



TESIS - EE185401

**PENGEMBANGAN SWARM UAV MENGGUNAKAN
ANT COLONY OPTIMIZATION UNTUK
MEMPERCEPAT PEMBENTUKAN FORMASI DI
RUANG TERBUKA**

ANDRI SUHARTONO
07111750042003

DOSEN PEMBIMBING
RONNY MARDIYANTO, ST., MT., PH.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN ELEKTRONIKA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO DAN INFORMATIKA CERDAS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020



TESIS - EE185401

**PENGEMBANGAN SWARM UAV MENGGUNAKAN
ANT COLONY OPTIMIZATION UNTUK
MEMPERCEPAT PEMBENTUKAN FORMASI DI
RUANG TERBUKA**

ANDRI SUHARTONO
07111750042003

DOSEN PEMBIMBING
RONNY MARDIYANTO, ST., MT., PH.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN ELEKTRONIKA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO DAN INFORMATIKA CERDAS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ANDRI SUHARTONO

NRP: 07111750042003

Tanggal Ujian: 29 Juni 2020

Periode Wisuda: September 2020

Disetujui oleh:

Pembimbing:

1. Ronny Mardiyanto, ST., MT., Ph.D.
NIP: 198101182003121003



Penguji:

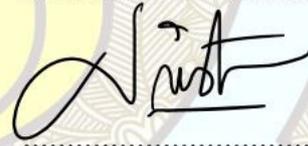
1. Ir. Djoko Purwanto, M.Eng., Ph.D.
NIP: 196512111990021002



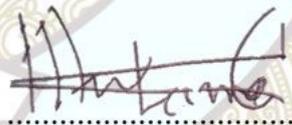
2. Achmad Arifin, ST., M.Eng., Ph.D.
NIP: 197103141997021001



3. Dr. Rachmad Setiawan, ST., MT.
NIP: 196905291995121001



4. Muhammad Attamimi, B.Eng., M.Eng., Ph.D.
NIP: 198503272019031006



Kepala Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas



Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
NIP: 197311192000031001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul **“PENGEMBANGAN SWARM UAV MENGGUNAKAN ANT COLONY OPTIMIZATION UNTUK MEMPERCEPAT PEMBENTUKAN FORMASI DI RUANG TERBUKA”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 05 Juni 2020



Andri Suhartono

NRP. 07111750042003

Halaman ini sengaja dikosongkan

PENGEMBANGAN SWARM UAV MENGGUNAKAN ANT COLONY OPTIMIZATION UNTUK MEMPERCEPAT PEMBENTUKAN FORMASI DI RUANG TERBUKA

Nama mahasiswa : Andri Suhartono
NRP : 07111750042003
Pembimbing : 1. Ronny Mardiyanto, ST., MT., Ph.D.

ABSTRAK

Dancing UAV merupakan suatu pertunjukkan tari yang diperankan oleh puluhan hingga ribuan UAV. Dalam pertunjukkan tersebut UAV terbang membentuk pola yang telah ditentukan. Performa *dancing* UAV sangat terbatas oleh waktu pertunjukkan dan juga waktu terbang masing-masing UAV. Selain masalah waktu, menentukan lintasan masing-masing UAV untuk membentuk pola-pola tertentu di daerah tiga dimensi merupakan masalah yang cukup penting untuk diselesaikan. Untuk mengatasi masalah waktu dan menentukan lintasan, perlu melakukan penentuan *waypoint* terbaik dan lintasan terbaik. *Ant Colony Optimization* (ACO) sebagai metode untuk menentukan *waypoint* dan lintasan terbaik dan *Data-Driven Applications Systems* (DDDAS) sebagai paradigma komunikasi untuk memastikan kondisi di lapangan berjalan sesuai dengan simulasi. Eksperimen menggunakan simulasi dilakukan untuk melihat besarnya efek memilih *waypoint* terbaik dan lintasan terbaik menggunakan ACO. Percobaan melibatkan 3, 5, 10, 15, 20, dan 25 unit UAV dengan pola yang berbeda-beda. Terdapat total 33 pola berbeda dalam percobaan ini. Hasil percobaan menunjukkan bahwa metode dapat mempersingkat waktu pembentukan pola sebesar 5% hingga 42% dari 60% percobaan yang dilakukan, terutama untuk pola yang terbentuk dengan jumlah UAV yang banyak. Tingkat keberagaman solusi yang disajikan mencapai 60%, namun selisih kurang dari 1% untuk setiap solusinya.

Kata kunci: ACO, Optimasi, Pembentukan formasi, UAV

Halaman ini sengaja dikosongkan

JUDUL DAN ISI DARI ABSTRAK MENGGUNAKAN BAHASA INGGRIS

By : Andri Suhartono
Student Identity Number : 07111750042003
Supervisor(s) : 1. Ronny Mardiyanto, ST., MT., Ph.D.

ABSTRACT

Dancing UAV is a dance performance played by tens to thousands of UAV units. In the show the UAV flies to form a predetermined pattern. The dancing UAV performance is very limited by the showtime and also the flying time of each UAV. Besides the time problem, determining the trajectory of each UAV to form certain patterns in a three-dimensional area is a problem. To overcome the time problem and determine the trajectory, it is necessary to determine the best waypoint and trajectory. Ant Colony Optimization (ACO) as a method to figure out the best waypoint and trajectory and Dynamic Data-Driven Applications Systems (DDDAS) as a communication paradigm to ensure condition in the field run according to the simulation. Experiments using simulation were carried out to see the magnitude of the effect of selecting the best waypoint and trajectory using the ACO. The experiments are using 3,5,10,15,20, and 25 units of UAVs with many patterns. There are 33 different patterns in these experiments. The results of the experiment show that method can shorten the pattern forming time by 5% to 42% from 60% of experiments, especially for the pattern that formed with a large number of UAVs. The diversity of solutions presented reaches 60%, but the difference is less than 1% for each solution.

Key words: ACO, Optimization, Pattern forming, UAV

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Terima kasih dan apresiasi yang sangat besar penulis berikan kepada keluarga, rekan kerja, pacar dan teman-teman penulis yang telah membantu penulis berupa bantuan materi maupun bantuan semangat juang yang sangat berharga hingga akhirnya buku tesis ini dapat terselesaikan. Rasa terima kasih yang sangat besar juga penulis sampaikan kepada semua dosen ITS yang telah membagikan ilmunya, terlebih kepada Pak Ronny Mardiyanto, ST., MT., Ph.D. selaku dosen pembimbing, beliau telah membimbing dengan sangat sabar hingga akhirnya buku tesis ini dapat terselesaikan. Sungguh suatu perjuangan yang tidak mudah untuk menyelesaikan buku tesis "Pengembangan Swarm UAV Menggunakan Ant Colony Optimization untuk Mempercepat Pembentukan Formasi di Ruang Terbuka" tersebut, banyak kejadian yang mewarnai hari-hari pembuatan buku tesis tersebut, kejadian yang paling berkesan adalah pandemi korona (COVID-19) yang menghebohkan seluruh negara.

Buku tesis ini dibuat sebagai syarat untuk memperoleh gelar magister teknik pada Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), disamping itu buku tersebut juga menjadi salah satu rekam jejak penelitian penulis yang dapat dijadikan referensi pengembangan topik sejenis di masa mendatang. Penulis menyadari bahwa terdapat beberapa kekurangan dalam buku tesis tersebut yang disebabkan oleh kelalaian dalam penulisan, oleh karena itu tolong perhatikan dan tetap menyaring informasi yang didapat baik dari buku ini maupun sumber informasi lainnya. Semoga materi dari buku tesis ini dapat berguna bagi perkembangan teknologi. Akhir kata, mohon maaf atas segala kesalahan dan kekurangan yang ada dalam buku tesis ini. Terima kasih.

Surabaya, 05 Juni 2020

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Kontribusi	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA.....	5
2.1 Kajian Penelitian Terkait	5
2.2 Teori Dasar.....	11
2.2.1 <i>Unmanned Aerial Vehicles (UAV)</i>	11
2.2.2 Quadcopter	15
2.2.3 Hambatan pada Quadcopter	22
2.2.4 Metode Metaheuristik	23
2.2.5 <i>Ant Colony Optimization (ACO)</i>	24
2.2.6 <i>Dynamic Data-Driven Application Systems (DDDAS)</i>	27
BAB 3 METODE PENELITIAN	29
3.1 Pembentukan Formasi.....	29
3.2 Desain Perangkat Keras	33
3.3 Pemodelan Perangkat Keras	35

3.4	Desain Area Terbang.....	38
3.5	Penentuan <i>Waypoint</i> Awal dan Kandidat <i>Waypoint</i> Tujuan.....	43
3.6	Pengembangan Algoritma Optimasi.....	45
3.7	Pembentukan Formasi.....	52
3.8	Penerapan DDDAS.....	54
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....		57
4.1	Formasi yang Dibentuk.....	58
4.1.1	Deretan formasi 1: 3 unit drone, 2 bentuk formasi sederhana.....	58
4.1.2	Deretan formasi 2: 5 unit drone, 2 bentuk formasi sederhana.....	59
4.1.3	Deretan formasi 3: 10 unit drone, 2 bentuk formasi sederhana.....	61
4.1.4	Deretan formasi 4: 15 unit drone, 2 bentuk formasi sederhana.....	62
4.1.5	Deretan formasi 5: 20 unit drone, 2 bentuk formasi sederhana.....	64
4.1.6	Deretan formasi 6: 25 unit drone, 2 bentuk formasi sederhana.....	67
4.1.7	Deretan formasi 7: 5 unit drone, 3 bentuk formasi sederhana.....	69
4.1.8	Deretan formasi 8: 5 unit drone, 4 bentuk formasi sederhana.....	71
4.1.9	Deretan formasi 9: 5 unit drone, 5 bentuk formasi sederhana.....	73
4.1.10	Deretan formasi 10: 3 unit drone, 2 bentuk formasi kompleks.....	76
4.1.11	Deretan formasi 11: 5 unit drone, 2 bentuk formasi kompleks.....	77
4.1.12	Deretan formasi 12: 10 unit drone, 2 bentuk formasi kompleks.....	78
4.1.13	Deretan formasi 13: 15 unit drone, 2 bentuk formasi kompleks.....	80
4.1.14	Deretan formasi 14: 20 unit drone, 2 bentuk formasi kompleks.....	82
4.1.15	Deretan formasi 15: 25 unit drone, 2 bentuk formasi kompleks.....	84
4.2	Hasil Percobaan Pertama.....	87
4.3	Hasil Percobaan Kedua.....	89
4.4	Hasil Percobaan Ketiga.....	90
4.5	Hasil Percobaan Keempat.....	91
4.6	Hasil Percobaan Kelima.....	91
BAB 5 KESIMPULAN.....		95
DAFTAR PUSTAKA.....		97
LAMPIRAN.....		101
DAFTAR INDEX.....		103

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Dancing UAV Perusahaan Ehang [6].....	2
Gambar 2.1	Diagram <i>Fishbone</i>	10
Gambar 2.2	<i>Global Hawk</i> [20].....	11
Gambar 2.3	A-160 [20].....	12
Gambar 2.4	Chyper [20].....	12
Gambar 2.5	Neptune [20].....	13
Gambar 2.6	<i>Dragon Eye</i> [20].....	13
Gambar 2.7	Fixed Wing UAV [20].....	14
Gambar 2.8	Quadcopter [20].....	15
Gambar 2.9	Konstruksi Rangka Quadcopter.....	16
Gambar 2.10	Arah Putaran Baling-Baling Quadcopter [21].....	17
Gambar 2.11	Konstruksi ESC [22].....	19
Gambar 2.12	<i>Brushless</i> DC Motor [23]	20
Gambar 2.13	Modul GPS Radiolink TS100 Mini [24]	21
Gambar 2.14	Ant-Colony Double Bridge [25].....	25
Gambar 2.15	Konsep DDDAS	27
Gambar 3.1	Ilustrasi Formasi yang Dirancang.....	29
Gambar 3.2	Penomeran pada Seluruh Drone	30
Gambar 3.3	Pembentukan Formasi Berikutnya	30
Gambar 3.4	Penomeran dengan Mempertimbangkan Jarak Drone.....	31
Gambar 3.5	Penomeran dengan Pertimbangan Kecepatan dan Percepatan	32
Gambar 3.6	RadioLink MiniPix.....	33
Gambar 3.7	Diagram Blok Drone	34

Gambar 3.8	Bentuk UAV Rakitan Jenis Quadcopter	35
Gambar 3.9	Ilustrasi Penentuan Waktu Pembentukan Formasi	36
Gambar 3.10	Grafik Kecepatan Terhadap Waktu	38
Gambar 3.11	Gridding Area Terbang.....	39
Gambar 3.12	Ilustrasi Pergerakan Berliku Drone.....	40
Gambar 3.13	Pergerakan dengan Menyelesaikan Koordinat X.....	41
Gambar 3.14	Pergerakan dengan Menyelesaikan Koordinat Y.....	41
Gambar 3.15	Ilustrasi Pergerakan dengan Sebuah Perubahan Arah Tambahan..	43
Gambar 3.16	Ilustrasi Koloni, Sumber Makanan dan Rute Memungkinkan.....	44
Gambar 3.17	Posisi Formasi Berikutnya Sebagai Kandidat Waypoint Tujuan...	44
Gambar 3.18	Posisi Formasi Saat Ini Sebagai Kandidat Waypoint Tujuan	45
Gambar 3.19	<i>Flowchart</i> Pemilihan Waypoint dan Rute Terbaik dengan ACO ..	49
Gambar 3.20	<i>Flowchart</i> Pembentukan Formasi	53
Gambar 3.21	Ilustrasi Komunikasi Dua Arah	55
Gambar 3.22	Ilustrasi Komunikasi Satu Arah.....	55
Gambar 4.1	Deretan 1 Formasi 1	59
Gambar 4.2	Deretan 1 Formasi 2.....	59
Gambar 4.3	Deretan 2 Formasi 1	60
Gambar 4.4	Deretan 2 Formasi 2.....	60
Gambar 4.5	Deretan 3 Formasi 1	61
Gambar 4.6	Deretan 3 Formasi 2.....	61
Gambar 4.7	Deretan 4 Formasi 1	62
Gambar 4.8	Deretan 4 Formasi 2.....	63
Gambar 4.9	Deretan 5 Formasi 1	64
Gambar 4.10	Deretan 5 Formasi 2.....	65
Gambar 4.11	Deretan 6 Formasi 1	67

Gambar 4.12	Deretan 6 Formasi 2	67
Gambar 4.13	Deretan 7 Formasi 1	69
Gambar 4.14	Deretan 7 Formasi 2	70
Gambar 4.15	Deretan 7 Formasi 3	70
Gambar 4.16	Deretan 8 Formasi 1	71
Gambar 4.17	Deretan 8 Formasi 2	71
Gambar 4.18	Deretan 8 Formasi 3	72
Gambar 4.19	Deretan 8 Formasi 4	72
Gambar 4.20	Deretan 9 Formasi 1	73
Gambar 4.21	Deretan 9 Formasi 2	74
Gambar 4.22	Deretan 9 Formasi 3	74
Gambar 4.23	Deretan 9 Formasi 4	74
Gambar 4.24	Deretan 9 Formasi 5	74
Gambar 4.25	Deretan 10 Formasi 1	76
Gambar 4.26	Deretan 10 Formasi 2	76
Gambar 4.27	Deretan 11 Formasi 1	77
Gambar 4.28	Deretan 11 Formasi 2	77
Gambar 4.29	Deretan 12 Formasi 1	78
Gambar 4.30	Deretan 12 Formasi 2	79
Gambar 4.31	Deretan 13 Formasi 1	80
Gambar 4.32	Deretan 13 Formasi 2	80
Gambar 4.33	Deretan 14 Formasi 1	82
Gambar 4.34	Deretan 14 Formasi 2	82
Gambar 4.35	Deretan 15 Formasi 1	84
Gambar 4.36	Deretan 15 Formasi 2	85

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Penelitian Terkait	9
Tabel 3.1	Parameter Kecepatan dan Percepatan RadioLink MiniPix	35
Tabel 4.1	Posisi drone pada Uji Coba Deretan 1	59
Tabel 4.2	Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 2	60
Tabel 4.3	Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 3	61
Tabel 4.4	Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 4	63
Tabel 4.5	Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 5	65
Tabel 4.6	Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 6	67
Tabel 4.7	Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 7	70
Tabel 4.8	Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 8	72
Tabel 4.9	Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 9	75
Tabel 4.10	Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 10	77
Tabel 4.11	Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 11	78
Tabel 4.12	Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 12	79
Tabel 4.13	Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 13	81
Tabel 4.14	Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 14	83
Tabel 4.15	Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 15	85
Tabel 4.16	Tabel Perbandingan Waktu Tempuh Solusi yang Ditetapkan	87
Tabel 4.17	Tabel Perbandingan Jarak Solusi yang Ditetapkan.....	89
Tabel 4.18	Tabel Perbandingan Solusi yang Ditetapkan	90
Tabel 4.19	Tabel Pembentukan Formasi dengan Adanya Gangguan Angin	92

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Unmanned aerial vehicles (UAV) merupakan sebutan bagi kendaraan terbang tanpa awak atau pesawat tanpa awak. Kondisi tanpa awak yang dimaksud bukanlah kondisi lepas kendali melainkan kondisi kendaraan dikendalikan dari jarak jauh menggunakan jaringan telekomunikasi ataupun kendaraan tersebut terbang mengikuti perintah yang telah dibenamkan pada *memory* kendaraan tersebut. UAV telah dimanfaatkan di berbagai bidang seperti di bidang militer, UAV berukuran kecil sering digunakan sebagai alat pengintai ataupun sebagai alat pengintai udara [1], pada teknik sipil UAV digunakan sebagai alat bantu pemetaan [2], dalam bidang pertanian digunakan sebagai penyemprot pestisida [3], bahkan ketika pandemi covid-19 UAV digunakan sebagai transportasi untuk menyemprotkan disinfektan dari udara [4]. Dalam beberapa kegiatan, jumlah UAV yang digunakan harus lebih dari satu unit dengan berbagai macam tujuan, seperti untuk mempercepat pemetaan, pengintaian di berbagai lokasi secara bersamaan, membentuk formasi-formasi tertentu dan lain sebagainya. Penggunaan sejumlah UAV tersebut dikenal dengan sebutan *Swarm* UAV.

Belakangan ini *Swarm* UAV sering kali digunakan dalam bidang hiburan. Hiburan seperti ini perlu menggunakan UAV dalam jumlah yang besar dikarenakan semakin banyak jumlah UAV maka semakin beragam formasi yang dapat dibentuk. Atraksi *swarm* UAV tersebut telah digunakan dalam beberapa acara, seperti yang telah ditampilkan pada Olimpiade musim dingin 2018 di Korea dengan melepaskan 1,218 drone [5], ditampilkan juga oleh perusahaan Ehang yang merupakan perusahaan pembuat drone di Tiongkok dengan melepaskan 1,374 drone pada 29 April 2018 [6]. Selain di luar negeri, di dalam negeri sendiri pertunjukkan dengan *swarm* UAV telah dilakukan, antara lain pertunjukkan 300 drone di Monas pada 18 Agustus 2017 dalam pembukaan Asian Games [7].



Gambar 1.1 Dancing UAV Perusahaan Ehang [6]

Formasi yang dibentuk dalam atraksi UAV terus berkembang dan semakin kompleks. Semakin kompleks formasi yang dibentuk dan semakin banyak jumlah UAV yang dikendalikan maka pengendali UAV dan desainer formasi akan semakin sulit melakukan pengaturan posisi setiap UAV. Untuk dapat membentuk berbagai formasi yang sederhana maupun yang kompleks, setiap UAV perlu menerima arahan dari *ground station* mengenai posisi yang harus masing-masing UAV tempati. Perhitungan posisi yang dituju serta rute yang harus dilalui oleh setiap UAV tentu perlu diperhitungkan dan dikirimkan ke UAV dengan cepat. Setelah menerima data berupa posisi yang harus dilalui, setiap UAV segera menuju posisi yang harus ditempati tersebut melalui rute yang telah diperhitungkan agar dapat mempercepat waktu pembentukan formasi.

Pemilihan posisi dan jalur yang tepat dapat dilakukan dengan menerapkan metode metaheuristik yang paling sesuai dalam kasus tersebut. Metode metaheuristik Ant Colony *Optimization* (ACO) diharapkan mampu memberikan posisi serta rute yang tepat untuk masing-masing UAV agar dapat membentuk formasi dengan waktu pembentukan formasi tercepat. Disamping posisi dan jalur yang tepat, cara mengirimkan data dari *ground station* menuju ke setiap UAV juga menjadi perhatian dikarenakan dengan cara pengiriman data yang salah maka waktu yang dibutuhkan untuk membentuk suatu formasi akan meningkat. Dalam penelitian tersebut digunakan metode komunikasi *Dynamic Data-Driven Application System* (DDDAS). DDDAS akan menjadi komunikasi antara *ground*

station dengan setiap UAV. Salah satu alasan dipilihnya metode DDDAS adalah untuk memastikan UAV mendapatkan data berupa posisi yang tepat dan terhindar dari tabrakan dengan UAV lain. Pengendalian *swarm* UAV akan sangat berbeda dengan UAV dikarenakan terdapat kompleksitas dalam pengaturan komunikasi, penentuan tugas dan gerak setiap UAV, serta penyesuaian gerak satu UAV dengan UAV lainnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, beberapa rumusan masalah dari topik penelitian tersebut adalah:

1. Mempersingkat waktu pembentukan formasi.
2. Pemilihan *waypoint* (titik tujuan/posisi) yang paling optimal untuk setiap UAV.
3. Pemilihan rute yang paling optimal untuk menuju *waypoint* berikutnya.
4. Komunikasi antara *ground station* dengan UAV dengan DDDAS.
5. Menganalisa besarnya peranan metode metaheuristik dalam mengurangi waktu yang dibutuhkan *swarm* UAV untuk membentuk formasi.
6. Penanganan pembentukan formasi yang dilakukan oleh *swarm* UAV

1.3 Tujuan

Penelitian tersebut bertujuan untuk:

1. Menghasilkan *swarm* UAV yang mampu berkoordinasi secara mandiri dengan mengikuti arahan dari *ground station* dengan selisih antara posisi yang diharapkan dengan posisi yang direalisasikan paling besar 5 meter.
2. Arahan dari *ground station* berupa posisi dan rute *swarm* UAV untuk membentuk formasi dengan waktu pembentukan formasi yang lebih cepat dibandingkan tanpa menggunakan metode optimasi.
3. Menghasilkan simulasi pengarah *swarm* UAV untuk pembentukan formasi dengan pergerakan UAV yang menyerupai pergerakan UAV pada kondisi nyata.

1.4 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah pada penelitian tersebut adalah:

- Penelitian tersebut dibatasi pada optimasi waktu perpindahan swarm UAV dalam membentuk formasi-formasi yang sederhana dalam gerakan 3 dimensi.
- Lingkungan yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah lingkungan terbuka (*outdoor*) dengan mengabaikan gangguan angin serta obyek lain yang dapat mengganggu uji coba.
- Jumlah UAV yang dapat dikendalikan dalam simulasi dibatasi sejumlah 1000 unit UAV.
- Jumlah UAV yang direalisasikan dalam penelitian tersebut sebanyak 3 unit UAV.
- Pada simulasi, tampilan yang diperlihatkan hanya 2 kondisi namun koordinat dapat dipilih, yaitu tampilan dalam koordinat X-Y atau koordinat X-Z.
- Radius terjauh antara pengendali dan swarm UAV adalah 100 meter dengan *local area network*.
- Untuk menghindari tabrakan diberlakukan jarak minimum antar UAV sejauh 5 meter dengan mengandalkan nilai dari GPS.
- Kondisi baterai unit UAV dianggap selalu dalam keadaan baik.
- Unit *ground station* berupa sebuah laptop dan jenis UAV yang digunakan adalah Quadcopter.

1.5 Kontribusi

Kontribusi yang diharapkan dari penelitian tersebut berupa pengembangan metode pencarian rute *swarm* UAV untuk memperoleh waktu perpindahan tersingkat dalam pembentukan formasi menggunakan metode metaheuristik dan metode komunikasi DDDAS serta metode tersebut mampu diterapkan pada UAV yang sebenarnya.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Penelitian mengenai pembentukan formasi adalah salah satu penelitian yang sering dilakukan pada kendaraan tanpa awak. Pembentukan formasi dapat diterapkan pada sejumlah *Autonomous Underwater Vehicles* (AUV) dengan teori *graph* dalam pembentukan struktur triangular [8]. Selain membentuk formasi, diharapkan setiap AUV dapat menghindari halangan yang ada dengan menggunakan pendekatan berbasis ruang kosong (*Null-Space-Based Method*). Kemampuan untuk menghindari halangan mendapatkan prioritas tertinggi dalam penyusunan tugasnya. Penggabungan kedua metode ini memberikan hasil simulasi yang efektif dan layak digunakan untuk membentuk gerakan di bawah laut dengan hambatan. Pada tesis ini digunakan multi UAV, hampir sama dengan AUV yang dapat bergerak dalam bidang 3D namun terdapat perbedaan lingkungan kerja yaitu di dalam air dengan di udara. Kedua kendaraan tanpa awak ini memiliki halangan gerak yang berbeda. Disamping itu, pendekatan yang digunakan untuk menghindari halangan berbeda, pendekatan yang digunakan pada tesis ini adalah paradigma DDDAS karena dalam tesis ini terdapat simulasi yang berjalan bersamaan dengan jalannya perangkat keras yang dapat memberikan rute alternatif jika data simulasi menunjukkan adanya potensi tabrakan dengan UAV lainnya.

Mempercepat pembentukan formasi merupakan pengembangan dari penelitian UAV untuk melakukan pencarian jalur yang harus dilalui untuk menuju *waypoint* [9]. Pada penelitian terdahulu telah dilakukan pengkajian terhadap berbagai algoritma yang diterapkan pada kendaraan tanpa awak. Sebagian besar algoritma yang dikaji merupakan algoritma yang menghasilkan solusi melalui proses seleksi alam. Selain algoritma itu, beragam algoritma juga terus dikembangkan untuk memperoleh metode pencarian jalur yang terbaik. Pencarian jalur untuk satu buah UAV akan berbeda dengan pencarian jalur untuk banyak

UAV. Tesis ini melibatkan banyak UAV dalam satu pertunjukkan, sehingga pergerakan akan terdapat banyak UAV yang bergerak secara bersamaan dan setiap UAV akan menjadi penghalang bagi UAV yang lain ketika melakukan pencarian jalur.

Pembandingan tiga buah metode metaheuristik, *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Genetic Algorithm* (GA), dan ACO telah dilakukan untuk menentukan metode yang tercepat dalam memperoleh solusi, yang paling konsisten dalam pemberian solusi dan yang paling efektif untuk menemukan solusi dalam penerapannya pada bidang konstruksi [10]. Dari percobaan yang telah dilakukan, perbandingan antara ACO, GA dan PSO adalah 1:1.5:5, sebagai contoh dalam pencarian solusi untuk sebuah kasus yang sama, ACO membutuhkan waktu pencarian solusi 0.366 detik, GA membutuhkan waktu pencarian solusi 0.529 detik, dan PSO membutuhkan waktu pencarian solusi selama 1.93 detik. Perbandingan tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa ketiganya memiliki tingkat keefektifan yang sama dalam pencarian solusi serta mampu memberikan solusi yang cukup konstan, namun diantara ketiganya, ACO merupakan algoritma tercepat dalam pemberian solusi, diikuti oleh GA dan kemudian PSO. Berdasarkan hasil penelitian ini maka ACO digunakan dalam tesis ini.

ACO telah sering digunakan sebagai metode optimasi pencarian jalur UAV, salah satunya digunakan dalam pencarian jalur UAV yang diterbangkan di medan pertempuran [11]. Dalam penerapan tersebut UAV diharapkan mampu mencapai tujuan secepat mungkin dan juga dapat menghindari serangan-serangan musuh yang sebelumnya telah diidentifikasi. ACO dipilih dalam kasus tersebut dikarenakan kehandalan ACO dalam pencarian solusi di masalah diskret. Disamping menggunakan metode ACO, penelitian tersebut menerapkan *gridding* 1x1 km pada wilayah terbang UAV yang memiliki luas keseluruhan 10x10 km. Penerapan *gridding* tersebut sangat membantu dalam pemilihan rute terbang UAV. Penerapan ACO pada UAV untuk mencari jalur memberikan hasil yang memuaskan, solusi yang efektif berhasil ditemukan dalam waktu yang singkat. Pencarian tujuan dan pembentukan formasi memiliki tantangan yang

berbeda. Pencarian tujuan dapat dilakukan dengan penelusuran segala bagian dari area terbang, sedangkan dalam hal pembentukan formasi titik tujuannya sudah jelas dan harus memilih tujuan yang terbaik.

ACO telah digunakan untuk menyelesaikan sistem pembagian tugas terbang sejumlah UAV pada area terbang tiga dimensi [12]. Sistem diharuskan memenuhi beberapa kebutuhan dasar sistem tersebut, yaitu sistem harus tetap dapat dikendalikan secara manual oleh operator, berikutnya sistem harus mampu menangani UAV yang berbeda-beda. ACO diyakini mampu menghasilkan solusi berupa pembagian tugas terbang yang optimal. Berdasarkan hasilnya, ACO berhasil memberikan solusi yang cukup baik dalam penentuan tugas terbang ini, namun belum yang terbaik dikarenakan masih terdapat kendala yang disebabkan oleh kecepatan kendaraan yang tidak seragam.

Suatu pendekatan baru untuk ACO telah dilakukan dengan tujuan untuk mempersingkat waktu pencarian *multi-UAV* dalam pencarian target yang hilang berdasarkan informasi yang terbatas [13]. Pendekatan baru ini dianalisa dalam enam buah skenario yang telah dirancang untuk melihat kualitas dari pendekatan baru tersebut.

Modifikasi terhadap ACO sering dilakukan dengan tujuan yang berbeda-beda, salah satu tujuan memodifikasi ACO adalah untuk mendapatkan kecepatan perhitungan yang lebih tinggi namun tetap mempertahankan akurasi dari solusi yang diberikan [14]. Modifikasi tersebut bertujuan untuk menentukan rute terpendek antar kota di pulau jawa. Modifikasi yang dilakukan adalah pengurangan jumlah semut yang digunakan sebanyak 35% dari jumlah kota. Modifikasi ini memberikan hasil yang baik berupa efisiensi penggunaan memory sebanyak 93% dengan kualitas solusi sebesar 99,8%. Pada tesis ini jumlah semut ditentukan berdasarkan jumlah UAV agar dapat mempersingkat waktu pencarian jalur dan titik tujuan terbaik. Selain penyesuaian jumlah semut, *fitness function* juga digunakan dalam proses ACO untuk mempercepat pencarian solusi.

Selain pengendalian menggunakan remote atau aplikasi komputer, sejumlah UAV berjenis quadcopter telah diterbangkan mengikuti alunan musik

[15]. Gerakan UAV dibatasi pada gerakan menyamping atau bisa dibilang pergerakan satu sumbu. Pergerakan terjadi ketika ada lagu yang dikenali UAV tersebut dimainkan. Atraksi tarian UAV tersebut dilakukan pada ruangan tertutup. Pertunjukkan tarian UAV ini memberikan memberikan nuansa baru bagi penikmat lagu dan juga penikmat teknologi.

Banyak aspek dari pertunjukkan tari UAV menjadi bahan penelitian untuk dikembangkan, salah satunya adalah aspek keamanan. Salah satu hal yang paling dikhawatirkan saat pertunjukkan tari UAV adalah tabrakan antar UAV, sehingga diperlukan suatu penanganan khusus untuk menghindari tabrakan tersebut [16]. Sejumlah UAV yang diterbangkan diwajibkan untuk mengikuti rute yang telah ditentukan melalui program linear. Keberhasilan dari pengembangan sistem keamanan tersebut telah diuji coba dalam menerbangkan 30 unit UAV dalam suatu pertunjukkan. Pada tesis ini faktor keamanan didasarkan pada komunikasi antara pusat kendali dengan semua UAV dengan paradigma DDDAS.

Untuk melakukan pengaturan gerak sejumlah obyek dalam satu sistem (*multi-agent system*) sering terjadi masalah ketidakstabilan dalam penyampaian informasi pengendaliannya [17]. Untuk mengatasi masalah ketidakstabilan pada sistem multi-agent, pertama-tama diambil satu dari sejumlah penyampaian informasi yang mengalami ketidakstabilan, kemudian dilakukan penerapan cara penyampaian informasi standar dan juga dilakukan modifikasi pada cara penyampaian informasi standar berupa pembatasan nilai gerak dari setiap obyek. Pada tesis ini teknik komunikasi yang dilakukan berupa penyampaian data dua arah yang dilakukan terus menerus dalam selang waktu 2 detik untuk mencegah terjadinya kesalahan pengarahan akibat ketidakstabilan ataupun kesalahan perhitungan.

Metode baru dalam penyebaran informasi untuk melakukan koordinasi dengan *multi-agent system* terus dikembangkan [18]. Penyebaran informasi ini merupakan cara yang baik untuk melakukan koordinasi namun disayangkan bahwa metode ini membuat setiap agen melakukan tindakan yang acak karena informasi *broadcast* yang diterima dijalankan begitu saja. Dengan metode penyebaran

informasi yang baru ini agen akan melakukan tindakan acak hanya secara virtual. Metode tersebut berhasil mengurangi agen untuk terlibat dalam situasi yang berbahaya. Pada tesis ini digunakan paradigma DDDAS yang memungkinkan perhitungan terjadi pada pusat kendali dan simulasi, penyampaian informasi juga dilakukan secara terus menerus langsung ke setiap UAV sehingga mengurangi kesalahan informasi yang diterima.

Untuk memastikan sejumlah UAV terbang menuju koordinat yang sesuai diterapkan suatu metode tambahan yaitu DDDAS [19]. Dengan DDDAS tersebut *ground station* terus menerima posisi semua UAV yang sedang terbang dan dilakukan penyesuaian nilai simulasi dan keadaan sebenarnya di lapangan. Dengan DDDAS ini juga dapat dilakukan pencegahan atau perhitungan ulang sebelum terjadi kecelakaan pada kondisi sebenarnya. Namun dikarenakan hanya menggunakan metode DDDAS tanpa digabung dengan metode lain maka jalur yang dipilih masih belum optimal. Sehingga untuk mengoptimalkan hal tersebut pada tesis ini digunakan metode optimasi.

Untuk mempermudah dalam membandingkan penelitian-penelitian yang telah dijabarkan maka metode, tujuan dan hasil dari penelitian-penelitian itu akan dirangkum dalam Tabel 2.1.

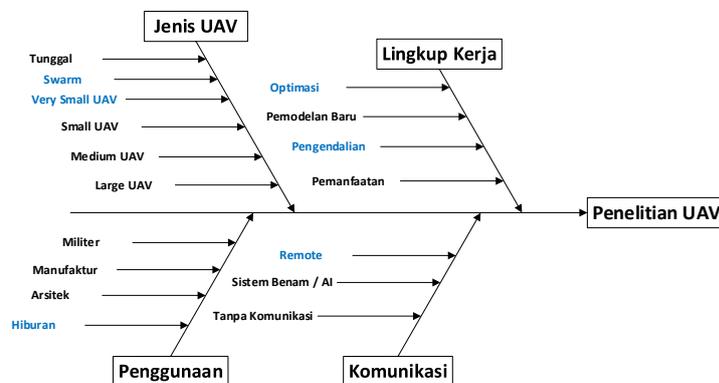
Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terkait

Referensi Ke-	Tujuan	Metode
1	Pembentukan formasi triangular AUV dengan menghindari halangan	Graph Theory dan Null-Space-Based Method
2	Mengembangkan metode pencarian jalur	<i>Evolutionary Algorithm</i> , GA
3	Menentukan metode tercepat dalam pencarian solusi	GA, PSO, ACO
4	Pencarian jalur tercepat di medan pertempuran	ACO
5	Menentukan pembagian tugas terbang	ACO
6	Mempersingkat waktu pencarian target	ACO
7	Modifikasi ACO untuk mempercepat proses perhitungan	ACO

Tabel 2.1 (Lanjutan)

Referensi Ke-	Tujuan	Metode
8	Membuat multi-UAV bergerak mengikuti alunan musik	freq
9	Pengembangan sistem keamanan Dancing UAV	Linear Programming
10	Mengatasi masalah ketidak stabilan pada multi-agent system	Modified Broadcast Control
11	Mengatur gerakan sejumlah obyek	Broadcast control
12	Koordinasi untuk mencapai tempat tujuan	DDDAS

Berdasarkan penelitian yang telah dijabarkan, UAV serta swarm UAV telah menjadi obyek penelitian sejak beberapa tahun terakhir. Pemanfaatan metode komunikasi DDDAS juga telah diterapkan dan memberikan hasil yang memuaskan. Salah satu metode metaheuristic telah diterapkan, yaitu *Ant Colony Optimization* dan memberikan hasil yang menarik. Terdapat berbagai macam penelitian yang berhubungan dengan UAV, baik dari jenisnya, lingkup kerja, penerapannya, serta cara komunikasinya. Namun, dari sekian banyak penelitian terkait belum ada penelitian yang berfokus pada percepatan pembentukan formasi swarm UAV, khususnya menggunakan metode ACO sebagai metode optimasinya dan DDDAS sebagai paradigma komunikasinya. Penelitian kali ini bertujuan untuk menghasilkan *swarm* UAV yang dapat melakukan perpindahan dengan waktu perpindahan sesingkat mungkin dengan menggunakan metode metaheuristik serta metode komunikasi yang paling sesuai.



Gambar 2.1 Diagram *Fishbone*

2.2 Teori Dasar

Beberapa teori dasar yang digunakan adalah terkait metode metaheuristik khususnya mengenai ACO, metode komunikasi menggunakan DDDAS dan teori umum mengenai UAV.

2.2.1 *Unmanned Aerial Vehicles (UAV)*

UAV merupakan salah satu kategori kendaraan tanpa awak. UAV merupakan sebutan bagi kendaraan tanpa awak yang bergerak di udara. Terdapat banyak beragam penggolongan UAV, mulai dari penggolongan berdasarkan bobotnya:

1. UAV *Super Heavy*

UAV jenis ini merupakan UAV yang memiliki nilai massa paling tinggi yaitu diatas 2000 Kg. Salah satu contoh UAV pada jenis *Super Heavy* ini adalah *Global Hawk*. UAV yang diberi nama *Global Hawk* ini memiliki kemampuan untuk terbang hingga ketinggian 19.800 meter. UAV ini digunakan untuk misi intelijen, pengawasan, serta pengintaian. Tidak jarang UAV ini juga digunakan untuk melakukan pemetaan dan pengambilan gambar secara *real-time* di cuaca ekstrim baik siang maupun malam hari.



Gambar 2.2 *Global Hawk* [20]



Gambar 2.3 A-160 [20]

2. UAV *Heavy*

UAV yang digolongkan pada jenis ini memiliki kisaran massa antara 200 Kg hingga 2000 Kg. Salah satu contoh UAV *Heavy* ini adalah UAV A-160. UAV tersebut mampu terbang hingga ketinggian 9.150 meter. Biasanya UAV tersebut digunakan untuk tujuan intelijen, pengintaian, pengawasan, akuisisi target, penyedia kebutuhan dalam kondisi mendesak.

3. UAV *Medium*

UAV pada golongan ini memiliki massa sekitar 50 Kg hingga 200 Kg. Salah satu UAV pada golongan ini adalah UAV Chyper. UAV ini mampu terbang hingga ketinggian 2438 meter. Chyper digunakan sebagai pengintai melalui udara, penerus jaringan komunikasi, pendeteksi ranjau, pengantar kebutuhan militer.



Gambar 2.4 Chyper [20]



Gambar 2.5 Neptune [20]

4. UAV *Light*

UAV golongan ini memiliki massa sekitar 5 Kg hingga 50 Kg. Salah satu contoh UAV pada golongan ini adalah UAV Neptune. UAV ini mampu terbang hingga ketinggian 2440 meter. UAV tersebut dikhususkan untuk beroperasi di atas daerah perairan.

5. UAV *Micro*

UAV yang masuk golongan ini adalah UAV yang memiliki massa kurang dari 5 Kg. UAV *micro* ini yang paling banyak digunakan oleh masyarakat pada umumnya, baik untuk kegiatan edukasi, penelitian atau bahkan kegiatan *entertainment*. Salah satu contoh dari jenis *micro* ini adalah *Dragon Eye*. UAV tersebut dapat terbang hingga ketinggian 150 meter. *Dragon Eye* sendiri biasanya digunakan untuk melakukan pengawasan di daerah padat penduduk.



Gambar 2.6 *Dragon Eye* [20]

Selain berdasarkan bobotnya, UAV juga dapat digolongkan berdasarkan bentuk penggerakannya. Hanya ada 2 buah penggolongan untuk UAV berdasarkan bentuk penggerakannya, yaitu:

1. *Fixed Wing*

UAV pada jenis ini memiliki sayap pada sisi kanan dan kirinya namun biasanya mesin penggerakannya tetap menggunakan baling-baling pada bagian belakang UAV tersebut. Selain baling-baling, terdapat UAV *Fixed Wing* yang menggunakan mesin jet sebagai tenaga penggerakannya. Tenaga penggerakannya berasal dari baterai dan ada juga yang menggunakan bahan bakar.

2. *Multirotor*

UAV jenis ini merupakan UAV yang menggunakan beberapa buah baling-baling pada sisi-sisinya, selain *multirotor*, jenis ini juga sering disebut sebagai *multicopter*. Namun tidak langsung disebut sebagai *multicopter*, penyebutannya berdasarkan jumlah motor yang digunakan, misalkan jika jumlah motor atau baling-baling yang digunakan adalah empat buah, maka kata *quad* menggantikan kata *multi* sehingga penyebutannya menjadi quadcopter. UAV yang tergolong pada *multirotor* UAV tersebut umumnya bergerak menggunakan tenaga dari baterai.



Gambar 2.7 Fixed Wing UAV [20]



Gambar 2.8 Quadcopter [20]

2.2.2 Quadcopter

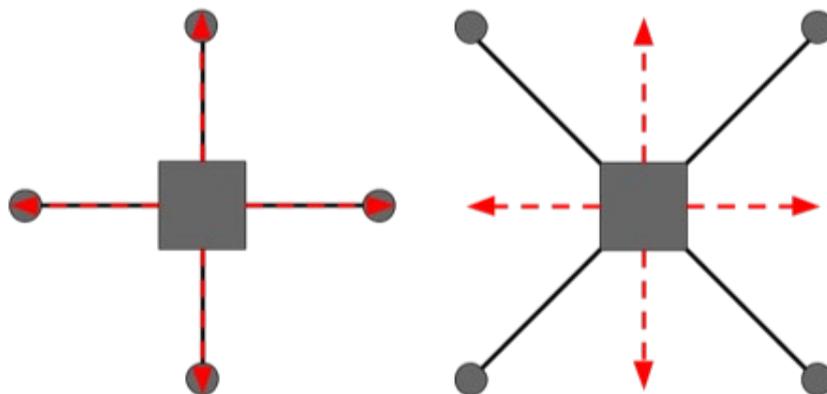
Quadcopter atau drone adalah salah satu jenis UAV yang bentuknya cukup ringkas serta mudah untuk dimodifikasi karena terdapat banyak modul tambahan yang dapat dipasangkan sesuai fungsi dari UAV tersebut. Di pasaran, quadcopter sangat mudah ditemukan dengan harga yang bervariasi mulai dari ratusan ribu hingga ratusan juta rupiah. Berikut adalah penjelasan lebih dalam seputar quadcopter.

2.2.2.1 Konstruksi *Quadcopter*

Sesuai namanya, quadcopter atau quat rotor adalah UAV yang memiliki empat motor penggerak. Keempat motor penggerak quadcopter diletakkan pada ujung-ujung kerangka dengan jarak tertentu yang menyebabkan quadcopter memiliki konstruksi rangka seperti bentuk X, namun terdapat juga konstruksi rangka seperti bentuk +. Kedua konstruksi ini tidak ada perbedaan, kedua konstruksi tersebut dapat bermanuver secara bebas di udara, perbedaan dari kedua konstruksi itu adalah adalah cara bergerak ke depan, belakang, kiri dan kanan. Menggerakkan quadcopter yang memiliki konstruksi rangka X akan sedikit lebih rumit daripada menggerakkan quadcopter dengan konstruksi rangka + dikarenakan untuk bergerak maju, mundur, ke kiri atau ke kanan harus mengendalikan keempat motor yang ada. Misalkan untuk bergerak maju, dua motor yang berada di bagian

depan harus sama dan lebih lambat dibandingkan dua buah motor yang ada di belakang, sedangkan untuk menggerakkan quadcopter dengan konstruksi rangka + untuk maju ke depan dapat dengan menambah kecepatan satu motor di belakang dan mengurangi kecepatan satu motor di depan. Dibalik kerumitan dari konstruksi rangka X, konstruksi rangka X lebih praktis digunakan ketika terdapat suatu modul tambahan pada quadcopter tersebut, misalkan ketika ditambahkan modul kamera, sudut pandang kamera tersebut akan lebih luas untuk melihat ke depan tanpa terhalang apapun, namun ketika konstruksi rangka + ditambahkan kamera yang menghadap ke depan maka pandangan kamera akan terhalang oleh kaki rangka yang digunakan oleh quadcopter untuk mendarat. Di samping bentuk rangka X dan +, masih terdapat konstruksi V, H, A-Tail dan H-Tail, namun konstruksi rangka itu tidak begitu banyak digunakan.

Sebagai komponen penggerak, quadcopter menggunakan 4 buah *brushless* DC motor yang terdapat *propeller*/baling-baling di setiap motornya. Motor tersebut memiliki arah putaran tertentu agar lebih mudah membuka angin dan memperoleh kestabilan ketika quadcopter diterbangkan. Terdapat dua buah arah perputaran baling-baling pada sebuah quadcopter, yaitu arah perputaran yang searah dengan jarum jam (*clockwise/cw*) dan arah perputaran yang berlawanan dengan arah putaran jarum jam (*counter clockwise/ccw*). Berikut adalah arah putaran setiap baling-baling pada sebuah quadcopter.



Gambar 2.9 Konstruksi Rangka Quadcopter



Gambar 2.10 Arah Putaran Baling-Baling Quadcopter [21]

1. Baling-baling depan sebelah kiri, baling-baling tersebut berputar searah dengan arah putaran jarum jam.
2. Baling-baling depan sebelah kanan, baling-baling tersebut berputar berlawanan dengan arah putaran jarum jam.
3. Baling-baling belakang sebelah kanan, baling-baling berputar berlawanan dengan arah putaran jarum jam.
4. Baling-baling belakang sebelah kiri, baling-baling berputar searah dengan arah putaran jarum jam.

2.2.2.2 *Flight Controller*

Flight controller merupakan pengendali utama dalam setiap UAV. *Flight controller* memiliki tugas untuk mengatur seluruh komponen elektronik pada UAV agar dapat terbang sesuai dengan perintah yang diarahkan oleh *ground station*. *Flight controller* mirip dengan *microcontroller* pada perangkat elektronik, bisa diisi deretan perintah, dipasangkan berbagai macam sensor serta menerima informasi dari perangkat lain melalui saluran komunikasi, tetapi *flight controller* dirancang khusus untuk mengatur perangkat-perangkat yang biasanya digunakan untuk menjalankan suatu UAV, seperti saluran komunikasi menggunakan telemetri, modul GPS, modul *Accelerometer*, PWM untuk ESC hingga *buzzer*. *Flight controller* juga biasanya telah ditanamkan beragam sensor untuk memaksimalkan

kinerjanya dan juga agar pengguna tidak perlu membeli modul sensor eksternal milik produsen lain. Selain itu, *flight controller* juga telah memiliki beberapa *built-in* program yang membantu pengendalain UAV, termasuk pengaturan kecepatan maksimum, percepatan maksimum ke segala arah.

Terdapat beragam merek *flight controller* dengan kisaran harga yang sangat beragam. Pada tesis ini digunakan flight controller dengan merek Radio Link MiniPix. *Flight controller* MiniPix ini bersifat *open source* yang berarti *flight controller* ini terbuka bebas untuk dimodifikasi dan dikreasikan sesuka pengguna. Selain itu *flight controller* ini termasuk *flight controller* yang murah namun cukup lengkap, baik dari sisi kelengkapan port maupun sensor *internal*. Beberapa sensor internal pada MiniPix adalah *gyroscope 3-axis*, *accelerometer 3-axis*, dan barometer. Ketiga jenis sensor tersebut adalah sensor utama bagi UAV untuk dapat mencapai keseimbangan ketika terbang serta bermanuver. Data berupa percepatan pada stiap sumbu, kecepatan sudut dan ketinggian yang diterima dari ketiga sensor dasar itu akan digunakan oleh *flight controller* untuk mengatur keseimbangan UAV saat diterbangkan dengan cara mengendalikan kecepatan putaran baling-baling. Pengendalian kecepatan putaran baling-baling tidak dilakukan langsung oleh *flight controller* ke baling-baling/motor, *flight controller* menggunakan bantuan *electronic speed controller* (ESC).

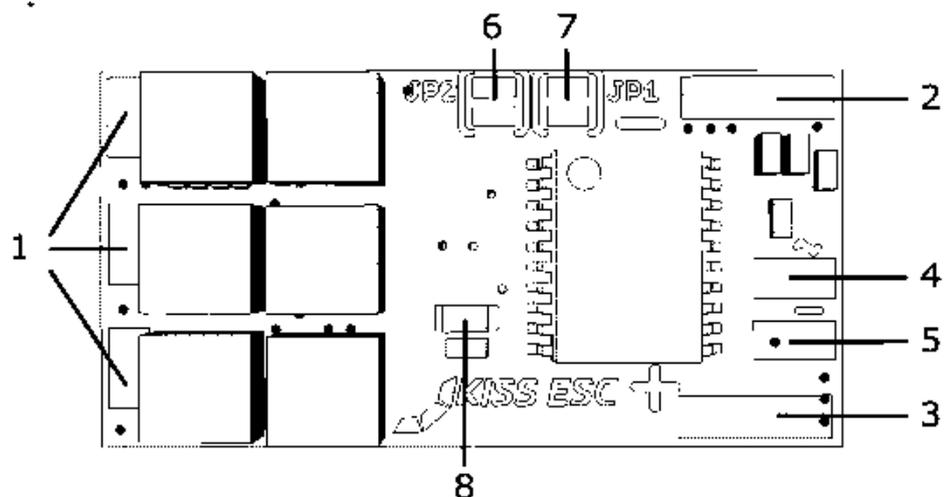
2.2.2.3 *Electronic Speed Controller (ESC)*

Electronic speed controller (ESC) merupakan perangkat yang menghubungkan antara flight controller dengan motor yang di pasang di setiap sisi quadcopter. ESC bertugas untuk mengubah signal instruksi yang diterimanya menjadi tegangan yang akan mengendalikan kecepatan motor. Dengan adanya ESC tersebut maka pengendalian motor akan menjadi lebih mudah. Dengan kecepatan putaran motor yang stabil quadcopter akan lebih mudah untuk dikendalikan. Disamping menjaga kecepatan putaran motor ketika terbang, ESC dapat memberikan *start-up* dan akselerasi yang lebih lembut, memungkinkan untuk melakukan pembalikan putaran motor, membatasi arus serta perlindungan terhadap kesalahan rangkaian.

ESC menerima sinyal PWM dari *flight controller*, informasi kecepatan dapat disampaikan melalui perbandingan rapat-renggang sinyal *High-Low (duty-cycle)* yang dikirimkan oleh *flight controller* ke ESC. Setelah ESC menerima sinyal PWM yang menginformasikan kecepatan yang diinginkan oleh *flight controller*, ESC akan mengendalikan transistor MOSFET agar menghasilkan sinyal 3-fase dengan frekuensi yang sesuai dengan instruksi. Sinyal 3-fase yang dihasilkan merupakan sinyal yang dibutuhkan untuk menggerakkan motor. Semakin tinggi frekuensi 3-fase tersebut maka makin cepat pula putaran motor.

Keterangan gambar:

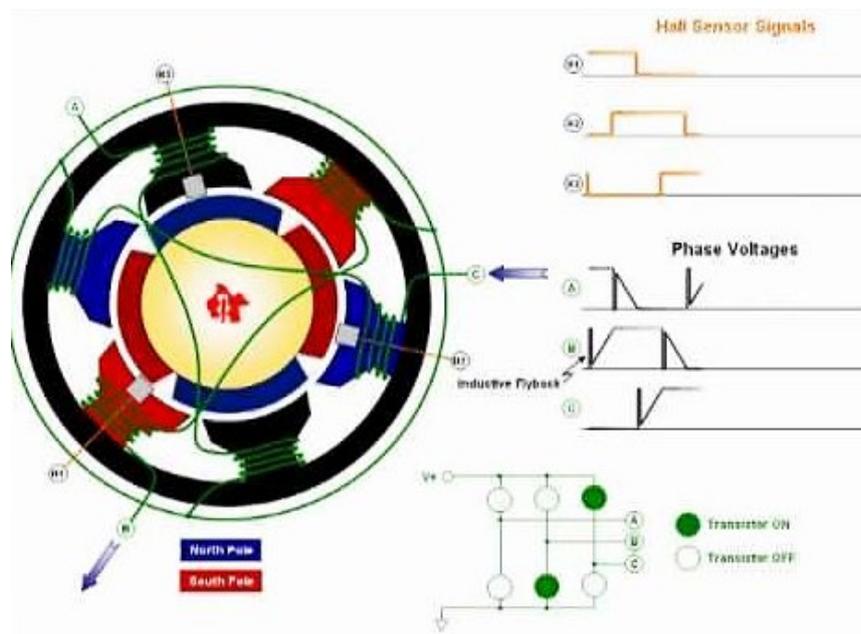
1. Solder pad untuk fase motor 3-BLDC
2. Negatif (-) koneksi LIPO
3. Positif (+) Koneksi LIPO
4. Sinyal servo atau input dari sinyal PWM
5. Referensi GND dari Sinyal PWM
6. Solder jumper, untuk mengubah arah Rotation (CW / CCW)
7. Solder jumper, untuk memvariasikan jenis sinyal input PWM
8. Status LED



Gambar 2.11 Konstruksi ESC [22]

2.2.2.4 Brushless DC Motor (BLDC Motor)

Salah satu jenis motor yang paling sering digunakan pada quadcopter adalah *brushless* DC motor atau biasa disingkat dengan sebutan BLDC. Motor BLDC merupakan motor dengan magnet permanen yang digerakkan menggunakan listrik arus searah (DC). Komponen utama pada BLDC adalah stator dan rotor. Stator merupakan bagian statis pada BLDC yang berisikan kumparan-kumparan tembaga yang nantinya akan menimbulkan medan magnet ketika diberi arus DC. Rotor merupakan bagian yang berputar pada BLDC yang terdiri dari sejumlah magnet permanen yang telah direkatkan. Untuk menggerakkan BLDC umumnya diperlukan tegangan 3-fase. Dengan tegangan 3-fase yang masuk dan melewati kumparan pada stator maka akan terjadi magnet dengan kutub tertentu. Ketika kumparan pada stator telah menjadi magnet dengan polaritas tertentu maka rotor akan bergerak untuk menyesuaikan posisi pada kutub yang sesuai. Ketika tegangan 3-fase terus berjalan maka polaritas stator akan terus berubah-ubah, dengan cara itu akhirnya BLDC dapat bergerak. Biasanya BLDC dipadukan dengan *Hall-effect* sensor agar dapat menghasilkan polaritas yang teratur dan berurutan.



Gambar 2.12 *Brushless* DC Motor [23]

2.2.2.5 Global Positioning System (GPS)

Untuk mengetahui posisi quadcopter pada ruang terbuka, dibutuhkan suatu modul bernama GPS. Modul GPS adalah modul yang memungkinkan quadcopter atau perangkat elektronik lainnya untuk berkomunikasi dengan satelit GPS. Satelit GPS mengelilingi bumi dengan orbit yang tetap sebanyak dua kali sehari. Sistem navigasi berbasis satelit ini memiliki setidaknya 24 satelit yang berada pada ketinggian sekitar 20,000 Km di atas bumi. Setiap satelit memiliki sinyal yang unik dan akan dikirimkan bersama dengan parameter orbital kepada modul GPS untuk melakukan pemecahan kode dan menghitung posisi satelit dengan tepat. Modul GPS melakukan pengukuran jarak terhadap masing-masing satelit GPS dengan jumlah waktu yang diperlukan untuk menerima sinyal yang dikirimkan. Pengukuran dilakukan pada beberapa satelit GPS agar modul GPS dapat menentukan posisi modul tersebut.

Untuk mendapatkan posisi *longitude* dan *latitude*, modul GPS harus mendapatkan sinyal minimal dari 3 buah satelit. Umumnya, jumlah satelit yang dilacak tidak hanya 3 buah namun hingga 8 buah atau lebih satelit yang dilacak, namun itu tergantung dengan waktu dan lokasi dilakukan pelacakan tersebut. Selain posisi, modul GPS umumnya dapat melakukan perhitungan untuk mendapatkan informasi mengenai kecepatan, jalur, jarak, matahari terbit dan terbenam. Akurasi dari GPS ditentukan oleh banyak hal, mulai dari jam yang ada pada satelit GPS, detakan kristal yang ada pada modul GPS, efek bias pada atmosfer, kesalahan orbit satelit GPS, kesalahan pada pusat fase antena, hingga multipath.



Gambar 2.13 Modul GPS Radiolink TS100 Mini [24]

2.2.3 Hambatan pada Quadcopter

Quadcopter yang merupakan kendaraan tanpa awak dengan area jelajah di udara memiliki beberapa hambatan dalam pengoperasiannya. Hambatan tersebut dapat terjadi karena adanya faktor alam ataupun perangkat keras yang kurang mumpuni. Berikut adalah hambatan dalam pengoperasian quadcopter.

2.2.3.1 Faktor Angin

Faktor angin menjadi hambatan bagi kendaraan yang bergerak di udara. Bagi kendaraan yang berpijak di bumi tidak akan terlalu dipengaruhi oleh angin, berbeda dengan Quadcopter yang dapat terbang tinggi dimana kekuatan angin akan semakin besar, terlebih quadcopter yang merupakan micro UAV tersebut memiliki bobot yang ringan. Faktor angin tersebut dapat memberikan perlambatan ketika arah angin berlawanan dengan arah terbang sekaligus percepatan bagi UAV ketika searah dengan arah terbang. Karena adanya faktor perlambatan dan percepatan ini maka kecepatan terbang UAV akan terganggu, perhitungan waktu terbang juga tidak akan sesuai lagi. Namun faktor angin yang tidak terlalu besar dapat diatasi dengan keberadaan ESC (*Electronic Speed Controller*).

2.2.3.2 Gravitasi

Peran gravitasi sangat besar terutama pada pergerakan vertikal. Gravitasi dapat menjadi faktor yang memperlambat pergerakan vertikal ke atas sekaligus faktor yang mempercepat pergerakan vertikal ke bawah. Karena adanya gaya gravitasi ini maka kecepatan putaran baling-baling pergerakan quadcopter di udara dapat lebih stabil. Dikarenakan gaya tarik ke bawah maka pergerakan vertikal ke bawah harus lebih dijaga dibandingkan dengan pergerakan ke atas. Resiko lebih besar terdapat pada pergerakan vertikal ke bawah, oleh karena itu kecepatan terbang ke bawah umumnya dibuat lebih pelan daripada kecepatan terbang ke atas. Dalam penerapannya di quadcopter, pengaturan putaran motor baling-baling dibantu dengan ESC dan pengendaliannya dibantu dengan flight controller sehingga pengaruh gravitasi ini tidak terlalu menjadi masalah.

2.2.3.3 Posisi UAV

Posisi dari UAV didapatkan dari modul GPS yang terpasang pada masing-masing quadcopter. Beberapa kendala yang berkaitan dengan modul GPS ini adalah

perolehan posisi yang tidak akurat. Hal tersebut dapat terjadi karena pengolahan hasil yang dari modul GPS yang salah, kesalahan penempatan modul GPS, atau karena modul GPS yang digunakan memiliki tingkat akurasi yang rendah. Pengolahan hasil yang salah dapat dikarenakan oleh salahnya metode komunikasi ataupun alur program, maka untuk mengatasi tersebut adalah dengan memperbaiki susunan program yang digunakan. Posisi modul GPS seharusnya diletakkan tepat di tengah quadcopter. Kesalahan karena tingkat akurasi sensor adalah kesalahan yang paling sering terjadi. Setiap modul GPS memiliki tingkat akurasi dan toleransinya masing-masing. Beberapa cara yang digunakan untuk meningkatkan tingkat akurasi tersebut adalah meletakkan GPS pada ruang terbuka, memosisikan modul GPS berada pada posisi terluar quadcopter atau mengganti modul GPS dengan modul GPS yang memiliki tingkat akurasi yang lebih tinggi dan tingkat toleransi yang lebih rendah.

2.2.4 Metode Metaheuristik

Kata metaheuristik berasal dari kata *meta* yang berarti metodologi tingkat tinggi atau lanjut dan heuristik yang aslinya dari bahasa Yunani *heuriskein* yang berarti teknik untuk menemukan strategi dalam menyelesaikan masalah. Dalam ilmu komputer, metode heuristik digunakan untuk menemukan penyelesaian dari suatu masalah tanpa pembuktian kebenaran dari penyelesaian yang didapat, namun mementingkan performa komputasi dan kesederhanaan. Metode tersebut menggunakan konsep pendekatan dalam mencari penyelesaiannya.

Metaheuristik dapat didefinisikan sebagai lanjutan metode heuristic yang dapat menyelesaikan masalah optimasi secara efisien. Dengan menggunakan metode tersebut, hasil penyelesaian bisa didapatkan dalam waktu yang singkat namun tidak menjamin bahwa penyelesaian tersebut adalah penyelesaian terbaik (optimal). Umumnya metode metaheuristik digunakan optimasi yang memiliki derajat ketidakpastian.

Terdapat berbagai macam metode metaheuristic yang memiliki masing-masing keunggulan. Berdasarkan penelitian terdahulu, metode metaheuristik yang paling sesuai untuk digunakan adalah *Ant-Colony Optimization (ACO)*,

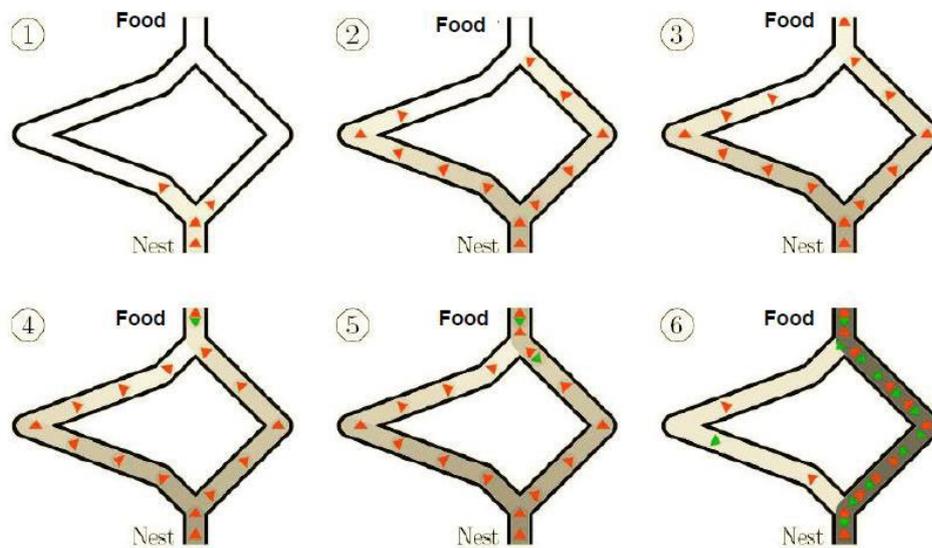
dikarenakan metode tersebut memang digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi diskrit yang mampu menangani banyak variabel dan mampu memberikan hasil dengan cepat serta cukup optimal. Dengan rujukan penelitian terdahulu maka metode metaheuristik yang akan digunakan adalah metode yang memiliki kesesuaian metode ataupun memang menggunakan metode ACO tersebut. Beberapa metode yang dapat dipertimbangkan selain metode ACO adalah *Genetic Algorithm* (GA) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO).

2.2.5 *Ant Colony Optimization* (ACO)

Ant-Colony Optimization dikembangkan berdasarkan perilaku kawanan serangga. Secara alamiah, kawanan serangga (dalam hal ini semut) mampu menentukan rute terpendek menuju pusat makanannya. Untuk menentukan rute terpendek tersebut, setiap semut dibantu dengan aroma tubuh (hormon feromon) semut yang terlebih dahulu melewati rute tersebut. Semut yang melewati rute terpendek akan meninggalkan aroma feromon yang lebih pekat. Semakin pekat feromon pada satu rute maka semakin banyak semut yang akan memilih rute tersebut.

ACO banyak digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang memiliki banyak variabel dan juga menyelesaikan masalah optimasi yang bersifat diskrit, yaitu masalah optimasi yang jumlah kandidat penyelesaiannya terbatas namun ukurannya meningkat seiring dimensi permasalahannya. Hasil optimasi yang didapatkan menggunakan ACO bukanlah hasil paling optimal, namun mendekati optimal.

Dalam pengembangannya, ACO banyak dimanfaatkan untuk menyelesaikan persoalan optimasi *multi* tujuan. Pengembangan tersebut merupakan modifikasi dari *Ant Colony System* (ACS) dan *MAX-MIN Ant System* (MMAS). Secara garis besar, modifikasi ACO untuk menyelesaikan persoalan multi-tujuan terdapat pada matriks pheromone, pembaharuan dan penguapan pheromone, konstruksi solusi, evaluasi dan pengarsipan Pareto [24].



Gambar 2.14 Ant-Colony Double Bridge [25]

Untuk melakukan proses pencarian, ACO memiliki beberapa variabel utama yang perlu disiapkan terlebih dahulu nilainya agar perhitungan ACO tersebut dapat memberikan hasil yang optimal.

- Jumlah semut. Semakin banyak jumlah semut yang dideklarasikan maka semakin banyak rute yang dapat dijelajahi dalam satu siklus, selain itu perubahan nilai feromon akan semakin dominan dalam satu siklus perjalanan.
- Nilai feromon dan tingkat penguapan. Feromon merupakan suatu aroma khas yang dikeluarkan oleh makhluk hidup, termasuk semut. Setiap semut akan meninggalkan aroma tubuhnya di setiap jalan yang ia lewati. Aroma yang ditinggalkan itu menandakan bahwa jalan tersebut pernah dilewati, bahkan tingkat kepekatan aroma tersebut dapat menjadi penanda seberapa sering jalur itu dilalui. Nilai feromon tidak selalu tetap atau terus bertambah, nilai feromon dapat berkurang dikarenakan penguapan yang terjadi terhadap feromon tersebut. Dalam ACO, terdapat variabel yang menunjukkan tingkat kepekatan feromon untuk setiap jalur. Nilai feromon setiap jalur akan mengalami pengurangan nilai setiap

berakhirnya satu siklus dan nilai feromon pada suatu jalur akan bertambah jika ada semut yang melewati jalur tersebut untuk menuju pusat makanan atau tujuannya.

- Jumlah perulangan. Jumlah perulangan yang dimaksud di sini adalah jumlah perulangan terbanyak dalam pencarian solusi. Pembatasan jumlah perulangan tersebut dibutuhkan agar program tidak terperangkap pada perulangan tak terbatas ketika solusi yang memenuhi syarat tidak dapat ditemukan.

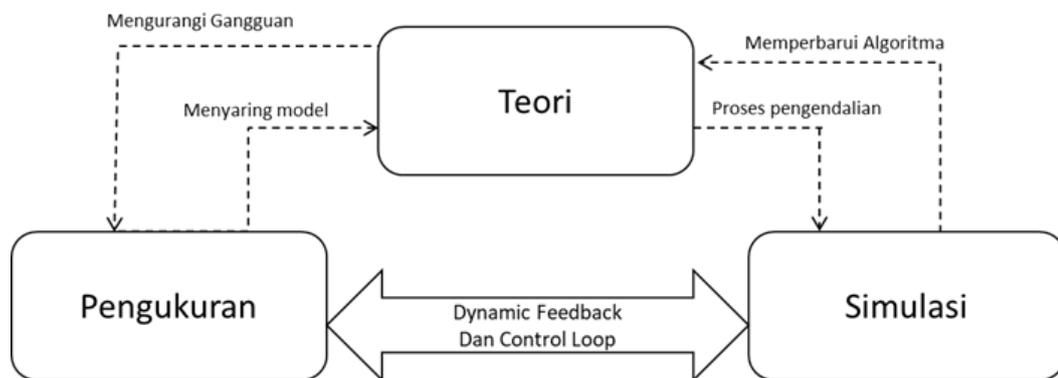
Setelah menentukan variabel utama, rute yang dapat dilalui beserta jarak setiap setiap rute harus didefinisikan juga. Hasil yang akan diberikan melalui proses perhitungan ACO ini adalah rute terbaik dan total jarak yang dilalui. Berikut adalah garis besar proses ACO.

1. Menentukan jalur yang akan dilalui oleh setiap semut untuk menuju sumber makanan, penentuan ini bisa menggunakan *roulette wheel selection*.
2. Menghitung jarak rute yang dilalui oleh setiap semut,
3. Memperbarui kadar feromon di semua jalur berdasarkan kadar feromon sebelumnya, tingkat penguapan feromon, dan kadar feromon yang baru dihasilkan oleh semut,
4. Menetapkan rute dengan tingkat feromon tertinggi sebagai solusi sementara,
5. Menghitung probabilitas setiap rute untuk dapat terpilih pada proses pemilihan berikutnya berdasarkan kadar feromon pada masing-masing jalur.
6. Langkah 1 hingga 4 terus diulang hingga mencapai jumlah perulangan maksimum atau tidak lagi terjadi perubahan solusi sementara,
7. Menetapkan solusi sementara sebagai solusi akhir.

2.2.6 *Dynamic Data-Driven Application Systems (DDDAS)*

Dynamic Data-Driven Application Systems (DDDAS) merupakan suatu paradigma yang menggabungkan simulasi dengan data dinamik dan terjadi interaksi dua arah antara eksekusi model dengan akuisisi data. DDDAS digunakan untuk meningkatkan metode pemodelan, meningkatkan kemampuan analisa dan prediksi dari suatu simulasi.

DDDAS ini dapat digunakan mengamati serta memperbarui informasi pada perangkat keras bersamaan dengan jalannya simulasi perangkat keras tersebut. Data-data keadaan *real-time* diambil oleh perangkat keras menggunakan sensor-sensor yang terdapat pada perangkat keras. Data-data *real-time* itu akan dikirimkan dari perangkat keras menuju pusat kendali sekaligus program simulasi yang berhubungan dengan perangkat keras tersebut. Dari data yang didapat, simulasi akan melakukan perhitungan kembali dengan teori-teori yang ada guna meminimalkan terjadinya hal yang tidak diinginkan serta menjaga kesesuaian gerakan perangkat keras di lapangan terhadap gerakan di simulasi.



Gambar 2.15 Konsep DDDAS

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

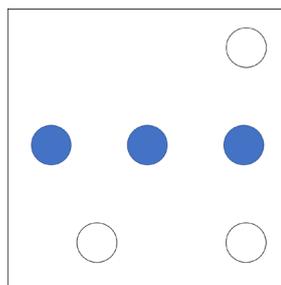
METODE PENELITIAN

Pada bagian ini disajikan metode penelitian beserta penjelasan untuk setiap metode penelitian yang dilakukan.

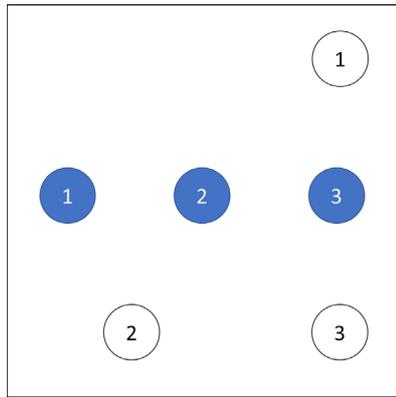
3.1 Pembentukan Formasi

Salah satu bagian dari pertunjukkan *dancing* drone adalah pembentukan formasi. Sekumpulan drone beterbangan membentuk deretan formasi yang telah disusun oleh desainer formasi. Pada Gambar 3.1, lingkaran biru adalah ilustrasi yang mewakili posisi masing-masing drone pada formasi awal yang telah dibentuk oleh desainer formasi, lingkaran putih adalah ilustrasi yang mewakili posisi masing-masing drone pada formasi yang harus dibentuk setelah formasi awal. Desainer formasi dapat dengan mudah merancang formasi-formasi yang bagus untuk pertunjukkan namun, cara agar drone dapat berpindah posisi dan membentuk formasi berikutnya menjadi suatu tantangan tersendiri dikarenakan desainer formasi harus menentukan jalur yang aman bagi drone untuk menuju posisi berikutnya.

Salah satu cara yang dilakukan untuk mengatur serta mengarahkan sekelompok drone adalah dengan penomoran. Desainer akan memberikan nomer pada setiap drone pada semua pola yang dibentuk. Dengan penomoran tersebut maka tujuan terbang dari setiap drone dapat dengan mudah diketahui. Seperti pada Gambar 3.2, drone nomer 1 pada formasi saat ini akan menuju posisi nomer 1 pada formasi berikutnya, begitu juga drone noomer 2 dan drone nomer 3.

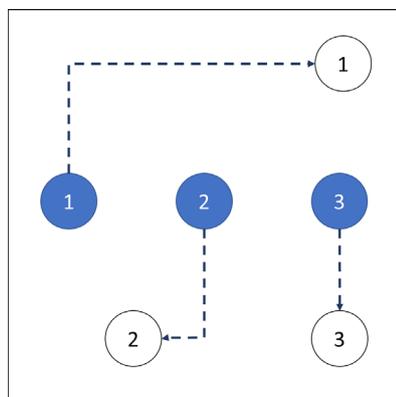


Gambar 3.1 Ilustrasi Formasi yang Dirancang.

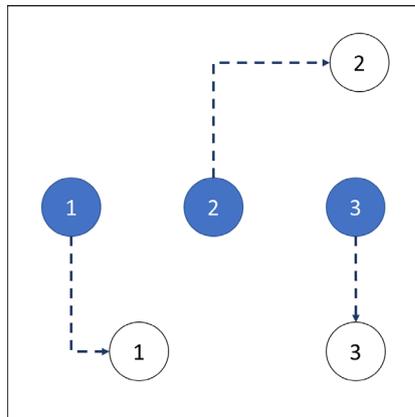


Gambar 3.2 Penomeran pada Seluruh Drone

Setelah setiap drone mengetahui posisi berikutnya, drone dapat terbang menuju posisi berikutnya. Lintasan yang dilalui untuk menuju posisi berikutnya bisa didapatkan dengan cara tertentu, misal menyesuaikan posisi vertikalnya terlebih dahulu kemudian menyesuaikan posisi horisontalnya seperti terlihat pada Gambar 3.3. Dapat dilihat bahwa jarak perpindahan setiap drone berbeda-beda, drone nomer 1 akan menempuh jarak terjauh dan drone nomer 3 akan menempuh jarak yang terpendek, drone nomer 1 harus terbang ke vertikal ke atas lalu bergerak secara horisontal dengan jarak yang cukup jauh, sedangkan drone nomer 3 hanya perlu terbang secara vertikal ke bawah. Kebiasaan manusia adalah menulis dari kiri ke kanan kemudian dari atas ke bawah. Kebiasaan dalam menulis itu mendasari penomeran yang telah dilakukan.



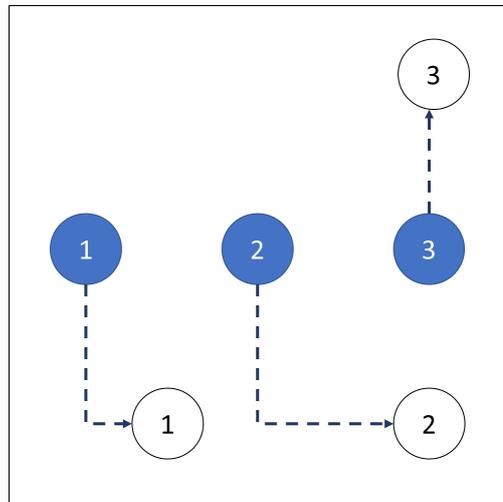
Gambar 3.3 Pembentukan Formasi Berikutnya



Gambar 3.4 Penomeran dengan Mempertimbangkan Jarak Drone

Walaupun formasi drone berikutnya sudah dapat terbentuk, pergerakan yang dilakukan terlihat sangat tidak efisien. Untuk meningkatkan efisiensi pergerakan maka penomeran harus diubah. Dengan melihat pola awal dan pola berikutnya serta melakukan perbandingan jarak antara ketiga drone maka didapatkan penomeran baru seperti pada Gambar 3.4. Dengan penomeran seperti ini maka jarak terjauh ditempuh oleh drone nomer 2 dan yang terpendek tetap drone nomer 3, namun dapat dilihat pergerakan terjauh sudah tidak sejauh pergerakan yang dilakukan dengan penomeran sebelumnya.

Dengan jarak yang lebih pendek tentu akan memperoleh waktu pembentukan formasi yang lebih cepat jika kecepatan gerak vertikal dan horisontal selalu konstan. Hal tersebut tentu tidak sesuai dengan kondisi drone, setiap drone memiliki nilai percepatan horisontal dan percepatan vertikal yang berbeda, kecepatan maksimum secara horisontal dan kecepatan maksimum secara vertikal yang berbeda, bahkan memiliki perbedaan percepatan ketika terbang vertikal ke atas dengan terbang vertikal ke bawah. Dengan mengasumsikan percepatan terbang secara vertikal ke bawah lebih besar daripada percepatan terbang secara vertikal ke atas maka penomeran menjadi sedikit diubah menjadi penomeran dan pergerakan seperti pada Gambar 3.5. Dengan asumsi yang ada maka dapat dilihat bahwa waktu pembentukan formasi dengan penomeran ini akan sedikit lebih cepat daripada penomeran sebelumnya.



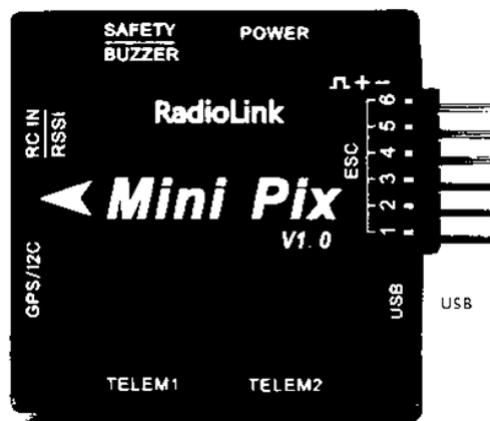
Gambar 3.5 Penomeran dengan Pertimbangan Kecepatan dan Percepatan

Melakukan penomeran dengan mempertimbangkan jarak serta spesifikasi drone dapat mempersingkat waktu pembentukan formasi, namun pada pembentukan formasi drone yang sesungguhnya di lapangan melakukan pergerakan pada bidang 3 dimensi serta jumlah drone bisa lebih banyak daripada yang diilustrasikan ini. Semakin banyak jumlah drone yang digunakan maka semakin banyak perbandingan yang harus dilakukan dan juga ketika semakin kompleks suatu pola maka akan lebih rumit dalam menentukan penomeran yang tepat agar dapat mempersingkat waktu pembentukan formasi. Selain banyak kesalahan, penomeran secara manual ketika melibatkan banyak drone atau pola yang rumit akan memakan waktu analisa yang cukup lama sehingga perlu digunakan metode lain yang lain. Salah satu metode pencarian solusi yang sesuai dalam kasus tersebut adalah metode metaheuristik ACO dikarenakan pencarian solusinya yang cepat dan hasil yang diberikan cukup optimal. Sebelum menerapkan ACO, beberapa hal dasar perlu dipersiapkan agar pencarian solusi menggunakan metode ACO dapat memberikan hasil yang optimal. Beberapa hal yang perlu disiapkan adalah spesifikasi obyek, yaitu spesifikasi drone yang digunakan dalam pembentukan formasi drone, pemodelan drone yang digunakan, kondisi area terbang, dan parameter dasar ACO.

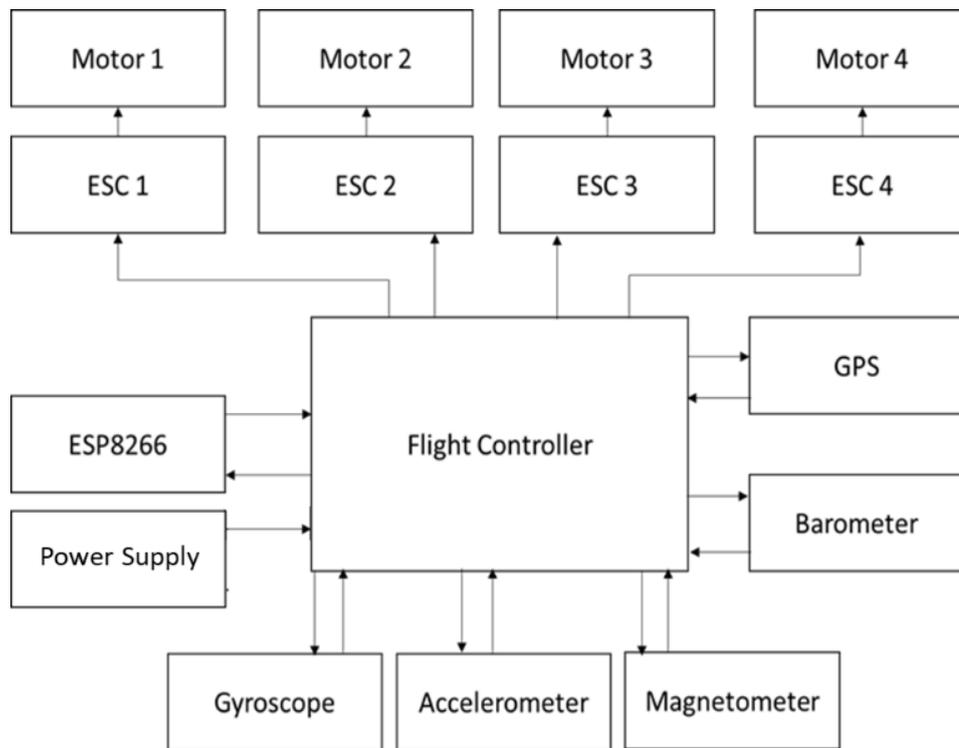
3.2 Desain Perangkat Keras

Dalam penelitian pembentukan formasi UAV ini digunakan UAV yang umum digunakan yaitu UAV berjenis Quadcopter atau drone berukuran *micro*. Pada umumnya Quadcopter dikendalikan menggunakan telemetri, namun karena penelitian tersebut menggunakan jaringan lokal (LAN) maka keberadaan modul telemetri digantikan dengan modul *wifi*. Untuk mengetahui posisi drone dibutuhkan nilai *Latitude* dan *Longitude* dari drone maka digunakan modul GPS, sedangkan nilai *Altitude* didapatkan dari Barometer. Dalam menerbangkan drone pengaturan kecepatan motor menjadi hal penting, dalam penelitian ini pengaturan kecepatan motor dibantu menggunakan *Electronic Speed Controller* (ESC) sebanyak 4 buah sesuai dengan jumlah motor yang digunakan. Diperlukan beberapa sensor untuk menjaga kestabilan terbang UAV yaitu *Gyroscope*, *Accelerometer* dan *magnetometer*, umumnya sensor-sensor tersebut sudah dibenamkan pada *flight controller*.

Flight controller yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah Radiolink MiniPix. Pemilihan *flight controller* tersebut dikarenakan Radiolink MiniPix merupakan suatu *flight controller* yang *open source*, memiliki berbagai macam fungsi yang dibutuhkan untuk menyelesaikan penelitian ini, harganya yang relatif murah dan telah dikenal serta direkomendasikan oleh komunitas pengembang drone.



Gambar 3.6 RadioLink MiniPix



Gambar 3.7 Diagram Blok Drone

Berdasarkan kebutuhan data dan komunikasi yang dilakukan, maka diagram blok drone dapat digambarkan seperti pada Gambar 3.7. UAV yang digunakan merupakan perangkat standar yang umum digunakan pada Quadcopter yang dijual bebas di pasaran, kecuali modul *wifi* yang digunakan dalam penelitian tersebut. Semua perangkat elektronik yang telah ditentukan dalam spesifikasi alat akan dirangkai menjadi satu pada *frame* drone yang terbuat dari *Carbon Fiber* dengan tipe ZMR 250. Ukuran *frame* drone adalah sepanjang 250 mm. Selain komponen utama seperti motor, ESC, *flight controller*, GPS dan modul *wifi*, terdapat beberapa modul pendukung seperti *power supply unit* (PSU) sebagai sumber energi utama dari drone dimana pada percobaan ini digunakan baterai *LiPo* dikarenakan kapasitas daya yang cukup besar dengan bobot dan ukuran yang kecil. Untuk memudahkan pendistribusian daya ke seluruh komponen elektronik, digunakan sebuah *power distribution board* (PDB).



Gambar 3.8 Bentuk UAV Rakitan Jenis Quadcopter

3.3 Pemodelan Perangkat Keras

Pemodelan perangkat keras ini berguna dalam perhitungan metode ACO. Pemodelan ini berupa bentuk matematis dari gerakan-gerakan perangkat keras yang digunakan. Untuk memodelkan perangkat keras terlebih dahulu harus diketahui spesifikasi dari perangkat keras yang digunakan. Spesifikasi dari perangkat keras tersebut dapat dilihat pada buku manual ataupun referensi parameter alat tersebut. Berdasarkan referensi parameter RadioLink MiniPix, beberapa informasi yang penting untuk membuat pemodelan perangkat keras pembentukan formasi drone adalah:

Tabel 3.1 Parameter Kecepatan dan Percepatan RadioLink MiniPix

Parameter	Rentang nilai	Default	Satuan
Percepatan vertical	0.5 - 5	1	m/s ²
Kecepatan vertical ke atas maximum	0.1 – 10	2.5	m/s
Kecepatan vertical ke bawah maximum	0.1 – 5	1.5	m/s
Percepatan horisontal	0.5 - 5	1	m/s ²
Kecepatan Horisontal Maksimum	0.2 – 20	5	m/s

Semua parameter di atas adalah parameter yang digunakan oleh PixHawk sebagai flight controller. Angka-angka kecepatan pada parameter harus diubah terlebih dahulu menjadi kecepatan putaran motor untuk masing-masing motor kemudian menjadi tegangan yang mengatur putaran motor di setiap sisi drone, namun hal itu tidak perlu dilakukan karena pada konstruksi perangkat keras terdapat

ESP yang menjadi penghubung antara *flight controller* dengan BLDC motor di setiap sisi drone.

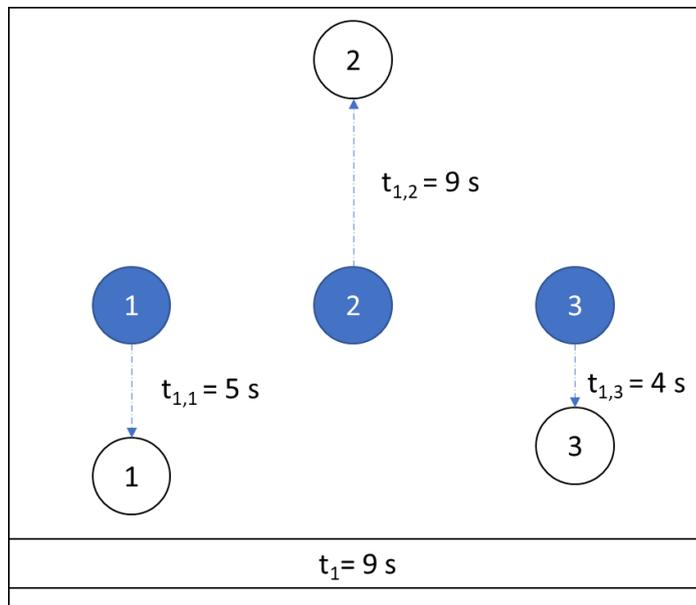
Parameter-parameter *flight controller* yang ada akan mempengaruhi total waktu pembentukan formasi. Waktu pembentukan formasi setara dengan waktu terlama drone untuk menuju titik tujuan dikarenakan seluruh drone akan terbang serentak menuju titik tujuannya. Pengertian tersebut dapat dimodelkan sebagai berikut:

$$t_i = \max(t_{i,n}) \quad (3.1)$$

Dimana: t_i : Waktu pembentukan formasi ke - i

$t_{i,n}$: Waktu drone ke - n menuju titik tujuan membentuk formasi ke - i

Waktu untuk sebuah drone menuju titik tujuan merupakan waktu yang dibutuhkan oleh sebuah drone untuk mencapai koordinat x, y dan z yang ditargetkan. Drone akan terbang menuju salah satu sumbu terlebih dahulu. Penentuan sumbu yang harus dicapai lebih dulu diperlukan untuk mengurangi resiko tabrakan antar drone.



Gambar 3.9 Ilustrasi Penentuan Waktu Pembentukan Formasi

Waktu untuk sebuah drone menuju titik tujuan dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$t_{i,n} = t_{i,n,x} + t_{i,n,y} + t_{i,n,z} \quad (3.2)$$

Dimana: $t_{i,n,x}$: waktu yang dibutuhkan drone menuju target sumbu pada x

$t_{i,n,y}$: waktu yang dibutuhkan drone menuju target sumbu pada y

$t_{i,n,z}$: waktu yang dibutuhkan drone menuju target sumbu pada z

Waktu terbang ke setiap sumbu akan berbeda berdasarkan parameter flight controller yang digunakan dan juga rute terbangnya. Untuk pergerakan drone pada koordinat kartesian, pergerakan pada sumbu x dan y sama-sama merupakan pergerakan secara horisontal, sehingga percepatan, dan kecepatan maksimum yang terjadi pada sumbu x dan y adalah sama. Sumbu z merupakan pergerakan secara vertikal sehingga berbeda dengan sumbu x dan y. Gerakan vertikal berarti mampu terbang ke atas dan terbang ke bawah. Berdasarkan parameter drone, gerakan ke terbang vertikal atas dan gerakan terbang vertikal ke bawah memiliki percepatan dan kecepatan maksimum yang berbeda.

Sebelum mencari waktu yang diperlukan oleh drone untuk melakukan perpindahan dari titik mula menuju titik tujuan, terlebih dahulu harus diketahui jarak (s_s) dan waktu (t_s) yang dibutuhkan drone untuk mencapai kecepatan maksimum dari keadaan diam serta jarak (s_f) dan waktu (t_f) yang dibutuhkan drone untuk kembali ke kondisi diam. Variabel s_s dan s_f dapat dicari dengan persamaan:

$$s = \frac{\Delta v^2}{2a} \quad (3.3)$$

Sedangkan variabel t_s dan t_f dapat dicari dengan persamaan:

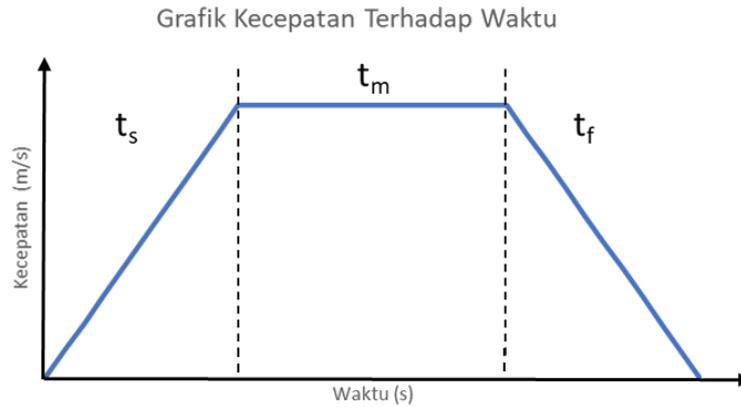
$$t = \frac{\Delta v}{a} \quad (3.4)$$

Dimana: Δv : Perubahan kecepatan (m/s)

a : Percepatan / perlambatan (m/s^2)

t : Waktu (s)

s : Jarak tempuh (m)



Gambar 3.10 Grafik Kecepatan Terhadap Waktu

Setelah mengetahui s_s , s_f , t_s , dan t_f , waktu yang dibutuhkan oleh drone untuk terbang dari titik asal ke titik tujuan dapat ditentukan. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$t = t_s + t_m + t_f \quad (3.5)$$

Dimana:

$$t_m = \frac{s - s_s - s_f}{v} \quad (3.6)$$

Diketahui bahwa hubungan antara waktu dan kecepatan adalah sebagai berikut, t_s adalah waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kecepatan maksimum, t_m adalah waktu ketika drone melakukan terbang dengan kecepatan maksimum menuju titik tujuan, dan t_f adalah waktu yang dibutuhkan untuk perlahan berhenti di titik tujuan. Fungsi kecepatan terhadap waktu dari grafik tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$v(t) = \begin{cases} at, & t \leq t_s \\ v_{max}, & t_s < t < t_f \\ v_{max} - a(t - t_m), & t \geq t_f \end{cases} \quad (3.7)$$

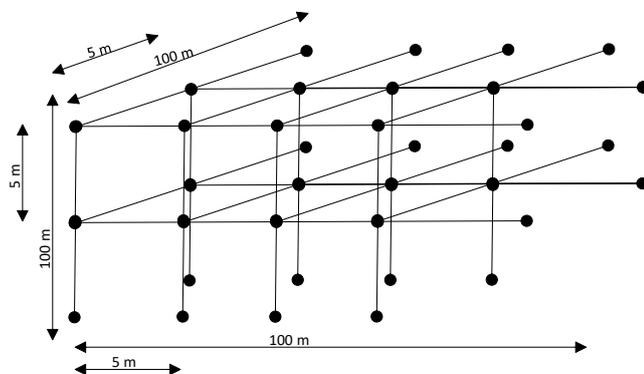
3.4 Desain Area Terbang

Perbedaan utama antara drone dengan kendaraan tanpa awak lainnya adalah area jelajahnya. Drone adalah kendaraan tanpa awak yang melakukan penjelajahan melalui udara. Drone dapat melakukan pergerakan bebas di udara,

pergerakan maju-mundur, kiri-kanan, atas-bawah, drone dapat dioperasikan pada ketiga sumbu koordinat kartesian (sumbu x, y dan z). gerakan memutar pun dapat dilakukan di ketiga sumbu (roll, pitch dan yaw). Dengan pergerakan di ketiga sumbu kartesian dan area jelajahnya adalah udara, maka dapat disebutkan bahwa drone memiliki area jelajah terluas jika dibandingkan dengan kendaraan tanpa awak yang lain. Tetapi, seluas-luasnya area jelajah/terbang, bukan berarti tidak terbatas. Area terbang drone dibatasi pada jangkauan transmisi pengendali drone. Dalam tesis ini transmisi pengendali yang digunakan adalah *wifi router* sehingga radius terbang drone dibatasi pada 100 meter dengan ground station sebagai pusatnya.

Dalam penerapannya drone selalu dibekali sebuah GPS untuk mengetahui posisi *latitude* dan *longitude* serta dibekali sebuah barometer untuk mendapatkan *altitude*. Nilai *longitude*, *latitude* dan *altitude* yang diberikan tidak selalu benar, terkadang memiliki selisih beberapa meter dari posisi aslinya. Perbedaan nilai dengan posisi asli disebabkan oleh tingkat akurasi modul GPS dan modul barometer yang digunakan. Untuk mengatasi tabrakan yang disebabkan oleh kesalahan pembacaan posisi maka dilakukan pembatasan jarak antar drone. Radius minimum antara drone ditetapkan sebesar 5 meter, angka ini diambil dengan mempertimbangkan akurasi modul GPS yang digunakan.

Dengan adanya radius minimum 5 meter maka akan lebih mudah jika dilakukan *gridding* pada area terbang. *Gridding* dengan jarak 5x5x5 meter, sehingga desain pola yang diijinkan adalah pola dengan jarak kelipatan 5 meter.

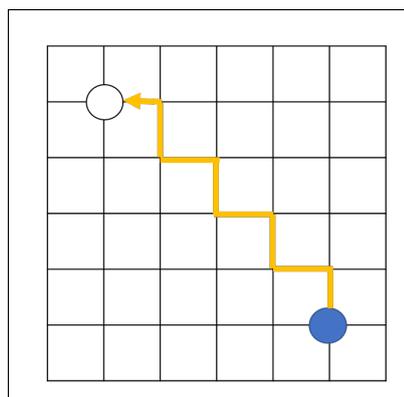


Gambar 3.11 Gridding Area Terbang

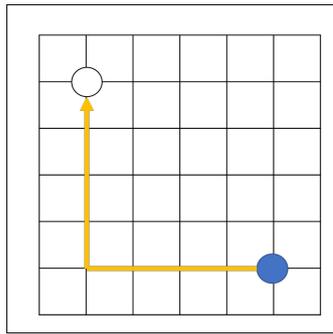
Gerakan yang dapat dilakukan oleh drone pada tesis ini adalah gerakan 6 arah pada bidang 3 dimensi, gerakan melintang tidak diperkenankan karena dikawatirkan akan memasuki radius aman drone lainnya ketika melakukan pergerakan. Selain itu gerakan drone dari titik awal menuju titik tujuan akan menggunakan jalur dengan perubahan arah paling sedikit.

Dalam keadaan sebenarnya, jalur terpendek adalah jalur melintang, namun dikarenakan pergerakan melintang tidak diperbolehkan pada area gridding maka gerakan melintang akan diimplementasikan sebagai gerakan berliku. Seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.12 dimana UAV pada *waypoint* asal yang diwakili oleh lingkaran biru berpindah menuju *waypoint* tujuan yang diwakili oleh lingkaran putih melewati lintasan yang berliku-liku sebagai pengganti lintasan melintang. Gerakan berliku-liku ini akan memakan waktu yang cukup lama dikarenakan pada setiap perubahan arah drone akan mengalami percepatan dan perlambatan.

Untuk mempercepat perpindahan maka dilakukan perpindahan dengan perubahan arah paling sedikit untuk mencapai *waypoint* tujuan. Dengan pertimbangan perubahan arah paling sedikit maka dilakukan pergerakan dengan memenuhi salah satu koordinat terlebih dahulu, misal memenuhi koordinat x kemudian koordinat y lalu koordinat z, dengan begini jumlah perubahan arah yang terjadi hanya 3 kali perubahan.



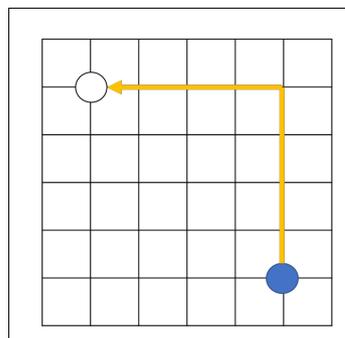
Gambar 3.12 Ilustrasi Pergerakan Berliku Drone



Gambar 3.13 Pergerakan dengan Menyelesaikan Koordinat X

Gambar 3.13 merupakan ilustrasi pergerakan pada area terbang 2 dimensi dengan menyelesaikan koordinat x terlebih dahulu kemudian menyelesaikan koordinat y. Dapat dilihat bahwa panjang jalur yang ditempuh dengan penyelesaian koordinat ini sama dengan panjang jalur yang bergerak dengan berkelu-liku. Dengan demikian percepatan/perlambatan yang lebih jarang dan jarak yang sama maka pergerakan dengan menyelesaikan salah satu koordinat ini dapat memberikan waktu yang lebih singkat dalam pembentukan formasi.

Selain pergerakan pada Gambar 3.14, drone dapat menempuh pergerakan yang berbeda dengan panjang yang sama, yaitu dengan menyelesaikan koordinat Y terlebih dahulu. Dalam pergerakan pergerakan pada wilayah 2 dimensi terdapat 2 model pergerakan yang diutamakan dengan panjang lintasan yang sama, merupakan lintasan terpendek, dan memiliki waktu tempuh yang sama, yaitu pergerakan dengan menyelesaikan koordinat x, kemudian koordinat y dan pergerakan dengan menyelesaikan koordinat y, kemudian koordinat x.

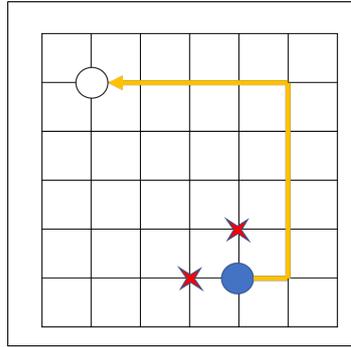


Gambar 3.14 Pergerakan dengan Menyelesaikan Koordinat Y

Dalam penerapannya padaruang gerak 3 dimensi maka akan terdapat 6 model pergerakan yang diutamakan dengan panjang lintasan yang sama, memiliki waktu tempuh yang sama, dan merupakan lintasan terpendek, yaitu:

1. Pergerakan dengan menyelesaikan koordinat x, lalu menyelesaikan koordinat y dan terakhir menyelesaikan koordinat z.
2. Pergerakan dengan menyelesaikan koordinat x, lalu menyelesaikan koordinat z dan terakhir menyelesaikan koordinat y.
3. Pergerakan dengan menyelesaikan koordinat y, lalu menyelesaikan koordinat x dan terakhir menyelesaikan koordinat z.
4. Pergerakan dengan menyelesaikan koordinat y, lalu menyelesaikan koordinat z dan terakhir menyelesaikan koordinat x.
5. Pergerakan dengan menyelesaikan koordinat z, lalu menyelesaikan koordinat y dan terakhir menyelesaikan koordinat x.
6. Pergerakan dengan menyelesaikan koordinat z, lalu menyelesaikan koordinat x dan terakhir menyelesaikan koordinat y.

Mengidentifikasi sebanyak mungkin pilihan model pergerakan dengan jarak dan waktu tempuh yang sama diperlukan sebagai rute alternatif ketika terdapat halangan pada rute yang pertama kali dipilih. Ketika melibatkan banyak drone akan terdapat kemungkinan seluruh model pergerakan utama yang disebutkan di atas tidak dapat dilalui maka diijinkan bagi drone untuk melakukan perubahan arah tambahan, yaitu menambah sebanyak 1 buah perubahan arah tambahan untuk menghindari obyek yang menghalangi. Gambar 3.15 merupakan ilustrasi penambahan satu perubahan arah ketika terdapat halangan untuk melakukan perpindahan dari *waypoint* awal menuju ke *waypoint* tujuan. Penambahan perubahan arah bisa dilakukan sampai 4 kali, jika jalur belum bisa ditemukan dengan 4 kali penambahan perubahan arah maka dilakukan penomeran ulang dengan mengabaikan hasil penomeran yang pertama. Dengan dilakukan penomeran ulang maka terdapat kemungkinan tujuan terbang akan berbeda dari yang sebelumnya.

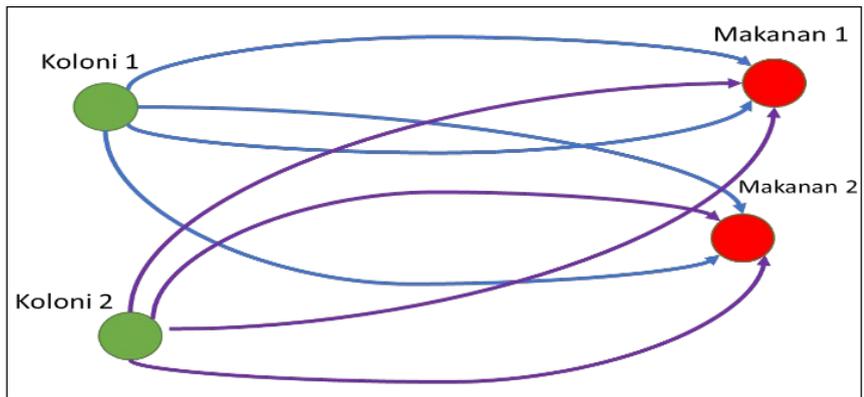


Gambar 3.15 Ilustrasi Pergerakan dengan Sebuah Perubahan Arah Tambahan

Pemilihan rute tidak dilakukan secara manual, pemilihan rute akan berlangsung secara otomatis dengan menggunakan algoritma ACO yang akan dilakukan bersamaan dengan pemilihan *waypoint* terbaik. Sehingga nantinya ACO akan menentukan *waypoint* terbaik dan rute terbaik langsung secara bersamaan agar waktu proses ACO menjadi lebih singkat.

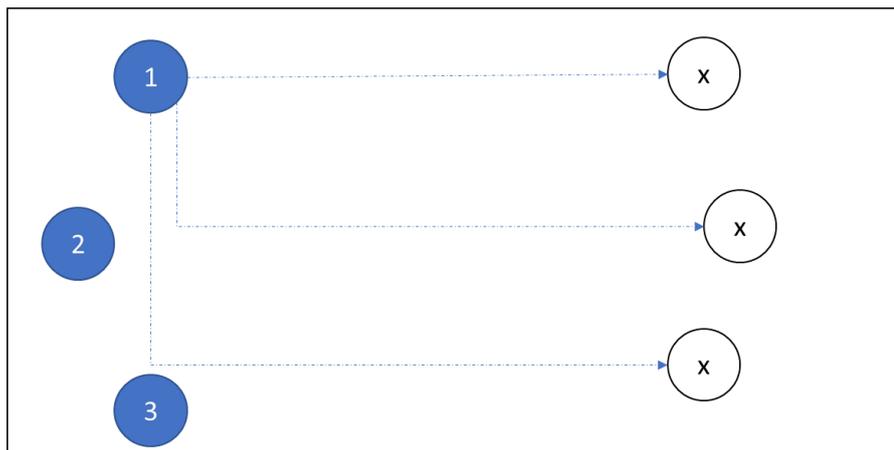
3.5 Penentuan *Waypoint* Awal dan Kandidat *Waypoint* Tujuan

Untuk menerapkan ACO pada pembentukan formasi drone ini perlu ditentukan *waypoint* yang menjadi pusat koloni semut dan *waypoint* yang menjadi sumber-sumber makanan. Dalam pembentukan formasi drone ini jumlah sumber makan tidak hanya satu, terdapat beberapa sumber makanan yang dapat dikunjungi dengan beragam rute. Sebelum ditetapkan sumber makanan yang dituju atau *waypoint* yang menjadi tujuan, semua *waypoint* yang akan dituju disebut sebagai kandidat *waypoint* tujuan. Gambar 3.16 mengilustrasikan peta yang digunakan dalam ACO dalam bidang 2 dimensi dan 2 unit drone yang terlibat dalam pembentukan formasi drone. Lingkaran hijau adalah koloni semut, sedangkan lingkaran merah adalah sumber-sumber makanan yang dapat dituju dengan rute yang berbeda-beda. Dalam ilustrasi, *gridding* area sementara dihilangkan untuk memberikan gambaran yang lebih jelas. Setiap sumber makanan dapat dikunjungi dengan berbagai cara dan juga dapat dikunjungi oleh koloni semut manapun, namun tentu saja jika sumber makan sudah dikuasai oleh satu koloni semut maka koloni semut yang lain tidak dapat menuju sumber makanan tersebut.

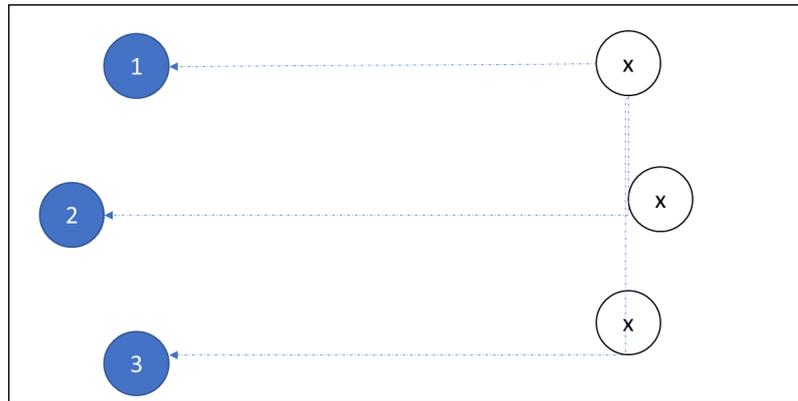


Gambar 3.16 Ilustrasi Koloni, Sumber Makanan dan Rute Memungkinkan

Dalam realisasinya pada pembentukan formasi drone, terdapat dua buah skenario yang mungkin untuk direalisasikan dalam menentukan *waypoint* awal dan kandidat *waypoint* tujuan, yaitu posisi-posisi saat ini sebagai *waypoint-waypoint* awal dan posisi-posisi pada formasi berikutnya sebagai kandidat-kandidat *waypoint* tujuan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.17, atau posisi-posisi pada formasi berikutnya sebagai *waypoint-waypoint* awal dan titik-titik pola saat ini sebagai kandidat-kandidat *waypoint* tujuan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.18.



Gambar 3.17 Posisi Formasi Berikutnya Sebagai Kandidat Waypoint Tujuan



Gambar 3.18 Posisi Formasi Saat Ini Sebagai Kandidat Waypoint Tujuan

Kedua skenario itu dapat memberikan hasil yang berbeda ataupun hasil yang sama berdasarkan cara penentuan waypoint yang digunakan. Ketika menggunakan skenario pertama maka cenderung untuk memposisikan drone dengan nomer 1 menjadi koloni pertama yang melakukan pemeriksaan. Hal tersebut membuat UAV dengan nomer urut terakhir memperoleh *waypoint* kandidat tujuan yang tidak dipilih oleh *waypoint* asal lainnya. Dengan skenario kedua kecendrungan melakukan pemeriksaan berdasarkan urutan akan sedikit berkurang dikarenakan belum adanya penomoran yang tepat maka dapat dilakukan dengan menggunakan urutan posisi. Posisi *waypoint* pada formasi berikutnya yang memiliki jarak terjauh dari posisi *waypoint* saat ini bisa menjadi yang pertama untuk dianalisa karena dengan mengisi bagian-bagian yang lebih jauh terlebih dahulu membuat halangan yang terjadi pada pembentukan formasi menjadi lebih sedikit. Sehingga penentuan *waypoint* awal dan kandidat *waypoint* tujuan menggunakan skenario kedua.

3.6 Pengembangan Algoritma Optimasi

Algoritma optimasi yang digunakan untuk mempercepat pembentukan formasi drone adalah ACO. Setelah mengetahui area terbang beserta waypoint awal dan waypoint kandidat tujuan, sebelum memulai proses ACO dibutuhkan deklarasi variabel terkait. Variabel terkait yang perlu disesuaikan

adalah variabel utama ACO meliputi jumlah semut, nilai awal feromon, nilai penguapan feromon dan batas jumlah perulangan.

- Jumlah semut. Ketika akan melakukan perubahan formasi, setiap drone yang akan melakukan perpindahan akan dihadapkan pada beberapa pilihan jalur yang mungkin untuk dilaluinya. Dalam ACO tidak semua jalur akan diperiksa. Jalur akan dipilih secara acak sejumlah semut yang digunakan. Pada proses ini jumlah semut yang digunakan berdasarkan jumlah *waypoint* asal yaitu sebanyak 3 kali jumlah *waypoint*.
- Feromon. Besar nilai feromon saat proses ACO dimulai dibuat sama untuk setiap jalur. Nilai yang ditetapkan adalah 2 untuk semua jalur. Dengan nilai yang sama pada permulaan ini maka seluruh jalur memiliki peluang yang sama untuk dipilih dalam penelusuran. Proses ini sama dengan kondisi ketika koloni semut belum mengetahui jalan menuju sumber makanan, semua rute akan dijelajahi.
- Jumlah perulangan. Siklus perjalanan semut dilakukan beberapa kali, jalur perjalanan yang ditempuh oleh semut bisa berbeda bisa juga sama bergantung nilai acak yang nantinya digunakan untuk memilih jalur yang harus dilewati semut. Pada perulangan ke dua pemilihan jalur tidak lagi berimbang, nilai feromon setiap rute sudah tidak lagi sama dikarenakan ada jalur yang telah dilalui oleh semut yang mengakibatkan nilai feromon pada jalur tersebut lebih tinggi. Jalur dengan nilai feromon yang lebih tinggi ini memiliki peluang lebih tinggi untuk dipilih untuk dilalui oleh semut. Jika pada perulangan kedua ditemukan jalur yang lebih pendek daripada jalur terpendek pada penelusuran pertama maka bisa jadi nilai feromon kedua jalur itu saling mendekati, namun pada perulangan berikutnya ketika semut menempuh kedua rute terpendek itu, feromon pada rute terpendek kedua akan menjadi

lebih pekat. Dengan konsep feromon dan perulangan berkali-kali tersebut pada akhirnya semua semut dalam koloni akan melewati rute yang sama dan itulah solusi yang terpilih. Solusi terpilih juga dapat ditentukan jika kandidat solusi memiliki nilai *fitness* yang mencapai batasan yang ditentukan. Jika nilai *fitness* tidak kunjung tercapai, ataupun koloni semut tidak kunjung memilih rute yang sama maka akan terjadi perulangan yang tidak terbatas, oleh karena itu harus ditentukan batas jumlah perulangan. Ketika perulangan telah mencapai batasnya, namun nilai *fitness* tidak kunjung mencapai nilai yang ditentukan serta koloni semut tidak berada pada jalur yang sama maka satu jalur dengan nilai feromon tertinggi dan nilai *fitness* tidak sama dengan nol akan dipilih sebagai solusi akhir. Secara default jumlah perulangan terbanyak yang digunakan adalah 10 perulangan. Jumlah 10 kali perulangan ditentukan berdasarkan uji coba.

Disamping variabel utama, terdapat suatu fungsi yang akan digunakan pada proses ACO pada tesis ini, fungsi itu telah disinggung sebelumnya, yaitu Fungsi *fitness*. Fungsi tersebut terdapat di beberapa metode optimasi yang didasarkan pada metode genetik. Fungsi tersebut dapat membantu mempercepat penentuan solusi dikarenakan hasil dari fungsi *fitness* ini adalah nilai kualitas dari solusi yang menjadi kandidat. Fungsi *fitness* dituliskan dalam suatu persamaan yang mengandung variabel-variabel yang mempengaruhi kualitas solusi. Jika nilai dari fungsi *fitness* mencapai batas yang ditentukan maka kandidat solusi dapat langsung dipilih sebagai solusi akhir. Dalam penerapannya untuk mempercepat pembentukan formasi drone, variabel yang berperan dalam penentuan kualitas adalah lama waktu yang ditempuh (t), tetapi tetap terdapat faktor lain yang mempengaruhi kualitas dari solusi, yaitu posisi drone terhadap pusat kendali. Sependek-pendeknya jarak terbang akan percuma saja jika drone terbang di luar area terbangnya yang menyebabkan putusnya komunikasi antara pusat kendali dengan drone, sehingga

radius terbang sangat mempengaruhi kualitas solusi. Persamaan fungsi fitness yang dipilih adalah:

$$\text{Fitness} = \frac{p}{t_{i,n} - t_{u+1}} \quad (3.8)$$

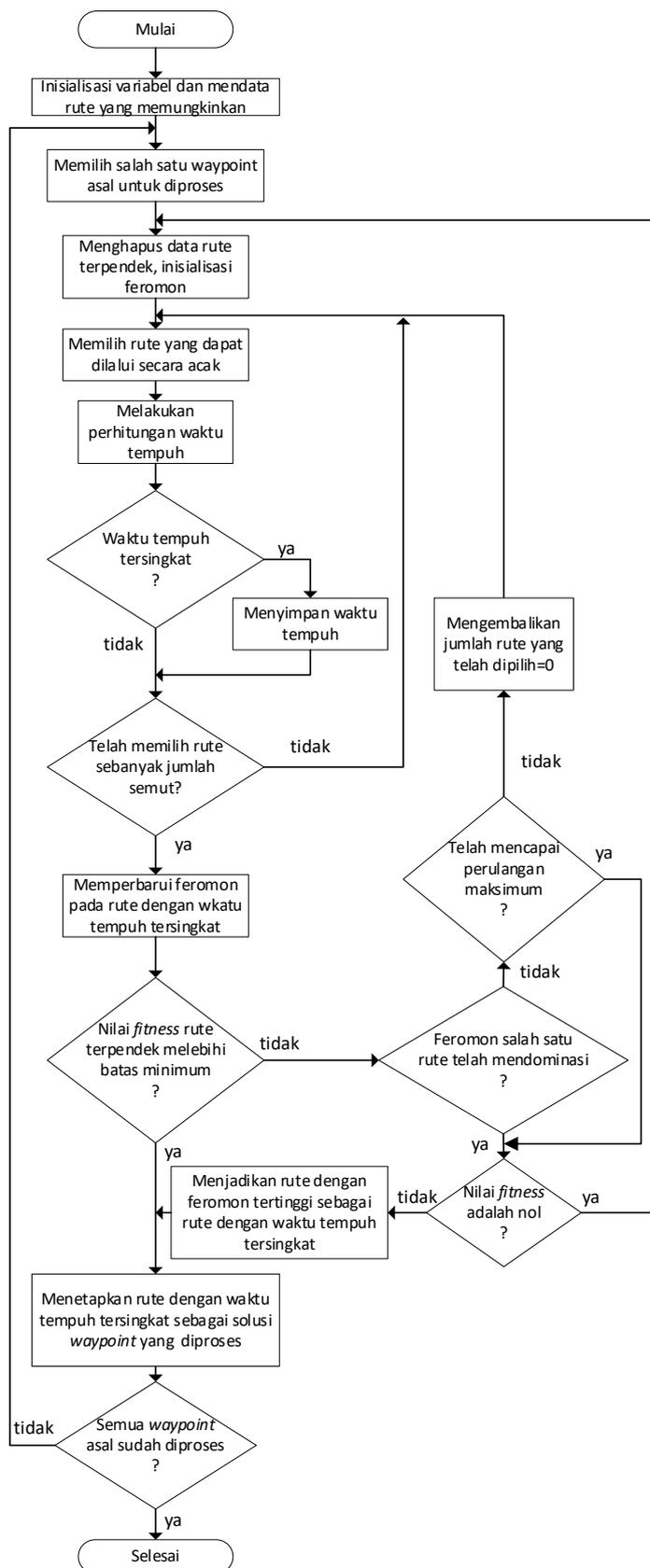
Dimana: t_u : waktu tempuh jika UAV menggunakan model pergerakan utama,
 p : nilai pembilang, $p=1$ jika drone di dalam jangkauan kendali, $p=0$ jika drone di luar jangkauan kendali.

Semakin kecil nilai fitness yang dihasilkan maka semakin kecil kualitas yang dihasilkan. Jika nilai fitness adalah 0 maka solusi tidak dapat diwujudkan dan harus dilakukan pencarian solusi yang baru.

Data dari drone yang diambil sebelum memasuki proses ACO ini meliputi jumlah drone yang berperan, koordinat x , y , dan z setiap drone saat ini, koordinat x , y , dan z drone yang akan dituju, kecepatan dan percepatan drone ke segala koordinat. Untuk mendapatkan waktu terbang tersebut maka Persamaan 3.2 yang telah dijabarkan di atas akan dilakukan di dalam proses ACO tersebut. Proses ACO ini akan menghasilkan pergantian titik tujuan setiap drone, disamping itu juga dihasilkan rute terbaik yang akan dilalui oleh drone.

Satu proses ACO digunakan untuk menentukan solusi perpindahan dari satu formasi ke satu formasi lainnya, sehingga jika dalam suatu pertunjukan pembentukan formasi drone terdapat 4 deret formasi yang akan dibentuk maka proses ACO dijalankan sebanyak 3 kali untuk menentukan alur pembentukan formasi tercepat. Alur satu proses ACO dijabarkan menggunakan *flowchart* pada Gambar 3.19. Berikut adalah penjelasan dari *flowchart* proses pemilihan waypoint dan rute terbaik menggunakan ACO.

1. Proses ACO diawali dengan inisialisasi variabel yang dibutuhkan serta mendata jumlah *waypoint* asal, dan jumlah rute utama.
2. Memilih salah satu *waypoint* asal untuk diproses dalam pencarian *waypoint* tujuan terbaik serta rute terbaiknya. Pemilihan tersebut dapat dilakukan dengan memilih *waypoint* yang berada paling jauh dari *waypoint* tujuan.



Gambar 3.19 Flowchart Pemilihan Waypoint dan Rute Terbaik dengan ACO

3. Membuat seluruh variabel penampung kembali ke nilai awal serta seluruh rute kembali memiliki kadar feromon yang sama, yaitu berkadar 2 untuk semua rute.
4. Melakukan pemilihan rute secara acak. Pemilihan secara acak ini dapat dilakukan dengan menggunakan roulette wheel selection.
5. Menentukan waktu ($t_{i,n}$) yang dibutuhkan oleh semut untuk menempuh rute yang telah dipilih.
6. Dilakukan perbandingan antara waktu tempuh rute yang terpilih dengan waktu tempuh terpendek yang terdaftar. Jika waktu tempuh yang terpilih tadi lebih singkat daripada waktu tempuh yang terdaftar maka waktu tempuh yang terpilih akan didaftarkan sebagai waktu tempuh tersingkat.
7. Pastikan langkah 4 hingga langkah 6 telah diulang sebanyak jumlah semut yang telah diinisialisasi pada tahap pertama.
8. Tahap perbaruan feromon ini meliputi penguapan feromon di semua rute dan penambahan kadar feromon pada rute dengan waktu tempuh tersingkat. Penguapan feromon pada setiap rute dapat diterapkan dengan persamaan:

$$\tau_{i,j,k} \leftarrow (1 - e)\tau_{i,j,k} \quad (3.9)$$

Dimana: $\tau_{i,j,k}$: kadar feromon dari waypoint asal ke-i menuju waypoint tujuan ke-j dengan rute ke-k,

e : Kadar penguapan.

Dalam pembentukan formasi ini digunakan kadar penguapan 25% Setelah dilakukan penguapan, rute terbaik akan mengalami penambahan feromon:

$$\tau_{i,j,k} \leftarrow \tau_{i,j,k} + \Delta\tau \quad (3.10)$$

$$\Delta\tau = 7 \left(\frac{t_{mf} - t_{i,n}}{t_{mf}} \right) \quad (3.11)$$

Dimana: $\Delta\tau$: kadar feromon yang ditambahkan pada rute terbaik,

t_{mf} : waktu perpindahan terlama yang diijinkan dalam pertunjukkan.

Angka 7 merupakan konstanta yang mewakili kadar feromon penuh seekor semut. Jika suatu rute mendapat tambahan 7 kadar feromon maka dapat dikatakan semut menetap pada rute tersebut dikarenakan panjang rute adalah 0. Semakin panjang rute yang ditempuh semut maka akan semakin bertebaran kadar feromon pada rute tersebut dan mengakibatkan berkurangnya kadar feromon yang ditambahkan pada rute tersebut.

Jika lama waktu perpindahan lebih dari waktu perpindahan yang ditetapkan maka rute tersebut tidak direkomendasikan dan aroma feromon akan dianggap menguap sehingga terjadi pengurangan kadar feromon.

9. Fungsi fitness dari rute terbaik akan dibandingkan dengan batas fungsi fitness. Perbandingan ini menjadi salah satu penentuan solusi dari *waypoint* yang diproses. Batas minimum nilai fungsi fitness pada pembentukan formasi drone ini adalah ditetapkan pada nilai 0.2 dari rentang nilai 0 hingga 1. Nilai 0.2 ini diambil dengan mempertimbangkan jika selisih antara waktu tempuh rute terbaik dengan waktu tempuh menggunakan model pergerakan utama tidak lebih dari 4 detik dan rute tersebut tidak keluar jalur maka rute terbaik ini dapat langsung diambil sebagai solusi. Jika nilai fitness tidak melebihi batas minimal maka dilanjutkan dengan pemeriksaan kadar feromon.
10. Kadar feromon dikatakan mendominasi ketika kadar feromon tersebut telah melebihi melebihi angka 12. Jika kadar feromon telah mendominasi maka dapat diperiksa nilai fitness dari rute terbaik tersebut. Angka 12 diambil karena kadar tersebut dianggap cukup mendominasi dan membuat rute tersebut dipilih sebagai rute terbaik lebih dari 2 kali dalam rentang perulangan yang tidak jauh.

Jika kadar feromon belum melebihi batas maka dilakukan pemeriksaan perulangan.

11. Melakukan pemeriksaan perulangan, jika perulangan telah melewati iterasi maksimum maka dilakukan pemeriksaan fungsi fitness, jika belum mencapai iterasi maksimum maka proses tahap ke-4 hingga proses tahap ke-10 akan diulang kembali.
12. Jika kadar feromon pada tahap 10 melebihi batasnya atau iterasi telah mencapai batasnya maka dilakukan pemeriksaan nilai fitness. Jika nilai fitness tidak nol yang berarti pergerakan drone tidak keluar dari jalur maka rute dengan kadar feromon tertinggi dapat disebut sebagai rute terbaik.
13. Rute terbaik yang telah ditetapkan akan dijadikan sebagai solusi dari *waypoint* yang diproses. Hingga tahap ini maka jumlah drone yang telah menemukan rute terbaik untuk membentuk formasi berikutnya bertambah satu.
14. Jika belum semua unit drone menemukan rute terbaiknya maka proses dilanjutkan dengan menjalankan kembali proses dari tahap ke-2. Jika semua drone telah menemukan rute terbaik maka proses pencarian rute terbaik dan *waypoint* terbaik untuk mempercepat pembentukan satu buah formasi dalam pertunjukkan pembentukan formasi drone telah selesai.

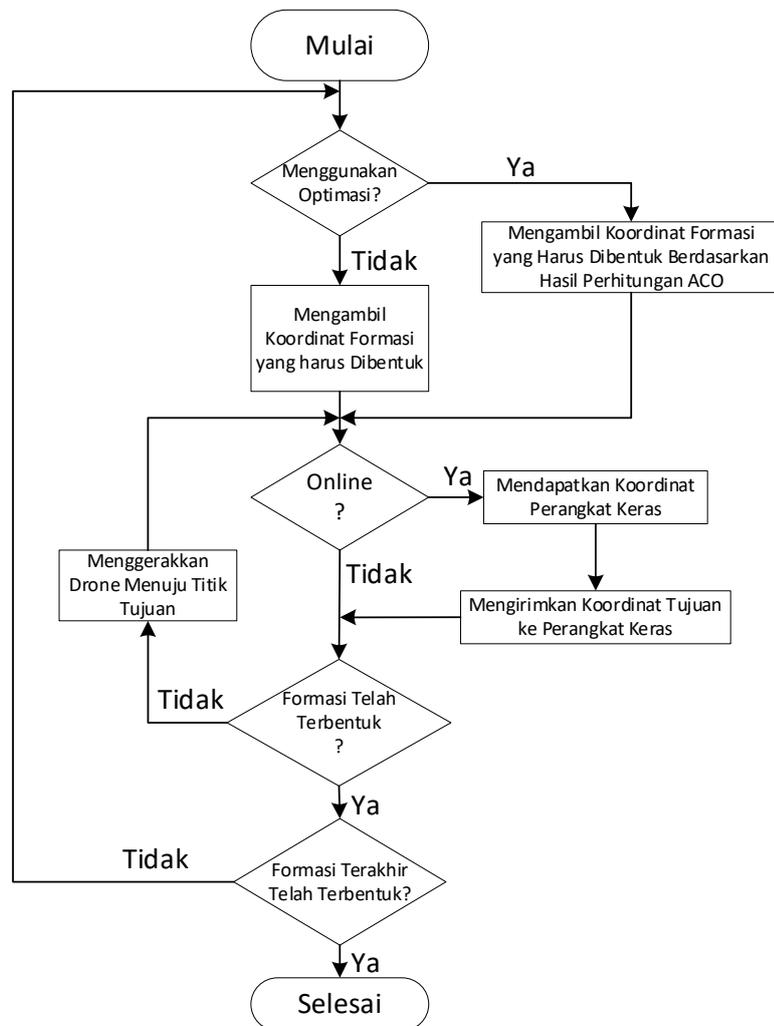
Jika terdapat lebih dari 1 formasi yang dibentuk maka tahap pencarian diulangi kembali dari tahap 1 hingga tahap akhir.

3.7 Pembentukan Formasi

Setelah menetapkan formasi yang akan ditampilkan, dan melakukan perhitungan ACO, pembentukan formasi sudah dapat dilakukan. Berikut ini adalah tahapan pembentukan formasi yang juga digambarkan dalam bentuk flowchart pada Gambar 3.20.

1. Dilakukan pemeriksaan, apakah hasil perhitungan ACO perlu digunakan atau tidak.

2. Jika menggunakan hasil perhitungan ACO maka seluruh data hasil perhitungan ACO akan diambil. Data hasil perhitungan berupa koordinat x, y, dan z yang harus dituju untuk membentuk formasi beserta arah pergerakan yang harus diselesaikan terlebih dahulu.
3. Jika tidak menggunakan hasil perhitungan ACO maka data yang digunakan sebagai acuan perpindahan adalah data yang dimasukkan oleh desainer. Pergerakan akan dilakukan dengan memenuhi koordinat z, kemudian koordinat y dan terakhir koordinat x.
4. Dilakukan pemeriksaan ada tidaknya perangkat drone yang terhubung dengan simulasi tersebut.



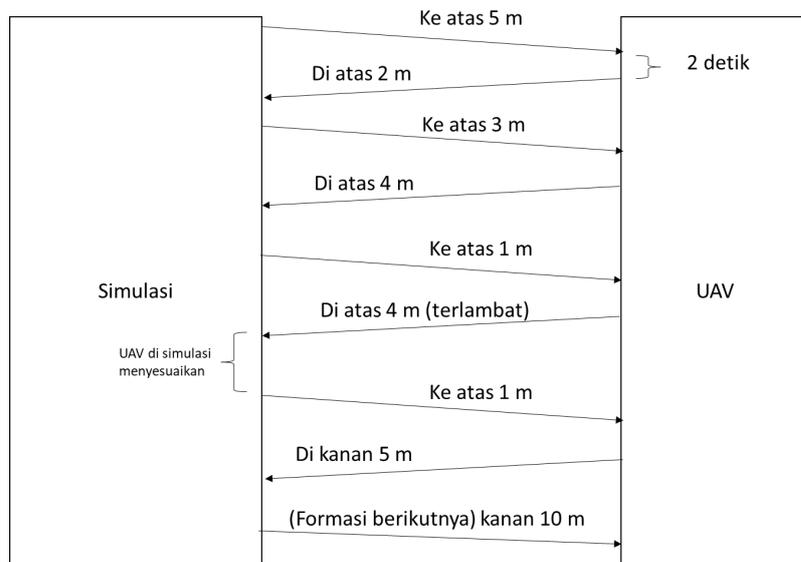
Gambar 3.20 *Flowchart* Pembentukan Formasi

5. Jika terdapat perangkat drone yang terhubung maka dilakukan pertukaran data. Dilakukan pertukaran data menggunakan paradigma DDDAS. Isi dari komunikasi ini akan dijabarkan pada subbab 3.8 mengenai penerapan DDDAS.
6. Proses dilanjutkan dengan pemeriksaan posisi setiap drone, apakah sudah mencapai titik tujuan atau belum. Jika seluruh drone telah mencapai titik tujuan maka formasi tersebut dikatakan telah terbentuk.
7. Jika formasi belum terbentuk maka seluruh drone pada simulasi yang tidak terhubung dengan perangkat drone yang sebenarnya akan digerakkan. Setelah pergerakan drone pada simulasi, alur program akan berulang lagi pada tahap nomer 5.
8. Jika formasi telah terbentuk akan dilakukan pemeriksaan apakah semua formasi yang telah dirancang telah dibentuk.
9. Jika masih terdapat formasi yang perlu dibentuk maka simulasi akan dilanjutkan untuk membentuk formasi tersebut. Alur program kembali ke tahap nomer 1.
10. Jika seluruh formasi telah dibentuk maka simulasi tersebut telah selesai dikerjakan dan simulasi dihentikan.

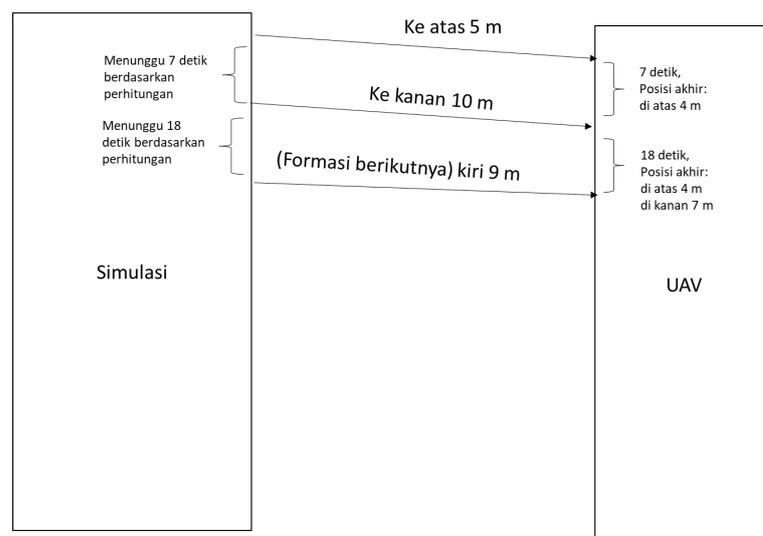
3.8 Penerapan DDDAS

Paradigma DDDAS mengharuskan terjadinya komunikasi 2 arah. Komunikasi yang terjadi adalah antara simulasi dengan perangkat keras atau drone dalam pembentukan formasi drone ini. Komunikasi dari simulasi ke drone berisikan jarak yang harus ditempuh beserta arahnya. Komunikasi dari drone ke simulasi berisikan jarak yang telah ditempuh. Dengan komunikasi dua arah tersebut diharapkan pergerakan drone akan selaras dengan pergerakan di simulasi, begitu juga sebaliknya. Jika tidak menggunakan paradigma DDDAS ini atau hanya melakukan komunikasi satu arah maka dapat terjadinya kegagalan dalam simulasi ataupun pada kondisi di lapangan. Kegagalan yang dimaksud adalah ketika drone pada simulasi telah mencapai *waypoint* yang harus dituju berdasarkan perhitungan

waktu, simulasi akan mulai membentuk formasi berikutnya dan mengirimkan posisi berikutnya ke drone di lapangan, namun kondisi di lapangan tidak demikian, drone mengalami perlambatan karena suatu hal yang menyebabkan drone belum mencapai *waypoint* yang harus dituju untuk membentuk formasi sebelumnya. Dengan dikirimkan posisi yang baru ini maka drone akan menuju formasi berikutnya dengan jarak perpindahan yang tidak tepat. Kejadian ini mengakibatkan formasi-formasi di lapangan gagal dibentuk.



Gambar 3.21 Ilustrasi Komunikasi Dua Arah



Gambar 3.22 Ilustrasi Komunikasi Satu Arah

Seperti pada ilustrasi komunikasi dua arah yang ditunjukkan oleh Gambar 3.21, jika terjadi keterlambatan atau pergerakan drone yang lebih cepat di lapangan, drone pada simulasi akan mengimbangi posisi drone di lapangan. Pergerakan diusahakan selaras antara drone di lapangan dengan drone di simulasi yang merupakan pusat kendali. Berbeda dengan komunikasi satu arah yang diilustrasikan pada Gambar 3.22, komunikasi hanya terjadi 1 arah, drone di lapangan tidak dapat menginfokan keadaannya sehingga simulasi terus mengirimkan arahan berdasarkan pada kondisi di simulasi. Pada ilustrasi terjadi selisih 1 meter vertikal dan 3 meter horisontal, jika pergerakan tersebut diteruskan maka formasi akan gagal terbentuk, bahkan dapat menyebabkan tabrakan antar drone.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan disampaikan hasil analisa dari setiap uji coba yang dilakukan serta melakukan pembahasan atas data-data yang didapatkan melalui percobaan. Sebelum menampilkan hasil yang didapatkan, terlebih dulu akan disajikan formasi-formasi yang akan dibentuk ketika dilakukan percobaan. Setelahnya akan disampaikan data-data hasil dari percobaan yang dilakukan.

Hasil percobaan yang pertama ditampilkan adalah lama waktu pembentukan formasi tanpa menggunakan metode optimasi, lama waktu perhitungan metode optimasi, lama waktu pembentukan formasi dengan menggunakan metode optimasi, dan selisih antara waktu pembentukan formasi tanpa menggunakan metode optimasi dengan waktu pembentukan formasi dengan menggunakan metode optimasi. Hasil percobaan kedua yang ditampilkan adalah total jarak yang ditempuh tanpa menggunakan metode optimasi, jarak terjauh yang ditempu drone tanpa menggunakan metode optimasi, total jarak yang ditempuh dengan menggunakan metode optimasi, jarak terjauh yang ditempuh drone dengan menggunakan metode optimasi. Hasil percobaan ketiga akan menunjukkan tingkat keberagaman solusi ketika menggunakan metode optimasi. Setiap selesai menampilkan hasil percobaan, disajikan pembahasan mengenai hasil yang didapatkan. Hasil percobaan keempat yang ditampilkan adalah pembahasan paradigma DDDAS yang menghubungkan antara perangkat keras dengan program simulasi yang dirancang. Perangkat keras yang digunakan dalam uji coba ini adalah sebanyak satu buah perangkat keras, namun jumlah drone yang disimulasikan berjumlah 3 unit drone. Hasil percobaan kelima adalah pengaruh angin terhadap waktu pembentukan formasi.

Dikarenakan pandemi Covid-19 yang melanda ketika masa uji coba alat, maka uji coba terhadap perangkat keras yang harusnya adalah drone akan digantikan menggunakan *dummy hardware*. *Dummy hardware* merupakan sebuah perangkat mikrokontroler statis dengan 4 buah tombol dan tiga buah lampu LED.

Empat buah tombol pada dummy hardware akan digunakan untuk mengubah nilai variabel yang merupakan variabel posisi drone (*latitude, longitude, altitude*), LED digunakan sebagai indikator yang akan menyala ketika posisi yang diinginkan telah tercapai. *Dummy hardware* juga dapat melakukan komunikasi dengan *ground station* untuk melakukan pertukaran data posisi yang harus dituju dan juga posisi drone saat ini. Uji coba dengan *hardware* ini digunakan untuk memastikan bahwa sistem tersebut dapat diterapkan ke perangkat sebenarnya, sehingga uji coba akan dilakukan pada sebuah *dummy hardware* yang akan menerima dan mengirimkan informasi mengenai posisi terakhirnya kepada *ground station*. Hasil yang didapatkan dari percobaan menggunakan *hardware* adalah kesanggupan drone dalam menerima dan mengirimkan data secara *real-time* dan dapat mempengaruhi simulasi, serta tingkat kesesuaian drone mengikuti gerakan yang ada di dalam simulasi.

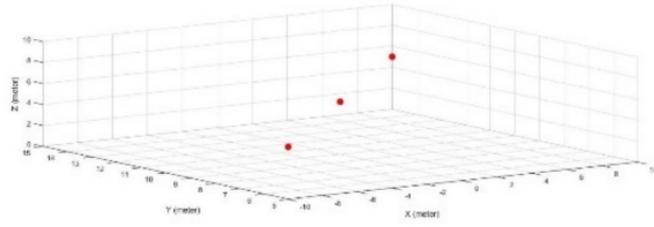
4.1 Formasi yang Dibentuk

Berikut adalah formasi yang dibentuk ketika dilakukan uji coba menggunakan simulasi. Nilai koordinat yang dicantumkan berpusat pada *ground station* sehingga area terbang pada simulator memiliki radius 100 meter di sekitar *ground station*.

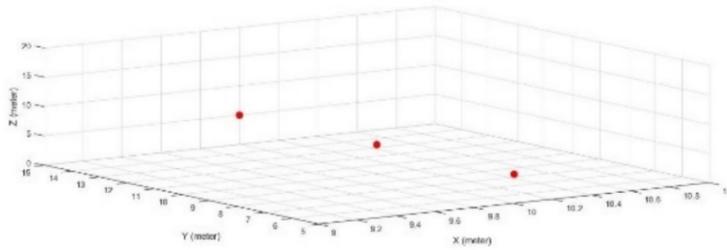
Deretan formasi 1 hingga 6 digunakan untuk menguji kehandalan metode optimasi dalam menangani pencarian rute terbaik ketika melibatkan sejumlah drone, dari jumlah yang sedikit hingga jumlah yang cukup banyak. Deretan formasi 7 dan 9 digunakan untuk menguji kehandalan metode ketika terdapat sejumlah pola yang harus dibentuk secara berurutan. Deretan formasi 10 hingga 15 digunakan untuk melihat kehandalan metode ketika digunakan untuk menentukan rute terbaik untuk membentuk pola yang kompleks atau pola dengan urutan yang tidak beraturan.

4.1.1 Deretan formasi 1: 3 unit drone, 2 bentuk formasi sederhana

Deret formasi 1 ini melibatkan 3 buah drone dalam pembentukan formasi, dan deret formasi ini terdiri dari 2 bentuk formasi.



Gambar 4.1 Deretan 1 Formasi 1



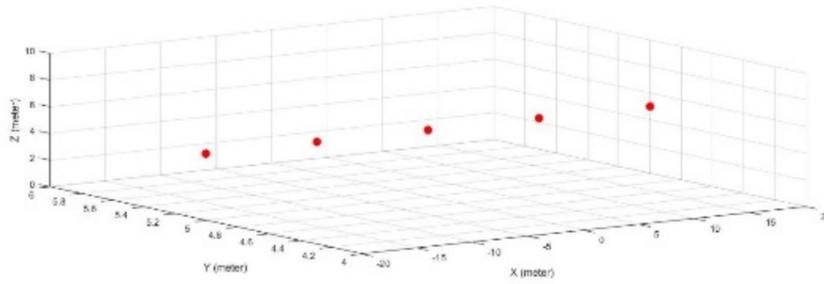
Gambar 4.2 Deretan 1 Formasi 2

Tabel 4.1 Posisi drone pada Uji Coba Deretan 1

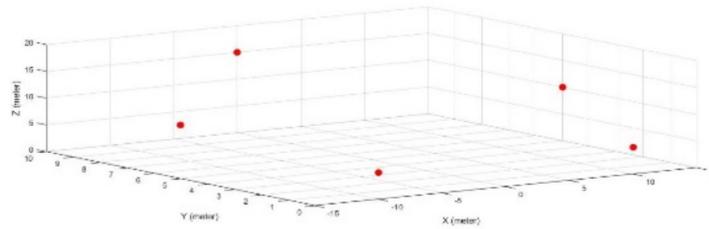
Formasi 1			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	5	5	5
Drone 2	10	10	5
Drone 3	15	15	5
Formasi 2			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	10	15	5
Drone 2	10	10	5
Drone 3	10	5	5

4.1.2 Deretan formasi 2: 5 unit drone, 2 bentuk formasi sederhana

Deret formasi 2 ini melibatkan 5 buah drone dalam pembentukan formasi, dan deret formasi ini terdiri dari 3 bentuk formasi.



Gambar 4.3 Deretan 2 Formasi 1



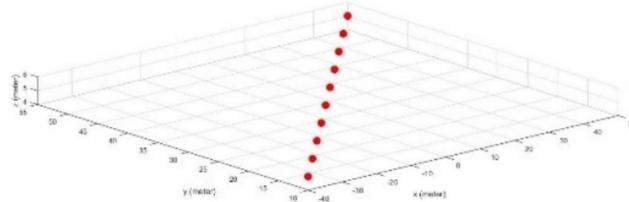
Gambar 4.4 Deretan 2 Formasi 2

Tabel 4.2 Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 2

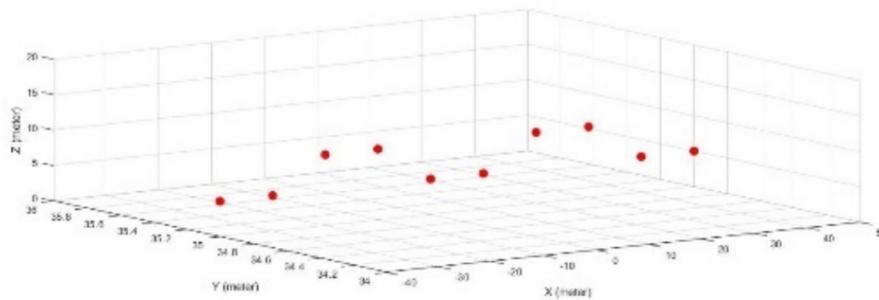
Formasi 1			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-20	5	5
Drone 2	-10	5	5
Drone 3	0	5	5
Drone 4	10	5	5
Drone 5	20	5	5
Formasi 2			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	0	10	15
Drone 2	-15	5	10
Drone 3	15	5	10
Drone 4	-10	0	5
Drone 5	10	0	5

4.1.3 Deretan formasi 3: 10 unit drone, 2 bentuk formasi sederhana

Deret formasi 3 ini melibatkan 10 buah drone dalam pembentukan formasi, dan deret formasi ini terdiri dari 2 bentuk formasi.



Gambar 4.5 Deretan 3 Formasi 1



Gambar 4.6 Deretan 3 Formasi 2

Tabel 4.3 Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 3

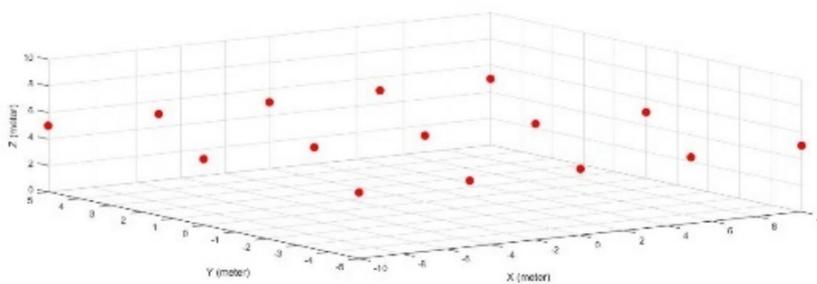
Formasi 1			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-40	10	5
Drone 2	-30	15	5
Drone 3	-20	20	5
Drone 4	-10	25	5
Drone 5	0	30	5
Drone 6	10	35	5
Drone 7	20	40	5
Drone 8	30	45	5

Tabel 4.3 (Lanjutan)

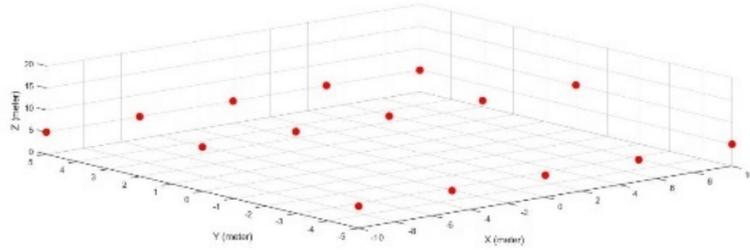
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 9	40	50	5
Drone 10	50	55	5
Formasi 2			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-40	35	5
Drone 2	-30	35	5
Drone 3	-20	35	10
Drone 4	-10	35	10
Drone 5	0	35	5
Drone 6	10	35	5
Drone 7	20	35	10
Drone 8	30	35	10
Drone 9	40	35	5
Drone 10	50	35	5

4.1.4 Deretan formasi 4: 15 unit drone, 2 bentuk formasi sederhana

Deret formasi 4 ini melibatkan 15 buah drone dalam pembentukan formasi, dan deret formasi ini terdiri dari 2 bentuk formasi.



Gambar 4.7 Deretan 4 Formasi 1



Gambar 4.8 Deretan 4 Formasi 2

Tabel 4.4 Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 4

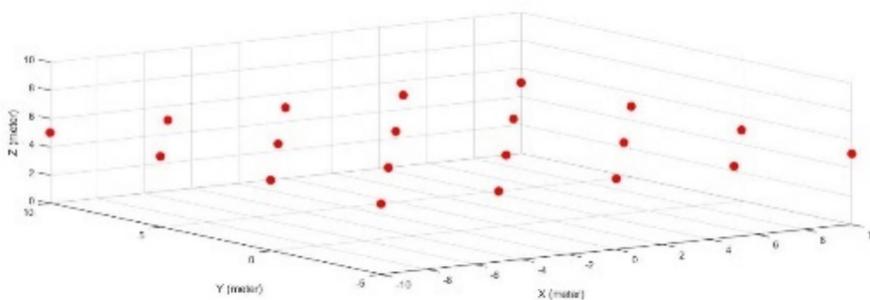
Formasi 1			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-10	-5	5
Drone 2	-5	-5	5
Drone 3	0	-5	5
Drone 4	5	-5	5
Drone 5	10	-5	5
Drone 6	-10	0	5
Drone 7	-5	0	5
Drone 8	0	0	5
Drone 9	5	0	5
Drone 10	10	0	5
Drone 11	-10	5	5
Drone 12	-5	5	5
Drone 13	0	5	5
Drone 14	5	5	5
Drone 15	10	5	5
Formasi 2			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-10	-5	5

Tabel 4.4 (Lanjutan)

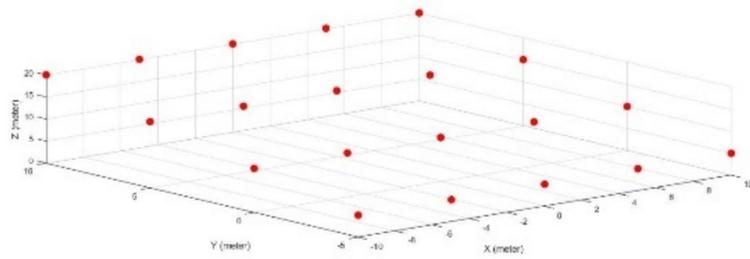
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 2	-5	-5	5
Drone 3	0	-5	5
Drone 4	5	-5	5
Drone 5	10	-5	5
Drone 6	-10	0	10
Drone 7	-5	0	10
Drone 8	0	0	10
Drone 9	5	0	10
Drone 10	10	0	10
Drone 11	-10	5	5
Drone 12	-5	5	5
Drone 13	0	5	5
Drone 14	5	5	5
Drone 15	10	5	5

4.1.5 Deretan formasi 5: 20 unit drone, 2 bentuk formasi sederhana

Deret formasi 4 ini melibatkan 20 buah drone dalam pembentukan formasi, dan deret formasi ini terdiri dari 2 bentuk formasi.



Gambar 4.9 Deretan 5 Formasi 1



Gambar 4.10 Deretan 5 Formasi 2

Tabel 4.5 Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 5

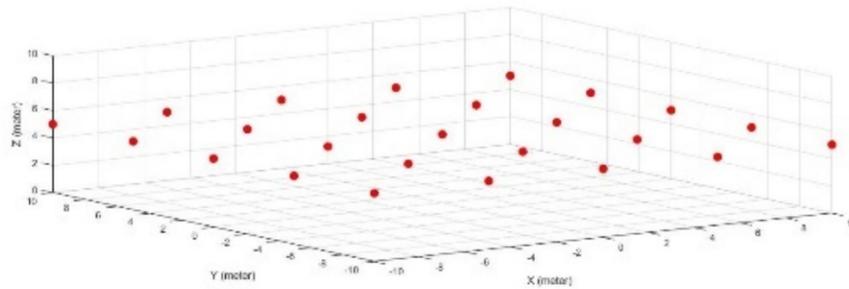
Formasi 1			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-10	-5	5
Drone 2	-5	-5	5
Drone 3	0	-5	5
Drone 4	5	-5	5
Drone 5	10	-5	5
Drone 6	-10	0	5
Drone 7	-5	0	5
Drone 8	0	0	5
Drone 9	5	0	5
Drone 10	10	0	5
Drone 11	-10	5	5
Drone 12	-5	5	5
Drone 13	0	5	5
Drone 14	5	5	5
Drone 15	10	5	5
Drone 16	-10	10	5
Drone 17	-5	10	5
Drone 18	0	10	5

Tabel 4.5 (Lanjutan)

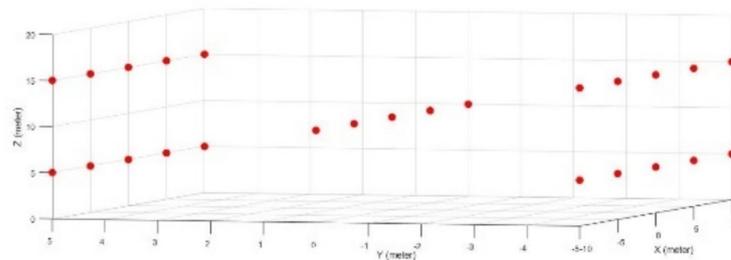
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 19	5	10	5
Drone 20	10	10	5
Formasi 2			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-10	-5	-5
Drone 2	-5	-5	-5
Drone 3	0	-5	-5
Drone 4	5	-5	-5
Drone 5	10	-5	-5
Drone 6	-10	0	0
Drone 7	-5	0	0
Drone 8	0	0	0
Drone 9	5	0	0
Drone 10	10	0	0
Drone 11	-10	5	5
Drone 12	-5	5	5
Drone 13	0	5	5
Drone 14	5	5	5
Drone 15	10	5	5
Drone 16	-10	10	10
Drone 17	-5	10	10
Drone 18	0	10	10
Drone 19	5	10	10
Drone 20	10	10	10

4.1.6 Deretan formasi 6: 25 unit drone, 2 bentuk formasi sederhana

Deret formasi 6 ini melibatkan 25 buah drone dalam pembentukan formasi, dan deret formasi ini terdiri dari 2 bentuk formasi.



Gambar 4.11 Deretan 6 Formasi 1



Gambar 4.12 Deretan 6 Formasi 2

Tabel 4.6 Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 6

Formasi 1			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-10	-5	5
Drone 2	-5	-5	5
Drone 3	0	-5	5
Drone 4	5	-5	5
Drone 5	10	-5	5
Drone 6	-10	0	5
Drone 7	-5	0	5
Drone 8	0	0	5
Drone 9	5	0	5

Tabel 4.6 (Lanjutan)

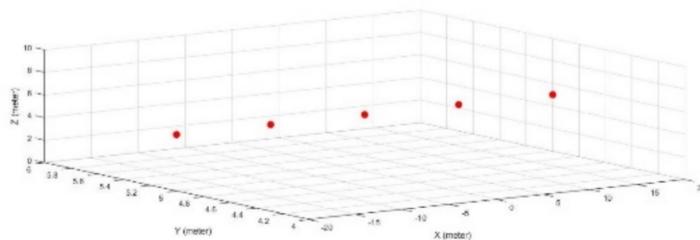
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 10	10	0	5
Drone 11	-10	5	5
Drone 12	-5	5	5
Drone 13	0	5	5
Drone 14	5	5	5
Drone 15	10	5	5
Drone 16	-10	10	5
Drone 17	-5	10	5
Drone 18	0	10	5
Drone 19	5	10	5
Drone 20	10	10	5
Drone 21	-10	-10	5
Drone 22	-5	-10	5
Drone 23	0	-10	5
Drone 24	5	-10	5
Drone 25	10	-10	5
Formasi 2			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-10	-5	5
Drone 2	-5	-5	5
Drone 3	0	-5	5
Drone 4	5	-5	5
Drone 5	10	-5	5
Drone 6	-10	-5	15
Drone 7	-5	-5	15
Drone 8	0	-5	15

Tabel 4.6 (Lanjutan)

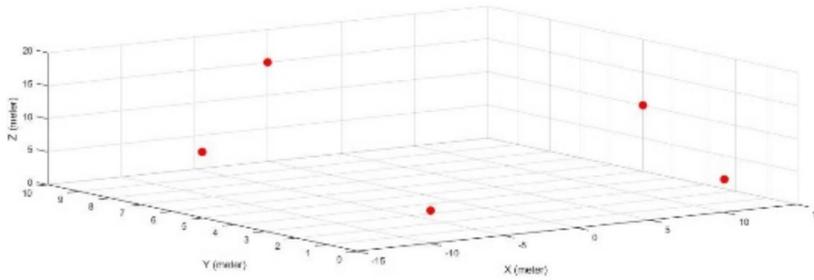
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 9	5	-5	15
Drone 10	10	-5	15
Drone 11	-10	0	10
Drone 12	-5	0	10
Drone 13	0	0	10
Drone 14	5	0	10
Drone 15	10	0	10
Drone 16	-10	5	15
Drone 17	-5	5	15
Drone 18	0	5	15
Drone 19	5	5	15
Drone 20	10	5	15
Drone 21	-10	5	5
Drone 22	-5	5	5
Drone 23	0	5	5
Drone 24	5	5	5
Drone 25	10	5	5

4.1.7 Deretan formasi 7: 5 unit drone, 3 bentuk formasi sederhana

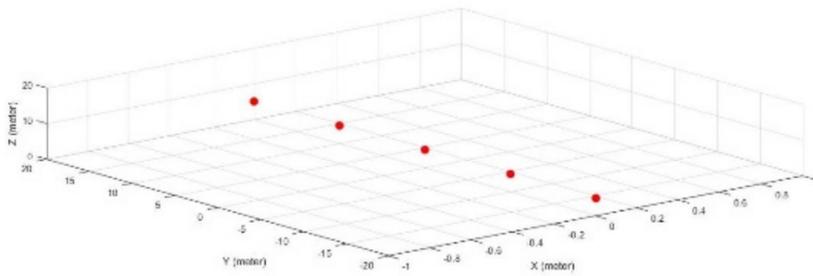
Deret formasi 7 ini melibatkan 5 buah drone dalam pembentukan formasi, dan deret formasi ini terdiri dari 3 bentuk formasi.



Gambar 4.13 Deretan 7 Formasi 1



Gambar 4.14 Deretan 7 Formasi 2



Gambar 4.15 Deretan 7 Formasi 3

Tabel 4.7 Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 7

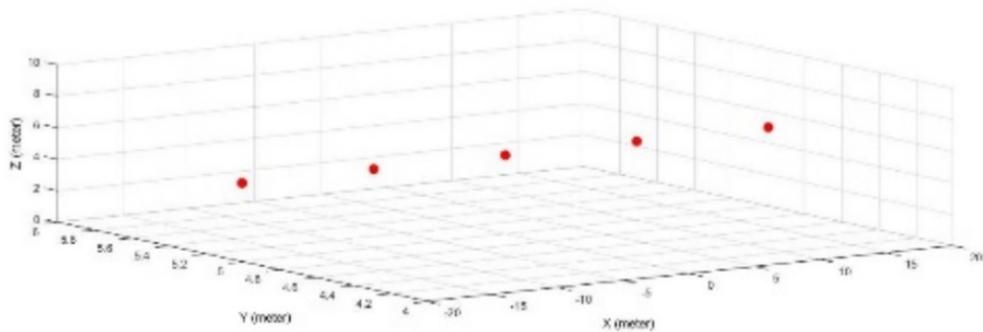
Formasi 1			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-20	5	5
Drone 2	-10	5	5
Drone 3	0	5	5
Drone 4	10	5	5
Drone 5	20	5	5
Formasi 2			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	0	10	15
Drone 2	-15	5	10
Drone 3	15	5	10
Drone 4	-10	0	5

Tabel 4.7 (Lanjutan)

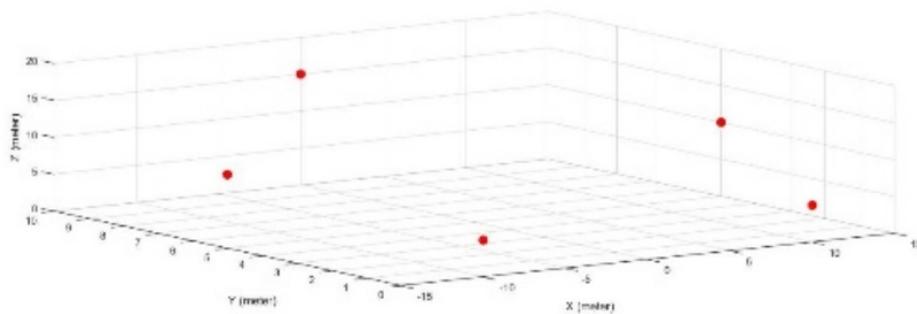
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 5	10	0	5
Formasi 3			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	0	-20	5
Drone 2	0	-10	5
Drone 3	0	0	5
Drone 4	0	10	5
Drone 5	0	20	5

4.1.8 Deretan formasi 8: 5 unit drone, 4 bentuk formasi sederhana

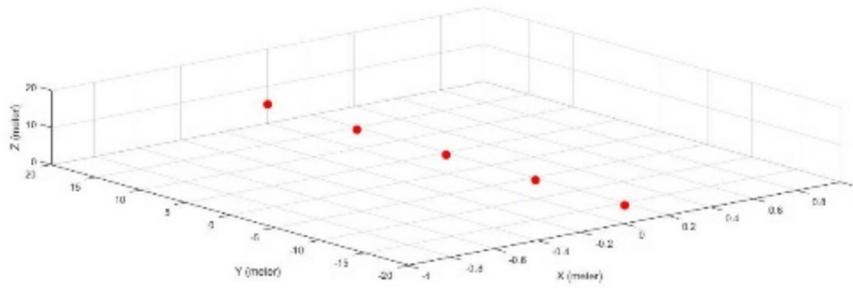
Deret formasi 8 ini melibatkan 5 buah drone dalam pembentukan formasi, dan deret formasi ini terdiri dari 4 bentuk formasi.



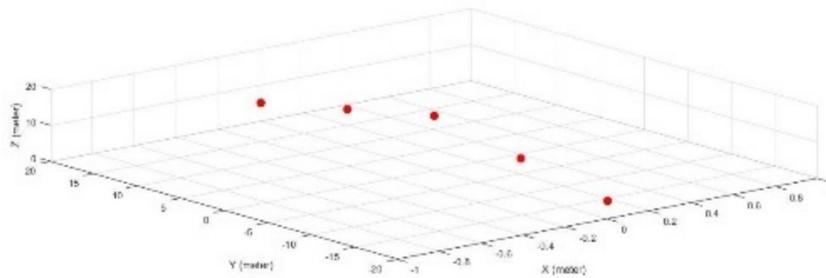
Gambar 4.16 Deretan 8 Formasi 1



Gambar 4.17 Deretan 8 Formasi 2



Gambar 4.18 Deretan 8 Formasi 3



Gambar 4.19 Deretan 8 Formasi 4

Tabel 4.8 Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 8

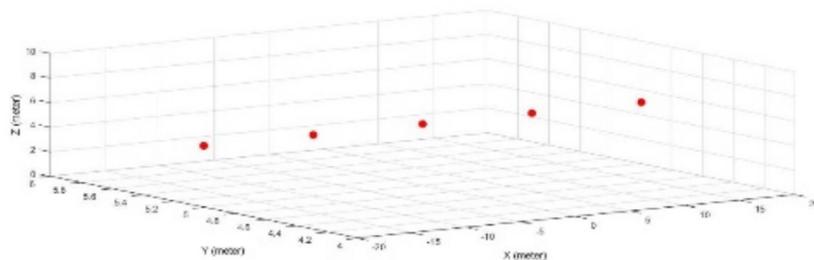
Formasi 1			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-20	5	5
Drone 2	-10	5	5
Drone 3	0	5	5
Drone 4	10	5	5
Drone 5	20	5	5
Formasi 2			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	0	10	15
Drone 2	-15	5	10
Drone 3	15	5	10
Drone 4	-10	0	5

Tabel 4.8 (Lanjutan)

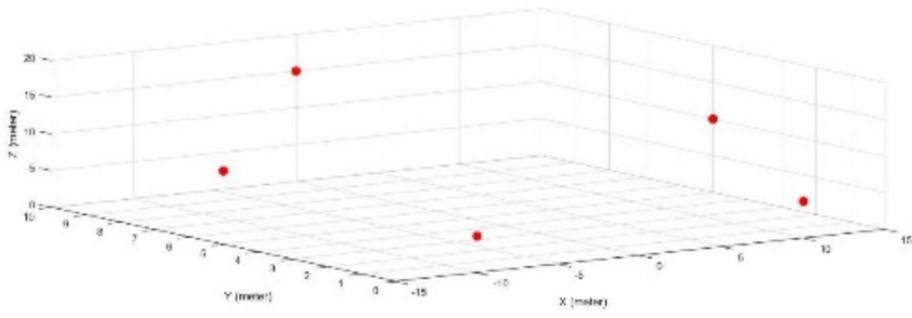
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 5	10	0	5
Formasi 3			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	0	-20	5
Drone 2	0	-10	5
Drone 3	0	0	5
Drone 4	0	10	5
Drone 5	0	20	5
Formasi 4			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	0	-20	5
Drone 2	0	-10	10
Drone 3	0	0	15
Drone 4	0	10	10
Drone 5	0	20	5

4.1.9 Deretan formasi 9: 5 unit drone, 5 bentuk formasi sederhana

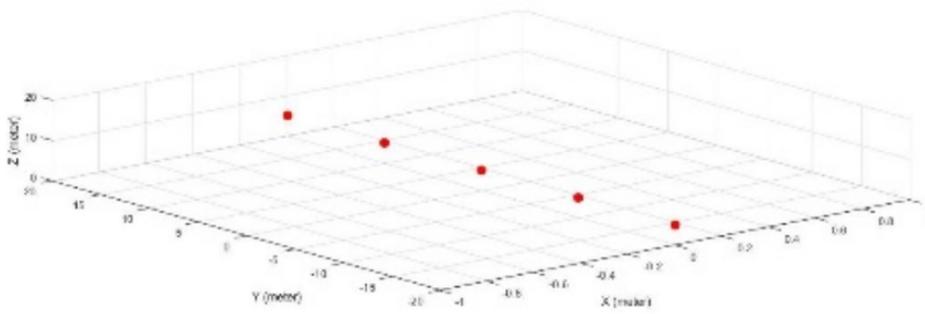
Deret formasi 9 ini melibatkan 5 buah drone dalam pembentukan formasi, dan deret formasi ini terdiri dari 5 bentuk formasi.



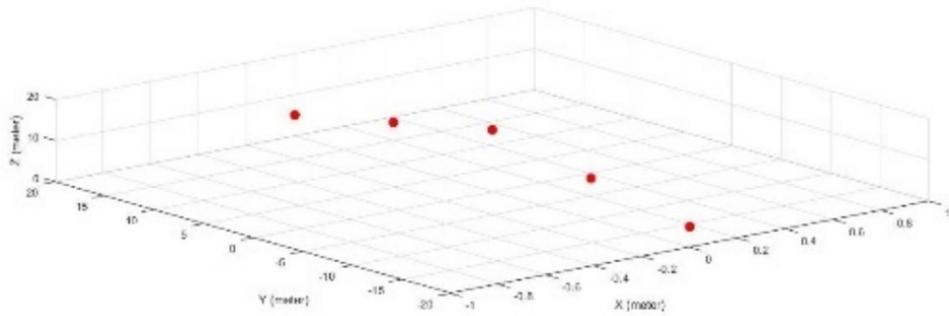
Gambar 4.20 Deretan 9 Formasi 1



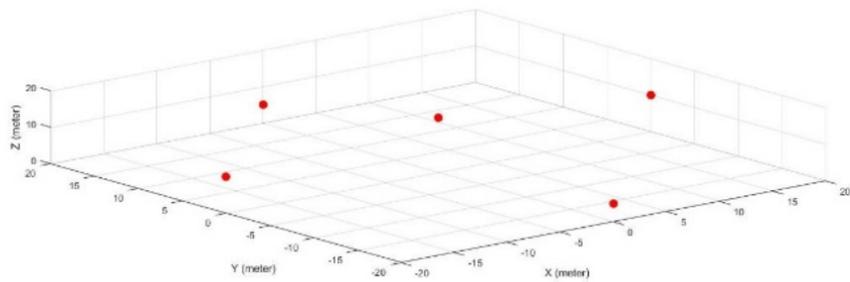
Gambar 4.21 Deretan 9 Formasi 2



Gambar 4.22 Deretan 9 Formasi 3



Gambar 4.23 Deretan 9 Formasi 4



Gambar 4.24 Deretan 9 Formasi 5

Tabel 4.9 Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 9

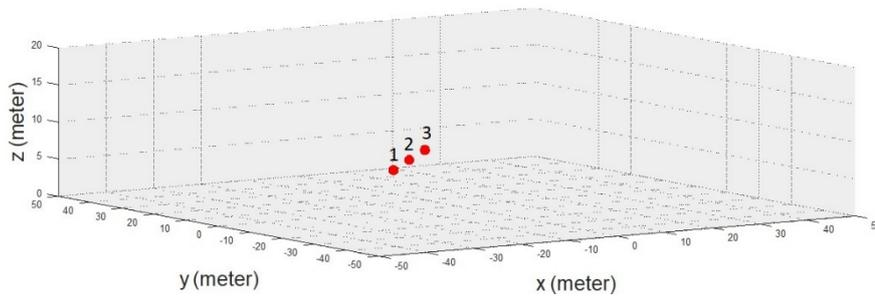
Formasi 1			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-20	5	5
Drone 2	-10	5	5
Drone 3	0	5	5
Drone 4	10	5	5
Drone 5	20	5	5
Formasi 2			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	0	10	15
Drone 2	-15	5	10
Drone 3	15	5	10
Drone 4	-10	0	5
Drone 5	10	0	5
Formasi 3			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	0	-20	5
Drone 2	0	-10	5
Drone 3	0	0	5
Drone 4	0	10	5
Drone 5	0	20	5
Formasi 4			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	0	-20	5
Drone 2	0	-10	10
Drone 3	0	0	15
Drone 4	0	10	10

Tabel 4.9 (Lanjutan)

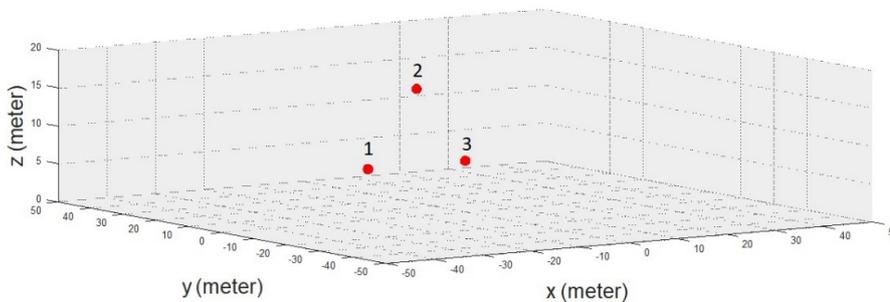
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 5	0	20	5
Formasi 4			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	0	20	5
Drone 2	-20	0	10
Drone 3	0	-20	5
Drone 4	20	0	10
Drone 5	0	0	15

4.1.10 Deretan formasi 10: 3 unit drone, 2 bentuk formasi kompleks

Deret formasi 10 ini melibatkan 3 buah drone dalam pembentukan formasi, dan deret formasi ini terdiri dari 2 bentuk formasi kompleks.



Gambar 4.25 Deretan 10 Formasi 1



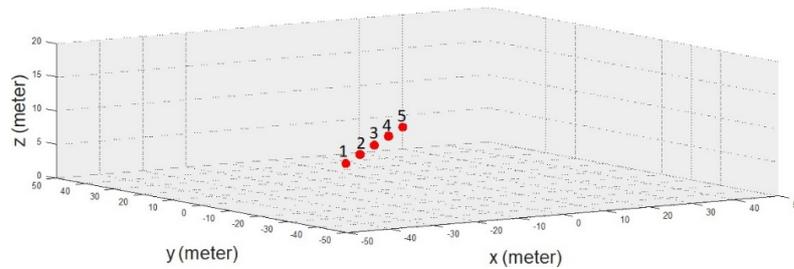
Gambar 4.26 Deretan 10 Formasi 2

Tabel 4.10 Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 10

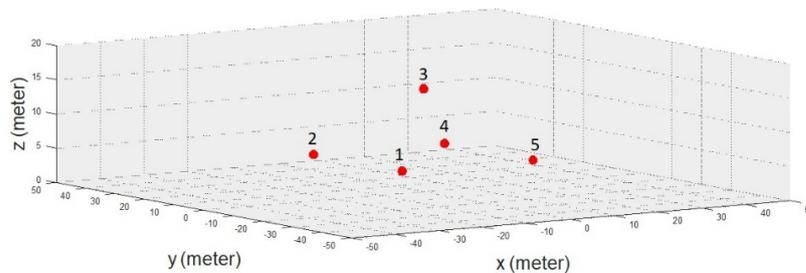
Formasi 1			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-10	5	5
Drone 2	0	15	5
Drone 3	10	25	5
Formasi 2			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-10	15	5
Drone 2	0	15	15
Drone 3	10	15	5

4.1.11 Deretan formasi 11: 5 unit drone, 2 bentuk formasi kompleks

Deret formasi 11 ini melibatkan 5 buah drone dalam pembentukan formasi, dan deret formasi ini terdiri dari 2 bentuk formasi kompleks.



Gambar 4.27 Deretan 11 Formasi 1



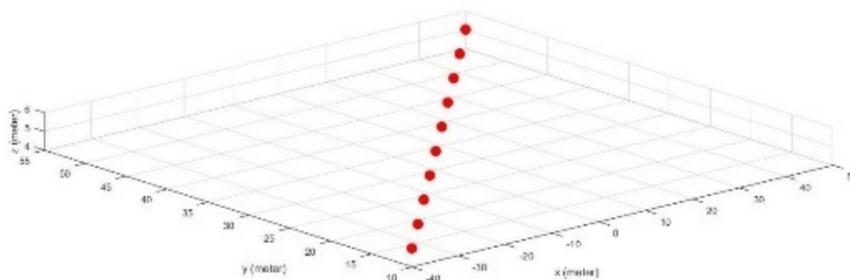
Gambar 4.28 Deretan 11 Formasi 2

Tabel 4.11 Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 11

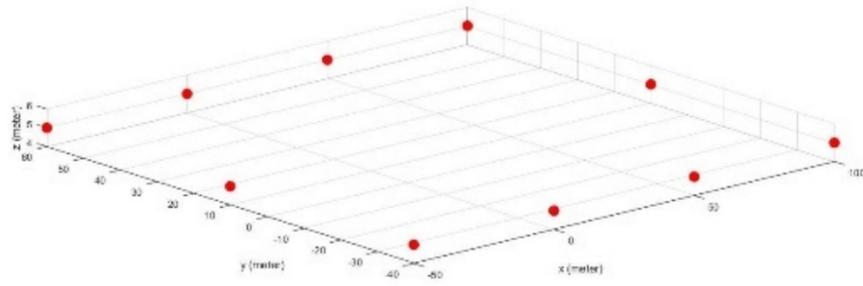
Formasi 1			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-10	5	5
Drone 2	-5	15	5
Drone 3	0	25	5
Drone 4	5	35	5
Drone 5	10	45	5
Formasi 2			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-10	-10	5
Drone 2	-10	10	5
Drone 3	0	0	15
Drone 4	10	10	5
Drone 5	10	-10	5

4.1.12 Deretan formasi 12: 10 unit drone, 2 bentuk formasi kompleks

Deret formasi 12 ini melibatkan 10 buah drone dalam pembentukan formasi, dan deret formasi ini terdiri dari 2 bentuk formasi kompleks.



Gambar 4.29 Deretan 12 Formasi 1



Gambar 4.30 Deretan 12 Formasi 2

Tabel 4.12 Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 12

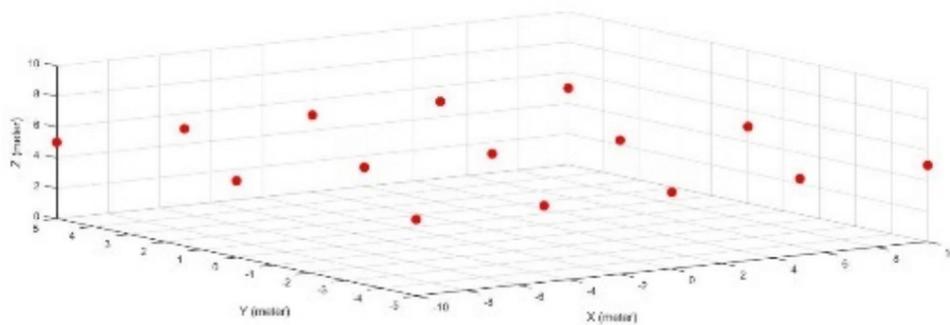
Formasi 1			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-40	10	5
Drone 2	-30	15	5
Drone 3	-20	20	5
Drone 4	-10	25	5
Drone 5	0	30	5
Drone 6	10	35	5
Drone 7	20	40	5
Drone 8	30	45	5
Drone 9	40	50	5
Drone 10	50	55	5
Formasi 2			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-50	60	5
Drone 2	0	60	5
Drone 3	50	60	5
Drone 4	100	60	5
Drone 5	100	10	5

Tabel 4.12 (Lanjutan)

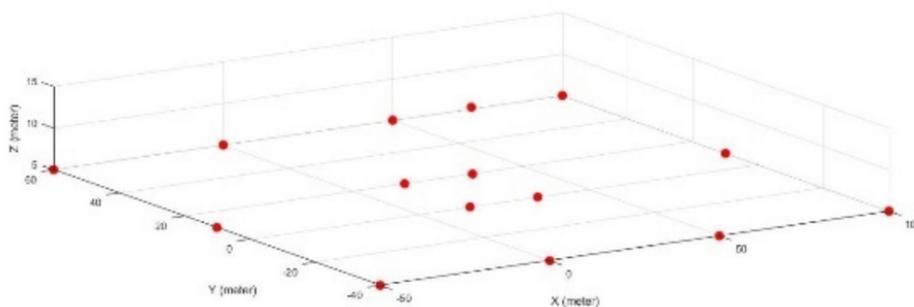
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 6	100	-40	5
Drone 7	50	-40	5
Drone 8	0	-40	5
Drone 9	-50	-40	5
Drone 10	-50	10	5

4.1.13 Deretan formasi 13: 15 unit drone, 2 bentuk formasi kompleks

Deret formasi 13 ini melibatkan 15 buah drone dalam pembentukan formasi, dan deret formasi ini terdiri dari 2 bentuk formasi kompleks.



Gambar 4.31 Deretan 13 Formasi 1



Gambar 4.32 Deretan 13 Formasi 2

Tabel 4.13 Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 13

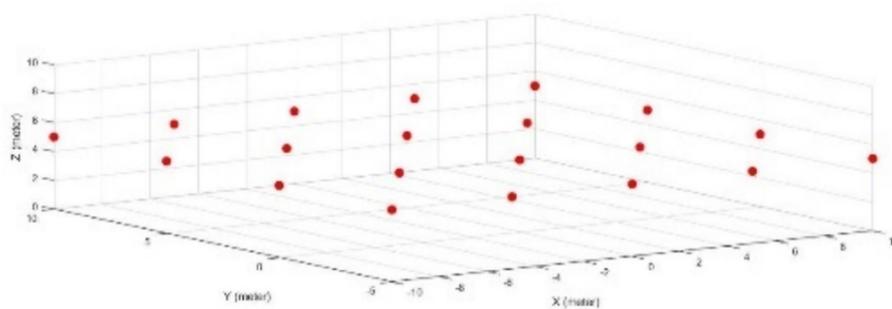
Formasi 1			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-10	-5	5
Drone 2	-5	-5	5
Drone 3	0	-5	5
Drone 4	5	-5	5
Drone 5	10	-5	5
Drone 6	-10	0	5
Drone 7	-5	0	5
Drone 8	0	0	5
Drone 9	5	0	5
Drone 10	10	0	5
Drone 11	-10	5	5
Drone 12	-5	5	5
Drone 13	0	5	5
Drone 14	5	5	5
Drone 15	10	5	5
Formasi 2			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-50	60	5
Drone 2	0	60	5
Drone 3	50	60	5
Drone 4	100	60	5
Drone 5	100	10	5
Drone 6	100	-40	5
Drone 7	50	-40	5
Drone 8	0	-40	5

Tabel 4.13 (Lanjutan)

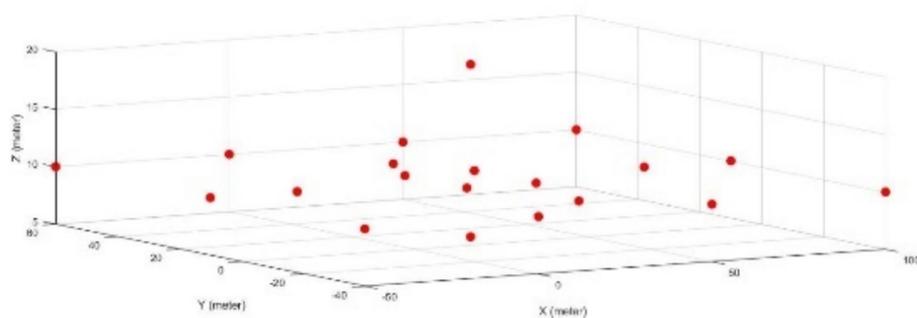
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 9	-50	-40	5
Drone 10	-50	10	5
Drone 11	15	0	5
Drone 12	15	20	5
Drone 13	25	10	15
Drone 14	35	20	5
Drone 15	35	0	5

4.1.14 Deretan formasi 14: 20 unit drone, 2 bentuk formasi kompleks

Deret formasi 14 ini melibatkan 20 buah drone dalam pembentukan formasi, dan deret formasi ini terdiri dari 2 bentuk formasi kompleks.



Gambar 4.33 Deretan 14 Formasi 1



Gambar 4.34 Deretan 14 Formasi 2

Tabel 4.14 Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 14

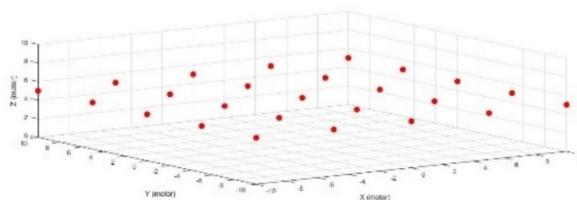
Formasi 1			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-10	-5	5
Drone 2	-5	-5	5
Drone 3	0	-5	5
Drone 4	5	-5	5
Drone 5	10	-5	5
Drone 6	-10	0	5
Drone 7	-5	0	5
Drone 8	0	0	5
Drone 9	5	0	5
Drone 10	10	0	5
Drone 11	-10	5	5
Drone 12	-5	5	5
Drone 13	0	5	5
Drone 14	5	5	5
Drone 15	10	5	5
Drone 16	-10	10	5
Drone 17	-5	10	5
Drone 18	0	10	5
Drone 19	5	10	5
Drone 20	10	10	5
Formasi 2			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-50	60	10
Drone 2	0	60	10
Drone 3	50	60	10

Tabel 4.14 (Lanjutan)

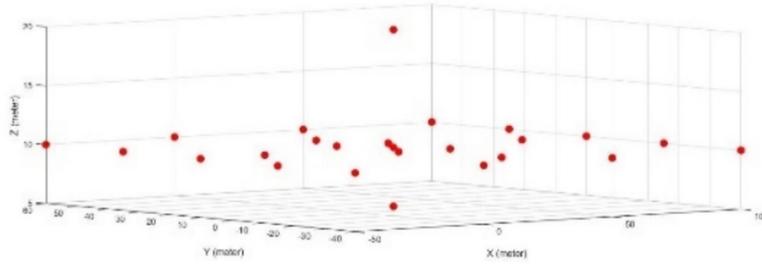
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 4	100	60	10
Drone 5	100	10	10
Drone 6	100	-40	10
Drone 7	50	-40	10
Drone 8	0	-40	10
Drone 9	-50	-40	10
Drone 10	-50	10	10
Drone 11	15	0	10
Drone 12	15	20	10
Drone 13	25	10	20
Drone 14	35	20	10
Drone 15	35	0	10
Drone 16	-25	10	10
Drone 17	25	35	10
Drone 18	75	10	10
Drone 19	25	-25	10
Drone 20	25	10	5

4.1.15 Deretan formasi 15: 25 unit drone, 2 bentuk formasi kompleks

Deret formasi 15 ini melibatkan 25 buah drone dalam pembentukan formasi, dan deret formasi ini terdiri dari 2 bentuk formasi kompleks.



Gambar 4.35 Deretan 15 Formasi 1



Gambar 4.36 Deretan 15 Formasi 2

Tabel 4.15 Posisi Drone pada Uji Coba Deretan 15

Formasi 1			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-10	-5	5
Drone 2	-5	-5	5
Drone 3	0	-5	5
Drone 4	5	-5	5
Drone 5	10	-5	5
Drone 6	-10	0	5
Drone 7	-5	0	5
Drone 8	0	0	5
Drone 9	5	0	5
Drone 10	10	0	5
Drone 11	-10	5	5
Drone 12	-5	5	5
Drone 13	0	5	5
Drone 14	5	5	5
Drone 15	10	5	5
Drone 16	-10	10	5
Drone 17	-5	10	5
Drone 18	0	10	5

Tabel 4.15 (Lanjutan)

Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 19	5	10	5
Drone 20	10	10	5
Drone 21	-10	-10	5
Drone 22	-5	-10	5
Drone 23	0	-10	5
Drone 24	5	-10	5
Drone 25	10	-10	5
Formasi 2			
Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 1	-50	60	10
Drone 2	0	60	10
Drone 3	50	60	10
Drone 4	100	60	10
Drone 5	100	10	10
Drone 6	100	-40	10
Drone 7	50	-40	10
Drone 8	0	-40	10
Drone 9	-50	-40	10
Drone 10	-50	10	10
Drone 11	15	0	10
Drone 12	15	20	10
Drone 13	25	10	20
Drone 14	35	20	10
Drone 15	35	0	10
Drone 16	-25	10	10
Drone 17	25	35	10

Tabel 4.15 (Lanjutan)

Koordinat	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
Drone 18	75	10	10
Drone 19	25	-25	10
Drone 20	25	10	5
Drone 21	-50	35	10
Drone 22	100	35	10
Drone 23	100	-15	10
Drone 24	-50	-15	10
Drone 25	25	10	10

4.2 Hasil Percobaan Pertama

Pada bagian ini akan ditampilkan hasil uji coba simulasi yang meliputi lama waktu pembentukan formasi tanpa menggunakan metode optimasi, lama waktu perhitungan metode optimasi, lama waktu pembentukan formasi dengan menggunakan metode optimasi, dan selisih antara waktu pembentukan formasi tanpa menggunakan metode optimasi dengan waktu pembentukan formasi dengan menggunakan metode optimasi. Agar formasi semakin cepat dibentuk maka percepatan yang digunakan adalah percepatan maksimum.

Tabel 4.16 Tabel Perbandingan Waktu Tempuh Solusi yang Ditetapkan

Deretan	Waktu pembentukan tanpa optimasi	Waktu dengan Metode Optimasi			D-B
		Perhitungan	Terbang	Total	
(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)
1	5 s	14,817 ms	2 s	2,015 s	-3 s
2	11,5 s	38,305 ms	6,5 s	6,538 s	-5 s
3	6 s	31,924 ms	6 s	6,032 s	0
4	2,5 s	73,958 ms	2,5 s	2,574 s	0

Tabel 4.16 (Lanjutan)

Deretan	Waktu pembentukan tanpa optimasi	Waktu dengan Metode Optimasi			D-B
		Perhitungan	Terbang	Total	
(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)
5	4,5 s	345,827 ms	4,5 s	4,846 s	0
6	6,5 s	255,325 ms	6,5 s	6,755 s	0
7	25,467 s	59,5 ms	18,133 s	18,193 s	-7,334 s
8	31,967 s	88,114 ms	22,633 s	22,721 s	-9,334 s
9	47,934 s	115,706 ms	27 s	27,116 s	-20,934 s
10	4,5 s	65,273 ms	4,5 s	4,565 s	0
11	12 s	69,475 ms	12 s	12,069 s	0
12	38 s	95,586 ms	33 s	33,096 s	-5 s
13	34 s	116,282 ms	31 s	31,116 s	-3 s
14	36,5 s	439,744 ms	34,5 s	35,940 s	-2 s
15	36,5 s	539,427 ms	32,5 s	33,059 s	-4 s

Dari hasil percobaan terlihat bahwa waktu proses perhitungan ACO terbilang cukup singkat. Dari semua perhitungan yang dilakukan tidak ada yang mencapai perhitungan selama 1 detik. Ini menandakan ACO dapat mencari solusi dengan cepat namun, semakin banyak jumlah Drone yang berperan maka semakin lama waktu perhitungannya. Ketika membentuk formasi yang sederhana hasil metode optimasi tidak seberapa banyak berperan, dari 6 deretan formasi hanya 2 yang memberikan respon pengurangan waktu pembentuka formasi yang sederhana. Metode optimasi berperan cukup banyak ketika berkaitan dengan pembentukan formasi pada bentuk formasi yang kompleks. Walaupun hasil dari metode optimasi tidak banyak mengurangi waktu pembentukan formasi, namun bisa dilihat pada deretan 7 hingga 9, ketika terdapat banyak formasi dalam satu deretan formasi, pengaruh metode optimasi menjadi cukup besar dalam mengurangi waktu pembentukan formasi.

4.3 Hasil Percobaan Kedua

Pada bagian ini akan ditampilkan hasil uji coba simulasi yang meliputi total jarak yang ditempuh tanpa menggunakan metode optimasi, jarak terjauh yang ditempu drone tanpa menggunakan metode optimasi, total jarak yang ditempuh dengan menggunakan metode optimasi, jarak terjauh yang ditempuh drone dengan menggunakan metode optimasi.

Tabel 4.17 Tabel Perbandingan Jarak Solusi yang Ditetapkan

Deretan	Tanpa Optimasi		Dengan Optimasi	
	Total Jarak	Jarak Terjauh	Total Jarak	Jarak Terjauh
(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
1	30 m	15 m	10 m	5 m
2	105 m	35 m	45 m	15 m
3	145 m	25 m	145 m	25 m
4	25 m	5 m	25 m	5 m
5	100 m	10 m	100 m	10 m
6	270 m	15 m	270 m	15 m
10	30 m	10 m	30 m	10 m
11	145 m	55 m	145 m	50 m
12	1225 m	180 m	730 m	155 m
13	1185 m	160 m	1075 m	145 m
14	1495 m	165 m	1395 m	155 m
15	1955 m	165 m	1865 m	145 m

Dari hasil percobaan terlihat bahwa dengan menggunakan metode optimasi pemilihan rute berdasarkan jarak juga menjadi lebih baik. Seluruh rute yang dipilih menggunakan metode optimasi memiliki total jarak yang lebih kecil atau sama dengan rute yang dipilih menggunakan penomeran. Dapat dilihat bahwa kebanyakan rute pilihan metode optimasi memiliki panjang yang sama dengan

metode penomeran ketika formasi yang dibangun adalah formasi yang sederhana ataupun melibatkan jumlah drone yang sedikit. Jarak terjauh yang didapat juga tentunya tidak akan lebih dari jarak terjauh tanpa metode optimasi dikarenakan jarak terjauh menjadi patokan dalam menentukan waktu pembentukan formasi.

4.4 Hasil Percobaan Ketiga

Pada bagian ini akan ditampilkan hasil uji coba simulasi berupa tingkat keragaman solusi yang dihasilkan dengan metode optimasi. Uji coba telah dilakukan dengan melakukan pencarian solusi untuk deretetan formasi 2 sebanyak 5 kali dan pencarian solusi deretetan formasi 12 sebanyak 5 kali. Dari percobaan yang dilakukan didapatkan.

Tabel 4.18 Tabel Perbandingan Solusi yang Ditetapkan

Deretan Formasi 2					
Solusi ke	Lama perhitungan	Total perpindahan	Jarak terjauh	Waktu terbang	Variasi gerakan
1	38,305 ms	45 m	15 m	6,5 s	A
2	38,305 ms	55 m	15 m	6,5 s	B
3	60,491 ms	45 m	15 m	6,5 s	A
4	35,294 ms	55 m	15 m	6,5 s	C
5	37,157 ms	55 m	15 m	6,5 s	C
Deretan Formasi 12					
Solusi ke	Lama perhitungan	Total perpindahan	Jarak terjauh	Waktu terbang	Variasi gerakan
1	95,586 ms	730 m	155 m	33 s	A
2	88,158 ms	740 m	160 m	34 s	B
3	84,572 ms	730 m	155 m	33 s	C
4	96,554 ms	720 m	160 m	34 s	D
5	97,289 ms	740 m	160 m	34 s	B

Dari tabel percobaan ini dapat dilihat bahwa solusi yang dikelarkan cukup beragam. Pada deretan formasi 5, dari 5 kali solusi yang dicari terdapat 3 buah kombinasi rute yang berbeda. Semakin banyak jumlah drone yang terlibat kemungkinan kombinasi rute atau tingkat keragaman akan semakin meningkat, seperti yang terjadi pada pencarian solusi deretan formasi 12, dari 5 kali pencarian solusi terdapat 4 buah kombinasi rute yang berbeda.

4.5 Hasil Percobaan Keempat

Percobaan dilakukan dengan mensimulasikan deretan formasi 1. Salah satu dari drone pada simulasi akan diterapkan pada *dummy hardware* dan melakukan komunikasi melalui serial. Meskipun jumlah drone yang diterapkan pada perangkat keras hanya satu, drone yang ada di simulasi akan berjalan dengan sendirinya tanpa membutuhkan umpan balik data dari perangkat keras yang sebenarnya, dengan kata lain jika jumlah drone di simulasi lebih banyak daripada jumlah perangkat keras maka drone pada simulasi dapat berjalan langsung berdasarkan arahan program tanpa umpan balik dari perangkat keras, namun tidak diijinkan bila perangkat keras yang dipilih lebih banyak daripada jumlah drone di simulasi. Dari hasil percobaan menggunakan *dummy hardware* ditemukan bahwa komunikasi berjalan dengan baik, simulasi selalu mengikuti perangkat keras. *Hardware* selalu memberikan laporan posisi pada simulasi setiap 2 detik. Balasan dari simulasi diterima oleh *dummy hardware* dalam selang waktu paling lama 50 ms dan paling cepat 220 ms setelah *dummy hardware* mengirimkan informasi posisi. drone pada simulasi yang tidak tersambung pada *dummy hardware* berjalan lancar pada simulasi tanpa mengabaikan drone simulasi yang terhubung dengan *dummy hardware*.

4.6 Hasil Percobaan Kelima

Pada percobaan ini dilakukan percobaan pembentukan formasi pada kondisi tidak ideal yang disebabkan oleh gangguan angin yang muncul 1 detik setelah simulasi dimulai. Percobaan tersebut melibatkan 3 buah drone dengan

pembentukan deretan formasi 10 dengan menggunakan algoritma teknik optimasi. Dalam simulasi ini faktor angin diwujudkan dengan cara mengurangi nilai kecepatan ke arah angin berhembus, sehingga jika kecepatan pergerakan ke arah positif sumbu X adalah 5 m/s, sedangkan hembusan angin adalah 2 m/s ke arah negatif sumbu X maka saat itu kecepatan pada sumbu X adalah 3 m/s ke arah positif. Setelah hembusan angin selesai maka kecepatan akan perlahan-lahan kembali normal. Dari percobaan yang dilakukan didapatkan.

Tabel 4.19 Tabel Pembentukan Formasi dengan Adanya Gangguan Angin

Kecepatan Angin	Arah Angin	Waktu Angin Berhembus	Waktu Pembentukan Formasi
0 m/s	-	0 s	4,5 s
0.278 m/s	Arah positif sumbu X	2 s	4,7 s
1.667 m/s	Arah positif sumbu X	2 s	5,3 s
2.778 m/s	Arah positif sumbu X	2 s	5,5 s
1.667 m/s	Arah positif sumbu Y	2 s	5,3 s
1.667 m/s	Arah positif sumbu Z	2 s	3,9 s
1.667 m/s	Arah negatif sumbu X	2 s	5,3 s
1.667 m/s	Arah negatif sumbu Y	2 s	5,3 s
1.667 m/s	Arah positif sumbu X	3 s	5,4 s
1.667 m/s	Arah positif sumbu X	4 s	5,6 s
1.667 m/s	Arah positif sumbu X	5 s	5,7 s
1.667 m/s	Arah positif sumbu X	10 s	5,7 s

Dari hasil percobaan diatas dapat dilihat bahwa kecepatan angin, arah angin dan lama angin berhembus dapat mempengaruhi kecepatan pembentukan formasi pada simulasi yang dibuat. Kondisi pada penerapan sebenarnya mungkin akan berbeda dikarenakan pengaruh angin terkadang dapat ditangani oleh *flight controller* dengan mengatur kecepatan putaran baling-baling.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN

Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa ACO berhasil mempercepat pembentukan formasi swarm drone. 60% dari percobaan pembentukan formasi yang dilakukan menunjukkan percepatan pembentukan formasi, sedangkan 40% percobaan lainnya memiliki waktu pembentukan formasi yang sama dengan waktu pembentukan tanpa menggunakan teknik optimasi. Pengaruh percepatan pembentukan formasi juga beragam, mulai dari 5% hingga 42% percepatan pembentukan formasi. Pengaruh percepatan lebih terlihat pada pembentukan formasi yang kompleks, dimana formasi yang kompleks adalah formasi yang melibatkan banyak drone dan memiliki bentuk formasi yang rumit.

Proses perhitungan ACO terbilang cukup cepat karena hampir tidak mempengaruhi total waktu terbang drone, namun waktu perhitungan itu terus bertambah seiring bertambahnya jumlah drone yang digunakan. Dari percobaan yang dilakukan, lama perhitungan teknik optimasi mejadi diatas 100 ms ketika melibatkan lebih dari 10 unit drone. Sehingga akan lebih baik jika proses pencarian solusi menggunakan ACO dilakukan sebelum pertunjukkan dimulai.

Selain mempersingkat waktu tempuh, teknik optimasi ini juga memberikan pilihan rute dengan perpindahan yang lebih pendek daripada rute tanpa teknik optimasi. 40% dari percobaan yang dilakukan berhasil memperoleh rute perpindahan yang lebih singkat dengan kisaran 4% hingga 66% dari rute yang ditentukan tanpa teknik optimasi.

Solusi yang dihasilkan dari ACO bukanlah solusi yang paling optimal, hal ini dapat dilihat dari tingkat keragaman yang cukup tinggi yaitu sekitar 60% hingga 80%. Meskipun demikian, solusi yang didapat tidak jauh dari solusi optimal, hal ini dapat dilihat dari waktu tempuh yang saling mendekati walaupun rute yang ditempuh berbeda-beda, selisih waktu tempuh setiap solusi lebih kecil dari 1%.

Proses pembentukan formasi swarm drone telah berhasil dilakukan. Terdapat 60 percobaan terdokumentasi dan puluhan percobaan tidak terdokumentasi yang berhasil melakukan pembentukan formasi swarm drone tanpa

ada kendala tabrakan antar drone, ataupun kegagalan karena kesalahan pembagian tugas. Penerapannya pada perangkat keras pun memberikan hasil yang baik. Komunikasi terus dilakukan dalam selang waktu 2 detik dan simulasi dapat menggambarkan pergerakan yang dilakukan oleh drone.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. H. Wiwoho, "Kebebasan "Drone" Si Pengintai," Kompas.com, 28 Februari 2015. [Online]. Available: <https://sains.kompas.com/read/2015/02/28/1600005/Kebebasan.Drone.Si.Pengintai>. [Accessed 5 April 2020].
- [2] N. Hermawan, "Uji Coba Pemanfaatan Pesawat Tanpa Awak (Unmanned Aerial Vehicle/Uav) Untuk Pemetaan Topografi," TNI Angkatan Darat, 24 Mei 2013. [Online]. Available: <https://tniad.mil.id/uji-coba-pemanfaatan-pesawat-tanpa-awak-unmanned-aerial-vehicleuav-untuk-pemetaan-topografi/>. [Accessed 10 Desember 2018].
- [3] f. n. izzuddin, "Uji Coba Pemanfaatan Pesawat Tanpa Awak (Unmanned Aerial Vehicle/Uav) Untuk Pemetaan Topografi," Kompasiana, 25 September 2014. [Online]. Available: <https://www.kompasiana.com/faiznurizzuddin8779/5d6329660d823016a31b43b3/penggunaan-pesawat-tanpa-awak-sebagai-penyemprot-pestisida>. [Accessed 28 Desember 2018].
- [4] F. M. Sidik, "Drone Semprotkan Disinfektan dari Udara di Jalan Protokol di Jaksel," DetikNews, 27 Maret 2020. [Online]. Available: <https://news.detik.com/berita/d-4955119/drone-semprotkan-disinfektan-dari-udara-di-jalan-protokol-di-jaksel>. [Accessed 5 April 2020].
- [5] C. Gartenberg, "Intel's Winter Olympics light show featured a record-breaking 1,218 drones," the verge, 9 Februari 2018. [Online]. Available: <https://www.theverge.com/2018/2/9/16994638/winter-olympics-2018-intel-drone-show-world-record>. [Accessed 2 Desember 2018].
- [6] E. Egret, "EHang Egret's 1374 drones dancing over the City Wall of Xi'an, achieving a Guinness World Records title," ehang, 29 April 2018. [Online]. Available: <https://www.ehang.com/news/365.html>. [Accessed 2 Desember 2018].
- [7] R. K. Nistanto, "300 Drone Bercahaya Akan Menari di Atas Monas 18 Agustus," Kompas, 15 Agustus 2017. [Online]. Available: <https://tekno.kompas.com/read/2017/08/15/18420017/300-drone-bercahaya-akan-menari-di-atas-monas-18-agustus>. [Accessed 2 Desember 2018].
- [8] S.-K. Pang, Y.-H. Li and H. Yi, "Joint Formation Control with Obstacle Avoidance of Towfish and Multiple Autonomous Underwater Vehicles

Based on Graph Theory and the Null-Space-Based Method,” in *Sensors*, 19(11), 2019.

- [9] B. Capozzi, *Evolution-based path planning and management for autonomous vehicles*, University of Washington, Washington: These (Doctor of Philosophy – Aeronautics Engineering), 2001.
- [10] A. M. Adrian, A. Utamima and a. K.-J. Wang, “A Comparative Study of GA, PSO and ACO for Solving Construction Site Layout Optimization,” *KSCCE Journal of Civil Engineering*, vol. 00, pp. 1-8, 2014.
- [11] Z. Chao, Z. Ziyang, W. Daobo and L. Meng, “UAV Path Planning Method Based on Ant Colony Optimization,” *IEEE*, pp. 3790-3792, 2010.
- [12] F. Adolf, A. Langer, L. d. M. P. e. Silva and F. Thielecke, “PROBABILISTIC ROADMAPS AND ANT COLONY OPTIMIZATION FOR UAV MISSION PLANNING,” in *IFAC Volume 40*, Monterrey, Mexico, 2007.
- [13] S. Perez-Carabaza, E. Besada-Portas, J. A. Lopez-Orozco and J. M. d. l. Cruz, “Ant colony optimization for multi-UAV minimum time search in uncertain domains,” *Applied Soft Computing*, vol. 62, pp. 789-806, 2018.
- [14] A. Jufri, Sunaryo and P. B. Santoso, “Modifikasi ACO untuk Penentuan Rute Terpendek ke Kabupaten/Kota di Jawa,” *Jurnal EECCIS*, vol. 8, pp. 187-192, 2014.
- [15] A. Schoellig, F. Augugliaro and R. andrea, *A platform for dance performances with multiple quadcopters*, ETH Zurich, Switzerland: Institute for Dynamic Systems and Control, 2010.
- [16] H. T. Dinh, M. H. C. Torres and T. Holvoet, “Dancing UAVs: Using linear programming to model movement behavior with safety requirements,” in *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Miami, FL, USA, USA, 2017.
- [17] M. H. M. Nor, Z. H. Ismail and M. A. Ahmad, “Broadcast control of multi-agent systems with instability phenomenon,” in *Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS)*, US, 2016.
- [18] Y. Ito, M. A. S. Kamal, T. Yoshimura and S.-i. Azuma, “Pseudo-perturbation-based broadcast control of multi-agent systems,” *Automatica*, vol. 113, 2020.

- [19] R. Purta, M. Dobski, A. Jaworski and G. Madeya, "A Testbed for Investigating the UAV Swarm Command and Control Problem Using DDDAS," *Procedia Computer Science*, vol. 18, pp. 2018-2027, 2018.
- [20] M. Z. Spasial, "Zona Spasial," 15 Nopember 2018. [Online]. Available: <https://zonaspasial.com/2018/11/jenis-jenis-pesawat-tanpa-awak/>. [Accessed 25 October 2019].
- [21] F. Corrigan, "DroneZon," 6 May 2020. [Online]. Available: <https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/how-a-quadcopter-works-with-propellers-and-motors-direction-design-explained/>. [Accessed 27 May 2020].
- [22] T. Agarwal, "elprocus," [Online]. Available: <https://www.elprocus.com/electronic-speed-control-esc-working-applications/>. [Accessed 30 Mei 2020].
- [23] OnExperience, "OnExperience," 2016 September 04. [Online]. Available: <https://onexperience.wordpress.com/2016/09/04/blog-post-title/>. [Accessed 30 July 2020].
- [24] Radiolink, "Radiolink," [Online]. Available: <http://radiolink.com.cn/doce/UploadFile/ProductFile/TS100Manual.pdf>. [Accessed 25 October 2019].
- [25] B. Santosa, *Metoda Metaheuristik Konsep dan Implementasi*, Surabaya: Guna Widya, 2011.
- [26] E. M, "Studyblue," [Online]. Available: <https://www.studyblue.com/#flashcard/view/18671530>. [Accessed 9 Desember 2018].
- [27] IEEE, "IEEE Citation Reference," [Online]. Available: www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf.
- [28] Feedback Instruments Ltd., *Digital Pendulum: Control in a Matlab Environment*, Sussex, UK: Feedback Instruments Ltd., 2006.
- [29] K. Tanaka and M. Sugeno, "Stability analysis and design of fuzzy control," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 45, pp. 135-156, 1992.
- [30] N. Koresponden, "Tempo.co," 21 June 2019. [Online]. Available: <https://dunia.tempo.co/read/1216840/mengintip-kecanggihan-drone-global-hawk-as-yang-ditembak-iran>. [Accessed 25 October 2019].

- [31] Anonim, "Zona Elektro," [Online]. Available: <http://zoniaelektro.net/unmanned-aerial-vehicle-uav/unmanned-aerial-vehicle-uav-a160/>. [Accessed 25 October 2019].
- [32] A. Parsch, "designation system," [Online]. Available: <http://www.designation-systems.net/dusrm/app2/q-15.html>. [Accessed 25 October 2019].
- [33] Admin, "Defense Update," 23 August 2005. [Online]. Available: https://defense-update.com/20050823_dragon-eye.html. [Accessed 25 October 2019].

LAMPIRAN

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR INDEX