

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teoritis

2.1.1 Tanaman Tebu (*Saccharum officinarum* L.)

2.1.1.1. Pengertian Dan Klasifikasi Tanaman Tebu



Gambar 1. Tanaman Tebu
Sumber : Dokumentasi Pribadi, (2025)

Tebu (*Saccharum officinarum* L.) merupakan tanaman perkebunan yang dibudidayakan sebagai bahan baku utama industri gula. Tanaman ini termasuk kelompok rumput-rumputan yang memiliki batang beruas, berair, dan mampu menyimpan sukrosa dalam jumlah tinggi. Bagian batang menjadi bagian utama yang dimanfaatkan karena sukrosa yang terkandung di dalamnya digunakan sebagai bahan dasar pengolahan gula. Tebu termasuk dalam genus *Saccharum* dan famili *Poaceae*. *Saccharum officinarum* L. dikenal sebagai salah satu spesies penting dalam pengembangan tebu budidaya karena memiliki kandungan gula tinggi dan berperan dalam sejarah domestikasi serta pemuliaan tanaman tebu (Dinesh Babu *et al.*, 2022). Dalam literatur budidaya, tebu diklasifikasikan sebagai tanaman biji tertutup, berkeping satu, dan termasuk kelompok rumput-rumputan (Indrawanto *et al.*, 2010). Pada beberapa literatur lama, famili tebu masih ditulis *Gramineae*, sedangkan dalam penamaan yang lebih umum digunakan saat ini, famili tersebut dikenal sebagai *Poaceae*. Secara taksonomi, tanaman tebu dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

Kingdom	: <i>Plantae</i>
Divisi	: <i>Spermatophyta</i>
Subdivisi	: <i>Angiospermae</i>
Kelas	: <i>Monocotyledonae</i>
Ordo	: <i>Poales</i>
Familia	: <i>Poaceae</i>

Genus : *Saccharum*
 Species : *Saccharum officinarum* L.

2.1.1.2. Syarat Tumbuh Tanaman Tebu

Tebu pada awalnya tumbuh di daerah tropis dan kemudian berkembang ke daerah subtropis hingga batas garis isotherm 20 °C, yang berada pada rentang lintang 19° LU – 35° LS. Pertumbuhan tebu menghendaki kondisi tanah yang tidak kering dan tidak tergenang, dengan drainase yang baik untuk mendukung perakaran. Kekurangan maupun kelebihan air pada fase pertumbuhan akan menyebabkan ruas batang menjadi pendek dan diameter batang mengecil (Badan Standardisasi Instrumen Pertanian, 2023). Parameter optimal untuk pertumbuhan tebu mencakup aspek iklim, topografi, dan tanah.

Tabel 1. Syarat Tumbuh Optimal Tanaman Tebu

Aspek	Parameter	Nilai Optimal
Iklim	Letak geografis	19° LU – 35° LS
	Suhu rata-rata tahunan	24 – 28 °C
	Curah hujan tahunan	1.200 – 2.500 mm
	Bulan kering	3 – 4 bulan
	Tipe iklim (Oldeman)	C1 atau C2
Topografi	Ketinggian tempat	0 – 500 mdpl
	Kemiringan lereng	< 3% (optimum 0–2%)
	Jenis tanah	Entisol, Inceptisol, Vertisol, Alfisol
Tanah	Tekstur	Agak halus – sedang
	pH H ₂ O	5,5 – 7,5
	Kedalaman tanah	> 100 cm
	Drainase	Baik – agak baik
	C-Organik	> 1,2%
	KTK tanah	> 16 cmol/kg

Sumber: (Badan Standardisasi Instrumen Pertanian, 2023)

Dalam praktik perencanaan budidaya, kesesuaian lahan untuk tebu dikelompokkan ke dalam empat kelas berdasarkan kualitas dan karakteristik lahan: Sangat Sesuai (S1), Cukup Sesuai (S2), Sesuai Marginal (S3), dan Tidak Sesuai (N). Parameter optimal pada Tabel 1 mengacu pada kelas S1, yaitu lahan tanpa faktor pembatas yang berarti. Lahan kelas S2 dan S3 masih dapat dimanfaatkan untuk budidaya tebu dengan tambahan masukan (*input*) dan intervensi teknis untuk mengatasi faktor pembatasnya, sedangkan kelas N tidak direkomendasikan karena

memiliki faktor pembatas yang sangat berat atau sulit diatasi (Badan Standardisasi Instrumen Pertanian, 2023).

2.1.1.3. Morfologi Tanaman Tebu

Morfologi tanaman tebu merupakan ciri fisik tanaman yang dapat diamati melalui bagian akar, batang, daun, tunas atau anakan, mata tunas, dan bunga. Karakter morfologi penting dalam budidaya tebu karena berhubungan dengan pertumbuhan tanaman, pembentukan populasi batang, kemampuan tanaman beradaptasi, serta potensi hasil. Pengamatan morfologi pada tanaman tebu dapat mencakup daun, pelepah daun, ruas batang, batang, mata tunas, dan beberapa karakter agronomis lainnya (Windiyan *et al.*, 2022).

1. Akar



Gambar 2. Akar Tebu

Sumber : Dokumentasi Pribadi, (2025)

Tanaman tebu memiliki sistem perakaran serabut yang berfungsi menyerap air dan unsur hara dari dalam tanah serta menopang pertumbuhan tanaman. Pada fase awal pertumbuhan, perkembangan akar menjadi penting karena menentukan kemampuan tanaman dalam memperoleh air dan hara untuk mendukung pembentukan tunas, daun, dan batang. Karakter akar pada tebu dapat diamati melalui panjang akar, luas permukaan akar, volume akar, serta bobot kering akar, terutama pada fase awal pertumbuhan tanaman (Khonghintaiong *et al.*, 2023).

2. Batang



Gambar 3. Batang Tebu

Sumber : Dokumentasi Pribadi, (2025)

Batang merupakan bagian utama tanaman tebu yang dimanfaatkan dalam industri gula. Batang tebu berbentuk silindris, beruas-ruas, dan terdiri atas buku serta ruas. Pada bagian buku terdapat mata tunas yang dapat tumbuh menjadi tanaman baru apabila digunakan sebagai bahan tanam. Batang juga menjadi tempat utama penyimpanan sukrosa, sehingga pertumbuhan batang berhubungan erat dengan hasil tebu. Karakter morfologi batang, seperti ruas, bentuk batang, dan mata tunas, menjadi bagian penting dalam pengamatan serta identifikasi kultivar tebu (Windiyan *et al.*, 2022).

3. Daun



Gambar 4. Daun Tebu

Sumber : Dokumentasi Pribadi, (2025)

Daun tebu berbentuk pita memanjang dan tersusun berseling pada buku batang. Daun terdiri atas pelepah daun yang membungkus batang dan helaian daun yang memanjang ke arah luar. Daun berperan sebagai tempat utama berlangsungnya fotosintesis, yaitu proses pembentukan karbohidrat yang kemudian sebagian disimpan dalam batang sebagai sukrosa. Karakter daun dan pelepah daun merupakan bagian dari pengamatan morfologi tebu yang dapat digunakan untuk membedakan kultivar, seperti bentuk, warna, lebar daun, lengkung daun, dan karakter pelepah daun (Windiyan *et al.*, 2022).

4. Tunas (Anakan)

Mata tunas merupakan bagian penting pada buku batang tebu karena dapat tumbuh menjadi tanaman baru. Dalam budidaya tebu, bahan tanam umumnya berasal dari batang yang memiliki mata tunas sehat. Setelah ditanam, mata tunas akan tumbuh menjadi tunas awal dan berkembang membentuk anakan. Jumlah anakan menjadi salah satu indikator penting dalam pertumbuhan tebu karena berhubungan dengan pembentukan populasi batang per satuan luas. Pada fase awal pertumbuhan, karakter seperti tinggi tanaman, jumlah anakan, jumlah daun, dan

bobot kering batang dapat digunakan untuk menilai perkembangan tanaman tebu (Khonghintaiong *et al.*, 2023).

5. Bunga



Gambar 5. Bunga Tebu
Sumber : Dokumentasi Pribadi, (2025)

Bunga tebu muncul pada fase generatif dan berbentuk malai di bagian ujung batang. Dalam budidaya tebu untuk produksi gula, pembungaan umumnya tidak diharapkan karena dapat mengalihkan cadangan sukrosa pada batang ke pembentukan organ reproduktif. Kondisi tersebut dapat menurunkan nilai tebu sebagai bahan baku gula. Namun, dalam kegiatan pemuliaan tanaman, bunga tebu memiliki peran penting karena digunakan dalam proses persilangan untuk menghasilkan varietas baru (Pavani *et al.*, 2023).

2.1.1.4. Siklus Tanam Komersial: *Plant Cane* dan *Ratoon Cane*

Budidaya tebu secara komersial mengikuti pola siklus tanam dengan dua fase utama yang saling berurutan, yaitu fase tanaman pertama (*Plant Cane*) dan fase tanaman keprasan (*Ratoon Cane*). Pemahaman atas pembagian fase ini menjadi penting karena setiap fase memiliki karakter pertumbuhan, kebutuhan input, dan tingkat produktivitas yang berbeda.

1. *Plant Cane* (PC)

Plant Cane (PC) adalah kebun tebu tahun pertama yang ditanam menggunakan bibit berupa stek batang. Fase PC diawali dengan rangkaian kegiatan persiapan lahan secara menyeluruh, mulai dari pembersihan lahan (*land clearing*), pengolahan tanah, hingga penyiapan bibit. Penanaman dapat dilakukan secara manual maupun mekanis. Setelah ditanam, tanaman PC memasuki tahap pemeliharaan yang mencakup pemupukan, pengendalian gulma, irigasi, sulam (penyisipan tanaman mati), pembumbunan, dan pengklentekan daun, hingga siap dipanen pada umur 10–12 bulan (Kementerian Pertanian, 2015; Evizal, 2018).

2. *Ratoon Cane* (RC)

Ratoon Cane (RC) adalah tebu yang tumbuh kembali dari tunggul keprasan setelah tanaman PC dipanen, tanpa proses tanam ulang. Fase RC diawali dengan kegiatan kepras, yaitu pemotongan tunggak tebu rata dengan permukaan tanah agar tunas baru dapat tumbuh secara seragam dari mata tunas di pangkal batang. Setelah kepras, dilakukan rangkaian pemeliharaan yang meliputi putus akar, sulam, pemupukan, irigasi, penggemburan tanah, pengendalian gulma, pendalaman got, dan pembumbunan. Tebu keprasan umumnya dapat dipanen lebih cepat dibandingkan PC karena tidak melalui fase awal pertumbuhan dari bibit (Kementerian Pertanian, 2015).

Dalam praktik komersial, siklus tanam tebu mengikuti urutan PC → RC1 → RC2 → RC3 → bongkar ratoon, yaitu pembongkaran seluruh tunggul untuk tanam ulang sebagai PC baru. Setiap siklus keprasan umumnya menunjukkan penurunan produktivitas dibandingkan PC, sebagaimana ditunjukkan oleh penelitian di Trangkil, Pati, Jawa Tengah, yang mencatat penurunan rata-rata sebesar 22,7% pada tonase tebu dan 21,0% pada tonase gula per hektar dari fase PC ke RC1 untuk varietas AAS Agribun, ASA Agribun, dan CMG Agribun (Riajaya *et al.*, 2022). Pola penurunan ini menjadikan PC sebagai fase dengan investasi tertinggi mencakup biaya persiapan lahan, bibit, dan penanaman sekaligus fase dengan potensi hasil tertinggi, sehingga keputusan agronomis dan teknis pada fase PC bersifat menentukan bagi produktivitas keseluruhan siklus tanaman tebu di kebun.

2.1.1.5. Sentra Produksi Tebu di Indonesia

Pada tahun 2024, perkebunan tebu Indonesia tersebar di 12 provinsi dengan total luas areal 520,82 ribu hektar. Distribusi geografisnya terkonsentrasi pada lima provinsi utama, yaitu Jawa Timur, Lampung, Jawa Tengah, Sumatera Selatan, dan Jawa Barat yang secara kumulatif mencakup 93,43% dari total luas areal nasional. Tujuh provinsi lainnya, termasuk Sumatera Utara sebagai lokasi penelitian ini, masing-masing memberikan kontribusi kurang dari 2% terhadap luas areal tebu nasional, sebagaimana disajikan pada Tabel 2 (Badan Pusat Statistik, 2025).

Tabel 2. Distribusi Luas Areal Perkebunan Tebu di Indonesia Tahun 2024

No.	Provinsi	Luas Areal (ribu ha)	Persentase Nasional (%)
1	Jawa Timur	239,54	45,99
2	Lampung	143,11	27,48
3	Jawa Tengah	55,95	10,74
4	Sumatera Selatan	32,77	6,29
5	Jawa Barat	15,23	2,92
6	Gorontalo	9,83	1,89
7	Sulawesi Selatan	7,49	1,44
8	Sumatera Utara ^a	6,37	1,22
9	Nusa Tenggara Timur	3,46	0,66
10	Nusa Tenggara Barat	3,25	0,62
11	Sulawesi Tenggara	2,83	0,54
12	D.I. Yogyakarta	0,99	0,19
Total Nasional		520,82	100,00

^a Lokasi penelitian.

Sumber: Badan Pusat Statistik (2025)

Dari sisi status pengusahaan, perkebunan tebu nasional didominasi oleh Perkebunan Rakyat (PR) yang mencakup 61,06% atau 318,01 ribu hektar, diikuti Perkebunan Besar Swasta (PBS) sebesar 27,40% atau 142,70 ribu hektar, dan Perkebunan Besar Negara (PBN) sebesar 11,54% atau 60,12 ribu hektar (Badan Pusat Statistik, 2025). Pada sentra dominan Jawa Timur, Kabupaten Malang merupakan area dengan produksi gula terbesar dengan rata-rata 238 ribu ton dari 42 ribu hektar selama periode 2015–2019, diikuti Kabupaten Kediri (153 ribu ton dari 26 ribu hektar) dan Kabupaten Mojokerto (53 ribu ton dari 8,1 ribu hektar) (Saputro *et al.*, 2021). Sumatera Utara menempati peringkat kedelapan secara nasional dalam luas areal perkebunan tebu. Berbeda dengan provinsi sentra yang didominasi PR, perkebunan tebu di Sumatera Utara pada tahun 2024 seluruhnya berstatus PBN dengan luas 6,37 ribu hektar dan produksi gula 14,52 ribu ton (Badan Pusat Statistik, 2025).

2.1.2 Jenis Gulma Pada Tanaman Tebu

2.1.2.1. Pengertian dan Klasifikasi Gulma

Gulma adalah jenis tumbuhan yang tumbuh di sekitar tanaman budidaya pada tempat yang tidak dikehendaki manusia, dan dapat menurunkan produksi melalui kompetisi dalam perolehan air, unsur hara, cahaya, serta ruang tumbuh (Sabtu dan Sulasmi, 2024). Identifikasi gulma yang mendominasi suatu lahan menjadi langkah penting dalam pengelolaan tanaman, karena setiap golongan gulma memiliki karakter pertumbuhan dan respons yang berbeda terhadap teknik pengendalian (Nabiilatussaniyya *et al.*, 2025). Secara morfologi, gulma umumnya dikelompokkan ke dalam tiga golongan utama, yaitu gulma rumput, gulma teki, dan gulma berdaun lebar (Sabtu dan Sulasmi, 2024).

1. Gulma rumput (*grasses*)

Golongan ini termasuk famili Poaceae dengan ciri utama daun berbentuk pita memanjang, batang silindris berongga di antara buku, tulang daun sejajar, sistem perakaran serabut, serta umumnya memiliki pelepah daun dan lidah daun. Contoh gulma rumput yang umum dijumpai di lahan pertanian tropis adalah *Eleusine indica*, *Imperata cylindrica* (alang-alang), *Echinochloa* spp., dan *Digitaria* spp.

2. Gulma teki (*sedges*)

Golongan ini termasuk famili Cyperaceae dengan ciri batang berbentuk segitiga tanpa rongga, daun tersusun dalam tiga baris dari pangkal batang, tidak memiliki lidah daun, serta banyak yang memiliki organ perbanyakan vegetatif berupa umbi atau rimpang di dalam tanah. *Cyperus rotundus* (teki ladang) merupakan spesies yang paling sering dijumpai di lahan tropis dan dikenal sebagai gulma yang sulit dikendalikan secara mekanis.

3. Gulma berdaun lebar (*broadleaves*)

Golongan ini terdiri atas tumbuhan kelas Dicotyledoneae dengan ciri daun melebar dan tulang daun berbentuk jala (menyirip atau menjari), sistem perakaran tunggang, serta tanaman tumbuh tegak atau menjalar. Contoh gulma berdaun lebar yang sering ditemui di lahan pertanian Indonesia adalah *Ageratum conyzoides* (babadotan), *Mimosa pudica* (putri malu), *Amaranthus* spp. (bayam-bayaman), dan *Asystasia gangetica* (rumput israel).

2.1.2.2. Gulma Dominan pada Perkebunan Tebu

Komposisi gulma pada perkebunan tebu sangat bervariasi tergantung pada lokasi geografis, jenis lahan (sawah atau lahan kering), umur tanaman, serta praktik pengelolaan kebun. Identifikasi gulma dominan menjadi dasar penting dalam memilih teknik pengendalian dan jenis herbisida yang tepat sasaran. Penelitian terkini di lahan sawah perkebunan tebu rakyat Desa Tajinan, Kabupaten Malang, Jawa Timur sentra utama produksi tebu Indonesia mengidentifikasi 16 spesies gulma yang terdiri atas 11 spesies gulma berdaun lebar, 3 spesies golongan teki (berdaun sempit), dan 2 spesies gulma rumput. Spesies dengan dominansi tertinggi adalah *Ageratum conyzoides* (babadotan) dengan nilai *Summed Dominance Ratio* (SDR) sebesar 26,78, sedangkan *Ipomoea obscura* memiliki nilai dominansi terendah sebesar 1,72. Indeks keanekaragaman pada lahan tersebut tergolong sedang ($H' = 1,863$), dan indeks dominansi Simpson menunjukkan bahwa tidak ada satu spesies tunggal yang sepenuhnya mendominasi komunitas gulma ($C = 0,185$) (Nabiilatussaniyya *et al.*, 2025). Pola ini menunjukkan bahwa komunitas gulma pada lahan sawah tebu di Jawa Timur didominasi oleh kelompok berdaun lebar, sehingga pemilihan herbisida perlu mempertimbangkan komposisi tersebut.

2.1.2.3. Periode Kritis dan Dampak terhadap Hasil Tebu

Periode kritis terhadap gulma adalah rentang waktu dalam siklus pertumbuhan tanaman ketika persaingan dengan gulma menyebabkan kehilangan hasil paling signifikan. Pengendalian gulma di luar periode kritis cenderung kurang efektif secara ekonomis karena dampak gulma terhadap hasil sudah terjadi atau telah lewat fase puncaknya. Periode kritis kompetisi gulma pada tebu berlangsung pada fase awal hingga pertengahan pertumbuhan tanaman, namun durasinya bervariasi antar penelitian. Tinjauan komprehensif terhadap berbagai studi gulma pada tebu menunjukkan bahwa periode kritis umumnya berlangsung selama 50–60 hari pertama setelah tanam (HST), yaitu saat tanaman tebu masih dalam fase pertumbuhan awal sebelum kanopi menutup sepenuhnya (Rajbir *et al.*, 2024).

Penelitian di Lampung mencatat bahwa pengendalian gulma pada 2–6 bulan setelah tanam (60–180 HST) memberikan peningkatan signifikan terhadap perkecambahan, populasi, diameter batang, dan tinggi tanaman tebu (Kusuma *et al.*, 2026). Variasi durasi periode kritis ini dipengaruhi oleh spesies gulma yang

dominan, kepadatan populasinya, kultivar tebu yang ditanam, serta praktik pengelolaan lahan. Sebagai ilustrasi pengaruh spesies gulma, penelitian di Jember, Jawa Timur, menunjukkan bahwa gulma berduri *Amaranthus spinosus* memberikan tekanan kompetisi yang lebih besar terhadap pertumbuhan awal tebu (0–90 HST) dibandingkan gulma teki *Cyperus rotundus*, dengan varietas PS 862 menunjukkan ketahanan terbaik di antara empat varietas yang diuji (Bululawang, HW Merah, VMC, dan PS 862) (Moelyaandani dan Setiyono, 2020). Dampak gulma terhadap hasil tebu cukup signifikan. Kompetisi gulma yang tidak terkendali pada fase awal pertumbuhan dapat menurunkan hasil tebu sebesar 20–40%, dan pada kasus dengan tingkat infestasi tinggi penurunan hasil dapat mencapai 70% (Rajbir *et al.*, 2024). Mekanisme penurunan hasil ini terjadi melalui kompetisi gulma dengan tebu dalam memperebutkan air, unsur hara, cahaya, dan ruang tumbuh (Sabtu dan Sulasmi, 2024; Nabiilatussaniyya *et al.*, 2025).

2.1.3 Pengendalian Gulma Pada Tanaman Tebu

2.1.3.1. Metode Pengendalian Gulma

Pengendalian gulma adalah upaya menekan populasi atau mengurangi dampak negatif gulma terhadap tanaman budidaya melalui pendekatan yang disesuaikan dengan skala lahan, jenis gulma dominan, dan pertimbangan ekonomi. Secara umum, metode pengendalian gulma pada perkebunan tebu dapat dikelompokkan ke dalam empat kategori utama, yaitu mekanis/manual, kultur teknis, biologis, dan kimiawi (Paiman, 2020).

1. Metode mekanis/manual

Metode ini meliputi pencabutan, pencangkulan, dan pembabatan gulma secara langsung menggunakan tenaga manusia atau alat sederhana. Keunggulan metode ini adalah ramah lingkungan, tidak meninggalkan residu kimia, dan dapat ditargetkan secara selektif pada gulma tertentu. Namun, metode ini bersifat padat karya, lambat, dan tidak efisien untuk pengelolaan lahan luas, terutama di perkebunan tebu komersial yang memiliki areal ratusan hektar (Paiman, 2020).

2. Metode kultur teknis

Metode ini mencakup praktik agronomi yang dirancang untuk menekan pertumbuhan gulma secara preventif, seperti pengolahan tanah yang tepat, rotasi tanaman, penggunaan mulsa, pengaturan jarak tanam yang rapat, dan penanaman

tanaman penutup tanah (*cover crops*). Pendekatan ini bekerja dengan mengurangi peluang gulma berkecambah atau menghambat pertumbuhannya melalui kompetisi dari tanaman pokok atau penutup tanah. Keunggulan utamanya adalah berkelanjutan, namun efektivitasnya membutuhkan perencanaan yang matang dan tidak selalu cocok untuk semua sistem budidaya (Rajbir *et al.*, 2024).

3. Metode biologis

Metode biologis memanfaatkan musuh alami gulma seperti serangga herbivora, patogen tanaman, atau hewan *grazing* untuk menekan populasi gulma tertentu. Pendekatan lain yang termasuk dalam kategori ini adalah penggunaan tanaman dengan sifat alelopati yang menghasilkan senyawa penghambat pertumbuhan gulma. Metode ini bersifat ramah lingkungan dan berpotensi memberikan pengendalian jangka panjang, namun efektivitasnya umumnya lambat, spesifik terhadap spesies tertentu, dan memerlukan kondisi lingkungan yang tepat untuk berhasil (Rajbir *et al.*, 2024).

4. Metode kimiawi (herbisida)

Metode kimiawi adalah penggunaan herbisida untuk mengendalikan gulma. Keunggulan utama metode ini meliputi kemampuan menekan gulma sebelum mengganggu tanaman pokok, efektivitas terhadap gulma tahunan dan semak belukar, kemampuan mengendalikan gulma di larikan tanaman tanpa merusak perakaran tanaman pokok, serta efisiensi tenaga kerja pada lahan luas (Paiman, 2020). Kekurangannya antara lain risiko residu kimia di lingkungan, potensi resistensi gulma jika bahan aktif yang sama digunakan secara berulang, dan biaya bahan herbisida yang relatif tinggi. Pada perkebunan tebu skala komersial dengan luas areal di atas seratus hektar, metode kimiawi menjadi pilihan dominan karena pertimbangan efisiensi waktu dan tenaga kerja. Aplikasi herbisida memungkinkan pengendalian gulma secara menyeluruh dalam waktu singkat, suatu hal yang sulit dicapai dengan metode mekanis atau biologis pada skala yang sama (Rajbir *et al.*, 2024).

2.1.3.2. Herbisida dan Klasifikasinya

Herbisida adalah senyawa kimia yang digunakan untuk mengendalikan gulma tanpa mengganggu tanaman pokok. Secara etimologis, istilah herbisida berasal dari kata *herba* (gulma) dan *sida* (membunuh) (Paiman, 2020). Klasifikasi

herbisida dapat dilakukan berdasarkan beberapa pendekatan, antara lain waktu aplikasi, cara aplikasi dan translokasinya, serta sifat selektivitasnya terhadap jenis tumbuhan. Berdasarkan waktu aplikasinya, herbisida dibedakan menjadi tiga golongan, yaitu pra-tanam (*pre-plant*), pratumbuh (*pre-emergence*), dan purnatumbuh (*post-emergence*). Herbisida pra-tanam diaplikasikan setelah tanah diolah tetapi sebelum tanaman budidaya ditanam. Herbisida pratumbuh diaplikasikan setelah tanaman budidaya ditanam tetapi sebelum biji gulma berkecambah, sehingga bekerja dengan mencegah perkecambahan gulma di lapisan atas tanah. Herbisida purnatumbuh diaplikasikan setelah tanaman budidaya dan gulma telah melewati fase perkecambahan, sehingga bekerja dengan menekan gulma yang telah muncul di permukaan tanah (Paiman, 2020).

Berdasarkan cara aplikasi dan translokasinya dalam tumbuhan, herbisida diaplikasikan melalui dua jalur utama. Aplikasi melalui daun (*foliage applied*) dibedakan menjadi herbisida kontak yang hanya mematikan bagian tumbuhan yang terkena langsung dengan semprotan tanpa ditranslokasikan ke bagian lain, dan herbisida sistemik yang diserap oleh jaringan daun kemudian ditranslokasikan ke seluruh bagian tumbuhan. Aplikasi melalui tanah (*soil applied*) umumnya menggunakan herbisida bersifat sistemik yang diserap akar dan ditranslokasikan bersama aliran transpirasi sampai ke jaringan daun untuk menghambat fotosintesis. Glifosat adalah contoh herbisida sistemik melalui daun, paraquat merupakan contoh herbisida kontak, sedangkan diuron adalah contoh herbisida sistemik yang diaplikasikan melalui tanah (Paiman, 2020).

Selektivitas adalah sifat herbisida yang hanya mematikan jenis tumbuhan tertentu tanpa mengganggu tumbuhan yang lainnya. Sifat selektif ini menjadi pertimbangan utama dalam pemilihan herbisida untuk diaplikasikan pada lahan yang sudah ditanami. Selektivitas suatu herbisida dipengaruhi oleh empat faktor utama, yaitu peranan tumbuhan (perbedaan morfologis dan fisiologis antara gulma dan tanaman pokok), peranan herbisida (bentuk molekul, dosis, dan formulasi), peranan lingkungan, serta peranan cara aplikasi di lapangan (Paiman, 2020).

Pada budidaya tebu, beberapa golongan bahan aktif herbisida yang umum digunakan meliputi golongan triazin (ametrin, atrazin), golongan urea (diuron), golongan fenoksi (2,4-D), dan golongan dinitroanilin (pendimethalin). Golongan

triazin dan urea bekerja dengan menghambat proses fotosintesis pada gulma, sedangkan dinitroanilin menghambat pembentukan sel pada biji yang sedang berkecambah (Paiman, 2020). Pada praktik di perkebunan tebu Indonesia, ametrin sering dikombinasikan dengan 2,4-D atau metsulfuron untuk memperluas spektrum gulma yang dapat dikendalikan (Susanto *et al.*, 2020).

2.1.3.3. Herbisida Pratumbuh pada Tebu

Aplikasi herbisida pratumbuh menjadi prioritas pada fase *Plant Cane* karena pendekatan ini bersifat preventif: herbisida diaplikasikan sebelum biji gulma berkecambah, sehingga membentuk lapisan aktif di permukaan tanah yang mencegah munculnya gulma yang akan berkompetisi dengan tunas tebu yang baru tumbuh (Susanto *et al.*, 2020). Pendekatan preventif ini memungkinkan tanaman tebu memperoleh masa pertumbuhan awal yang bebas dari kompetisi, sebelum kanopi tebu sendiri cukup rapat untuk menekan pertumbuhan gulma secara alami. Waktu aplikasi herbisida pratumbuh pada tebu sangat krusial untuk mencapai efektivitas optimal. Pada praktik budidaya tebu lahan kering di Indonesia, herbisida pratumbuh diaplikasikan sejak saat tanam hingga sekitar satu minggu setelah tanam, dilanjutkan dengan aplikasi herbisida purnatumbuh sampai sekitar 2,5 bulan untuk mempertahankan kondisi bebas gulma menjelang pemupukan kedua (Susanto *et al.*, 2020).

Bahan aktif yang umum digunakan untuk pengendalian gulma di awal pertumbuhan tebu mencakup golongan triazin (ametrin) dan urea (diuron) yang diaplikasikan sebagai herbisida pratumbuh, sering dikombinasikan dengan golongan fenoksi (2,4-D) yang umumnya berfungsi mengendalikan gulma berdaun lebar yang telah tumbuh. Golongan triazin dan urea bekerja dengan menghambat proses fotosintesis pada gulma, sedangkan golongan fenoksi bekerja sebagai pengatur tumbuh (*growth regulator*) yang menyebabkan pertumbuhan abnormal pada gulma berdaun lebar (Paiman, 2020). Kombinasi ametrin dengan 2,4-D atau metil metsulfuron telah terbukti efektif menekan pertumbuhan gulma total pada budidaya tebu lahan kering di Lampung (Susanto *et al.*, 2020).

Efektivitas herbisida pratumbuh dalam menekan gulma bervariasi tergantung pada dosis bahan aktif yang digunakan dan dapat berbeda terhadap masing-masing spesies gulma. Penelitian di Lampung menunjukkan bahwa pada dosis ametrin 0,8

dan 1,2 kg/ha, efektivitas penekanan gulma *Borreria alata* sudah menurun secara signifikan pada 8 dan 12 minggu setelah aplikasi (MSA), sementara pada dosis lebih tinggi (1,6–2,4 kg/ha) efektivitas masih terjaga hingga 12 MSA (Susanto *et al.*, 2020). Selain itu, tidak semua jenis gulma dapat dikendalikan oleh herbisida pratumbuh; beberapa spesies seperti *Brachiaria* sp., *Cyperus rotundus*, dan *Cleome rutidosperma* menunjukkan ketahanan terhadap kombinasi ametrin dengan 2,4-D atau metil metsulfuron pada seluruh dosis yang diuji, sehingga memerlukan pendekatan pengendalian tambahan.

2.1.4. Teknologi Aplikasi Herbisida pada Tanaman Tebu

Keberhasilan aplikasi herbisida di perkebunan tebu skala komersial sangat dipengaruhi oleh teknologi aplikasi yang digunakan untuk menyalurkan dan mendistribusikan herbisida ke permukaan lahan.

2.1.4.1. Knapsack sprayer



Gambar 6. *Knapsack sprayer*
Sumber : Dokumentasi Pribadi, (2025)

Knapsack sprayer atau sprayer punggung adalah alat aplikasi pestisida yang dirancang untuk digendong di punggung operator. Berdasarkan sumber tenaga penggerakannya, *knapsack sprayer* dibedakan menjadi dua tipe utama, yaitu tipe manual yang membangkitkan tekanan melalui gerakan tuas pompa diafragma oleh operator, dan tipe elektrik yang menggunakan pompa DC bertenaga baterai untuk menghasilkan tekanan secara konstan tanpa memerlukan gerakan pompa manual (Hermawansyah *et al.*, 2022). Komponen-komponen utama *knapsack sprayer* elektrik beserta fungsinya disajikan pada tabel berikut.

Tabel 3. Komponen Utama *Knapsack sprayer* Elektrik

Komponen	Fungsi
Tangki cairan	Wadah penampung larutan herbisida
Pompa DC	Membangkitkan tekanan untuk mendorong cairan ke nozzle, menggantikan pompa diafragma manual
Baterai	Sumber tenaga listrik untuk mengoperasikan pompa DC
Saklar	Pengendali hidup/mati pompa DC
Selang	Penyalur cairan dari tangki menuju batang penyemprot
Batang penyemprot (<i>lance</i>)	Mengarahkan semprotan ke target gulma di permukaan lahan
Nozzle	Memecah cairan menjadi butiran semprot (<i>droplet</i>) dengan pola kerucut atau kipas
Tali sandang (<i>strap</i>)	Penyangga alat di punggung operator

Sumber: Hermawansyah et al., (2022)

Knapsack sprayer elektrik memiliki sejumlah kelebihan dibandingkan tipe manual, antara lain konsistensi tekanan semprot yang lebih stabil sepanjang durasi penyemprotan, distribusi *droplet* yang lebih merata, pengurangan beban kerja fisik operator karena tidak memerlukan gerakan pompa manual yang berulang, dan kemampuan menyelesaikan areal lebih luas dalam waktu kerja yang sama (Silalahi *et al.*, 2023). Namun, alat ini juga memiliki sejumlah kekurangan, antara lain biaya investasi awal yang lebih tinggi dibandingkan tipe manual, ketergantungan pada baterai yang harus dicas berulang dan memiliki umur pakai terbatas, serta kapasitas kerja yang masih dibatasi oleh kemampuan jalan operator dalam menyusuri petakan lahan (Hermawansyah *et al.*, 2022).

2.1.4.2. Drone sprayer (UAV)



Gambar 7. *Drone sprayer*
Sumber : Dokumentasi Pribadi, (2025)

Drone sprayer atau *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) sprayer* adalah pesawat udara tanpa awak yang dilengkapi dengan tangki cairan, sistem pompa, dan rangkaian nozzle untuk mengaplikasikan pestisida, pupuk cair, atau herbisida ke lahan pertanian dari udara. Teknologi ini merupakan salah satu inovasi utama dalam framework pertanian presisi (*precision agriculture*) yang menggabungkan kontrol penerbangan otomatis, navigasi berbasis *Global Positioning System (GPS)*, dan sistem aplikasi cairan yang dapat dikalibrasi dengan tepat (Wicaksono dan Arifin, 2021). Di Indonesia, adopsi *drone sprayer* dalam sektor pertanian mulai meningkat sejak era industri 4.0, didorong oleh kebutuhan untuk meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi beban kerja manusia, dan menekan paparan kimia terhadap operator (Wicaksono dan Arifin, 2021).

Tabel 4. Komponen Utama Drone Sprayer

Komponen	Fungsi
Rangka pesawat (<i>frame</i>)	Struktur utama drone berbahan komposit ringan sebagai tempat pemasangan komponen lain
Motor <i>brushless</i>	Menggerakkan baling-baling melalui putaran tinggi
Baling-baling (<i>propeller</i>)	Menghasilkan gaya angkat (<i>lift</i>) dan dorong (<i>thrust</i>)
Baterai <i>lithium polymer</i> (LiPo)	Sumber tenaga listrik untuk motor dan sistem elektronik drone
Modul GPS	Navigasi posisi presisi untuk pemetaan dan jalur terbang otomatis
Sensor radar/penginderaan optik	Deteksi rintangan dan pengukuran ketinggian terbang
Tangki cairan	Wadah penampung herbisida dengan kapasitas yang bervariasi sesuai kelas drone
Pompa elektrik	Membangkitkan tekanan untuk mendorong cairan ke rangkaian nozzle
Rangkaian nozzle	Memecah cairan menjadi <i>droplet</i> dan menyebarkannya di bawah drone
<i>Remote controller</i>	Pengendali jarak jauh untuk mode penerbangan manual
Perangkat android/tablet	Antarmuka pemetaan lahan dan perencanaan misi terbang otomatis

Sumber: Wicaksono dan Arifin (2021)

Operasi *drone sprayer* didahului oleh tahapan pemetaan lahan dan perencanaan misi penerbangan (*flight planning*) menggunakan perangkat lunak yang terintegrasi dengan citra satelit atau peta digital. Operator menentukan batas lahan, ketinggian terbang, kecepatan, dan jalur lintasan yang akan diikuti drone, kemudian drone akan terbang secara otomatis mengikuti rute tersebut dengan presisi yang dipandu GPS (Wicaksono dan Arifin, 2021). Pemanfaatan teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*) dapat diintegrasikan dengan *drone sprayer* untuk menerapkan aplikasi dosis variabel (*variable rate application*) yang menyesuaikan dosis herbisida berdasarkan kondisi spesifik tiap area lahan, termasuk untuk identifikasi area yang dikuasai gulma dengan kerapatan tinggi (Quan *et al.*, 2023).

Pengoperasian *drone sprayer* di Indonesia diatur oleh Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2020 tentang Pengoperasian Pesawat Udara Tanpa Awak (PUTA), yang menjadi acuan regulasi dalam pemanfaatan teknologi drone untuk berbagai sektor termasuk pertanian (Kementerian Perhubungan RI, 2020). Berdasarkan peraturan tersebut, drone dengan berat antara 250 gram hingga 25 kilogram wajib diregistrasi melalui Sistem Registrasi Drone, Pilot Drone, dan Persetujuan Pengoperasian Drone (SIDOPI-GO) yang dikelola oleh Direktorat Kelaikudaraan dan Pengoperasian Pesawat Udara (DKPPU) Kementerian Perhubungan. Operator drone juga diwajibkan memiliki sertifikat kompetensi pilot yang diterbitkan oleh DKPPU dengan persyaratan minimum berupa kewarganegaraan Indonesia, usia minimal 17 tahun, kemampuan berbahasa Inggris, kondisi sehat jasmani dan rohani, serta lulus ujian teori dan praktik (Kementerian Perhubungan RI, 2020). Ketentuan teknis pengoperasian mencakup batas ketinggian terbang maksimum 120 meter dari permukaan tanah tanpa izin khusus, larangan terbang di kawasan terlarang dan area sekitar bandara, serta kewajiban memperhatikan keselamatan penerbangan dan masyarakat di sekitar area operasi. Karakteristik lahan tebu yang umumnya luas dan relatif datar menjadi kondisi yang sesuai untuk operasi *drone sprayer* karena memungkinkan pemanfaatan kapasitas kerja drone secara optimal (Wicaksono dan Arifin, 2021).

2.1.5. Buruh Harian Lepas (BHL)



Gambar 8. Buruh Harian Lepas (BHL)
Sumber : Dokumentasi Pribadi, (2025)

Buruh Harian Lepas (BHL) merupakan tenaga kerja yang dipekerjakan untuk melakukan pekerjaan tertentu dengan sistem upah harian berdasarkan jumlah hari kerja atau kehadiran pekerja. Hubungan kerja BHL umumnya bersifat tidak tetap dan digunakan oleh perusahaan untuk pekerjaan yang sifatnya berubah-ubah, musiman, atau tidak berlangsung secara terus-menerus. Dalam sistem ketenagakerjaan di Indonesia, buruh harian lepas diatur dalam ketentuan perjanjian kerja waktu tertentu (PKWT) dan memiliki hak-hak dasar seperti upah, perlindungan kerja, serta jaminan kesehatan sesuai ketentuan perundang-undangan. Menurut Suryaningrat *et al.*, (2021), buruh harian lepas merupakan pekerja yang hubungan kerjanya dilakukan berdasarkan perjanjian kerja dengan pembayaran upah harian dan pelaksanaannya diatur dalam peraturan ketenagakerjaan Indonesia untuk pekerjaan tertentu yang bersifat tidak tetap.

Dalam sektor perkebunan, khususnya pada perusahaan perkebunan kelapa sawit dan tebu, buruh harian lepas memiliki peranan penting dalam menunjang kegiatan operasional lapangan seperti pemeliharaan tanaman, pengendalian gulma, pemupukan, aplikasi herbisida, hingga kegiatan panen. Penggunaan tenaga kerja BHL di perkebunan umumnya dipilih karena sifat pekerjaan yang sangat dipengaruhi kondisi musim, luas areal kerja, target harian, dan kebutuhan tenaga kerja yang fluktuatif. Sistem ini memberikan fleksibilitas bagi perusahaan dalam mengatur kebutuhan tenaga kerja operasional di lapangan.

2.1.6. Kinerja Operasional

Kinerja operasional menunjukkan kemampuan suatu metode kerja dalam menyelesaikan kegiatan lapangan melalui pemanfaatan waktu dan tenaga kerja secara efektif dan efisien. Pada kegiatan aplikasi herbisida pratumbuh, kinerja

operasional dapat dilihat dari kemampuan metode aplikasi dalam menyelesaikan luas areal serta jumlah tenaga kerja yang diperlukan untuk setiap hektare pekerjaan. Kapasitas kerja aktual merupakan luas areal yang dapat diselesaikan oleh suatu metode dalam waktu kerja aktual.

Kapasitas kerja aktual diperoleh dengan membagi luas areal yang dikerjakan dengan waktu operasi dan dapat digunakan untuk menilai kemampuan alat atau metode kerja berdasarkan kondisi pelaksanaan di lapangan (Yamin *et al.*, 2022). Semakin tinggi kapasitas kerja aktual, semakin luas areal yang dapat diselesaikan dalam satu hari operasi.

Kebutuhan tenaga kerja per hektare menunjukkan jumlah tenaga kerja yang diperlukan untuk menyelesaikan pekerjaan pada satu hektare areal. Penggunaan tenaga kerja pada kegiatan pertanian dapat dinilai berdasarkan jumlah input tenaga kerja dibandingkan dengan luas areal yang dikerjakan (Yousif & Ahmed, 2025). Dalam penelitian ini, kebutuhan tenaga kerja dinyatakan dalam satuan Hari Orang Kerja per hektare (HOK/ha). Nilai HOK/ha yang lebih rendah menunjukkan bahwa suatu metode membutuhkan tenaga kerja yang lebih sedikit untuk menyelesaikan satu hektare areal.

Berdasarkan uraian tersebut, kinerja operasional dalam penelitian ini diukur menggunakan dua indikator, yaitu kapasitas kerja aktual dalam satuan ha/hari dan kebutuhan tenaga kerja per hektare dalam satuan HOK/ha. Metode dengan kapasitas kerja aktual lebih tinggi dan kebutuhan tenaga kerja per hektare lebih rendah menunjukkan kinerja operasional yang lebih baik.

2.1.7. Biaya Operasional

Biaya operasional merupakan seluruh pengeluaran yang berkaitan dengan pelaksanaan suatu kegiatan produksi atau pekerjaan. Biaya tersebut digunakan untuk memperoleh input, menjalankan proses kerja, serta menyelesaikan kegiatan sesuai dengan target yang telah ditetapkan. Analisis biaya operasional diperlukan untuk mengetahui besarnya sumber daya ekonomi yang digunakan dalam menghasilkan satu unit pekerjaan. Pada kegiatan pertanian, biaya operasional dapat terdiri atas biaya tenaga kerja, bahan, penggunaan alat atau jasa, biaya modal, serta komponen lain yang timbul selama pelaksanaan pekerjaan. Besarnya biaya dapat berbeda menurut metode kerja, teknologi yang digunakan, kebutuhan tenaga kerja,

luas areal, dan sistem pembiayaan kegiatan. Oleh karena itu, metode yang mempunyai kapasitas kerja lebih tinggi belum tentu memiliki biaya operasional yang lebih rendah.

Perbandingan biaya antara beberapa metode kerja perlu dilakukan menggunakan satuan keluaran yang sama. Pada kegiatan lapangan pertanian, biaya umumnya dinyatakan dalam rupiah per hektare agar besarnya pengeluaran setiap metode dapat dibandingkan pada luas pekerjaan yang setara. Biaya per hektare diperoleh dengan membagi total biaya pelaksanaan pekerjaan dengan luas areal yang diselesaikan. Penggunaan teknologi *drone sprayer* memiliki struktur biaya yang berbeda dibandingkan metode penyemprotan konvensional. Metode *drone sprayer* dapat melibatkan biaya alat atau jasa vendor, operator, dan tenaga pendukung, sedangkan metode konvensional lebih banyak dipengaruhi oleh kebutuhan tenaga kerja dan kapasitas kerja pekerja. Penilaian teknologi drone perlu mempertimbangkan biaya dan beban kerja karena peningkatan kapasitas kerja tidak selalu diikuti oleh penurunan biaya pada setiap kondisi penggunaan (Umeda *et al.*, 2022).

Perbandingan biaya juga dapat dilengkapi dengan analisis sensitivitas untuk mengetahui perubahan hasil perhitungan ketika salah satu komponen biaya mengalami perubahan. Analisis sensitivitas dilakukan dengan mengubah nilai parameter tertentu dan mengamati pengaruhnya terhadap total biaya. Pendekatan tersebut dapat digunakan untuk melihat kestabilan hasil perbandingan serta komponen biaya yang paling memengaruhi keputusan penggunaan suatu metode (Grznár *et al.*, 2024).

2.2 Penelitian Terdahulu

Tabel 5. Hasil Penelitian Terdahulu

No.	Judul/Penulis/ Tahun	Metode	Hasil Penelitian
1.	Uji Efektivitas Aplikasi <i>Pre-Emergence</i> Herbisida Menggunakan <i>Drone sprayer</i> Dibandingkan dengan Penggunaan <i>Knapsack sprayer</i> , (Saumatgerat <i>et al.</i> , 2024)	Kuantitatif eksperimental	Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata efektivitas penyemprotan menggunakan <i>drone sprayer</i> sebesar 99,36%, lebih tinggi dibandingkan <i>knapsack sprayer</i> sebesar 93,83%, dengan selisih 5,53%. Standar deviasi masing-masing sebesar 1,0199 (drone) dan 2,5733 (knapsack). Uji t menghasilkan nilai $t = 7,206$ dengan signifikansi 0,000 ($<0,05$), yang menunjukkan perbedaan sangat signifikan. <i>Drone sprayer</i> lebih efektif dan menghasilkan tingkat miss gulma lebih rendah dibandingkan metode manual.
2.	Analisa Proses Penyemprotan Pupuk Cair Menggunakan Teknologi <i>Drone sprayer</i> (Studi Kasus: Komoditas Tebu Provinsi Jawa Timur), (Joanda & Hidayat, 2024)	Kuantitatif deskriptif-komparatif	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyemprotan konvensional menggunakan sprayer punggung memerlukan waktu 248 menit/ha (4,13 jam) dengan 3 tenaga kerja, sehingga dalam 8 jam kerja hanya mampu mencakup 1,64 ha/hari. Sebaliknya, penggunaan <i>drone sprayer</i> hanya membutuhkan 18 menit/ha dengan 1 operator dan mampu mencakup 26,67 ha/hari. Tingkat efisiensi yang dihasilkan masing-masing sebesar 93,67% (waktu penyemprotan), 66,67% (tenaga kerja), dan 93,66% (luas cakupan kerja). Secara kuantitatif, drone menunjukkan peningkatan produktivitas kerja yang sangat signifikan dibandingkan metode konvensional.

Lanjutan Tabel 5.

3.	Agricultural spraying drones: A comprehensive review, (Talaieizadeh <i>et al.</i> , 2025)	Kualitatif-deskriptif berbasis systematic literature review (SLR)	Berdasarkan sintesis berbagai penelitian, dilaporkan bahwa penggunaan drone dapat mengurangi penggunaan pestisida hingga 20–40% melalui sistem presisi dan spot spraying. Selain itu, beberapa studi yang dirujuk menunjukkan bahwa kapasitas kerja drone dapat mencapai 10–20 ha/jam, jauh lebih tinggi dibandingkan sprayer manual yang rata-rata hanya 1–2 ha/jam. Dari sisi keselamatan kerja, paparan operator terhadap pestisida dilaporkan dapat berkurang hingga 90–99% dibandingkan metode handheld. Namun demikian, artikel ini juga menyoroti keterbatasan drone seperti kapasitas tangki terbatas (umumnya 10–30 liter), kebutuhan pengisian ulang baterai setiap 10–20 menit, serta biaya investasi awal yang relatif tinggi.
4.	Perbandingan Teknis Penyemprotan Gulma secara Manual dan Menggunakan <i>Drone sprayer</i> di Lahan Replanting, (Mahhendra <i>et al.</i> , 2025)	Kuantitatif komparatif	Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu kematian gulma antara kedua metode tidak berbeda nyata, dengan rata-rata 17,5 hari pada <i>drone sprayer</i> dan 19,5 hari pada <i>knapsack sprayer</i> . Namun, pada variabel lama waktu aplikasi terdapat perbedaan nyata, yaitu 15,1 menit/ha untuk <i>drone sprayer</i> dan 84,2 menit/ha untuk <i>knapsack sprayer</i> , sehingga drone lebih cepat sekitar 82%. Dari sisi biaya, <i>drone sprayer</i> membutuhkan Rp269.000/ha, sedangkan <i>knapsack sprayer</i> sebesar Rp556.000/ha, sehingga terjadi penghematan biaya sekitar 51,6%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa secara efektivitas biologis kedua metode tidak berbeda nyata, tetapi <i>drone sprayer</i> secara signifikan lebih efisien dari segi waktu dan biaya operasional.
5.	Efektifitas dan Efisiensi <i>Drone sprayer</i> untuk Pengendalian Hama	Kuantitatif eksperimental komparatif	Hasil penelitian menunjukkan bahwa populasi keong mas pada perlakuan <i>drone sprayer</i> sebesar $2,30 \pm 0,95$ individu/rumpun, lebih rendah

Lanjutan Tabel 5.

	Keong (<i>Pomacea canaliculata</i> Lamarck) Tanaman (<i>Oryza sativa</i> L.), (Syarief, 2024)	Mas pada Padi	dibandingkan <i>knapsack sprayer</i> sebesar $2,96 \pm 0,67$ individu/rumpun dan berbeda nyata. Intensitas serangan juga lebih rendah pada <i>drone sprayer</i> yaitu $10,96 \pm 3,51\%$, dibandingkan <i>knapsack sprayer</i> $12,60 \pm 2,93\%$ dan berbeda nyata. Namun, berat gabah kering panen tidak berbeda nyata antara drone ($53,54 \pm 12,70$ g/rumpun) dan <i>knapsack</i> ($53,90 \pm 12,07$ g/rumpun). Dari sisi efisiensi kerja, waktu kerja <i>drone sprayer</i> sebesar 0,17 jam/ha, jauh lebih efisien dibandingkan <i>knapsack sprayer</i> sebesar 11,57 jam/ha. Secara kuantitatif, <i>drone sprayer</i> terbukti lebih efektif dalam menekan populasi dan intensitas serangan serta sangat unggul dalam efisiensi waktu kerja.
6.	Efektivitas dan Efisiensi <i>Drone sprayer</i> untuk Pengendalian Gulma pada Tanaman Padi (<i>Oryza sativa</i> L.), (Syarief <i>et al.</i> , 2024)	Kuantitatif eksperimental komparatif	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kepadatan mutlak gulma pada perlakuan <i>drone sprayer</i> sebesar $2,20 \pm 1,30$ individu/m ² , jauh lebih rendah dibandingkan <i>knapsack sprayer</i> sebesar $18,6 \pm 8,55$ individu/m ² dan berbeda nyata berdasarkan uji Mann–Whitney. Keanekaragaman gulma pada drone terdiri atas 2 ordo, 2 famili, dan 5 spesies yang didominasi <i>Leptochloa chinensis</i> (SDR 0,31), sedangkan <i>knapsack</i> terdiri atas 4 ordo, 4 famili, dan 6 spesies yang didominasi <i>Ipomoea aquatica</i> (SDR 0,30). Indeks Shannon-Wiener pada drone sebesar 1,47 dan <i>knapsack</i> 1,15, dengan indeks kesamaan Sorensen hanya 25% (kategori sangat rendah). Namun, berat gabah kering panen tidak berbeda nyata, yaitu $58,72 \pm 17,14$ g/rumpun (drone) dan $58,22 \pm 13,50$ g/rumpun (<i>knapsack</i>). Dari sisi efisiensi waktu, <i>drone sprayer</i> hanya membutuhkan 0,17 jam/ha, sedangkan <i>knapsack sprayer</i> 11,57 jam/ha, menunjukkan perbedaan efisiensi kerja yang sangat signifikan secara operasional.

Lanjutan Tabel 5.

7.	A review of UAV platforms, sensors, and applications for monitoring of sugarcane crops, Narmilan (Amarasingam <i>et al.</i> , 2022)	Kualitatif deskriptif dengan pendekatan systematic literature review (SLR)	Hasil kajian menunjukkan bahwa penggunaan UAV dalam industri tebu paling banyak difokuskan pada estimasi hasil (yield estimation), yaitu sekitar 31% dari total publikasi yang dianalisis. Aplikasi lain yang banyak diteliti meliputi pemetaan barisan tanaman, pengukuran tinggi dan kanopi, deteksi hama dan penyakit, aplikasi pestisida, serta estimasi indeks vegetasi. Dari sisi jenis UAV, rotary-wing digunakan lebih dominan (25 penelitian) dibandingkan fixed-wing (4 penelitian). Dari sisi sensor, sekitar 12 penelitian menggunakan kamera RGB, sedangkan sekitar 6 penelitian menggunakan kamera multispektral, sementara penggunaan hyperspectral dan LiDAR masih terbatas karena biaya yang relatif tinggi.
8.	Comparison of Droplet Deposition Control Efficacy on Phytophthora capsica and Aphids in the Processing Pepper Field of the Unmanned Aerial Vehicle and Knapsack sprayer, (Xiao <i>et al.</i> , 2020)	Kuantitatif eksperimental lapangan (<i>field experiment</i>)	Hasil penelitian menunjukkan bahwa cakupan droplet EAP sprayer jauh lebih tinggi dibanding UAV, yaitu 21,12% vs 1,83% (penyemprotan pertama) dan 18,59% vs 1,43% (penyemprotan kedua), karena volume semprot EAP (300 L/ha) jauh lebih besar dibanding UAV (15 L/ha). Densitas droplet rata-rata EAP mencapai 52,39 butir/cm ² , sekitar 2,54 kali lebih tinggi dari UAV (20,62 butir/cm ²). Namun demikian, deposisi aktual UAV justru lebih tinggi, mencapai 1,01 µg/cm ² , yaitu 98% lebih besar dibanding EAP pada lapisan atas kanopi. Dari sisi efektivitas biologis, pengendalian <i>P. capsici</i> oleh EAP mencapai >95% pada 20 hari setelah aplikasi, sedangkan UAV pada dosis 1/3 rekomendasi mampu mencapai 94,34%. Pada pengendalian aphid, efektivitas EAP >80% dalam 5 hari, sementara UAV sedikit lebih rendah namun tetap efektif. Penelitian ini menyimpulkan bahwa UAV memiliki

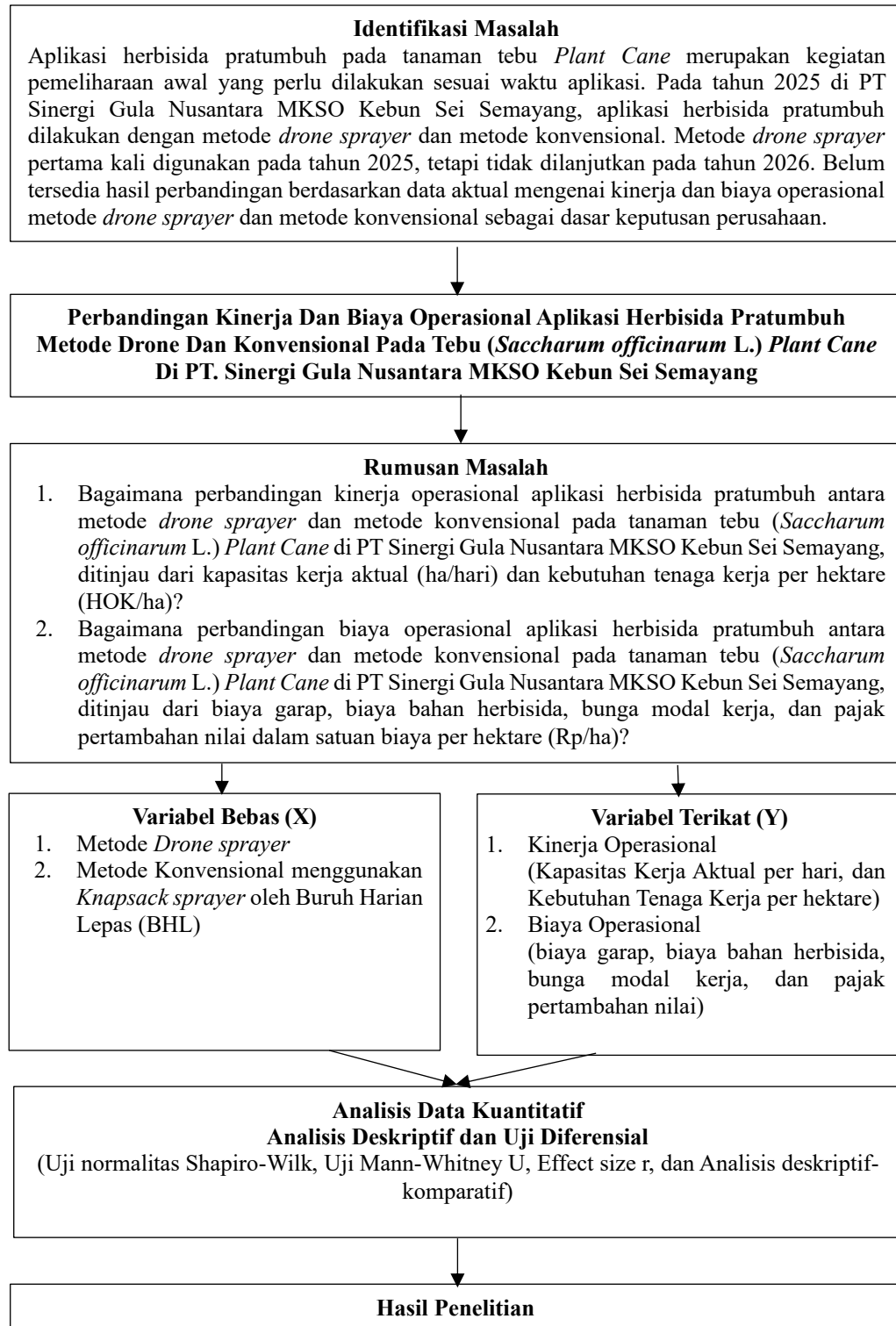
Lanjutan Tabel 5.

			efisiensi deposisi yang baik dan memungkinkan pengurangan dosis pestisida, meskipun cakupan dan keseragaman semprot masih lebih rendah dibanding metode manual bertekanan.
9.	Cost and Workload Assessment of Agricultural Drone sprayer: A Case Study of Rice Production in Japan, (Umeda <i>et al.</i> , 2022)	Kuantitatif studi kasus komparatif	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan UAV menurunkan biaya operasional dibandingkan metode konvensional. Di Farm H, biaya pengendalian hama turun dari 42.197 JPY/ha menjadi 25.989 JPY/ha (efisiensi 16.208 JPY/ha). Di Farm K, biaya berubah dari 27.431 JPY/ha (power sprayer) menjadi 30.874 JPY/ha (UAV), namun UAV memberikan efisiensi tenaga kerja signifikan (biaya tenaga kerja turun $\pm 50\%$). Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa UAV semakin ekonomis pada skala lahan besar karena kapasitas maksimum mencapai ± 200 ha. Dari sisi beban kerja, rata-rata intensitas kerja UAV sebesar 2,45 METs (SD 0,98) yang tergolong aktivitas ringan, dan 63,86% postur kerja termasuk kategori risiko rendah (AC 1) menurut OWAS. Hal ini menunjukkan UAV tidak hanya efisien biaya pada kondisi tertentu, tetapi juga lebih ergonomis dan mendukung pengurangan beban fisik operator.
10.	Herbicide spraying and weed identification using drone technology in modern farms: A comprehensive review, (Meesaragandla <i>et al.</i> , 2024)	Kualitatif deskriptif berbasis sistematis literatur review	Hasil kajian mencakup perbandingan parameter teknis seperti tinggi terbang (umumnya 2–4 meter), ukuran droplet (100–300 μm), volume semprot (10–30 L/ha), serta kapasitas kerja drone yang dilaporkan mampu mencapai 6–15 ha/jam tergantung spesifikasi dan kondisi lahan. Studi-studi yang direview menunjukkan bahwa penggunaan drone dapat menurunkan volume penggunaan herbisida hingga 20–40% melalui teknik spot spraying berbasis citra, serta meningkatkan efisiensi waktu kerja dibandingkan

Lanjutan Tabel 5.

11.	Efisiensi Biaya Penyemprotan Pupuk Pada Tanaman Tebu (<i>Saccharum officinarum</i> Linn) Dengan Menggunakan Drone DJI T20P, (Amaliah, 2025)	Kuantitatif deskriptif- komparatif	metode konvensional. Selain itu, integrasi sensor multispektral dan algoritma klasifikasi citra dilaporkan mampu mengidentifikasi gulma dengan akurasi lebih dari 85–95% pada beberapa penelitian yang dikaji. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan drone DJI T20P memiliki kapasitas kerja yang jauh lebih tinggi dibandingkan metode manual, dengan cakupan lahan yang lebih luas dalam waktu yang lebih singkat. Secara ekonomi, biaya penyemprotan per hektar menggunakan drone lebih rendah dibandingkan metode konvensional karena efisiensi tenaga kerja dan waktu operasional. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan drone DJI T20P lebih efisien secara biaya dan waktu dibandingkan metode manual pada tanaman tebu.
-----	---	--	--

2.3 Kerangka Pikir



Gambar 9. Kerangka Pikir

2.4 Hipotesis

Hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Diduga terdapat perbedaan kinerja operasional aplikasi herbisida pratumbuh antara metode *drone sprayer* dan metode konvensional pada tanaman tebu *Plant Cane* di PT Sinergi Gula Nusantara MKSO Kebun Sei Semayang, ditinjau dari kapasitas kerja aktual (ha/hari) dan kebutuhan tenaga kerja per hektare (HOK/ha).
2. Diduga terdapat perbedaan biaya operasional aplikasi herbisida pratumbuh antara metode *drone sprayer* dan metode konvensional pada tanaman tebu *Plant Cane* di PT Sinergi Gula Nusantara MKSO Kebun Sei Semayang, ditinjau dari biaya garap, biaya bahan herbisida, bunga modal kerja, dan pajak pertambahan nilai dalam satuan biaya per hektare (Rp/ha).