

PENGEMBANGAN HEXACOPTER SPRAYER BERKAPASITAS 5 LITER DENGAN SISTEM AKTIVASI NOZEL SELEKTIF BERBASIS KERAPATAN PADA LAHAN TERFRAGMENTASI

Al Al*, Aswir Premadi, Asnal Effendi, Antonov Bachtiar, Dasman Dasman

Program Studi Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik Fakultas Vokasi
Institut Teknologi Padang

*Corresponding Author: al.mtdrs@gmail.com

Abstrak

Sektor pertanian Indonesia menghadapi tantangan struktural berupa kelangkaan tenaga kerja, aplikasi pestisida yang tidak efisien, serta paparan bahan kimia berbahaya terhadap petani. Meskipun drone sprayer berkapasitas besar (10–30 L) telah banyak diadopsi untuk perkebunan ekstensif, penggunaannya masih tidak ekonomis dan tidak fleksibel bagi petani pemilik lahan kecil yang mengelola lahan terfragmentasi dengan topografi kompleks. Penelitian ini mengembangkan hexacopter sprayer berkapasitas 5 liter dengan konfigurasi enam nozel berbasis aktivasi selektif yang disesuaikan dengan kerapatan tajuk tanaman. Sistem yang diusulkan mengintegrasikan tangki 5 L dengan enam nozel yang dipasang pada lengan hexacopter, di mana empat nozel diaktifkan untuk tanaman dengan tajuk penuh dan dua nozel (diposisikan tepat di bawah propeler sisi kiri dan kanan) diaktifkan untuk tanaman dengan tajuk jarang atau aplikasi perkebunan. Prototipe dikembangkan dari platform hexacopter fotogrametri sebelumnya dengan kapasitas angkat 12 kg dan kemampuan terbang otonom. Pengujian laboratorium memperoleh durasi terbang 24,6 menit tanpa beban dan 20,4 menit pada beban penuh (22,7 kg total). Pengujian operasional lapangan di kebun manggis Banjalloweh, Lima Puluh Kota, Sumatera Barat, menunjukkan bahwa operasi dua nozel selektif mencapai targeted spot spraying dengan efisiensi kimia yang lebih tinggi (1 menit per pohon, cakupan $8 \times 8 \text{ m}^2$), sementara operasi empat nozel mempercepat waktu aplikasi menjadi 0,5 menit per pohon namun meningkatkan drift ke area non-target. Sistem yang diusulkan meningkatkan Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) dari 6 menjadi 7, menawarkan solusi yang skalabel dan ekonomis untuk lahan pertanian skala kecil dan terfragmentasi di Indonesia.

Kata kunci : hexacopter sprayer, aktivasi nozel selektif, pertanian presisi, petani pemilik lahan kecil, penyemprotan UAV.

Abstrak

The agricultural sector in Indonesia faces persistent challenges including labor shortages, inefficient pesticide application, and direct chemical exposure to farmers. While large-capacity agricultural drones (10–30 L) have been widely adopted for extensive plantations, their deployment remains economically and operationally impractical for smallholder farmers cultivating fragmented and topographically complex lands. This study presents the development of a 5-liter hexacopter sprayer featuring a novel six-nozzle configuration with selective activation capability based on canopy density. The proposed system integrates a 5 L tank with six nozzles mounted on the hexacopter arms, where four nozzles are activated for full-canopy crops and two nozzles (positioned under the left and right propellers) are activated for sparse-canopy or orchard applications. The prototype was developed from a prior hexacopter photogrammetry platform with a 12 kg lift capacity and autonomous flight capability. Laboratory testing confirmed a flight duration of 24.6 minutes without payload and 20.4 minutes at full load (22.7 kg total weight). Field operational testing at a mangosteen orchard in Banjalloweh, Lima Puluh Kota, West Sumatra, demonstrated that selective two-nozzle operation achieved targeted spot spraying with higher chemical efficiency (1 minute per tree, $8 \times 8 \text{ m}^2$ coverage), whereas four-nozzle operation reduced application time to 0.5 minutes per tree but increased off-target drift. The proposed system advances the Technology Readiness Level (TRL) from 6 to 7, offering a scalable, cost-effective solution for small-scale and fragmented agricultural landscapes in Indonesia.

Keywords : hexacopter sprayer, selective nozzle activation, precision agriculture, smallholder farming, UAV spraying, canopy

1. PENDAHULUAN

Sektor pertanian tetap menjadi tulang punggung perekonomian Indonesia, namun menghadapi tantangan struktural yang semakin kompleks, termasuk penuaan demografi petani, kelangkaan tenaga kerja di pedesaan, serta aplikasi input pertanian yang tidak efisien [1]. Penyemprotan manual konvensional memerlukan tenaga kerja intensif, memakan waktu lama, dan mengekspos operator terhadap bahan kimia berbahaya yang berisiko kesehatan akut maupun kronis [2]. Adopsi Unmanned Aerial Vehicle (UAV) sprayer telah muncul sebagai solusi transformasi untuk pertanian presisi, memungkinkan aplikasi kimia yang cepat, merata, dan lebih aman [3].

Penelitian terkini telah secara ekstensif menginvestigasi pengaruh parameter penyemprotan drone—ketinggian terbang, kecepatan perjalanan, konfigurasi rotor, ukuran droplet, muatan, tekanan semprot, dan konfigurasi nozel—terhadap karakteristik deposisi semprotan [4,5]. Penelitian menunjukkan bahwa aliran udara downwash yang dihasilkan oleh propeler multi-rotor secara signifikan mengubah pola distribusi semprotan, menciptakan interaksi aerodinamika kompleks yang dapat meningkatkan penetrasi tajuk atau menyebabkan drift ke area non-target [4]. Optimasi jarak nozel dan konfigurasi pemasangan telah diidentifikasi sebagai kritis untuk mencapai distribusi semprotan yang merata dan meminimalkan kehilangan kimia [5].

Namun, pasar drone pertanian global telah didominasi oleh platform berkapasitas besar (10–30 L) yang dirancang untuk perkebunan monokultur ekstensif [6]. Di Indonesia, di mana mayoritas petani adalah pemilik lahan kecil yang menggarap lahan kurang dari 2 hektar dengan batas tidak beraturan dan topografi kompleks, drone besar ini menghadirkan hambatan signifikan: investasi modal tinggi (USD 20.000–40.000), infleksibilitas operasional di lahan sempit atau bertingkat, serta muatan yang berlebihan untuk perlakuan spot [7]. Lanskap pertanian Indonesia ditandai dengan fragmentasi kepemilikan lahan, diversitas sistem tanam, dan medan terjal—kondisi yang menuntut platform penyemprotan yang kompak, lincah, dan ekonomis [8].

Pengembangan UAV sprayer berkapasitas kecil (5 L) mengatasi celah kritis ini dengan menawarkan kemampuan targeted spot spraying, investasi awal yang lebih rendah, dan fleksibilitas operasional yang lebih tinggi untuk lahan terfragmentasi [9]. Sistem tersebut secara khusus cocok untuk Controlled Droplet Application (CDA) pada volume ultra-rendah (< 5 L/ha), memungkinkan penyaluran kimia yang presisi dengan dampak lingkungan minimal [10].

Penelitian sebelumnya oleh Purnomo et al. [11] telah mengembangkan platform hexacopter fotogrametri yang mampu terbang otonom dengan kapasitas angkat 12 kg dan stabilitas tinggi. Platform tersebut menetapkan dasar airframe dan sistem navigasi (GPS, IMU, flight controller) yang menjadi fondasi bagi sistem penyemprotan yang dikembangkan saat ini. Namun, konfigurasi fotogrametri tersebut belum memiliki sistem penanganan cairan terintegrasi, optimasi posisi nozel, dan mekanisme kontrol distribusi semprotan yang diperlukan untuk aplikasi pertanian.

Huang et al. [12] mengembangkan sistem semprot UAV untuk platform fenotyping, sementara Zhang dan Kovacs [13] meninjau aplikasi UAV kecil dalam pertanian presisi, menekankan kebutuhan akan sistem penyemprotan adaptif yang merespons kondisi tanaman secara real-time. Yallappa et al. [2] mendemonstrasikan sprayer terpasang pada drone untuk aplikasi pestisida, namun sistem mereka tidak mengintegrasikan aktivasi nozel variabel berdasarkan arsitektur tajuk—faktor kritis untuk tanaman perkebunan dan tajuk jarang. Penelitian ini mengatasi keterbatasan tersebut dengan memperkenalkan mekanisme aktivasi nozel selektif yang beradaptasi terhadap kerapatan tajuk, sehingga mengoptimalkan penggunaan kimia dan meminimalkan aplikasi ke area non-target.

Penelitian ini bertujuan untuk: 1. Mengembangkan dan merealisasikan prototipe hexacopter sprayer berkapasitas 5 liter dengan sistem aktivasi selektif enam nozel. 2. Mengoptimasi posisi dan jarak nozel untuk memanfaatkan downwash rotor guna meningkatkan distribusi semprotan. 3. Mengevaluasi daya tahan terbang, efisiensi penyemprotan, dan kinerja operasional dalam kondisi laboratorium dan lapangan. 4. Meningkatkan Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) dari 6 (demonstrasi prototipe di lingkungan relevan) menjadi 7 (demonstrasi prototipe sistem di lingkungan operasional).

Kontribusi ilmiah dan teknologi utama dari penelitian ini adalah: Aktivasi Nozel Selektif Berbasis Kerapatan Tajuk. Berbeda dengan drone sprayer konvensional yang mengoperasikan semua nozel secara simultan tanpa memperhatikan arsitektur tanaman, sistem yang diusulkan menggunakan enam nozel dengan aktivasi selektif: empat nozel untuk tanaman dengan tajuk penuh (memaksimalkan lebar cakupan) dan dua nozel (diposisikan tepat di bawah propeler kiri dan kanan) untuk tanaman dengan tajuk jarang atau aplikasi perkebunan. Arsitektur ini memungkinkan targeted spot spraying yang mengurangi pemborosan kimia dengan menghindari aplikasi ke tanah telanjang.

Eksplorasi Downwash Rotor untuk Distribusi Semprotan. Dimana posisi nozel dirancang dengan sengaja untuk selaras dengan pola downwash enam rotor hexacopter. Penelitian terkini mengonfirmasi bahwa konfigurasi hexa-nozel menghasilkan distribusi semprotan yang lebih merata dibandingkan pengaturan boom karena interaksi langsung antara turbulensi yang diinduksi rotor dan trajektori droplet [4,5]. Downwash menghasilkan turbulensi yang dalam dan penetrative ke dalam tajuk tanaman, meningkatkan absorpsi kimia bahkan pada volume rendah [4,5].

Kapasitas 5 L secara spesifik didimensikan untuk misi perlakuan spot (≤ 1 ha) dan siklus turnaround yang cepat, berbeda dengan drone berkapasitas besar yang memerlukan pengisian ulang dan pergantian baterai yang lama. Kapasitas ini selaras dengan realitas operasional pertanian smallholder Indonesia, di mana ukuran lahan kecil dan heterogenitas tanaman tinggi [7,8]. Sistem mempertahankan kemampuan terbang otonom (navigasi waypoint berbasis GPS, failsafe return-to-home) dari platform fotogrametri pendahulu, memungkinkan eksekusi rute yang presisi tanpa intervensi operator yang berkelanjutan [11].

2. METODOLOGI

2.1 Desain Sistem

Hexacopter sprayer dikembangkan dari platform hexacopter fotogrametri dengan spesifikasi sebagai berikut:

Parameter	Spesifikasi
Tipe Airframe	Hexacopter
Bobot Maximum Take-off (MTOW)	26 kg
Bobot Kosong (dengan baterai)	15,7 kg
Kapasitas Muatan	Tangki cairan 5 L
Bobot Total (Beban Penuh)	22,7 kg
Dimensi	Tinggi: 690 mm; Lebar: 1.375 mm
Baterai	Li-Po, 2200 mAh, 51 V (awal)
Kecepatan Terbang	5,4–7 m/s
Durasi Terbang Maksimum	25 menit (tanpa beban)
Suhu Operasional	-10°C hingga 50°C
Ketinggian Maksimum	100 m
GPS	Here 3
IMU	CUAV Nora
Konfigurasi Nozel	6 nozel (aktivasi selektif 2 atau 4 nozel)

2.2 Konfigurasi Nozel dan Aktivasi Selektif

Sistem enam nozel diatur sebagai berikut: - **Empat nozel** dipasang pada posisi lengan luar (diaktifkan untuk tanaman dengan tajuk penuh) - **Dua nozel** diposisikan tepat di bawah hub propeler kiri dan kanan (diaktifkan untuk tanaman dengan tajuk jarang atau aplikasi perkebunan) Aktivasi dikontrol melalui *flight controller*, memungkinkan peralihan real-time berdasarkan parameter misi yang telah diprogram atau pengesetan manual.

2.3 Protokol Pengujian

Pengujian Laboratorium: - Pengukuran daya tahan terbang pada kondisi tanpa beban (15,7 kg) dan beban penuh (22,7 kg) - Pemantauan pemakaian baterai dengan aktivasi otomatis *return-to-home* (RTH) pada sisa kapasitas 10% (42,6 V)

Pengujian Operasional Lapangan: - Lokasi: Kebun manggis, Banjaloweh, Bukit Barisan, Lima Puluh Kota, Sumatera Barat, Indonesia (Lintang: -0,048239°, Bujur: 100,473746°) - Tanggal: 13 September 2025 - Parameter tanaman: Tinggi pohon ~10 m; diameter tajuk ~8 m; jarak tanam 12 m - Profil misi: Ground station ke target (1 menit), penyemprotan (5 menit untuk 5 pohon), kembali (1 menit), pengisian ulang (2 menit).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Kinerja Laboratorium

Kondisi	Durasi Terbang Rata-rata	Tegangan Pemicu RTH
Tanpa beban (15,7 kg)	24,6 menit	42,6 V (sisa 10%)
Beban penuh (22,7 kg)	20,4 menit	42,6 V (sisa 10%)

Penurunan durasi terbang 17% pada kondisi beban penuh konsisten dengan peningkatan permintaan daya untuk angkat dan kompensasi stabilitas. Fungsi RTH otomatis memastikan keselamatan operasional dengan mencegah kecelakaan akibat habisnya baterai.

3.2 Efisiensi Operasional Lapangan

Operasi Dua Nozel (Tajuk Jarang): - Laju aplikasi: 1 menit per pohon - Area cakupan per pohon: 64 m² (8 × 8 m) - Efisiensi kimia: Tinggi (aplikasi terarah ke tajuk saja) - *Drift* ke non-target: Minimal
Operasi Empat Nozel (Tajuk Penuh): - Laju aplikasi: 0,5 menit per pohon - Area cakupan per pohon: 64 m² - Efisiensi kimia: Berkurang (*drift* signifikan ke tanah telanjang) - *Drift* ke non-target: Meningkat. **Analisis Siklus Misi:** - Kapasitas terbang per misi: 5 L (5 pohon per misi) - Durasi misi: 7 menit (1 menit transit + 5 menit penyemprotan + 1 menit kembali) - Waktu pengisian ulang: 2 menit - Daya tahan baterai per pengisian penuh: 21 menit (berbeban) - **Misi per baterai:** 3 penerbangan (15 pohon) - **Total pohon per siklus baterai:** 15 pohon dalam 21 menit waktu operasional + 6 menit pengisian = 27 menit siklus efektif - **Operasi dua baterai:** 30 pohon dalam 42 menit. **Proyeksi Skalsasi:** - Untuk 80 pohon: 3 × 42 menit = 126 menit, mengonsumsi 80 L cairan kimia.

3.3 Keunggulan Komparatif

Hasil menunjukkan bahwa **operasi dua nozel selektif mencapai efisiensi kimia yang superior** untuk aplikasi perkebunan di mana cakupan tajuk bersifat parsial. Temuan ini selaras dengan penelitian terkini yang menunjukkan bahwa **konfigurasi hexa-nozel menghasilkan distribusi semprotan yang lebih merata dengan koefisien variasi (CV) lebih rendah** dibandingkan pengaturan *boom*, terutama ketika ketinggian *hover* dioptimalkan pada 2,0 m [4,5]. *Downwash* rotor pada ketinggian ini menghasilkan turbulensi penetrative yang meningkatkan deposisi droplet pada permukaan target sambil meminimalkan *drift* vertikal [4].

Sebaliknya, operasi empat nozel—meskipun menggandakan kecepatan aplikasi—mengorbankan presisi dengan mendistribusikan kimia ke area non-target. **Trade-off antara kecepatan dan presisi** ini fundamental dalam pertanian presisi dan memvalidasi novelty pendekatan aktivasi selektif.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan mendemonstrasikan hexacopter sprayer berkapasitas 5 liter dengan sistem aktivasi enam nozel selektif untuk aplikasi pertanian presisi pada sistem pertanian smallholder dan lahan terfragmentasi. Kesimpulan utama adalah:

Realisasi Desain: Prototipe mengintegrasikan tangki 5 L, enam nozel dengan aktivasi selektif, dan navigasi otonom (GPS/IMU) pada airframe hexacopter yang telah terbukti dengan kapasitas MTOW 26 kg.

Kinerja Operasional: Pengujian laboratorium memperoleh durasi terbang 24,6 menit tanpa beban dan 20,4 menit dengan beban penuh, dengan fungsi failsafe RTH otomatis pada sisa baterai 10%.

Efikasi Lapangan: Pengujian operasional di kebun manggis menunjukkan bahwa aktivasi dua nozel selektif mencapai targeted spot spraying dengan efisiensi kimia yang lebih tinggi (1 menit/pohon), sementara aktivasi empat nozel meningkatkan kecepatan (0,5 menit/pohon) dengan biaya peningkatan drift ke non-target.

Peningkatan Teknologi: Sistem berhasil meningkatkan TKT dari 6 menjadi 7 melalui demonstrasi lingkungan operasional yang berhasil.

Hexacopter sprayer yang diusulkan mengatasi celah kritis dalam pasar drone pertanian dengan menyediakan solusi yang terjangkau, lincah, dan adaptif untuk lanskap pertanian Indonesia yang didominasi smallholder. Penelitian mendatang harus mengintegrasikan sensor tajuk multispektral untuk kontrol aktivasi nozel real-time dan mengembangkan optimasi jalur terbang berbasis AI untuk medan kompleks.

UCAPAN TERIMA KASIH

Artikel ini merupakan hasil penelitian Program Hilirisasi Riset - Pengujian Model dan Prototipe Tahun Anggaran 2025, Institut Teknologi Padang, dengan dukungan Direktorat Hilirisasi dan Kemitraan, Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Pertanian Republik Indonesia, Roadmap Pertanian 4.0 untuk Mendukung Smart Farming, Jakarta: Kementan, 2022.
- [2] Yallappa R, Veerabhadrapa, Ramesh R, "Development and evaluation of drone mounted sprayer for pesticide applications in agriculture," *Int J Agric Biol Eng*, vol. 10, no. 5, hal. 169–176, 2017.
- [3] Zhang C, Kovacs JM, "The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review," *Precision Agric*, vol. 13, no. 6, hal. 693–712, 2012.
- [4] [Penulis], "Improving agricultural spraying with multi-rotor drones," *Frontiers in Nutrition*, vol. 11, 2024.
- [5] [Penulis], "Optimization of operational parameters for agricultural drone sprayers," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2024.
- [6] Grand View Research, "Agriculture Drones Market Size, Share & Growth Report 2030," 2024. Tersedia: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/agriculture-drones-market>
- [7] Terra Drone Agri, "Challenges and Potential of Smart Farming in Asia," 2024. Tersedia: <https://terra-droneagri.com/challenges-and-potential-of-smart-farming-in-asia/>
- [8] FFTC/AP, "National Agricultural Development Planning of Indonesia 2025–2029," 2025.
- [9] Terra Drone Corporation, "Terra Drone Selected for the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries Project of Supporting Smart Agriculture Verification in Southeast Asia (Indonesia)," 2025. Tersedia: <https://terra-drone.net/global/2025/02/27/terra-drone-selected-for-the-ministry-of-agriculture-forestry-and-fisheries-project-of-supporting-smart-agriculture-verification-in-southeast-asia-indonesia/>
- [10] Abz Innovation, "Optimizing Drone Spray Settings: 4 Pillars of Precision," 2026.
- [11] Purnomo D, Mustafid M, Fitriyani A, "Desain dan implementasi drone hexacopter untuk pemetaan udara," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 10, no. 1, hal. C6–9, 2021.
- [12] Huang Y, Hoffmann WC, Lan Y, Wu W, Fritz BK, "Development of a spray system for UAV application in high-throughput phenotyping platform," *Comput Electron Agric*, vol. 98, hal. 112–120, 2013.
- [13] Wolfert S, Ge L, Verdouw C, Bogaardt MJ, "Big Data in Smart Farming – A review," *Agric Syst*, vol. 153, hal. 69–80, 2017.
- [14] MarketsandMarkets, "Agricultural Drones Market by Application, Offering, Component, and Region - Global Forecast to 2030," 2023.
- [15] Andanaputra dkk., "GNSS-based navigation systems of autonomous drone for pesticide sprayer," *ICIC Express Letters*, 2020.