

OPTIMASI WAYPOINT DAN LINTASAN TERBAIK PADA PERTUNJUKAN DANCING DRONE MENGUNAKAN ANT COLONY OPTIMIZATION

Andri Suhartono

Program Studi Teknik Elektro – Institut Sains dan Teknologi Terpadu Surabaya

Email: andrisuh@stts.edu

ABSTRAK

Dancing drone merupakan tarian yang dilakukan oleh puluhan hingga ribuan drone untuk membentuk formasi yang telah ditentukan. Pertunjukan dancing drone sangat dipengaruhi oleh waktu pertunjukan dan waktu terbang masing-masing drone dalam membentuk formasi. Untuk mendapatkan waktu perpindahan yang singkat, kecepatan, jarak dan percepatan masing-masing drone perlu untuk diperhatikan. Selain masalah waktu, menentukan lintasan tiap drone untuk membentuk formasi tertentu dalam area tiga dimensi menjadi masalah penting yang harus diselesaikan. Untuk mengatasi masalah tersebut, maka perlu ditentukan *waypoint* dan lintasan terbaik. *Waypoint* adalah titik yang harus dituju oleh drone, dan lintasan adalah jalur yang harus dilalui oleh drone. *Ant Colony Optimization* (ACO) adalah metode yang dipilih 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 pengaruh pemilihan lintasan dan *waypoint* terbaik menggunakan ACO. Pengujian melibatkan 3, 5, 10, 15, 20 dan 25 unit drone dengan formasi yang berbeda. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode ini dapat mempersingkat waktu pembentukan formasi sebesar 5% hingga 42% dalam 60% percobaan, terutama untuk formasi yang dibentuk dengan jumlah drone yang banyak. Keberagaman solusi yang disajikan mencapai 60%, namun selisihnya kurang dari 1% untuk masing-masing solusi.

Kata kunci : ACO, Drone, Optimasi, Pembentukan formasi

PENDAHULUAN

Drone merupakan salah satu jenis pesawat tanpa awak yang paling sering digunakan. Terdapat banyak sekali sektor pekerjaan yang memanfaatkan drone, seperti sektor pertanian sebagai penyemprotan pestisida di sawah [5], penggunaan drone untuk pemetaan [8], penggunaan drone pada sektor militer sebagai mata-mata [4], penggunaan drone di bidang kesehatan sebagai penyemprot disinfektan ketika pandemi Covid-19 [2], bahkan drone digunakan sebagai pemeran utama dalam bidang pertunjukan, yaitu dancing drone. Pertunjukan dancing drone melibatkan ratusan bahkan ribuan drone. Sejumlah drone terbang membentuk formasi tertentu, selang beberapa saat drone akan bergerak membentuk formasi yang lainnya. Pertunjukan dancing drone seperti ini telah digunakan sebagai pembukaan acara dalam negeri [6] dan juga acara luar negeri, seperti pada pembukaan Olimpiade musim dingin 2018 di Korea [3], dan pembukaan acara Asian Games di Jakarta.

Semakin banyak jumlah drone yang diterbangkan maka semakin beragam formasi yang dapat dibentuk oleh kawanan drone tersebut. Namun, semakin banyak jumlah drone maka manajemen formasi akan menjadi sulit, desainer formasi harus mengatur gerakan drone dalam jumlah besar. Selain pengaturan gerakan drone, desainer formasi harus melakukan perhitungan agar drone dapat terbang menuju *waypoint* yang tepat [9]. Penentuan *waypoint* juga harus berdasarkan perhitungan dan perbandingan agar *waypoint* dapat dicapai dalam

waktu yang singkat dikarenakan terbatasnya waktu pertunjukan. Penentuan *waypoint* semakin sulit jika formasi yang hendak dibentuk adalah formasi yang memiliki kompleksitas tinggi. Semakin sulit perhitungan yang dilakukan maka semakin besar kemungkinan salah, ditambah lagi jumlah *waypoint* yang dihitung cukup banyak dan mengandung beragam variable, yaitu posisi awal drone, titik tujuan yang memungkinkan, karakteristik drone yang digunakan, meliputi percepatan, kecepatan maksimum drone yang digunakan, lintasan yang memungkinkan dan pengaruh percepatan gravitasi pada drone. Untuk meminimalkan kesalahan maka perhitungan ini lebih pantas jika dilakukan menggunakan program.

Program yang dibuat harus bisa membantu perhitungan dan memberikan hasil berupa *waypoint* yang cepat dan tepat. Menentukan *waypoint* dengan melakukan perbandingan satu per satu kandidat titik tujuan akan memberikan hasil yang tepat namun memakan waktu yang cukup lama sehingga dibutuhkan suatu metode yang lebih cepat namun tetap akurat, salah satu metode yang dapat digunakan adalah metode metaheuristic *Ant Colony Optimization* (ACO) [10]. Metode ACO diharapkan mampu memberikan *waypoint* serta lintasan yang tepat untuk masing-masing drone agar dapat membentuk formasi dengan waktu pembentukan formasi tercepat.

Setelah mendapatkan *waypoint* dan lintasan terbaik, data hasil perhitungan perlu dikirimkan ke setiap drone yang sedang terbang. Selain itu, posisi drone saat terbang tersebut perlu dikirimkan juga ke pusat kendali (*Ground Station*) untuk dilakukan perhitungan berikutnya berdasarkan kondisi sebenarnya di lapangan juga untuk melakukan pengawasan guna menghindari kecelakaan antar drone. Untuk melakukan hal tersebut digunakan metode komunikasi *Dynamic Data-Driven Application System* (DDDAS) [1]. DDDAS akan menjadi komunikasi antara *ground station* dengan setiap drone.

TINJAUAN PUSTAKA

Konsep Dasar *Ant Colony Optimization* (ACO)

Ant-Colony Optimization (ACO) 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 *variable* 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 [7].

Untuk melakukan proses pencarian, ACO memiliki beberapa *variable* 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 *variable* 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 *variable* utama, rute yang dapat dilalui beserta jarak 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.

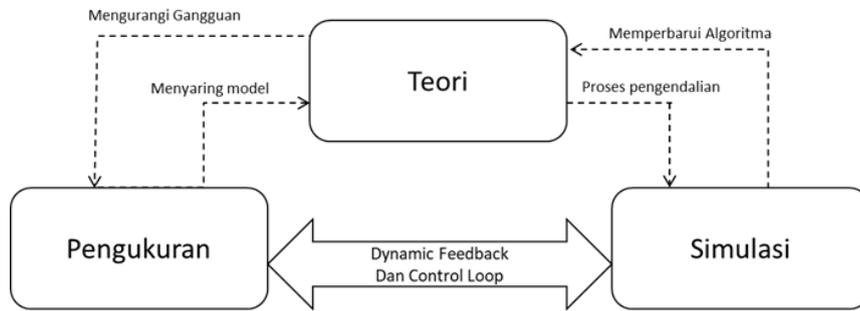
1. Menentukan jalur yang akan dilalui oleh setiap semut untuk menuju sumber makanan, penentuan ini bisa menggunakan *roulette wheel selection*.
2. Menghitung jarak rute yang dilalui oleh setiap semut,
3. Memperbarui kadar feromon di semua jalur berdasarkan kadar feromon sebelumnya, tingkat penguapan 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.

Konsep 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

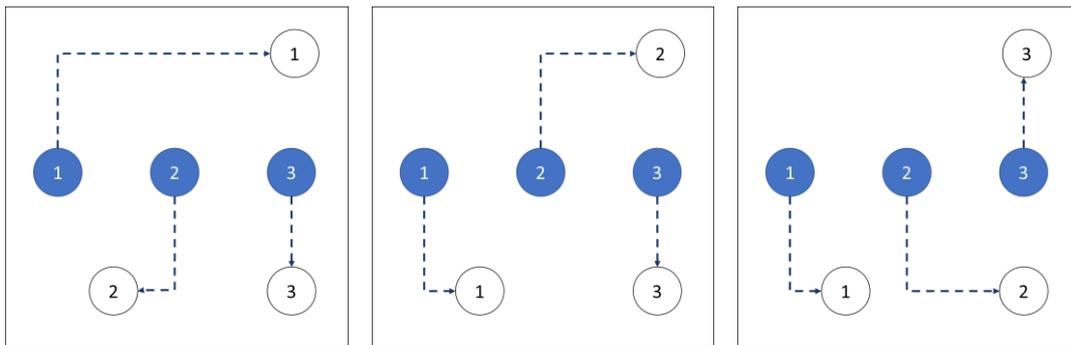
guna meminimalkan terjadinya hal yang tidak diinginkan serta menjaga kesesuaian gerakan perangkat keras di lapangan terhadap gerakan di simulasi.



Gambar 1. Konsep DDDAS

METODE PENELITIAN

Percepatan Pembentukan Formasi Drone



Gambar 2. Contoh Pergerakan Drone

Salah satu cara yang dilakukan untuk mengatur serta mengarahkan sekelompok drone adalah dengan penomoran. Desainer akan memberikan nomor pada setiap drone pada semua pola yang dibentuk. Dengan penomoran tersebut maka tujuan terbang dari setiap drone dapat dengan mudah diketahui. Walaupun formasi drone berikutnya sudah dapat terbentuk, pergerakan yang dilakukan terlihat sangat tidak efisien. Untuk meningkatkan efisiensi pergerakan maka penomoran harus diubah.

Dengan penomoran yang mempertimbangkan efisiensi gerakan maka jarak terjauh ditempuh oleh drone nomor 2 dan yang terpendek tetap drone nomor 3, namun dapat dilihat pergerakan terjauh sudah tidak sejauh pergerakan yang dilakukan dengan penomoran sebelumnya. Dengan jarak yang lebih pendek tentu akan memperoleh waktu pembentukan formasi yang lebih cepat jika kecepatan gerak vertikal dan horizontal selalu konstan. Hal tersebut tentu tidak sesuai dengan kondisi drone, setiap drone memiliki nilai percepatan horizontal dan percepatan vertikal yang berbeda, kecepatan maksimum secara horizontal 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 penomoran menjadi sedikit diubah. Dengan

asumsi yang ada maka dapat dilihat bahwa waktu pembentukan formasi dengan penomoran ini akan sedikit lebih cepat daripada penomoran sebelumnya. Melakukan penomoran 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 penomoran yang tepat agar dapat mempersingkat waktu pembentukan formasi. Selain banyak kesalahan, penomoran secara manual ketika melibatkan banyak drone atau pola yang rumit akan memakan waktu analisa yang cukup lama sehingga perlu digunakan metode lain yang lain. Untuk itu digunakan metode optimasi ACO.

Area Terbang Drone

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 *yawn*). Area terbang drone dibatasi pada jangkauan transmisi pengendali drone. Dalam penelitian ini, transmisi pengendali yang digunakan adalah WiFi router sehingga radius terbang drone dibatasi pada 100 meter dengan pusat pengendalinya.

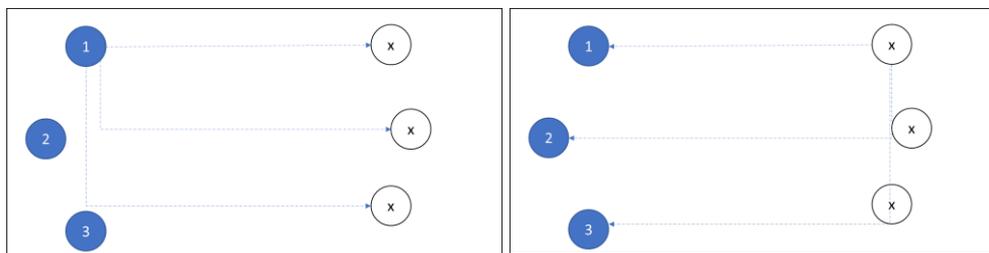
Dalam penerapannya, drone selalu dibekali sebuah GPS untuk mengetahui posisi latitud dan longitude serta dibekali sebuah barometer untuk mendapatkan altitud. Nilai longitude, latitud dan altitud yang diberikan tidak selalu benar, terkadang memiliki selisih beberapa meter dari posisi aslinya. Perbedaan 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 diizinkan adalah pola dengan jarak kelipatan 5 meter.

Pengembangan Algoritma Optimasi

Algoritma optimasi yang digunakan untuk mempercepat pembentukan formasi drone adalah ACO. 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 lintasan. Sebelum ditetapkan sumber makanan yang dituju atau *waypoint* yang menjadi tujuan, semua *waypoint* yang akan dituju disebut sebagai kandidat *waypoint* tujuan. Setiap sumber makanan dapat dikunjungi dengan berbagai cara dan juga dapat dikunjungi oleh koloni semut mana pun, namun tentu saja jika sumber makan sudah dikuasai oleh satu koloni semut maka koloni semut yang lain tidak dapat menuju sumber makanan tersebut.

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, atau skenario kedua yaitu

posisi-posisi pada formasi berikutnya sebagai *waypoint* awal dan titik-titik pola saat ini sebagai kandidat-kandidat *waypoint* tujuan.



Gambar 3. Skenario Penentuan Waypoint Awal dan 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 memosisikan drone dengan nomor 1 menjadi koloni pertama yang melakukan pemeriksaan. Hal tersebut membuat UAV dengan nomor urut terakhir memperoleh *waypoint* kandidat tujuan yang tidak dipilih oleh *waypoint* asal lainnya. Dengan skenario kedua kecenderungan 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 dianalisis 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.

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 lintasan yang mungkin untuk dilaluinya. Dalam ACO tidak semua lintasan 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 lintasan. Nilai yang ditetapkan adalah 2 untuk semua lintasan. Dengan nilai yang sama pada permulaan ini maka seluruh lintasan memiliki peluang yang sama untuk dipilih dalam penelusuran. Proses ini sama dengan kondisi ketika koloni semut belum mengetahui jalan menuju sumber makanan, semua lintasan akan dijelajahi.
- Jumlah perulangan. Siklus perjalanan semut dilakukan beberapa kali, lintasan perjalanan yang ditempuh oleh semut bisa berbeda bisa juga sama bergantung nilai acak yang nantinya digunakan untuk memilih lintasan yang harus dilewati semut. Pada perulangan ke dua pemilihan lintasan tidak lagi berimbang, nilai feromon setiap lintasan sudah tidak lagi sama dikarenakan ada lintasan yang telah dilalui oleh semut yang mengakibatkan nilai feromon pada lintasan tersebut lebih tinggi. Lintasan dengan nilai feromon yang lebih tinggi ini memiliki peluang lebih tinggi untuk dipilih untuk dilalui oleh semut. Jika pada perulangan kedua ditemukan lintasan yang lebih pendek daripada lintasan terpendek pada penelusuran pertama maka bisa jadi nilai feromon kedua lintasan itu saling mendekati, namun pada

perulangan berikutnya ketika semut menempuh kedua lintasan terpendek itu, feromon pada lintasan terpendek kedua akan menjadi lebih pekat. Dengan konsep feromon dan perulangan berkali-kali tersebut pada akhirnya semua semut dalam koloni akan melewati lintasan 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 lintasan 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 lintasan yang sama maka satu lintasan 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 penelitian ini, 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:

$$\text{Fitness} = \frac{p}{t_{i,n} - t_u + 1}$$

Keterangan:

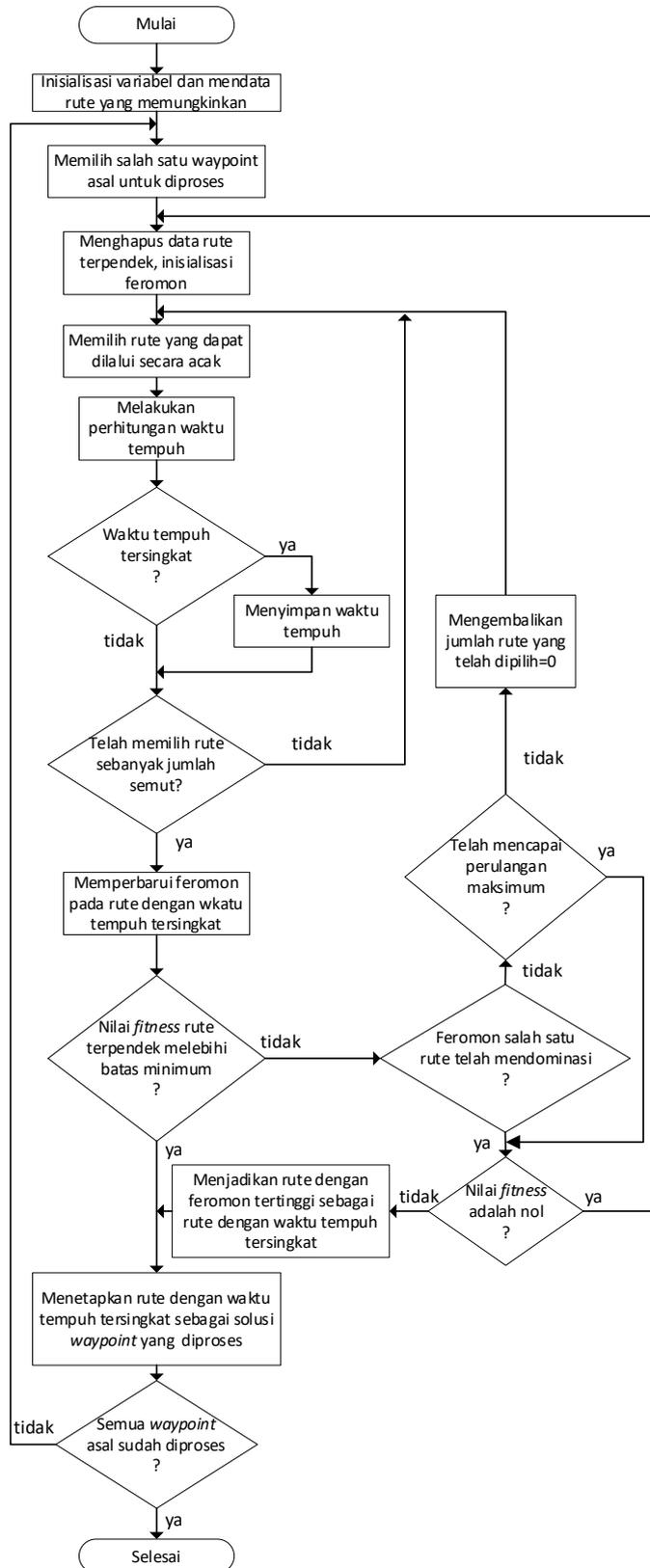
t_u : Waktu tempuh jika UAV menggunakan model pergerakan utama,

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. Proses ACO ini akan menghasilkan pergantian titik tujuan setiap drone, di samping itu juga dihasilkan lintasan 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 pertunjukkan 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 dalam proses pemilihan *waypoint* dan rute terbaik dijabarkan menggunakan *flowchart* pada Gambar 4.



Gambar 4. Flowchart ACO Dalam Pemilihan Waypoint

Penguapan feromon pada setiap lintasan dapat diterapkan dengan persamaan:

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

Keterangan:

$\tau_{i,j,k}$: Kadar feromon dari *waypoint* asal ke-i menuju *waypoint* tujuan ke-j dengan lintasan ke-k,

e : Kadar penguapan. Dalam pembentukan formasi ini digunakan kadar penguapan 25%

Setelah dilakukan penguapan, lintasan terbaik akan mengalami penambahan feromon:

$$\tau_{i,j,k} \leftarrow \tau_{i,j,k} + \Delta\tau$$

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

Keterangan:

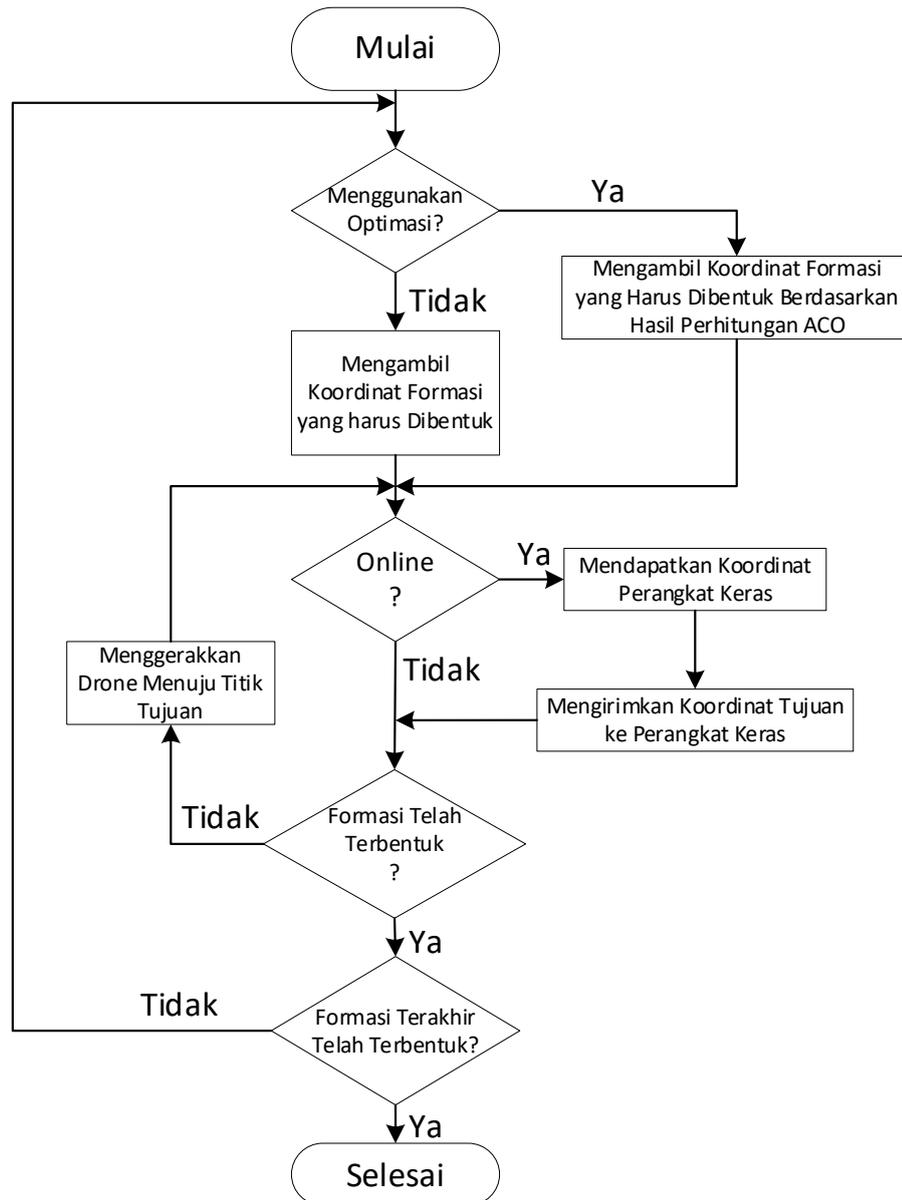
$\Delta\tau$: Kadar feromon yang ditambahkan pada lintasan terbaik,

t_{mf} : Waktu perpindahan terlama yang diizinkan dalam pertunjukkan.

Angka 7 pada persamaan penambahan kadar feromon pada lintasan terbaik merupakan konstanta yang mewakili kadar feromon penuh seekor semut. Jika suatu lintasan mendapat tambahan 7 kadar feromon maka dapat dikatakan semut menetap pada lintasan tersebut dikarenakan panjang lintasan adalah 0. Semakin panjang lintasan yang ditempuh semut maka akan semakin bertebaran kadar feromon pada lintasan tersebut dan mengakibatkan berkurangnya kadar feromon yang ditambahkan pada lintasan tersebut. Jika lama waktu perpindahan lebih dari waktu perpindahan yang ditetapkan maka lintasan tersebut tidak direkomendasikan dan aroma feromon akan dianggap menguap sehingga terjadi pengurangan kadar feromon.

Fungsi *fitness* dari lintasan 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 lintasan terbaik dengan waktu tempuh menggunakan model pergerakan utama tidak lebih dari 4 detik dan lintasan tersebut tidak keluar jalur maka lintasan terbaik ini dapat langsung diambil sebagai solusi.

Setelah menetapkan formasi yang akan ditampilkan dan melakukan perhitungan ACO, pembentukan formasi sudah dapat dilakukan. Tahapan pembentukan formasi digambarkan dalam *flowchart* pada Gambar 5.



Gambar 5. Tahapan Pembentukan Formasi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji coba berupa simulasi dilakukan dalam beberapa tahap untuk melihat pengaruh teknik optimasi pada pembentukan formasi drone. Uji coba dilakukan sebanyak 15 model uji coba dimana uji coba 1 hingga uji coba 6 membentuk 2 buah formasi sederhana, percobaan 7 membentuk 3 buah formasi sederhana berkelanjutan, uji coba 8 membentuk 4 buah formasi sederhana berkelanjutan dan uji coba 9 membentuk 5 buah formasi sederhana berkelanjutan, uji coba 10 hingga 15 membentuk 2 buah formasi kompleks.

Tahap pertama hasil uji coba akan menampilkan hasil uji coba simulasi yang meliputi perubahan waktu pembentukan formasi antara pembentukan formasi yang melibatkan metode optimasi dan pembentukan formasi tanpa metode optimasi.

Tabel 1. Perbandingan Waktu Pembentukan Formasi

Uji Coba	Jumlah Drone	Waktu pembentukan tanpa optimasi	Waktu dengan Metode Optimasi			(E)-(C)
			Perhitungan	Terbang	Total	
(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
1	3	5 s	14,817 ms	2 s	2,015 s	-3 s
2	5	11,5 s	38,305 ms	6,5 s	6,538 s	-5 s
3	10	6 s	31,924 ms	6 s	6,032 s	0
4	15	2,5 s	73,958 ms	2,5 s	2,574 s	0
5	20	4,5 s	345,827 ms	4,5 s	4,846 s	0
6	25	6,5 s	255,325 ms	6,5 s	6,755 s	0
7	5	25,467 s	59,5 ms	18,133 s	18,193 s	-7,334 s
8	5	31,967 s	88,114 ms	22,633 s	22,721 s	-9,334 s
9	5	47,934 s	115,706 ms	27 s	27,116 s	-20,934 s
10	3	4,5 s	65,273 ms	4,5 s	4,565 s	0
11	5	12 s	69,475 ms	12 s	12,069 s	0
12	10	38 s	95,586 ms	33 s	33,096 s	-5 s
13	15	34 s	116,282 ms	31 s	31,116 s	-3 s
14	20	36,5 s	439,744 ms	34,5 s	35,940 s	-2 s
15	25	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 uji coba dengan 2 buah formasi sederhana hanya 2 uji coba yang memberikan respons pengurangan waktu pembentukan 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 uji coba 7 hingga 9, ketika terdapat banyak formasi dalam satu deretan formasi, pengaruh metode optimasi menjadi cukup besar dalam mengurangi waktu pembentukan formasi.

Tahap kedua hasil uji coba akan menampilkan hasil uji coba simulasi yang membandingkan total jarak yang ditempuh tanpa menggunakan metode optimasi dengan pembentukan formasi tanpa menggunakan metode optimasi.

Tabel 2. Perbandingan Jarak Pembentukan Formasi

Uji Coba	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 lintasan berdasarkan jarak juga menjadi lebih baik. Seluruh lintasan yang dipilih menggunakan metode optimasi memiliki total jarak yang lebih kecil atau sama dengan lintasan yang dipilih menggunakan penomoran. Dapat dilihat bahwa kebanyakan lintasan pilihan metode optimasi memiliki panjang yang sama dengan metode penomoran 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.

Tahap ketiga hasil uji coba akan menampilkan keragaman dari solusi yang didapat Ketika pembentukan formasi menggunakan metode optimasi. Uji coba ini dilakukan dengan cara mengulang-ulang pembentukan formasi menggunakan 5 unit drone seperti pada uji coba 2 untuk melihat keragaman solusi dalam pembentukan formasi sederhana dan mengulang-ulang pembentukan formasi menggunakan 10 unit drone seperti pada uji coba 12 untuk melihat keragaman solusi dalam pembentukan formasi kompleks.

Tabel 3. Hasil Uji Keragaman Pembentukan Formasi

Uji Coba 5 unit drone, 2 formasi sederhana					
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
Uji Coba 10 unit drone, 2 formasi kompleks					
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 dikeluarkan cukup beragam. Pada uji coba dengan 5 unit drone membentuk 2 formasi sederhana, dari 5 kali solusi yang dicari terdapat 3 buah kombinasi lintasan yang berbeda. Semakin banyak jumlah drone yang terlibat kemungkinan kombinasi lintasan atau tingkat keragaman akan semakin meningkat, seperti yang terjadi pada pencarian solusi dengan 10 unit drone membentuk 2 formasi kompleks, dari 5 kali pencarian solusi terdapat 4 buah kombinasi lintasan yang berbeda.

KESIMPULAN

Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa ACO berhasil mempercepat pembentukan formasi 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 menjadi 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 lintasan dengan perindahan yang lebih pendek daripada lintasan tanpa teknik optimasi. 40% dari percobaan yang dilakukan berhasil memperoleh lintasan perpindahan yang lebih singkat dengan kisaran 4% hingga 66% dari lintasan 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 lintasan yang ditempuh berbeda-beda, selisih waktu tempuh setiap solusi lebih kecil dari 1%.

Proses pembentukan formasi drone telah berhasil dilakukan. Terdapat 40 percobaan terdokumentasi dan puluhan percobaan tidak terdokumentasi yang berhasil melakukan pembentukan formasi drone tanpa ada kendala tabrakan antar drone, ataupun kegagalan karena kesalahan pembagian tugas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Darema, F. (2015). **InfoSymbioticSystems/DDDAS - Large-scale dynamic data and large-scale big computing for smart systems**. 2015 IEEE 22nd International Conference on High Performance Computing Workshops (pp. 53-53). Bengaluru, India: IEEE.
- [2]. Efelina, V., Dampang, S., Maulana, I., Adam, R. I., Purwanti, E., Rahmadewi, R., & Nugraha, B. (2021, 3 27). **Penggunaan Drone Untuk Penyemprotan Disinfektan Dalam Pencegahan Covid-19 di Masa Pandemi (Studi Kasus di Desa Margasari)**. SELAPARANG.Jurnal Pengabdian Masyarakat Berkemajuan, 368-373. Retrieved from Detiknews: <https://news.detik.com/berita/d-4955119/drone-semprotkan-disinfektan-dari-udara-di-jalan-protokol-di-jaksel>.
- [3]. Gartenberg, C. (2018, 2 9). **Intel's Winter Olympics light show featured a record-breaking 1,218 drones**. Retrieved from The Verge: <https://www.theverge.com/2018/2/9/16994638/winter-olympics-2018-intel-drone-show-world-record>.
- [4]. Husodo, A. Y., Jati, G., Alfiany, N., & Jatmiko, W. (2019, 2 28). **Intruder Drone Localization Based on 2D Image and Area Expansion Principle for Supporting Military Defence System**. 2019 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (pp. 35-40). Makassar, Indonesia: IEEE. Retrieved from Kompas.com: <https://sains.kompas.com/read/2015/02/28/1600005/Kebebasan.Drone.Si.Pengintai>.
- [5]. Khoirunisa, H., & Kurniawati, F. (2019, 8 26). **Penggunaan Drone dalam Mengaplikasikan Pestisida di Daerah Sungai Besar, Malaysia**. Jurnal Pusat Inovasi Masyarakat, 87-91. Retrieved from Viva.co.id:

<https://www.viva.co.id/vstory/teknologi-vstory/1176570-penggunaan-pesawat-tanpa-awak-sebagai-penyemprot-pestisida>.

- [6]. Nistanto, R. K. (2017, 8 15). **300 Drone Bercahaya Akan Menari di Atas Monas 18 Agustus**. Retrieved from Kompas.com: <https://tekno.kompas.com/read/2017/08/15/18420017/300-drone-bercahaya-akan-menari-di-atas-monas-18-agustus>.
- [7]. Santosa, B. (2011). **Metoda Metaheuristik Konsep dan Implementasi**. Surabaya: Guna Widya.
- [8]. Sulistijono, I. A., Ramadhani, M. R., & Risnumawan, A. (2020, 5 24). **Aerial Drone Mapping and Trajectories Generator for Agricultural Ground Robots. 2020 International Symposium on Community-centric Systems (CcS)** (pp. 1-6). Tokyo: IEEE. Retrieved from TNI Angkatan Darat: <https://tniad.mil.id/uji-coba-pemanfaatan-pesawat-tanpa-awak-unmanned-aerial-vehicleuav-untuk-pemetaan-topografi/>.
- [9]. Tahir, A., Böling, J., Haghbayan, M.-H., Toivonen, H. T., & Plosila, J. (2019). **Swarms of Unmanned Aerial Vehicles — A Survey**. Journal of Industrial Information Integration.
- [10]. Zhang, C., Zhen, Z., Wang, D., & Li, M. (2010). **UAV path planning method based on ant colony optimization**. 2010 Chinese Control and Decision Conference (pp. 3790-3792). Xuzhou: IEEE.