648308933	-8.324170928	-9.955281014	-11.45418277	-13.70420028
3.6	-8.963429351	-9.08631309	-6.795359965	-8.251896219	-13.3252706	-16.88469377
3.7	-8.533727265	-8.526629003	-5.200420714	-6.352373981	-15.35167837	-20.53075179
3.8	-8.145855994	-7.959348838	-3.580448344	-4.308630558	-16.9661564	-23.64020609
3.9	-7.791965894	-7.378310219	-1.978969414	-2.17543925	-17.7412953	-25.23125159
4	-7.466785722	-6.784989822	-0.438609234	-0.004290807	-17.605883	-24.99896579
4.1	-7.168109526	-6.189370884	0.997287063	2.154210258	-16.77483158	-23.35331071
4.2	-6.89401693	-5.607493905	2.28089095	4.243152977	-15.54388157	-20.96124745
4.3	-6.637170697	-5.056286845	3.356769482	6.191539389	-14.15137398	-18.37086888
4.4	-6.377009163	-4.546714284	4.161417617	7.909176909	-12.7428217	-15.90734193
4.5	-6.070921906	-4.076190146	4.626253737	9.285738143	-11.38771061	-13.72138109
4.6	-5.645912485	-3.620936911	4.682947831	10.1918261	-10.10714551	-11.86584101
4.7	-4.992968022	-3.129120597	4.266465793	10.46933062	-8.897379506	-10.35330454
4.8	-3.965913123	-2.51596161	3.303183243	9.84885099	-7.748220088	-9.191379942
4.9	-2.38048953	-1.66049405	1.639051209	7.232264016	-6.658122616	-8.402899604
5	0.009118713	-0.395817709	-1.392502672	-56.72668726	-5.644663605	-8.037185761

Lampiran 26. Tabel Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut λ_R dan λ_L Bicopter pada Trajektori *Quasi-Static* dengan beban 2.5 kg

Waktu (s)	Bicopter 1		Bicopter 2		Bicopter 3	
	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$	$\lambda_R (deg)$	$\lambda_L (deg)$
0	-85.01381978	-85.01381978	-4.744406031	-5.152601968	-4.744406031	-5.152601968
0.1	-49.32098808	-62.3427944	-2.94607686	-3.18248059	-4.84428908	-4.88699686
0.2	-38.32147222	-40.96835897	-2.177738338	-2.421086446	-5.320976337	-5.791816831
0.3	-30.28738419	-32.05714511	-1.346096566	-1.542935162	-5.517686639	-5.973821117
0.4	-25.7151241	-27.05052862	-0.838291134	-1.001987123	-5.684652036	-6.110377663
0.5	-22.91765648	-24.01264385	-0.664425134	-0.820765621	-5.813521946	-6.197112849
0.6	-21.13524542	-22.08585622	-0.836265056	-1.026690546	-5.894419651	-6.227803307
0.7	-19.96154546	-20.81988343	-1.356598254	-1.639315617	-5.919676099	-6.198239003
0.8	-19.13097089	-19.92568472	-2.212711438	-2.661328499	-5.886067982	-6.108387697
0.9	-18.42880971	-19.17289501	-3.374500254	-4.074650224	-5.795998012	-5.96337675
1	-17.65447438	-18.34795457	-4.795787901	-5.840395333	-5.657713933	-5.773496111
1.1	-16.60945406	-17.2400887	-6.41954136	-7.904228833	-5.485692757	-5.554455128
1.2	-15.15740797	-15.70520679	-8.178814546	-10.19546436	-5.2971494	-5.323841797
1.3	-13.31159503	-13.75923572	-9.989829835	-12.6130303	-5.109171109	-5.098380647
1.4	-11.26172701	-11.60546848	-11.75196267	-15.02023519	-4.938254363	-4.893672566
1.5	-9.316088534	-9.569790492	-13.35308724	-17.24895461	-4.79865928	-4.722733434
1.6	-7.764009336	-7.952802944	-14.68759648	-19.12846618	-4.701405091	-4.59514844

1.7	-6.76742302	-6.91765696	-15.68676796	-20.54086314	-4.654224539	-4.517136008
1.8	-6.347263579	-6.480334643	-16.35194987	-21.48467786	-4.6626022	-4.492618643
1.9	-6.430008435	-6.561121215	-16.7780789	-22.12034286	-4.731727266	-4.525094379
2	-6.894452387	-7.033485962	-17.16778399	-22.79893612	-4.868965181	-4.619876891
2.1	-7.607020606	-7.758507644	-17.90315504	-24.19623936	-5.074590038	-4.775471751
2.2	-8.46532011	-8.627954565	-19.82369901	-27.90354136	-5.30132211	-4.947791591
2.3	-9.357465227	-9.529929433	-24.82524591	-38.40223879	-5.477285152	-5.072441105
2.4	-10.18533818	-10.36433997	-39.29162442	-72.3623788	-5.543603052	-5.098771405
2.5	-10.87277843	-11.05265637	-85.37921232	-51.06801086	-5.460911686	-4.994305873
2.6	-11.37413389	-11.54804266	-45.02651024	-28.37692092	-5.215989912	-4.748972568
2.7	-11.68000413	-11.84141334	-29.1517138	-21.07028208	-4.826537039	-4.378468264
2.8	-11.8154243	-11.95940121	-24.00123417	-18.45118985	-4.339296309	-3.922897094
2.9	-11.83280433	-11.95671766	-22.29882058	-17.64534191	-3.823326974	-3.441948867
3	-11.80366964	-11.90725843	-21.89030902	-17.57579604	-3.364179382	-3.010601973
3.1	-11.79320832	-11.87741599	-21.84549826	-17.69595184	-3.068410994	-2.722938779
3.2	-11.80323212	-11.86746237	-21.75099639	-17.75006853	-3.08456869	-2.706899743
3.3	-11.83702949	-11.88169244	-21.42845923	-17.61347754	-3.617770188	-3.123242575
3.4	-11.89843093	-11.92406915	-20.79715731	-17.22501537	-4.886496207	-4.120858394
3.5	-11.99057737	-11.99730296	-19.86255352	-16.58209918	-7.052281925	-5.773724285
3.6	-12.11574238	-12.10322359	-18.69373464	-15.72845609	-10.04650178	-7.97166447
3.7	-12.27461567	-12.24216441	-17.38983238	-14.73410421	-13.37867196	-10.34586904
3.8	-12.46671471	-12.41350479	-16.05220921	-13.67651813	-16.23252532	-12.37825558
3.9	-12.69118562	-12.61659744	-14.76904866	-12.62830453	-17.94927419	-13.67384823
4	-12.94696623	-12.85103097	-13.61204425	-11.65263381	-18.39448133	-14.13625541
4.1	-13.23129348	-13.11520202	-12.64114058	-10.8046841	-17.84641141	-13.90823811
4.2	-13.53587785	-13.40252049	-11.91344101	-10.13666654	-16.68967772	-13.21341124
4.3	-13.84073604	-13.69523063	-11.49460268	-9.70492314	-15.23034138	-12.24819706
4.4	-14.10668858	-13.95680631	-11.47418698	-9.579381096	-13.65830208	-11.14850173
4.5	-14.26899437	-14.12528675	-11.99169047	-9.85862241	-12.07492183	-9.997302265
4.6	-14.23644666	-14.1117603	-13.29321881	-10.70047266	-10.53209015	-8.844982164
4.7	-13.90133664	-13.80943521	-15.88318443	-12.39772553	-9.066576026	-7.731513532
4.8	-13.16295267	-13.11636892	-21.02578738	-15.60307955	-7.729742738	-6.709299631
4.9	-11.95790303	-11.96591321	-32.94977667	-22.18166959	-6.614276034	-5.867491786
5	-10.27818404	-10.34642079	-70.78045898	-39.91335878	-5.875384706	-5.356430289

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Lumajang, 15 Nopember 2002, merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SDN Ranuyoso 1 Ranuyoso, SMPN 1 Klakah dan SMA Taruna Dra. Zulaeha Kota Probolinggo. Setelah lulus dari SMAN tahun 2021, Penulis mengikuti SBMPTN dan diterima di Departemen Teknik Mesin FTIRS - ITS pada tahun 2021 dan terdaftar dengan NRP 5007211138. Di Departemen Teknik Mesin Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan Seminar yang diselenggarakan oleh Departemen dan aktif sebagai staff organisasi mahasiswa DIMENSI. Apabila ada hal yang ingin didiskusikan dan ingin memberikan saran terkait dengan penelitian ini dapat menghubungi e-mail: dani15awr11@gmail.com.