



Kinerja dan Biaya Aplikasi Herbisida Pratumbuh Menggunakan *Drone* dan *Knapsack Sprayer* pada Tebu *Plant Cane*

Iwan Era Syahputra^{1*}, Mawar Indah Peranginangin², Fajar Ramadhan³

¹⁻² Program Studi Teknologi Produksi Tanaman Perkebunan, Politeknik Pembangunan Pertanian Medan, Indonesia

³ PT Sinergi Gula Nusantara MKSO Kebun Sei Semayang, Indonesia

*Penulis Korespondensi: iwanerasyahputra@gmail.com

Abstract. Pre-emergence herbicide application in plant cane sugarcane must be completed within a narrow operational window, making work capacity, labor requirement, and unit cost central to method selection. This study compared the operational performance and cost of a drone sprayer and a conventional knapsack sprayer at PT Sinergi Gula Nusantara MKSO Kebun Sei Semayang. A quantitative descriptive-comparative design was applied to 38 operational days during the 2025/2026 planting season, comprising 20 drone days and 18 conventional days. Actual work capacity and labor requirement were tested using the Mann–Whitney U test, while costs were evaluated descriptively through one-way sensitivity and break-even analyses. The drone achieved 10.93 ha/day, approximately 4.03 times the conventional capacity of 2.71 ha/day. Labor requirement was 0.2506 man-days/ha for the drone and 1.3160 man-days/ha for the conventional method. Both differences were significant ($p < 0.001$) with large effect sizes. Nevertheless, drone application cost IDR 804,043/ha, 5.95% above the conventional cost of IDR 758,908/ha. Cost parity occurred at a drone service tariff of IDR 216,838/ha or a conventional field cost of IDR 252,942/ha. The drone is therefore preferable for time- and labor-constrained operations, whereas the conventional method remains economical under the current cost structure.

Keywords: Break-Even Analysis; Conventional Sprayer; Drone Sprayer; Operational Cost; Sugarcane.

Abstrak. Aplikasi herbisida pratumbuh pada tebu *plant cane* harus diselesaikan dalam jendela waktu yang sempit sehingga kapasitas kerja, kebutuhan tenaga kerja, dan biaya per hektare menjadi dasar penting dalam pemilihan metode. Penelitian ini membandingkan kinerja operasional dan biaya aplikasi menggunakan *drone sprayer* dan *knapsack sprayer* konvensional di PT Sinergi Gula Nusantara MKSO Kebun Sei Semayang. Pendekatan kuantitatif deskriptif-komparatif diterapkan terhadap 38 hari operasi pada musim tanam 2025/2026, yang terdiri atas 20 hari operasi *drone* dan 18 hari operasi konvensional. Kapasitas kerja aktual dan kebutuhan tenaga kerja diuji dengan Mann–Whitney U, sedangkan biaya dianalisis secara deskriptif melalui analisis sensitivitas satu arah dan titik impas. *Drone* menghasilkan kapasitas 10,93 ha/hari atau sekitar 4,03 kali metode konvensional sebesar 2,71 ha/hari. Kebutuhan tenaga kerjanya 0,2506 HOK/ha, lebih rendah daripada metode konvensional sebesar 1,3160 HOK/ha. Kedua perbedaan signifikan pada $p < 0,001$ dengan ukuran efek besar. Namun, biaya *drone* mencapai Rp804.043/ha atau 5,95% lebih tinggi daripada biaya konvensional Rp758.908/ha. Kesetaraan biaya tercapai pada tarif jasa *drone* Rp216.838/ha atau biaya garap konvensional Rp252.942/ha. *Drone* lebih sesuai untuk operasi yang dibatasi waktu dan tenaga kerja, sedangkan metode konvensional tetap ekonomis pada struktur biaya aktual.

Kata kunci: Analisis Titik Impas; Biaya Operasional; *Drone Sprayer*; Penyemprot Konvensional; Tebu.

1. LATAR BELAKANG

Tebu (*Saccharum officinarum* L.) merupakan komoditas strategis karena batangnya menjadi sumber utama sukrosa bagi industri gula. Luas areal tebu Indonesia pada 2024 mencapai 520,82 ribu ha, tetapi produksi gula nasional sebesar 2,47 juta ton masih belum mengimbangi kebutuhan sehingga impor tetap tinggi (Badan Pusat Statistik, 2025). Peningkatan produksi karena itu tidak cukup bertumpu pada perluasan lahan, melainkan memerlukan ketepatan pengelolaan budidaya, efisiensi pekerjaan lapangan, dan pemanfaatan teknologi yang sesuai. Karakter tanaman tebu yang memiliki siklus panjang dan kemampuan

menyimpan sukrosa pada batang juga menuntut pemeliharaan awal yang konsisten agar populasi dan pertumbuhan batang dapat (Dinesh Babu et al., 2022).

Gulma menjadi salah satu pembatas utama pada fase awal *plant cane* karena bersaing memperoleh air, unsur hara, cahaya, dan ruang tumbuh. Persaingan yang berlangsung pada periode kritis dapat menurunkan jumlah anakan, pertumbuhan batang, hasil tebu, dan hasil gula (Tadele et al., 2022). Standar budidaya tebu menempatkan pengendalian gulma sebagai bagian penting dari pemeliharaan tanaman, terutama ketika tajuk tebu belum menutup permukaan tanah (Badan Standardisasi Instrumen Pertanian, 2023). Herbisida pratumbuh digunakan untuk menekan kemunculan gulma sebelum kompetisi berkembang. Aplikasi yang tepat dapat menurunkan kepadatan serta biomassa gulma, sedangkan strategi pengendalian kimia yang sesuai berhubungan dengan peningkatan hasil dan keuntungan usaha tani (Madhu et al., 2021; Pringgani et al., 2025).

Keberhasilan herbisida pratumbuh tidak hanya ditentukan oleh bahan aktif dan dosis. Waktu aplikasi, kondisi permukaan tanah, volume semprot, ukuran *droplet*, kecepatan kerja, dan keseragaman distribusi ikut menentukan kualitas operasi. *Drone* pertanian menawarkan lebar sapuan, navigasi otomatis, dan volume aplikasi yang lebih rendah, tetapi kinerja semprotnya dipengaruhi oleh ketinggian terbang, *nozzle*, cuaca, dan parameter penerbangan (García-Munguía et al., 2024; Ranabhat & Price, 2025; Talaeizadeh et al., 2025). Perbandingan dengan alat darat juga memperlihatkan perbedaan ukuran *droplet*, penutupan sasaran, serta potensi hanyutan sehingga peningkatan kapasitas tidak boleh dipisahkan dari pengaturan teknis yang tepat (Gibbs et al., 2021).

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa UAV dapat mengurangi volume semprot dan tetap menghasilkan deposisi serta pengendalian gulma yang memadai ketika konfigurasi aplikasi disesuaikan (Paul et al., 2024). Pada konteks Indonesia, *drone sprayer* dilaporkan meningkatkan efisiensi waktu dan tenaga dalam pengendalian gulma, meskipun hasil teknisnya dipengaruhi kondisi lahan, jenis alat, dan pola pelaksanaan (Mahhendra et al., 2025; Saumatgerat et al., 2024; Syarief et al., 2024). Kajian pemantauan tebu juga menegaskan bahwa platform UAV memiliki prospek luas dalam pertanian presisi, tetapi nilai tambah teknologi baru akan terbentuk apabila informasi teknis diterjemahkan menjadi keputusan operasional di tingkat kebun (Amarasingam et al., 2022).

Penilaian metode aplikasi tidak cukup berdasarkan kecepatan. *Drone* dapat menekan beban kerja, tetapi biaya investasi atau jasa, operator, pemeliharaan, dan pajak dapat menyebabkan biaya per hektare lebih tinggi. Kajian pada produksi padi menunjukkan bahwa manfaat *drone* perlu dibaca bersama biaya dan beban kerja (Umeda et al., 2022). Analisis

ekonomi teknologi presisi juga menekankan pentingnya biaya satuan, skala penggunaan, sensitivitas parameter, dan titik impas agar keputusan tidak hanya berlandaskan keunggulan teknis (Finco et al., 2021; Kushwah et al., 2024; Testa et al., 2025).

PT Sinergi Gula Nusantara MKSO Kebun Sei Semayang menggunakan *knapsack sprayer* yang dioperasikan buruh harian lepas dan mulai menerapkan jasa *drone sprayer* pada *plant cane*. Kedua metode mempunyai struktur kerja berbeda: metode konvensional fleksibel dan berbiaya garap relatif rendah, sedangkan *drone* memiliki lebar sapuan lebih besar serta hanya memerlukan pilot dan asisten. Bukti lapangan yang membandingkan kapasitas aktual, kebutuhan HOK, biaya komponen, sensitivitas, dan batas titik impas pada aplikasi herbisida pratumbuh tebu masih terbatas. Sebagian penelitian terdahulu lebih menitikberatkan efektivitas biologis, deposisi, atau perbandingan teknis pada komoditas lain.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan hari operasi aktual sebagai unit analisis, penggabungan indikator kapasitas dan tenaga kerja dengan struktur biaya perusahaan, serta penentuan ambang biaya yang membuat *drone* dan metode konvensional setara. Penelitian bertujuan membandingkan kinerja operasional dan biaya kedua metode, kemudian merumuskan kondisi penggunaannya berdasarkan kebutuhan penyelesaian pekerjaan dan keterbatasan sumber daya.

2. KAJIAN TEORITIS

Kinerja operasional menggambarkan kemampuan metode menyelesaikan pekerjaan pada kondisi lapangan. Kapasitas kerja aktual dinyatakan sebagai luas areal yang diselesaikan per hari, sedangkan kebutuhan tenaga kerja menunjukkan jumlah HOK untuk mengerjakan satu hektare. Konsep kapasitas aktual mempertimbangkan waktu efektif, pengisian ulang, perpindahan, serta hambatan operasi, sehingga lebih representatif daripada kapasitas teoritis (Yamin et al., 2022). Kebutuhan tenaga kerja per satuan luas dapat dihitung dari jumlah orang dan hari kerja yang digunakan dibandingkan dengan areal yang diselesaikan (Yousif & Ahmed, 2025).

Drone sprayer dan *knapsack sprayer* memiliki mekanisme kerja yang berbeda. *Drone* menggunakan jalur terbang dan lebar sapuan yang relatif konsisten, sedangkan *knapsack* mengandalkan gerak operator, pengisian ulang tangki, dan kestabilan ayunan *nozzle*. Perbedaan tersebut diperkirakan menghasilkan kapasitas serta kebutuhan tenaga kerja yang berbeda. Namun, volume semprot rendah pada UAV harus dikelola agar distribusi *droplet* dan penutupan sasaran tetap memenuhi kebutuhan aplikasi (Gibbs et al., 2021; Paul et al., 2024).

Biaya operasional merupakan biaya pelaksanaan per hektare yang dalam penelitian ini terdiri atas biaya garap, bahan herbisida, bunga modal kerja, dan PPN. Karena bahan dan dosis sama, pembeda utama berasal dari sistem pelaksanaan. Analisis sensitivitas satu arah digunakan untuk menilai perubahan hasil ketika satu parameter biaya diubah sementara parameter lain tetap. Pendekatan ini membantu mengidentifikasi komponen yang paling menentukan dan menguji ketahanan kesimpulan (Grznár et al., 2024). Titik impas selanjutnya menunjukkan tarif jasa atau biaya tenaga kerja yang membuat total biaya kedua metode sama (Testa et al., 2025).

Kerangka keputusan penelitian menempatkan kapasitas, HOK, dan biaya sebagai indikator yang saling melengkapi. Metode berkapasitas tinggi lebih bernilai ketika jendela aplikasi sempit atau tenaga kerja terbatas, sedangkan metode dengan biaya satuan rendah lebih menarik ketika pekerjaan dapat diselesaikan sesuai jadwal. Dengan demikian, pemilihan metode diarahkan pada kesesuaian kondisi, bukan pada penetapan satu teknologi sebagai pilihan mutlak.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan pada Januari–April 2026 di Rayon A PT Sinergi Gula Nusantara MKSO Kebun Sei Semayang, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara, dengan menggunakan data operasi musim tanam 2025/2026. Desain penelitian bersifat kuantitatif deskriptif-komparatif dan non-eksperimental. Data diperoleh dari laporan harian aplikasi, luas areal, jumlah operator atau buruh harian lepas, dokumen Manajemen Biaya Kebun, tarif pekerjaan konvensional, kontrak jasa *drone*, biaya bahan, bunga modal kerja, dan PPN.

Populasi mencakup seluruh hari operasi aplikasi herbisida pratumtumbuh pada *plant cane* di Rayon A. Sampel jenuh menghasilkan 38 hari operasi yang memenuhi kriteria, terdiri atas 20 hari *drone* dan 18 hari konvensional. Apabila satu metode mengerjakan beberapa blok pada tanggal yang sama, luas serta tenaga kerja digabung menjadi satu entri sehingga unit analisis tetap satu hari operasi. Data cakupan per blok digunakan sebagai konteks deskriptif, sedangkan pengujian kinerja menggunakan unit hari operasi.

Kinerja operasional kedua metode dianalisis melalui kapasitas kerja aktual dan kebutuhan tenaga kerja per hektare. Kapasitas kerja aktual menunjukkan kemampuan suatu metode dalam menyelesaikan aplikasi herbisida selama satu hari operasi. Nilai tersebut dihitung dengan membagi luas areal yang berhasil diselesaikan dengan jumlah hari operasi dan dinyatakan dalam satuan ha/hari. Semakin tinggi kapasitas kerja aktual, semakin luas areal yang dapat ditangani dalam waktu kerja yang sama. Adapun kebutuhan tenaga kerja

menggambarkan intensitas penggunaan tenaga kerja pada setiap hektare areal aplikasi. Nilai ini dihitung dengan membagi jumlah hari orang kerja yang digunakan dengan luas areal aplikasi dan dinyatakan dalam HOK/ha. Nilai HOK/ha yang lebih rendah menunjukkan bahwa suatu metode mampu menyelesaikan pekerjaan dengan penggunaan tenaga kerja yang lebih efisien.

Data kapasitas kerja aktual dan kebutuhan tenaga kerja dianalisis terlebih dahulu menggunakan statistik deskriptif yang meliputi rata-rata, standar deviasi, nilai minimum, nilai maksimum, frekuensi, dan persentase. Nilai rata-rata digunakan untuk menggambarkan kecenderungan umum kinerja setiap metode, sedangkan standar deviasi menunjukkan tingkat variasi hasil selama periode operasi. Nilai minimum dan maksimum digunakan untuk melihat rentang kinerja terendah dan tertinggi, sementara frekuensi serta persentase digunakan untuk menjelaskan distribusi cakupan areal, jumlah hari operasi, dan karakteristik pelaksanaan aplikasi. Statistik deskriptif diperlukan agar pola data dapat dipahami secara ringkas sebelum dilakukan pengujian lebih lanjut (Mishra et al., 2019).

Sebelum dilakukan uji perbedaan, normalitas data pada masing-masing kelompok diperiksa menggunakan uji Shapiro-Wilk. Uji tersebut dipilih karena jumlah pengamatan pada setiap kelompok kurang dari 50 dan sesuai untuk mengevaluasi distribusi data pada sampel berukuran relatif kecil (Ahadi & Zain, 2023). Pengujian dilakukan pada taraf signifikansi 5%. Data dinyatakan berdistribusi normal apabila nilai signifikansi lebih besar dari 0,05, sedangkan nilai signifikansi kurang dari atau sama dengan 0,05 menunjukkan bahwa data tidak memenuhi asumsi normalitas.

Apabila data tidak berdistribusi normal, perbandingan kinerja antara metode *drone sprayer* dan metode konvensional dilakukan menggunakan uji Mann-Whitney U. Uji nonparametrik tersebut digunakan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara dua kelompok independen pada indikator kapasitas kerja aktual dan kebutuhan tenaga kerja. Perbedaan dinyatakan signifikan apabila nilai p lebih kecil dari 0,05, sedangkan nilai p lebih besar dari atau sama dengan 0,05 menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik (Chicco et al., 2025).

Selain menilai signifikansi statistik, kekuatan perbedaan antara kedua metode dihitung menggunakan ukuran efek $r = |Z|/\sqrt{N}$. Dalam persamaan tersebut, Z merupakan nilai statistik baku hasil uji Mann-Whitney U, sedangkan N adalah jumlah seluruh pengamatan dari kedua kelompok. Nilai r kurang dari 0,30 ditafsirkan sebagai efek kecil, nilai 0,30 sampai kurang dari 0,50 sebagai efek sedang, dan nilai r sebesar atau lebih dari 0,50 sebagai efek besar (Tomczak

& Tomczak, 2014). Ukuran efek digunakan agar perbedaan yang ditemukan tidak hanya dinilai dari signifikansi statistik, tetapi juga dari kekuatan makna operasionalnya.

Analisis biaya dilakukan secara deskriptif dalam satuan Rp/ha karena data bersumber dari dokumen administrasi dan catatan biaya perusahaan, bukan dari pengamatan acak berulang. Komponen yang dianalisis meliputi biaya garap, biaya bahan herbisida, bunga modal kerja, dan pajak pertambahan nilai. Seluruh komponen tersebut dijumlahkan untuk memperoleh total biaya operasional setiap metode per hektare. Penggunaan satuan Rp/ha memungkinkan biaya metode *drone sprayer* dan metode konvensional dibandingkan secara proporsional meskipun luas areal yang ditangani oleh kedua metode berbeda.

Perbandingan ekonomi dilakukan dengan menghitung selisih total biaya antara metode *drone* dan konvensional serta persentase perbedaannya. Selisih tersebut digunakan untuk menunjukkan besarnya tambahan biaya atau potensi penghematan pada setiap hektare areal. Namun, penilaian ekonomi tidak hanya didasarkan pada kondisi biaya aktual. Analisis sensitivitas satu arah juga dilakukan untuk mengetahui kestabilan kesimpulan apabila terjadi perubahan pada komponen biaya tertentu. Skenario yang dianalisis mencakup kenaikan tarif jasa *drone* sebesar 10%, penurunan tarif jasa *drone* sebesar 10%, serta kenaikan biaya garap metode konvensional sebesar 10%. Pada setiap skenario, hanya satu komponen yang diubah, sedangkan komponen biaya lainnya dipertahankan tetap.

Analisis sensitivitas digunakan untuk mengetahui apakah perubahan biaya dalam batas tersebut mampu mengubah posisi metode yang lebih murah. Apabila metode dengan biaya terendah tetap sama pada seluruh skenario, kesimpulan ekonomi dinilai relatif stabil. Sebaliknya, apabila perubahan salah satu komponen menyebabkan pergeseran posisi biaya, keputusan penggunaan metode dinilai sensitif terhadap komponen tersebut. Hasil analisis ini dapat membantu perusahaan dalam mempertimbangkan perubahan tarif jasa, kenaikan upah tenaga kerja, maupun penyesuaian biaya operasional pada musim tanam berikutnya.

Titik impas dihitung dengan menyamakan total biaya operasional metode *drone sprayer* dan metode konvensional. Perhitungan tersebut menghasilkan ambang tarif jasa *drone* atau ambang biaya garap konvensional yang menyebabkan kedua metode memiliki biaya per hektare yang sama. Nilai titik impas dapat digunakan sebagai dasar evaluasi kontrak, negosiasi tarif, dan perencanaan anggaran perusahaan. Kesimpulan ekonomi selanjutnya ditetapkan berdasarkan total biaya aktual, selisih biaya per hektare, persentase perbedaan, perubahan biaya pada setiap skenario sensitivitas, serta nilai ambang yang dihasilkan melalui analisis titik impas.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Operasional

Data operasional menunjukkan bahwa aplikasi herbisida pratumbuh dilaksanakan pada areal seluas 267,348 ha yang tersebar di 48 blok tanaman tebu *plant cane*. Metode *drone sprayer* digunakan pada 218,534 ha atau 81,74% dari total cakupan, sedangkan metode konvensional menggunakan *knapsack sprayer* diterapkan pada 48,814 ha atau 18,26%. Proporsi tersebut memperlihatkan bahwa *drone* menjadi metode dominan selama periode penelitian dan lebih banyak dialokasikan pada areal yang luas. Seluruh blok diaplikasikan dalam rentang 1–7 hari setelah tanam (HST) sesuai standar waktu perusahaan. Keseragaman jendela aplikasi menunjukkan bahwa kedua metode dioperasikan pada tahap budidaya yang relatif sebanding, sehingga perbedaan kinerja tidak dipengaruhi oleh kelompok yang terlambat atau berada di luar standar waktu. Meskipun cakupan arealnya tidak seimbang, perbandingan dilakukan menggunakan satuan terstandar, yaitu ha/hari dan HOK/ha. Karakteristik operasi dan spesifikasi alat diringkas pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Operasi dan Spesifikasi Metode Aplikasi.

Indikator	<i>Drone sprayer</i>	Konvensional
Jumlah hari operasi	20	18
Jumlah blok	38	10
Luas aplikasi	218,534 ha	48,814 ha
Rata-rata waktu aplikasi	3,66 HST	2,50 HST
Ketepatan pada 1–7 HST	100%	100%
Kapasitas tangki	20 L	15 L
Lebar sapuan	7 m	1,2 m
Volume aplikasi	18 L/ha	200 L/ha
Navigasi dan pelaksana	RTK-GPS; pilot dan asisten	Manual; 2–4 BHL per regu

Sumber: Data operasional PT SGN MKSO Kebun Sei Semayang, diolah (2026).

Lebar sapuan *drone* sebesar 7 m dan volume aplikasi 18 L/ha memungkinkan areal lebih luas diselesaikan dengan frekuensi pengisian yang lebih rendah dibandingkan *knapsack sprayer* berlebar sapuan 1,2 m dan volume 200 L/ha. Sistem RTK-GPS membantu konsistensi jalur, sedangkan metode konvensional sangat bergantung pada kemampuan berjalan, pengisian ulang, dan koordinasi regu. Keunggulan teknis tersebut sejalan dengan tinjauan teknologi penyemprotan yang menempatkan navigasi, *nozzle*, ketinggian, dan volume sebagai determinan utama kinerja UAV (García-Munguía et al., 2024; Talaeizadeh et al., 2025).

Rata-rata waktu aplikasi menggunakan *drone* tercatat 1,16 hari lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Namun, perbedaan tersebut tidak menunjukkan adanya keterlambatan karena seluruh kegiatan tetap dilaksanakan dalam jendela aplikasi yang ditetapkan, yaitu 1–7

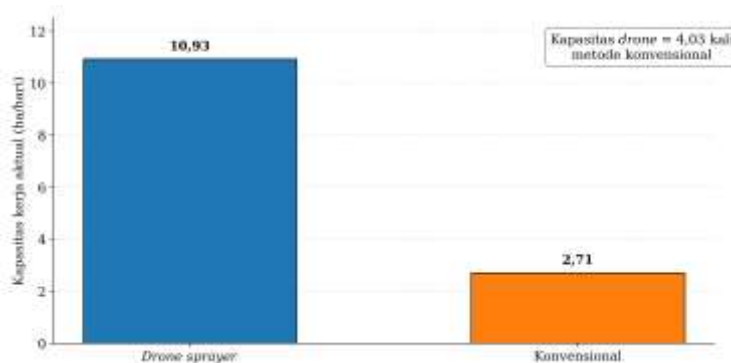
hari setelah tanam (HST). Rata-rata HST yang lebih tinggi pada metode *drone* dapat dijelaskan oleh luas areal yang ditangani secara lebih besar, sehingga pelaksanaan penyemprotan tersebar pada lebih banyak blok dan berlangsung hingga HST ke-7. Kondisi ini menunjukkan bahwa penggunaan *drone* memberikan fleksibilitas dalam menyusun urutan dan waktu aplikasi sesuai dengan luas lahan, prioritas blok, serta kesiapan operasional di lapangan. Kapasitas kerja yang tinggi memungkinkan penyelesaian pekerjaan pada areal yang luas tanpa melampaui batas waktu aplikasi. Meskipun demikian, efektivitas penjadwalan tetap dipengaruhi oleh kesiapan alat, ketersediaan operator, kondisi lahan, serta faktor cuaca, terutama hujan dan kecepatan angin yang dapat membatasi kegiatan penerbangan dan penyemprotan. Dengan demikian, rata-rata HST *drone* yang lebih tinggi tidak mencerminkan rendahnya ketepatan waktu, tetapi menunjukkan adanya penyesuaian jadwal untuk menangani cakupan areal yang lebih luas secara efektif dan tetap sesuai dengan standar waktu perusahaan.

Kinerja Operasional

Tabel 2. Perbandingan Kinerja Operasional dan Hasil Uji Mann–Whitney U.

Indikator	Drone	Konvensional	U	Z	p	r
Kapasitas kerja aktual (ha/hari)	10,93	2,71	7	-5,073	<0,001	0,823
Kebutuhan tenaga kerja (HOK/ha)	0,2506	1,3160	0	-5,279	<0,001	0,856

Sumber: Hasil pengolahan data SPSS dan perhitungan effect size, diolah (2026).



Gambar 1. Perbandingan Kapasitas Kerja Aktual.

Sumber: Data operasional PT SGN MKSO Kebun Sei Semayang, diolah (2026).

Drone mencapai rata-rata 10,93 ha/hari, sedangkan metode konvensional 2,71 ha/hari. Dengan demikian, kapasitas *drone* sekitar 4,03 kali lebih tinggi. Perbedaan tersebut terlihat pada Gambar 1 dan didukung uji Mann–Whitney U dengan $p < 0,001$ serta ukuran efek 0,823. Besarnya efek menunjukkan bahwa perbedaan bukan hanya signifikan secara statistik, tetapi juga kuat secara operasional.

Kebutuhan tenaga kerja *drone* sebesar 0,2506 HOK/ha, lebih rendah daripada metode konvensional sebesar 1,3160 HOK/ha. Penurunan relatif mencapai 80,96%, dengan $p < 0,001$ dan ukuran efek 0,856. Hasil tersebut konsisten dengan kajian beban kerja yang menunjukkan bahwa *drone* memindahkan sebagian besar aktivitas fisik penyemprotan kepada sistem kendali pilot dan asisten (Umeda et al., 2022). Pada areal luas atau ketika buruh harian sulit tersedia, pengurangan HOK menjadi manfaat yang relevan bagi kesinambungan operasi.

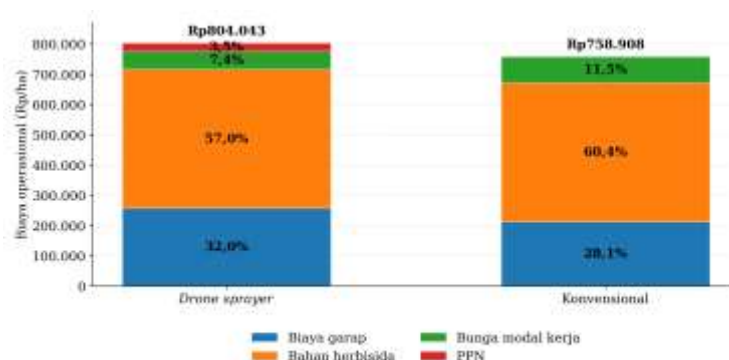
Kapasitas tinggi tidak dapat dilepaskan dari kualitas pengaturan semprot. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa hasil UAV dipengaruhi ketinggian, *nozzle*, kecepatan, dan distribusi *droplet* (Ranabhat & Price, 2025). Oleh karena itu, angka kapasitas pada penelitian ini harus dibaca sebagai kinerja operasional aktual, bukan bukti langsung efektivitas biologis. Efektivitas terhadap gulma tetap perlu diverifikasi melalui penutupan, kerapatan, biomassa, atau tingkat pengendalian.

Biaya Operasional

Tabel 3. Komponen Biaya Operasional per Hektare.

Komponen	Drone (Rp/ha)	Konvensional (Rp/ha)	Selisih	Keterangan
Biaya garap	257.500	213.000	44.500	Jasa vendor dan BHL
Bahan herbisida	458.600	458.600	0	Bahan dan dosis sama
Bunga modal kerja	59.618	87.308	-27.690	Tarif 13%
PPN	28.325	0	28.325	11% jasa <i>drone</i>
Total	804.043	758.908	45.135	Drone lebih mahal 5,95%

Sumber: Dokumen Manajemen Biaya Kebun dan kontrak jasa, diolah (2026).



Gambar 2. Komposisi Biaya Operasional per Hektare.

Sumber: Dokumen biaya perusahaan, diolah (2026).

Total biaya *drone* sebesar Rp804.043/ha, sedangkan metode konvensional Rp758.908/ha. Selisih Rp45.135/ha menunjukkan *drone* 5,95% lebih mahal. Biaya bahan

herbisida sama pada kedua metode, sehingga perbedaan terutama berasal dari biaya garap *vendor* dan PPN. Bunga modal kerja *drone* lebih rendah Rp27.690/ha, tetapi pengurangan tersebut belum menutup tambahan biaya jasa dan pajak.

Komposisi biaya pada Gambar 2 memperlihatkan bahwa bahan herbisida tetap menjadi komponen terbesar, yaitu 57,0% pada *drone* dan 60,4% pada metode konvensional. Biaya garap menyumbang 32,0% pada *drone* dan 28,1% pada konvensional. Struktur ini menjelaskan mengapa negosiasi tarif jasa lebih berpengaruh terhadap daya saing *drone* daripada perubahan biaya bahan yang pada penelitian ini dibuat sama.

Hasil ekonomi ini menguatkan pandangan bahwa mekanisasi tidak selalu langsung menurunkan biaya satuan. Manfaat teknologi presisi dipengaruhi skala penggunaan, struktur kontrak, frekuensi operasi, dan nilai tenaga kerja yang dapat digantikan (Finco et al., 2021; Kushwah et al., 2024). Temuan teknis dari aplikasi *drone* di perkebunan juga menunjukkan peningkatan kecepatan, tetapi kelayakan akhirnya tetap ditentukan oleh keseimbangan biaya, mutu aplikasi, dan kebutuhan perusahaan (Mahhendra et al., 2025; Syarief et al., 2024).

Sensitivitas dan Titik Impas

Tabel 4. Analisis Sensitivitas dan Titik Impas Biaya.

Skenario	Drone (Rp/ha)	Konvensional (Rp/ha)	Selisih	Posisi biaya
Kondisi dasar	804.043	758.908	45.135	<i>Drone</i> lebih mahal
Tarif <i>drone</i> naik 10%	832.626	758.908	73.718	<i>Drone</i> lebih mahal
Tarif <i>drone</i> turun 10%	775.461	758.908	16.553	<i>Drone</i> lebih mahal
Biaya garap konvensional naik 10%	804.043	782.977	21.066	<i>Drone</i> lebih mahal
Titik impas tarif <i>drone</i> Rp216.838/ha	758.908	758.908	0	Setara
Titik impas garap konvensional Rp252.942/ha	804.043	804.043	0	Setara

Sumber: Data biaya perusahaan, diolah (2026).

Pada kenaikan tarif *drone* 10%, total biaya meningkat menjadi Rp832.626/ha dan selisih terhadap konvensional melebar menjadi Rp73.718/ha. Penurunan tarif 10% menekan biaya menjadi Rp775.461/ha, tetapi masih lebih mahal Rp16.553/ha. Kenaikan biaya garap konvensional 10% meningkatkan totalnya menjadi Rp782.977/ha dan menyisakan selisih Rp21.066/ha. Dengan demikian, posisi biaya kedua metode tidak berubah pada ketiga skenario 10%, meskipun jaraknya sensitif terhadap tarif jasa dan biaya tenaga kerja.

Titik impas tarif jasa *drone* berada pada Rp216.838/ha, berarti tarif aktual Rp257.500/ha harus turun Rp40.662/ha atau 15,79%. Sebaliknya, biaya garap konvensional harus meningkat dari Rp213.000/ha menjadi Rp252.942/ha atau 18,75% agar total biaya sama dengan *drone*.

Ambang tersebut memberikan dasar kuantitatif bagi negosiasi *vendor* dan evaluasi kebijakan upah. Pendekatan titik impas relevan untuk teknologi semprot karena dapat menunjukkan kondisi ketika keunggulan operasional mulai sejalan dengan kelayakan ekonomi (Testa et al., 2025).

Analisis sensitivitas bersifat parsial karena hanya mengubah satu parameter pada satu waktu. Meskipun demikian, pendekatan tersebut cukup untuk menunjukkan bahwa tarif jasa merupakan pengungkit biaya utama dan bahwa kesimpulan dasar relatif tahan terhadap perubahan moderat. Evaluasi berikutnya dapat memasukkan variasi harga bahan, luas kontrak, biaya mobilisasi, hari tidak efektif akibat cuaca, serta nilai ekonomi dari keterlambatan aplikasi.

Implikasi Penggunaan Metode

Tabel 5. Matriks Pertimbangan Pemilihan Metode.

Kondisi operasi	Metode utama	Alasan	Catatan pengendalian
Areal luas dan batas waktu ketat	<i>Drone</i>	Kapasitas tinggi; HOK rendah	Pastikan cuaca, baterai, rute, <i>nozzle</i> , dan kalibrasi
BHL terbatas	<i>Drone</i>	Mengurangi ketergantungan tenaga penyemprot	Siapkan pilot dan asisten bersertifikat
Blok kecil atau bentuk tidak beraturan	Konvensional	Fleksibel dan mudah menyesuaikan medan	Jaga konsistensi kecepatan, tekanan, dan <i>overlap</i>
Prioritas biaya per hektare	Konvensional	Biaya aktual lebih rendah 5,95%	Pastikan pekerjaan selesai dalam 1–7 HST
Portofolio blok beragam	Kombinasi	Menyeimbangkan waktu, biaya, dan akses	Tetapkan kriteria alokasi blok sebelum musim tanam

Sumber: Sintesis hasil penelitian (2026).

Keputusan penggunaan metode perlu disesuaikan dengan tujuan operasi. *Drone* lebih rasional ketika perusahaan menghadapi luas aplikasi besar, jendela waktu sempit, atau keterbatasan buruh, karena kapasitasnya tinggi dan HOK/ha rendah. Metode konvensional tetap layak pada blok yang mudah dijangkau, luasan terbatas, dan kondisi ketika tenaga kerja tersedia dengan biaya aktual. Kombinasi kedua metode dapat mengurangi risiko ketergantungan pada satu sistem.

Implikasi manajerial penelitian ini adalah perlunya pemetaan blok sebelum musim tanam. Areal luas dan beragam dapat diprioritaskan untuk *drone*, sedangkan blok kecil, tidak beraturan, atau membutuhkan penyesuaian manual dapat dialokasikan kepada *knapsack sprayer*. Penggunaan *drone* sebaiknya disertai standar ketinggian, kecepatan, *nozzle*, cuaca, kalibrasi, dan dokumentasi jalur. Rekomendasi tersebut selaras dengan bukti bahwa efektivitas

UAV bergantung pada konfigurasi teknis dan ketepatan operasional (Paul et al., 2024; Saumatgerat et al., 2024).

Penelitian ini terbatas pada satu rayon, satu musim tanam, dan data operasional yang tidak dirancang sebagai eksperimen terkontrol. Periode penggunaan kedua metode juga berbeda sehingga variasi cuaca dan kondisi blok belum sepenuhnya dipisahkan. Hasil tidak mengukur efikasi biologis, keseragaman deposisi, *drift*, keselamatan operator, atau dampak terhadap pertumbuhan tebu. Keterbatasan tersebut membatasi generalisasi, tetapi tidak mengurangi kegunaan data aktual sebagai dasar keputusan internal dan perumusan penelitian lanjutan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Drone sprayer menunjukkan kinerja operasional lebih tinggi daripada *knapsack sprayer* konvensional. Kapasitasnya mencapai 10,93 ha/hari dibandingkan 2,71 ha/hari, sedangkan kebutuhan tenaga kerjanya 0,2506 HOK/ha dibandingkan 1,3160 HOK/ha. Kedua perbedaan signifikan pada $p < 0,001$ dengan ukuran efek besar. Keunggulan tersebut belum menghasilkan biaya lebih rendah karena total biaya *drone* Rp804.043/ha, atau 5,95% di atas biaya konvensional Rp758.908/ha. Posisi biaya tidak berubah pada skenario perubahan 10%. Kesetaraan tercapai apabila tarif jasa *drone* turun menjadi Rp216.838/ha atau biaya garap konvensional meningkat menjadi Rp252.942/ha. Perusahaan dapat memprioritaskan *drone* pada areal luas, jadwal ketat, dan kondisi kekurangan tenaga kerja, serta mempertahankan metode konvensional pada areal yang masih dapat diselesaikan tepat waktu dengan biaya lebih rendah. Penelitian lanjutan perlu menguji kedua metode secara serempak pada kondisi blok dan cuaca sebanding serta memasukkan efikasi gulma, deposisi, *drift*, keselamatan, dan dampaknya terhadap pertumbuhan tebu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT Sinergi Gula Nusantara MKSO Kebun Sei Semayang yang menyediakan akses data operasional dan mendukung verifikasi lapangan. Artikel ini dikembangkan dari tugas akhir pada Program Studi Teknologi Produksi Tanaman Perkebunan, Politeknik Pembangunan Pertanian Medan.

DAFTAR REFERENSI

- Ahadi, G. D., & Zain, N. N. L. E. (2023). The Simulation Study of Normality Test Using Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, and Shapiro-Wilk. *EIGEN Mathematics Journal*, 6(1), 11–19. <https://doi.org/10.29303/emj.v6i1.131>
- Amarasingam, N., Salgadoe, A. S., Powell, K., Gonzalez, L. F., & Natarajan, S. (2022). A Review of {UAV} Platforms, Sensors, and Applications for Monitoring of Sugarcane Crops. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 26, 100712. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100712>
- Badan Standardisasi Instrumen Pertanian. (2023). *Standar Operasional Prosedur ({SOP}) Budi Daya Tebu*.
- Chicco, D., Sichenze, A., & Jurman, G. (2025). A Simple Guide to the Use of Student's t-Test, Mann-Whitney {U} Test, Chi-Squared Test, and Kruskal-Wallis Test in Biostatistics. *BioData Mining*, 18, 56. <https://doi.org/10.1186/s13040-025-00465-6>
- Dinesh Babu, K. S., Janakiraman, V., Palaniswamy, H., Kasirajan, L., Gomathi, R., & Ramkumar, T. R. (2022). A Short Review on Sugarcane: Its Domestication, Molecular Manipulations and Future Perspectives. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 69, 2623–2643. <https://doi.org/10.1007/s10722-022-01430-6>
- Finco, A., Bucci, G., Belletti, M., & Bentivoglio, D. (2021). The Economic Results of Investing in Precision Agriculture in Durum Wheat Production: A Case Study in Central Italy. *Agronomy*, 11(8), 1520. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081520>
- García-Munguía, A., Guerra-Ávila, P. L., Islas-Ojeda, E., Flores-Sánchez, J. L., Vázquez-Martínez, O., García-Munguía, A. M., & García-Munguía, O. (2024). A Review of Drone Technology and Operation Processes in Agricultural Crop Spraying. *Drones*, 8(11), 674. <https://doi.org/10.3390/drones8110674>
- Gibbs, J. A., Fiegen, Z. J., & Mueller, T. C. (2021). Comparison of Droplet Size, Coverage, and Drift Potential from {UAV} Application Methods and Ground Application Methods on Row Crops. *Transactions of the ASABE*, 64(3), 819–828. <https://doi.org/10.13031/trans.14121>
- Grznár, P., Gregor, M., Mozol, Š., Mozolová, L., Krump, H., Mizerák, M., & Trojan, J. (2024). A Comprehensive Analysis of Sensitivity in Simulation Models for Enhanced System Understanding and Optimisation. *Processes*, 12(4), 716. <https://doi.org/10.3390/pr12040716>
- Kushwah, A., Sharma, P. K., Kushwaha, H. L., Nag, R. H., Carpenter, G., Choudhary, M. K., Chowdhury, M., Pandey, A., & Chaudhary, S. (2024). Economic Evaluation of Precise Intelligent Cauliflower Harvester: A Comparative Study with Manual Harvesting. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(1), 33–42. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i11822>
- Madhu, G. P., Nooli, S. S., Alagundagi, S. C., & Hundekar, S. T. (2021). Weed Management Strategy in Sugarcane through Early Post Emergence Herbicides. *Journal of Farm Sciences*, 34(4), 390–395. <https://doi.org/10.61475/jfm.v34i04.159>
- Mahendra, D. W., Mawandha, H. G., & Yuniasih, B. (2025). Perbandingan Teknis Penyemprotan Gulma Secara Manual dan Menggunakan Drone Sprayer di Lahan Replanting. *AGROISTA: Jurnal Agroteknologi*, 8(2), 120–127. <https://doi.org/10.55180/agi.v8i2.851>

- Mishra, P., Pandey, C. M., Singh, U., Gupta, A., Sahu, C., & Keshri, A. (2019). Descriptive Statistics and Normality Tests for Statistical Data. *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(1), 67–72. https://doi.org/10.4103/aca.ACA_157_18
- Paul, R. A. I., Palanisamy, M. A., Peramaiyan, P., Kumar, V., Bagavathiannan, M., Gurjar, B., Vijayakumar, S., Djanaguiraman, M., Pazhanivelan, S., & Ramasamy, K. (2024). Spray Volume Optimization with {UAV}-Based Herbicide Application for Effective Droplet Deposition and Weed Control in Direct-Seeded Rice. *Frontiers in Agronomy*, 6, 1491842. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1491842>
- Pringgani, A. M., Khonghintaiong, J., Gonkhamdee, S., Songsri, P., & Jongrunklang, N. (2025). Pre-Emergence Herbicide for Controlling Weed in Various Sugarcane Genotypes Grown under Late Rainy Season. *Indian Journal of Agricultural Research*, 59(10), 1552–1560. <https://doi.org/10.18805/IJARE.AF-933>
- Ranabhat, S., & Price, R. (2025). Effects of Flight Heights and Nozzle Types on Spray Characteristics of Unmanned Aerial Vehicle ({UAV}) Sprayer in Common Field Crops. *AgriEngineering*, 7(2), 22. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7020022>
- Saumatgerat, A., Wahyudiono, S., & Prijono, A. (2024). Uji Efektivitas Aplikasi Pre Emergent Herbisida Menggunakan Drone Sprayer Dibandingkan dengan Penggunaan Knapsack Sprayer. *AGROFORETECH*, 2(1), 632–638. <https://jurnal.instiperjogja.ac.id/index.php/JOM/article/view/1188>
- Syarief, M., Rahmawati, D., Mujiono, & Fittryah, L. D. (2024). Efektivitas dan Efisiensi Drone Sprayer untuk Pengendalian Gulma pada Tanaman Padi ({*Oryza sativa*} L.). *Agriprima: Journal of Applied Agricultural Sciences*, 8(1), 52–60. <https://doi.org/10.25047/agriprima.v8i1.523>
- Tadele, W., Tessema, T., & Tegene, S. (2022). Determination of Critical Period of Weed Competition in Sugarcane ({*Saccharum officinarum*} L.) at Arjo Didessa Sugar Estate, Western Ethiopia. *Journal of Current Opinion in Crop Science*, 3(2), 62–71. <https://doi.org/10.62773/jcocs.v3i2.165>
- Talaeizadeh, A., Sharifi, I., Alasty, A., & Ghatreh Samani, S. (2025). Agricultural Spraying Drones: A Comprehensive Review. *Smart Agricultural Technology*, 12, 101519. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101519>
- Testa, R., Galati, A., Schifani, G., & Migliore, G. (2025). Cost-Effectiveness of Conventional and Precision Agriculture Sprayers in Southern Italian Vineyards: A Break-Even Point Analysis. *Precision Agriculture*, 26, 39. <https://doi.org/10.1007/s11119-025-10233-5>
- Tomczak, M., & Tomczak, E. (2014). The Need to Report Effect Size Estimates Revisited: An Overview of Some Recommended Measures of Effect Size. *Trends in Sport Sciences*, 21(1), 19–25.
- Yamin, M., Hamid, S., Ali, M. A., Bashir, S., Iqbal, M., & Ashraf, M. (2022). Performance Optimization and Knife Dynamics of Power Tiller Operated Reaper during Wheat Harvesting. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 59(2), 261–268. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/22.1406>
- Yousif, L. A., & Ahmed, S. B. (2025). Estimation of Manual Labor Required to Carry Out Agricultural Operations for Some Crops in the Gezira Scheme, Sudan. *Asian Journal of Agriculture and Allied Sciences*, 8(1), 153–161. <https://doi.org/10.56557/ajaas/2025/v8i160>