

Penerapan Simulasi AI Sistem Drone Ganda untuk Optimasi Lintasan pada Pemantauan Perkebunan

Tedi Sumardi*¹, M. Agung Suhendra^{#1}, Iqbal Robiyana^{#1}, Anderias Eko Wijaya*²

Program Studi Fisika, Fakultas Sains, Universitas Mandiri¹
Lab Cognitive Sciences, Instrumentation and Control (CIC), Program Studi Fisika, Fakultas Sains, Universitas Mandiri[#]
Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Mandiri²

E-mail: tedi@universitasmandiri.ac.id*¹, agung@universitasmandiri.ac.id*¹,
irobiyana@universitasmandiri.ac.id*¹, ekowjy09@gmail.com*²

Received: 2025-03-11 | Accepted: 2025-03-21 | Published: 2025-04-01

Abstrak

Sistem pemantauan berbasis drone telah menjadi solusi efektif untuk meningkatkan efisiensi pengawasan lahan pertanian skala besar, khususnya pada perkebunan kelapa sawit. Penelitian ini mengusulkan simulasi berbasis kecerdasan buatan (AI) menggunakan dua drone untuk memetakan lintasan optimal secara terdistribusi. Simulasi dilakukan dengan memperhitungkan pengaruh angin acak terhadap akurasi lintasan menggunakan pendekatan grid waypoints dalam area kebun. Hasil menunjukkan bahwa kedua drone mampu menyelesaikan inspeksi lahan dengan deviasi rata-rata akibat angin sebesar ± 0.14 meter, menunjukkan kestabilan sistem dalam kondisi lingkungan dinamis. Drone 1 menyelesaikan misi sejauh 8888.14 m dan Drone 2 sejauh 9827.74 m. Hasil simulasi trajektori dalam grafik 3D memperlihatkan penyimpangan lintasan yang tetap terkendali. Penelitian ini menjadi dasar untuk pengembangan sistem otonom berbasis drone yang lebih adaptif dan efisien dalam konteks pemantauan pertanian cerdas.

Kata kunci: drone simulasi AI, efek angin, pemantauan perkebunan, smart farming

Abstract

Drone-based monitoring systems have emerged as an effective solution to improve the efficiency of large-scale agricultural land surveillance, particularly in oil palm plantations. This study proposes an artificial intelligence (AI)-based simulation using dual drones to map optimal and distributed flight paths. The simulation considers the random wind effect on trajectory accuracy using a grid-based waypoint approach across the plantation area. The results show that both drones successfully completed the land inspection mission with an average wind-induced deviation of ± 0.14 meters, indicating system stability under dynamic environmental conditions. Drone 1 covered a total distance of 8888.14 meters, while Drone 2 covered 9827.74 meters. A 3D trajectory visualization illustrates that the path deviations remained controlled. This research provides a foundation for developing more adaptive and efficient autonomous drone systems in the context of smart farming.

Kata kunci: drone simulation AI, wind effect, plantation monitoring, smart farming

1. Pendahuluan

Pemanfaatan teknologi drone atau Unmanned Aerial Vehicles (UAV) dalam sektor pertanian telah menjadi bagian penting dari revolusi digital pertanian modern. Penggunaan drone memungkinkan peningkatan efisiensi dalam pengumpulan data agronomis, pemetaan lahan, pemantauan kesehatan tanaman, hingga deteksi dini terhadap hama dan penyakit [1]. Dalam konteks pertanian presisi (precision agriculture), drone memainkan peran vital dalam mengoptimalkan penggunaan sumber daya secara spasial dan temporal [2].

Salah satu tantangan utama dalam pengoperasian UAV di lapangan adalah ketergantungan terhadap kondisi lingkungan yang dinamis, terutama angin yang dapat menyebabkan deviasi lintasan

dan mengganggu kestabilan penerbangan [3]. Selain itu, koordinasi antar beberapa UAV dalam satu sistem (drone ganda atau multi-drone) juga menimbulkan tantangan teknis terkait distribusi tugas, penghindaran tabrakan, dan efisiensi lintasan [4].

Penelitian sebelumnya banyak memfokuskan pada algoritma navigasi UAV menggunakan pendekatan heuristik, seperti algoritma A*, D*, dan Rapidly-exploring Random Tree (RRT), yang cenderung bersifat deterministik dan tidak selalu tangguh terhadap gangguan lingkungan [5]. Studi lain mengusulkan pendekatan pembelajaran mesin dan reinforcement learning untuk optimasi jalur UAV, namun umumnya terbatas pada satu drone dalam lingkungan ideal [6]. Beberapa penelitian seperti oleh Eze et al. [7] dan Mosteo et al. [8] mulai mengeksplorasi sistem multi-UAV berbasis AI dan sistem multi-agen, tetapi masih jarang yang mengintegrasikan variabel lingkungan secara dinamis seperti angin acak ke dalam simulasi multi-drone. Penggunaan Unmanned Aerial Vehicles (UAV) dalam sektor pertanian telah banyak dikaji dalam literatur akademik dalam beberapa tahun terakhir. Fokus utama umumnya mencakup pemetaan lahan pertanian, deteksi penyakit tanaman, monitoring kelembaban tanah, dan optimasi irigasi. Namun, aspek efisiensi lintasan dan pengaruh kondisi lingkungan, khususnya angin, belum secara luas diteliti dalam konteks sistem drone ganda.

Tokekar et al. [1] mengembangkan sistem kolaboratif UAV dan UGV untuk pemetaan presisi. Meskipun sistem ini efisien, pendekatannya belum mempertimbangkan dinamika gangguan lingkungan seperti angin. Huang et al. [3] mengusulkan metode *deep learning* untuk perencanaan jalur UAV, namun implementasinya terbatas pada simulasi satu drone dalam lingkungan ideal.

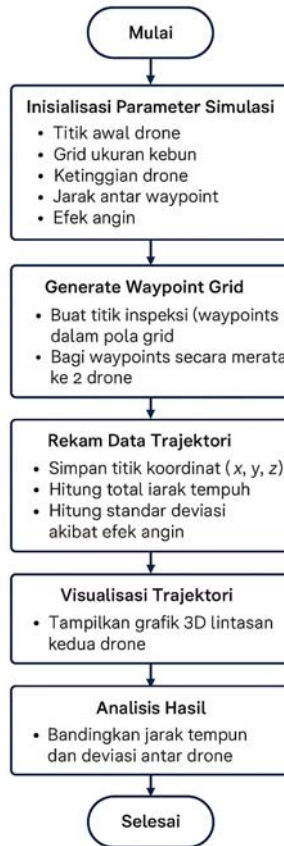
Eze et al. [5] menyajikan pendekatan *reinforcement learning* untuk perencanaan jalur UAV secara otonom. Penelitian ini unggul dalam pengambilan keputusan berbasis pembelajaran, namun fokusnya tidak pada sistem multi-drone atau pengaruh gangguan eksternal. Mosteo et al. [4] membahas eksplorasi multi-robot menggunakan model prioritas target, yang relevan dengan sistem drone ganda. Namun, pendekatan tersebut lebih menekankan pada distribusi tugas daripada kestabilan lintasan dalam lingkungan dinamis.

Liu et al. [7] dan Loianno et al. [8] mengusulkan kontrol UAV berbasis estimasi dan energi efisien, namun tanpa integrasi kondisi lingkungan acak seperti angin. Dengan demikian, terdapat celah dalam literatur terkait integrasi antara koordinasi multi-drone, efek lingkungan, dan optimasi jalur dalam konteks pertanian presisi.

Penelitian ini mencoba mengisi celah tersebut dengan mengembangkan simulasi AI sistem drone ganda dalam skenario kebun sawit tropis, serta menganalisis deviasi dan efisiensi jalur dalam kondisi lingkungan acak. Oleh karena itu, penelitian ini berkontribusi dalam mengembangkan model simulasi dua drone berbasis AI untuk eksplorasi area kebun sawit secara paralel. Model mempertimbangkan efek angin sebagai gangguan lingkungan serta distribusi waypoint secara grid sesuai dengan pola tanam pada kebun tropis. Fokus utama adalah mengevaluasi efisiensi lintasan, total jarak tempuh, dan deviasi akibat gangguan eksternal. Simulasi ini bertujuan untuk memberikan dasar sistem UAV yang lebih adaptif, efisien, dan realistis dalam konteks pertanian cerdas (smart farming) berbasis Internet of Things (IoT). Dengan demikian, pendekatan ini tidak hanya melengkapi celah penelitian sebelumnya yang sebagian besar belum mempertimbangkan dinamika lingkungan secara holistik, tetapi juga mendukung arah pengembangan sistem UAV otonom yang lebih tangguh dan kolaboratif di masa depan.

2. Analisa dan Pembahasan

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi untuk menganalisis performa lintasan dua drone dalam skenario pemantauan kebun sawit dengan pola tanam grid. Tujuan utama dari simulasi ini adalah untuk mengamati perbedaan jarak tempuh dan deviasi lintasan akibat pengaruh angin, serta mengevaluasi efisiensi sistem navigasi drone ganda yang berjalan secara paralel. Secara umum, metode penelitian untuk simulasi drone gandapa dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah ini,



Gambar 1. Flowchart metode simulasi sistem drone ganda untuk pemantauan perkebunan

2.1. Desain Grid Kebun dan Titik Waypoint

Lahan kebun sawit dimodelkan dalam bentuk grid berukuran $N \times N$, dengan jarak tetap antar pohon. Masing-masing titik dalam grid dianggap sebagai waypoint yang harus dikunjungi untuk keperluan inspeksi. Penempatan titik-titik ini dilakukan menggunakan metode iteratif dari baris dan kolom, seperti yang digunakan dalam metode *coverage path planning* [9]. Sebagaimana terlihat pada Gambar 2. Simulasi struktur area inspeksi berbasis grid pada kebun sawit,



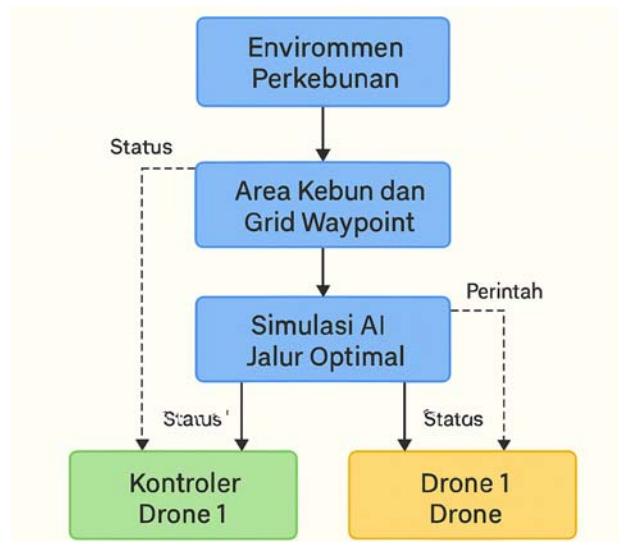
Gambar 2. Struktur area inspeksi berbasis grid pada kebun sawit, yang menjadi skenario simuliasi drone ganda.

2.2. Simulasi Dua Drone Ganda

Dua drone disimulasikan berjalan secara paralel, masing-masing diberi separuh dari total waypoint untuk dikunjungi. Pembagian tugas dilakukan secara horizontal, yaitu Drone 1 menangani baris atas hingga tengah, dan Drone 2 dari tengah ke bawah. Kedua drone memiliki titik awal dan akhir yang berbeda. Setiap drone terbang dengan ketinggian konstan dan kecepatan tetap. Titik waypoint untuk drone i yang ke n dihitung dengan menggunakan koordinat (X_n, Y_n) , yang masing-masing diambil dari posisi awal ke posisi akhir yang direncanakan. Posisi $P_n = (X_n, Y_n, Z_n)$ pada setiap langkah n diberikan oleh:

$$P_n = P_{n-1} + \frac{1}{S} \cdot (P_{n+1} - P_{n-1}) \quad (1)$$

dimana P_n adalah posisi waypoint ke- n , dan S adalah panjang langkah interpolasi. Untuk diagram konseptual sistem drone ganda terlihat pada Gambar 3 dimana menggambarkan alur kerja sistem drone ganda untuk pemantauan lahan pertanian. Proses dimulai dari input data lahan (koordinat area kebun), dilanjutkan dengan pembagian wilayah kerja untuk Drone 1 dan Drone 2 secara otomatis. Masing-masing drone kemudian menjalankan perencanaan lintasan (path planning) berdasarkan grid waypoint yang dihasilkan. Sistem mengaktifkan kontrol navigasi berbasis algoritma (termasuk kompensasi angin), dan selama operasi, data pemantauan dikumpulkan dan dikirim ke pusat kendali. Diagram ini juga memperlihatkan adanya umpan balik (feedback loop) dari sensor dan kontrol PID untuk menjaga kestabilan selama penerbangan.



Gambar 3. Diagram konseptual sistem drone ganda.

2.3. Model Efek Angin

Untuk mensimulasikan kondisi lingkungan riil, efek angin ditambahkan secara acak pada setiap langkah interpolasi. Angin dimodelkan sebagai gangguan pada sumbu x , y , dan z dengan distribusi uniform [10] yaitu:

$$W_n = (W_{xn}, W_{yn}, W_{zn}) \sim U(-0.5, 0.5) \quad (2)$$

di mana W_{xn}, W_{yn}, W_{zn} adalah nilai acak untuk gangguan angin pada sumbu x , y , dan z , yang dihitung pada setiap langkah interpolasi n . Posisi yang dipengaruhi angin pada drone ke- i dihitung dengan,

$$P'_n = P_n + W_n \quad (3)$$

2.4. Perhitungan Jarak Tempuh dan Deviasi

Jarak tempuh total untuk drone dihitung menggunakan rumus jarak Euclidean antar titik P_n dan P_{n+1} pada lintasan :

$$D_{total} = \sum_{n=1}^{N-1} \|P_{n+1} - P_n\| \quad (4)$$

Deviasi akibat angin dihitung sebagai standar deviasi dari perbedaan antara posisi ideal (tanpa angin) dan posisi yang dipengaruhi angin pada setiap langkah n :

$$\sigma_{deviasi} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\|P_{n+1} - P_n\|)^2} \quad (5)$$

di mana $\sigma_{deviasi}$ adalah deviasi standar akibat angin [11].

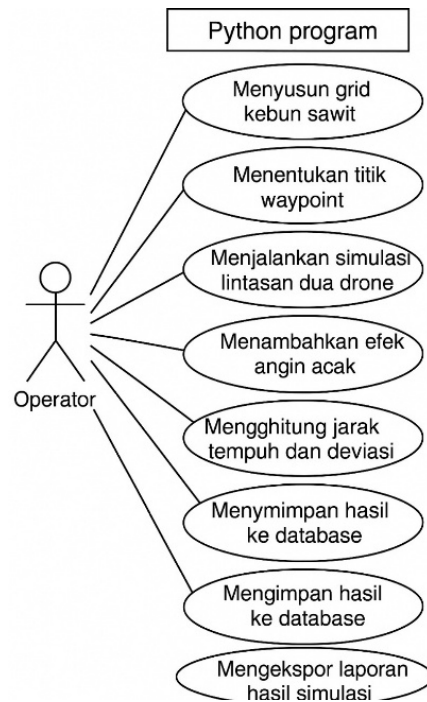
2.5. Visualisasi dan Analisis

Hasil simulasi divisualisasikan dalam grafik 3D lintasan dan Semua simulasi dijalankan menggunakan Python dengan pustaka *Matplotlib* dan *NumPy*. Penggunaan simulasi sebagai pendekatan awal telah terbukti efektif dalam pengembangan sistem AI berbasis UAV sebelum deployment nyata dilakukan [12].

2.6. Unified Modelling Language (UML)

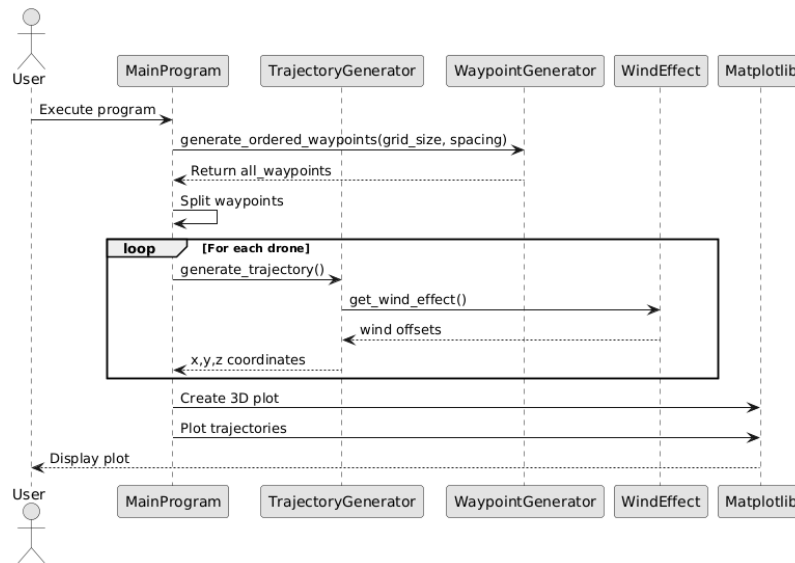
Untuk menjelaskan alur kerja sistem simulasi lintasan drone berbasis Python, digunakan pendekatan pemodelan dengan Unified Modeling Language (UML) yang telah diakui secara luas dalam rekayasa perangkat lunak. UML memungkinkan pemodelan visual terhadap struktur fungsional, proses interaksi antar komponen, serta urutan aktivitas dalam sistem. Pada penelitian ini, digunakan tiga jenis diagram UML, yaitu use case diagram, sequence diagram, dan activity diagram, yang masing-masing merepresentasikan aspek berbeda dari sistem yang dikembangkan.

Gambar 4. menunjukkan use case diagram yang menggambarkan hubungan antara pengguna (dalam hal ini operator) dengan fungsionalitas yang disediakan oleh program. Operator memiliki akses terhadap beberapa fungsi utama seperti penyusunan grid kebun sawit, penentuan titik waypoint, pelaksanaan simulasi lintasan dua drone, penambahan gangguan angin acak, penghitungan jarak tempuh dan deviasi lintasan, serta penyimpanan dan ekspor hasil simulasi. Diagram ini bertujuan untuk memberikan gambaran umum mengenai kebutuhan fungsional sistem dan cakupan interaksi pengguna.



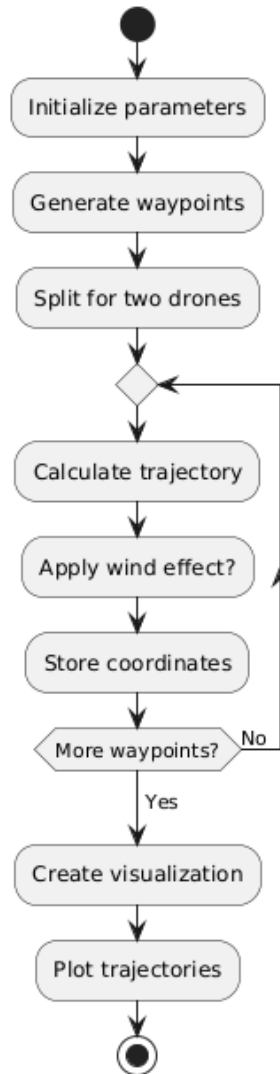
Gambar 4. use case diagram.

Pada Gambar 5. merupakan sequence diagram yang mengilustrasikan urutan interaksi antar objek dalam sistem secara kronologis. Diagram ini memuat alur eksekusi program, mulai dari pemanggilan fungsi pembangkitan *waypoint*, pembagian *waypoint* untuk dua drone, hingga proses generasi lintasan yang disertai efek gangguan angin melalui fungsi *get_wind_effect()*. Setelah proses ini selesai, sistem akan menghasilkan visualisasi lintasan dalam format 3D menggunakan pustaka *Matplotlib*. Diagram ini penting untuk memetakan aliran data dan logika implementasi antar modul secara sistematis.



Gambar 5. sequence diagram.

Terakhir, untuk menjelaskan activity diagram terlihat pada Gambar 6 dimana menjelaskan alur kegiatan sistem secara keseluruhan dari awal hingga akhir. Aktivitas dimulai dengan inialisasi parameter dan dilanjutkan dengan pembentukan titik waypoint, pembagian lintasan untuk dua drone, perhitungan trajektori dengan atau tanpa pengaruh angin, penyimpanan data koordinat, dan pembuatan visualisasi akhir. Diagram ini menyajikan alur kontrol logis dan proses yang bersifat berulang (iteratif) dalam sistem secara rinci.



Gambar 6. activity diagram.

Berdasarkan penjelasan pada gambar diatas, jenis diagram ini saling melengkapi dalam menyajikan pemahaman menyeluruh tentang cara kerja sistem yang dibangun, baik dari sisi fungsi pengguna, mekanisme internal, maupun alur kerja utama. Pendekatan berbasis UML ini sangat membantu dalam proses perancangan dan dokumentasi sistem, sehingga pengembang dapat mengkomunikasikan struktur dan perilaku sistem secara lebih efektif dan terstruktur.

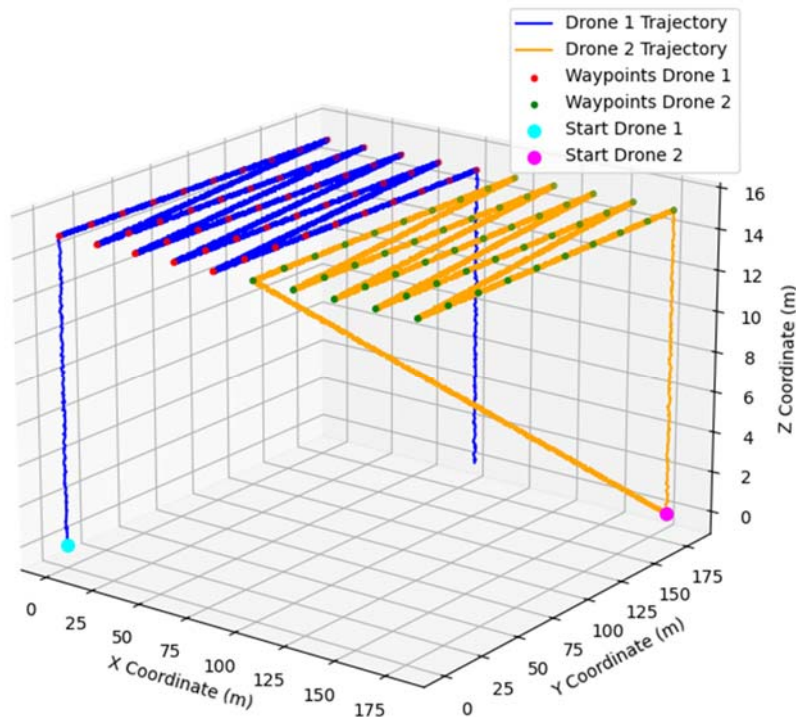
3. Hasil

Simulasi dilakukan untuk dua drone dalam sebuah kebun sawit yang dimodelkan sebagai grid berukuran 10×10 dengan jarak antar pohon sebesar 20 meter. Drone 1 bertanggung jawab untuk

memantau bagian bawah hingga tengah area, sedangkan Drone 2 menangani bagian atas. Simulasi menggunakan interpolasi langkah-langkah kecil (step size = 0.1 m) serta mempertimbangkan gangguan angin dengan distribusi acak untuk mensimulasikan kondisi riil di lapangan.

3.1. Visualisasi Trajektori Drone

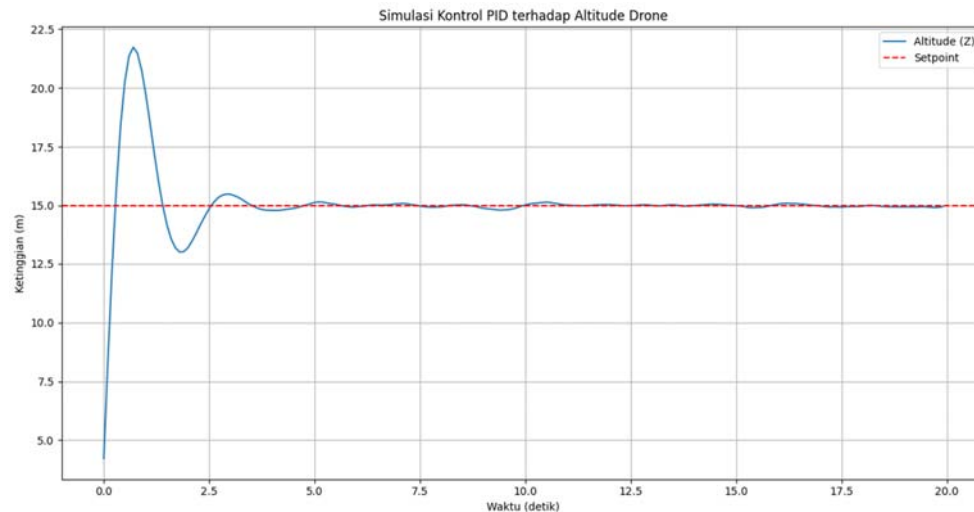
Gambar 7 menunjukkan hasil simulasi tiga dimensi dari lintasan dua drone selama proses pemantauan kebun sawit. Jalur yang dilalui oleh Drone 1 digambarkan dalam warna biru, sedangkan Drone 2 divisualisasikan dalam warna oranye. Titik-titik waypoint yang menjadi acuan jalur terbang ditandai dengan warna merah untuk Drone 1 dan hijau untuk Drone 2, sementara posisi awal masing-masing drone ditunjukkan oleh titik sian (Drone 1) dan magenta (Drone 2). Simulasi ini mempertimbangkan pengaruh angin acak dalam setiap langkah interpolasi, yang menyebabkan penyimpangan ringan dari lintasan lurus ideal antar waypoint. Meskipun rute inspeksi telah ditentukan secara grid dan teratur, efek lingkungan menyebabkan jalur aktual membentuk deviasi yang tampak dalam grafik. Secara umum, kedua drone berhasil menyelesaikan lintasan inspeksi dari titik awal ke titik akhir melalui jalur inspeksi yang efisien, dengan pola lintasan yang tetap berada dalam batas penyimpangan kecil. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem dapat mengakomodasi kondisi dinamis seperti hembusan angin tanpa penyimpangan besar terhadap misi.



Gambar 7. Hasil simulasi 3D Lintasan Drone 1 dan Drone 2 dengan Efek Angin.

Untuk menguatkan analisa visualisasi trajektori drone pada Gambar 7 diatas, ditambahkan pula analisa respons sistem drone terhadap kontrol PID dalam mempertahankan lintasan menuju titik target dengan mempertimbangkan gangguan eksternal berupa angin acak sebagaimana terlihat pada Gambar 8. Meskipun kondisi lingkungan tidak ideal, kontrol PID berhasil menstabilkan pergerakan drone ke arah target, sebagaimana terlihat dari pola lintasan yang secara progresif mendekati titik tujuan. Parameter PID yang digunakan ($K_p = 0.6$, $K_i = 0.04$, $K_d = 0.2$) memberikan keseimbangan antara kecepatan respons dan kestabilan sistem. Integrasi gangguan angin menyebabkan fluktuasi kecil di sepanjang lintasan, namun tidak cukup signifikan untuk menghalangi drone mencapai target. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pengendali cukup adaptif dalam menghadapi dinamika lingkungan dan mampu mempertahankan ketinggian tetap di sekitar

15 meter secara konsisten. Efektivitas ini menunjukkan potensi implementasi nyata dari algoritma PID pada sistem drone otonom dalam misi pemantauan di area terbuka.



Gambar 8. Hasil simulasi respon kontrol PID terhadap altitude drone.

3.2. Analisis Jarak Tempuh dan Deviasi Akibat Angin

Pada Tabel 1 terlihat perhitungan jarak total tempuh yang dilakukan oleh masing-masing drone menunjukkan bahwa Drone 1 menempuh jarak sebesar 8888.14 meter, sedangkan Drone 2 menempuh 9827.74 meter. Perbedaan ini disebabkan oleh variasi distribusi waypoint yang ditugaskan pada masing-masing drone. Hal ini menunjukkan bahwa sistem navigasi ganda memberikan efisiensi dalam distribusi lintasan, meskipun terdapat ketidakseimbangan kecil karena struktur grid. Selain itu, untuk mengevaluasi dampak gangguan lingkungan, deviasi lintasan terhadap jalur ideal dihitung dalam bentuk deviasi standar. Baik Drone 1 maupun Drone 2 memiliki deviasi rata-rata sebesar 0.14 meter. Nilai ini termasuk kecil dan menunjukkan bahwa sistem navigasi mampu menjaga stabilitas terhadap efek gangguan angin ringan hingga sedang.

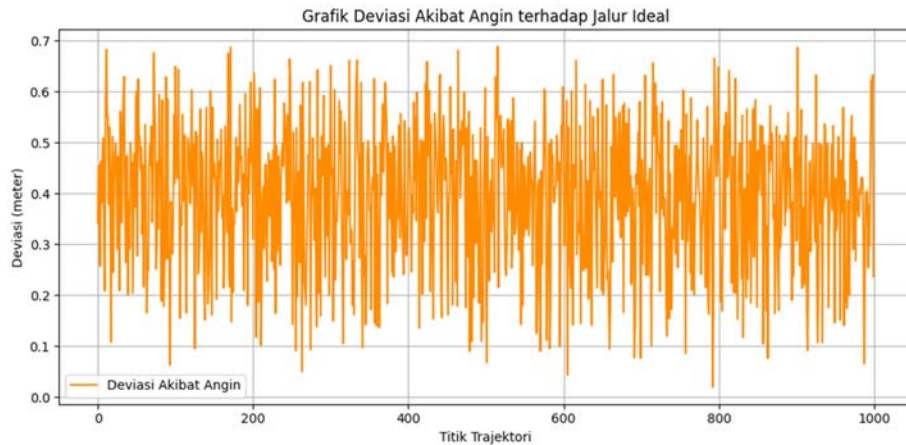
Tabel 1. Hasil simulasi Trajektori Drone

Analisa	Drone 1	Drone 2
Jarak tempuh	8888.14 m	9827.74 m
Standar Deviasi	0.14 m	0.14 m

3.3. Analisis Deviasi Lintasan Akibat Angin

Simulasi ini memperhitungkan pengaruh angin sebagai faktor lingkungan yang memengaruhi kestabilan lintasan drone selama misi pemantauan. Berdasarkan grafik deviasi pada Gambar 9. yang dihasilkan, terlihat bahwa deviasi lintasan bersifat fluktuatif namun tetap berada dalam kisaran toleransi operasional. Rata-rata deviasi yang tercatat untuk kedua drone adalah sekitar ± 0.14 meter, menunjukkan bahwa sistem navigasi yang diterapkan cukup adaptif terhadap gangguan eksternal seperti angin. Pola deviasi yang muncul bersifat acak dan tidak menunjukkan tren peningkatan yang signifikan seiring waktu, yang mengindikasikan bahwa efek akumulatif dari angin berhasil diredam oleh sistem kendali drone. Hal ini dapat disebabkan oleh kestabilan algoritma interpolasi serta distribusi waypoint yang terstruktur dalam bentuk grid. Dari sudut pandang efisiensi energi dan akurasi pengumpulan data, deviasi kecil ini menunjukkan bahwa drone masih mampu mempertahankan lintasan mendekati ideal. Hal ini penting dalam konteks aplikasi nyata di lapangan, seperti pada pemantauan tanaman atau pemetaan lahan, di mana akurasi posisi sangat menentukan

kualitas data yang diperoleh. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sistem dua drone yang diuji dalam simulasi ini menunjukkan ketahanan yang cukup baik terhadap gangguan dinamis lingkungan. Meskipun terdapat variasi kecil akibat angin, sistem tetap menunjukkan kemampuan pelacakan lintasan yang presisi dan stabil, menjadikannya layak diterapkan dalam sistem pemantauan cerdas berbasis drone.



Gambar 9. Hasil simulasi grafik deviasi lintasan akibat angin.

3.4. Evaluasi Efisiensi Sistem Drone Ganda

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan sistem drone ganda memberikan peningkatan signifikan terhadap efisiensi pemantauan wilayah, terutama dalam konteks kebun dengan struktur grid seperti pada perkebunan kelapa sawit. Kedua drone mampu menyelesaikan tugas inspeksi dengan distribusi waypoint yang seimbang dan lintasan yang relatif stabil, meskipun dihadapkan pada variabel lingkungan yang dinamis seperti gangguan angin acak. Jarak tempuh akhir yang dicapai oleh masing-masing drone hanya berbeda dalam kisaran ± 500 – 700 meter, dengan deviasi rata-rata akibat angin sebesar ± 0.14 meter. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem mampu menjaga kestabilan arah dan ketinggian lintasan secara adaptif melalui simulasi berbasis kecerdasan buatan.

Stabilitas dan efisiensi ini memperkuat argumen bahwa pendekatan drone kolaboratif memiliki potensi besar dalam skenario inspeksi berskala menengah hingga besar. Dibandingkan dengan sistem tunggal yang harus menyisir seluruh wilayah sendirian, pendekatan multi-drone tidak hanya mengurangi waktu tempuh secara keseluruhan, tetapi juga meningkatkan cakupan area secara simultan. Model distribusi lintasan yang dikembangkan pada studi ini bersifat skalabel dan dapat diperluas pada sistem multi-UAV yang lebih kompleks.

Lebih jauh, hasil ini sejalan dengan temuan dalam literatur sebelumnya seperti yang dikemukakan oleh Popescu et al. [12], di mana simulasi sistem multi-agen menunjukkan efektivitas koordinasi drone dalam menyelesaikan misi berbasis area dengan efisiensi tinggi. Demikian pula, Anderson et al. [13] menekankan pentingnya strategi swarming dan manajemen koordinasi antar UAV untuk meningkatkan kecepatan respons dan mengurangi redundansi tugas. Penelitian ini membuktikan bahwa model sederhana berbasis pembagian waypoint dan pengaturan jalur inspeksi dengan AI sudah cukup memberikan hasil yang menjanjikan dalam konteks pemantauan berbasis drone di sektor pertanian.

Dengan memanfaatkan pendekatan seperti ini, efisiensi energi drone juga dapat ditingkatkan karena rute yang diambil lebih terfokus dan minim manuver tak perlu akibat gangguan lingkungan. Hal ini penting dalam pengembangan sistem drone berbasis baterai yang memiliki keterbatasan daya. Maka, simulasi yang telah dikembangkan dapat dijadikan sebagai dasar pengujian awal

sebelum sistem diimplementasikan secara nyata di lapangan, sekaligus menjadi referensi bagi sistem monitoring berbasis IoT yang adaptif terhadap kondisi lingkungan.

Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa sistem drone ganda berhasil mendistribusikan beban kerja secara efisien. Drone mampu mempertahankan jalur inspeksi dengan stabil meskipun terdapat pengaruh angin. Deviasi yang rendah dan perbedaan jarak tempuh yang kecil menunjukkan bahwa sistem berbasis dua drone ini cukup andal untuk diimplementasikan pada skala inspeksi pertanian menengah hingga besar. Metode ini sejalan dengan pendekatan multi-agent aerial systems yang menunjukkan bahwa pendekatan kolaboratif antar UAV dapat meningkatkan efisiensi dan cakupan wilayah [12-13]

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menyimulasikan sistem drone ganda berbasis AI untuk pemantauan lahan perkebunan dengan mempertimbangkan pengaruh lingkungan, khususnya angin. Penggunaan dua drone yang bekerja secara paralel terbukti mampu mengurangi waktu inspeksi dan membagi beban kerja secara efisien. Hasil simulasi menunjukkan bahwa meskipun terdapat gangguan angin acak, penyimpangan lintasan tetap berada dalam batas toleransi (standar deviasi ± 0.14 m), selain itu, trajektori kedua drone menunjukkan pergerakan adaptif menuju titik-titik waypoint yang telah ditentukan. Hasil simulasi lintasan menunjukkan potensi penerapan sistem ini di dunia nyata untuk mempercepat proses inspeksi lahan. Dengan demikian, simulasi ini dapat dijadikan sebagai referensi awal dalam merancang sistem drone cerdas untuk pengawasan wilayah pertanian dalam skala besar. Riset lanjutan disarankan untuk mengintegrasikan algoritma pembelajaran mesin dalam pengambilan keputusan rute secara real-time dan adaptasi terhadap kondisi cuaca ekstrem.

Daftar Pustaka

- [1] A. Tokekar, J. Vander Hook, D. Mulla, and V. Isler, "Sensor planning for a symbiotic UAV and UGV system for precision agriculture," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 32, no. 6, pp. 1498–1511, Dec. 2016.
- [2] R. B. R. Warasthe, A. D. Kulkarni, and V. L. Uplane, "Autonomous drone navigation in GPS-denied environment using artificial intelligence," in *Proc. 2021 Int. Conf. Emerg. Smart Comput. Inform. (ESCI)*, Pune, India, 2021, pp. 46–50.
- [3] Y. Huang *et al.*, "Deep learning-based path planning for agricultural UAV," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 113944–113956, 2020.
- [4] P. Rudol and P. Doherty, "Human body detection and geolocalization for UAV search and rescue missions using color and thermal imagery," in *Proc. 2008 IEEE Aerosp. Conf.*, Big Sky, MT, USA, 2008, pp. 1–8.
- [5] C. N. Eze, S. Zhang, and E. Liu, "Autonomous path planning for UAVs using reinforcement learning and evolutionary computation," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 180246–180260, 2019.
- [6] A. R. Mosteo *et al.*, "Multi-robot exploration under the priority target model," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 33, no. 4, pp. 1048–1062, Aug. 2017.
- [7] C. H. Liu, Z. Chen, J. Tang, J. Xu, and C. Piao, "Energy-efficient UAV control for effective and fair communication in wireless networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 9, pp. 2059–2070, Sept. 2018.
- [8] G. Loianno, C. Brunner, G. McGrath, and V. Kumar, "Estimation, control, and planning for aggressive flight with a small quadrotor with a single camera and IMU," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 404–411, Apr. 2017.
- [9] S. LaValle, *Planning Algorithms*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2006.
- [10] R. K. Gupta, Y. H. Zweiri, and L. Seneviratne, "Modeling wind disturbance for UAVs in urban environments," in *Proc. 2013 IEEE Int. Conf. Syst., Man, Cybern.*, Manchester, U.K., 2013, pp. 3887–3892.
- [11] A. Breitenmoser, M. Schwager, J.-C. Metzger, R. Siegwart, and D. Rus, "Voronoi coverage of non-convex environments with a group of networked robots," in *Proc. 2010 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Anchorage, AK, USA, 2010, pp. 4982–4989.

- [12] D. Popescu, M. Ichim, and D. S. Gorunescu, "Using simulations in multi-agent systems for aerial drone applications," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 77692–77703, 2021.
- [13] J. M. Anderson et al., "Aerial swarming and coordination strategies for cooperative UAVs," *Sensors*, vol. 19, no. 24, pp. 1–15, 2019.