II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanaman Kelapa Sawit (*Elaeis Guineensis* Jacq.)

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis Jacq*.) merupakan tanaman perkebunan tropis yang berasal dari Afrika Barat dan saat ini menjadi komoditas minyak nabati paling produktif di dunia. Menurut Alhaji *et al*. (2024), produksi minyak sawit global terus meningkat dan diproyeksikan melampaui 80 juta ton per tahun, dengan kontribusi lebih dari 35% terhadap total produksi minyak nabati dunia. Produktivitasnya yang tinggi, yakni sekitar 4–4,5 ton minyak per hektare per tahun, menjadikan kelapa sawit sebagai tanaman paling efisien dibandingkan komoditas minyak nabati lainnya. Secara botani, kelapa sawit termasuk famili Arecaceae dan merupakan tanaman monokotil berkayu dengan batang tunggal yang dapat mencapai tinggi lebih dari 20 meter pada fase dewasa. Corley dan Tinker (2016) menjelaskan bahwa buah kelapa sawit berbentuk drupe yang tersusun dalam tandan buah segar (fresh fruit bunch/FFB), terdiri atas lapisan eksokarp (kulit), mesokarp (daging buah), endokarp (cangkang), dan endosperm (inti). Minyak sawit mentah *(crude palm oil*/CPO) diekstraksi dari mesokarp, sedangkan minyak inti sawit (palm kernel oil/PKO) diperoleh dari bijinya.

Dari aspek agronomi, produktivitas tanaman kelapa sawit dipengaruhi oleh faktor genetik, kondisi lingkungan, serta praktik pengelolaan kebun. Penelitian Yonanda *et al* (2024) menunjukkan bahwa perbedaan topografi berbukit dan bergelombang tidak memberikan perbedaan nyata terhadap karakter agronomi maupun produksi tanaman, meskipun capaian produksi masih berada di bawah potensi optimalnya. Hal ini mengindikasikan bahwa manajemen budidaya, pemupukan, dan pemeliharaan berperan lebih dominan dibandingkan faktor topografi semata. Pada fase pembibitan, kualitas media tanam dan kecukupan unsur hara sangat menentukan pertumbuhan awal tanaman. Murnita *et al* (2024) membuktikan bahwa penggunaan bokashi tandan kosong kelapa sawit (OPEFB) dengan komposisi tertentu mampu meningkatkan sifat kimia tanah seperti pH, C-organik, N-total, P-tersedia, dan K-dd, serta berpengaruh signifikan terhadap tinggi tanaman pada fase main nursery. Sejalan dengan itu, Munir *et al*. (2026) menemukan bahwa variasi dosis pupuk KCl dan metode aplikasinya pada fase pre-nursery memengaruhi respons pertumbuhan bibit, meskipun tidak selalu menunjukkan interaksi signifikan antarperlakuan. Kalium berperan penting dalam proses fisiologis tanaman, termasuk pembentukan jaringan, regulasi stomata, serta keseimbangan metabolisme.

Selain aspek produksi dan agronomi, kelapa sawit juga memiliki karakteristik kimia yang khas. Alhaji *et al*. (2024) menjelaskan bahwa minyak sawit mengandung komposisi asam lemak seimbang antara jenuh dan tak jenuh, terutama asam palmitat dan asam oleat, serta komponen minor seperti karotenoid dan tokoferol yang memiliki aktivitas antioksidan. Kandungan ini memberikan stabilitas oksidatif tinggi dan menjadikan minyak sawit banyak digunakan dalam industri pangan maupun nonpangan. Dari perspektif keberlanjutan, pengembangan kelapa sawit menghadapi tantangan lingkungan dan sosial, terutama terkait deforestasi dan emisi gas rumah kaca. Namun demikian, Alhaji *et al*. (2024) menekankan bahwa peningkatan produktivitas melalui praktik budidaya berkelanjutan, sertifikasi, serta pemanfaatan limbah seperti tandan kosong dan *palm oil mill effluent* (POME) menjadi strategi penting dalam menyeimbangkan

aspek ekonomi, sosial, dan ekologis. Polinasi alami sangat bergantung pada serangga penyerbuk utama, yaitu kumbang *Elaeidobius kamerunicus*. Kehadiran kumbang ini dipicu oleh emisi senyawa volatil estragole dari bunga betina reseptif, dengan konsentrasi optimum sekitar 100 ppm untuk menarik penyerbuk (Fahmi-Halil *et al.*, 2021). Dengan demikian, pemahaman mengenai morfologi dan fenologi bunga merupakan dasar penting untuk mengoptimalkan sistem polinasi, baik alami maupun buatan.

Tabel 1. Perbandingan Morfologi Bunga Betina dan Jantan Kelapa Sawit

Aspek	Bunga Betina	Bunga Jantan
Ukuran bunga	Kecil, jumlah ribuan dalam satu tandan	Relatif besar, bulat – lonjong
Organ reproduksi utama	Ginesium: stigma, style, ovarium, trilokular	Enam stamen: filamen dan antera penghasil polen
Organ rudimer	Staminodia (benang sari rudimeter)	Pistillode (putik rudimeter)
Warna bunga	Kekuningan pucat – krem (reseptif)	Kuning keemasan hingga kecoklatan (antera/polen)
Tanda biologis	Tepal terbuka ≥ 70%, stigma krem dan lengket, bau khas	Anthesis 10 – 14hari, pelepasan polen bertahap
Peran ekologi	Menerima polen untuk pembuahan	Menghasilkan polen dan habitat kumbang penyerbuk
Periode kritis	Fase reseptif 1 sampai dengan 3 hari	Puncak polen ± hari ke 5 – 7 anthesis

2.1.1. Bunga Betina

Dalam sistem reproduksi kelapa sawit, bunga betina memegang peran yang sangat penting karena menjadi titik awal pembentukan tandan buah segar (TBS) yang menentukan hasil panen. Berbeda dengan bunga jantan yang jumlahnya lebih banyak, bunga betina lebih sedikit tetapi berukuran lebih besar, sehingga memerlukan strategi reproduksi yang lebih efisien untuk menjamin keberhasilan pembuahan. Menurut Corley & Tinker., (2016), bunga betina tersusun dalam spikelet yang padat, membentuk infloresens kompak yang muncul dari ketiak pelepah. Struktur ini dirancang untuk memaksimalkan penerimaan polen yang dibawa angin maupun serangga. Bunga betina kelapa sawit berukuran lebih besar dibanding bunga jantan, berbentuk bulat hingga lonjong, dan tersusun rapat dalam spikelet. Setiap bunga betina memiliki ginesium sebagai organ reproduksi utama yang tersusun dari tiga karpel menyatu (ovarium trilokular), style pendek, dan stigma trifid yang berfungsi sebagai permukaan penempelan polen. Tanaman ini bersifat monoesis, yaitu bunga jantan dan betina terdapat pada satu individu tetapi dalam infloresens yang berbeda serta waktu kematangan yang tidak selalu bersamaan. Kondisi ini menyebabkan keberhasilan reproduksi sangat bergantung pada sinkronisasi fase berbunga dan efektivitas penyerbukan silang. Laporan global FAO. (2023) menegaskan bahwa efisiensi penyerbukan pada tanaman perkebunan tropis, termasuk kelapa sawit, menjadi faktor kunci dalam stabilitas produksi dan ketahanan pangan berbasis minyak nabati.Bunga betina memasuki fase reseptif setelah spatha (seludang) terbuka.

Secara morfologis, bunga betina tersusun dalam spikelet padat yang membentuk infloresens kompak dan muncul dari ketiak pelepah. Studi perkembangan bunga oleh Yaakub dan Shaipulah., (2023) menunjukkan bahwa diferensiasi organ reproduktif betina berlangsung melalui tahapan fenologi yang terstruktur, dimulai dari pembentukan primordia hingga pembukaan spatha. Setiap bunga betina memiliki ovarium trilokular dengan tiga bakal biji, style pendek, serta stigma bercabang (*trifid*) yang berfungsi sebagai permukaan reseptif polen.

Penelitian molekuler terbaru oleh Gintoron., (2022) menjelaskan bahwa regulasi ekspresi gen yang terlibat dalam determinasi kelamin dan perkembangan infloresens berperan penting dalam pembentukan struktur ovarium dan viabilitas ovulum. Meskipun secara anatomi terdapat tiga bakal biji, secara fisiologis umumnya hanya satu yang berkembang menjadi embrio normal, sedangkan dua lainnya mengalami degenerasi akibat kompetisi nutrisi dan seleksi internal. Bunga betina memasuki fase reseptif setelah spatha terbuka sempurna. Berdasarkan pengamatan fenologi lapangan, Yaakub dan Shaipulah., (2023) melaporkan bahwa periode reseptif berlangsung rata-rata 3–4 hari, dengan puncak viabilitas stigma terjadi pada hari pertama hingga kedua setelah pembukaan.

Karakteristik fase reseptif meliputi:

1. Tepal terbuka lebih dari 70% sehingga struktur stigma terekspos optimal.
2. Warna stigma krem hingga kekuningan dan permukaan berlendir/viskous, yang meningkatkan adhesi serta hidrasi polen.
3. Produksi senyawa volatil aromatik, terutama estragole, yang berfungsi sebagai atraktan polinator.

Gintaron. (2023) menjelaskan bahwa senyawa volatil yang dilepaskan infloresens betina berperan sebagai sinyal kimia yang menarik kumbang penyerbuk *Elaeidobius kamerunicus*. Senyawa estragole terbukti menjadi komponen dominan dalam komunikasi kimia antara bunga dan polinator, sehingga meningkatkan peluang fertilisasi efektif. Keberhasilan pembentukan buah sangat dipengaruhi oleh sinkronisasi antara fase reseptif bunga betina dan anthesis bunga jantan. Li *et al.*, (2022) dalam studi ekologi lanskap pada *Agriculture, Ecosystems & Environment* menunjukkan bahwa ketersediaan habitat sekitar kebun (misalnya hutan sekunder) berkontribusi terhadap keberadaan dan aktivitas polinator, yang pada akhirnya meningkatkan *fruitset* pada bunga betina. Ketidaksinkronan waktu berbunga atau rendahnya populasi polinator terbukti menurunkan tingkat pembuahan dan meningkatkan proporsi bunga steril.



(a) (b) (c)

Gambar 1. Bunga Betina. (a) Bunga Reseptif, (b) 2 Hari Setelah Penyerbukan, (c) Bunga Setelah Terserbuki Sempurna

Gambar 1 memperlihatkan morfologi bunga betina kelapa sawit yang baru memasuki fase reseptif. Terlihat jelas spikelet berisi bunga-bunga betina yang padat dengan tepal terbuka. Warna merah muda keunguan hingga krem menunjukkan fase awal menuju reseptif penuh. Kehadiran stigma trifid pada setiap bunga berfungsi sebagai tempat melekatnya butir polen yang dibawa serangga. Susunan rapat spikelet merupakan adaptasi untuk meningkatkan efisiensi penyerbukan silang, sehingga peluang terbentuknya buah bernas lebih besar (Gintoron *et al.*, 2023). Selain itu, gambar ini juga memperlihatkan fungsi ekologis bunga betina. Dengan emisi senyawa volatil yang khas, infloresens betina bukan hanya berperan sebagai organ reproduksi, tetapi juga sebagai sinyal kimiawi yang memastikan peran aktif polinator serangga. Adaptasi ini menjadi kunci keberhasilan *entomophily* (penyerbukan oleh serangga) yang menjadi strategi utama kelapa sawit, berbeda dengan tanaman *monoecious* lain yang cenderung mengandalkan *anemophily* (angin).

2.1.2. Bunga Jantan

Bunga jantan kelapa sawit merupakan komponen vital dalam siklus reproduksi karena berfungsi sebagai sumber utama polen yang dibutuhkan untuk menyerbuki bunga betina. Jumlah bunga jantan dalam satu tandan sangat melimpah, memungkinkan produksi polen dalam jumlah besar sehingga meningkatkan peluang keberhasilan polinasi. Menurut Corley & Tinker., (2016), struktur morfologi bunga jantan telah berevolusi untuk memastikan pelepasan polen yang efisien, sekaligus menyediakan habitat bagi serangga penyerbuk utama, yakni *Elaeidobius kamerunicus.* Ketersediaan bunga jantan anthesis berpengaruh signifikan terhadap kepadatan populasi kumbang penyerbuk di kebun (Sinaga *et al.*, 2025). Bunga jantan kelapa sawit berukuran kecil, jumlahnya ribuan dalam satu infloresens. Organ reproduksi utamanya adalah enam benang sari (stamen), tersusun dalam dua lingkaran masing-masing tiga. Tiap benang sari memiliki antera penghasil polen. Serbuk sari (polen) berbentuk halus, ringan, dan berwarna kuning keemasan hingga kecoklatan. Selain stamen, bunga jantan juga memiliki pistillode (putik rudimenter) yang tidak berfungsi, tetapi berperan sebagai ciri diagnostik anatomi (Corley dan Tinker, 2016).

Infloresens jantan memasuki fase anthesis ketika antera melepaskan polen secara bertahap. Menurut Permana *et al.* (2021), bunga jantan mekar selama 6 hinga 7 hari hingga menyelesaikan siklus infloresensnya, dengan puncak aktivitas kunjungan E. *kamerunicus* terjadi pada siang hari. Selain sebagai sumber polen, infloresens jantan juga menjadi habitat dan tempat reproduksi utama kumbang penyerbuk. Permana *et al.* (2021) menjelaskan bahwa oviposisi betina terjadi pada bunga jantan, sementara larva berkembang dengan memanfaatkan jaringan bunga dan imago memakan polen. Oleh karena itu, keberadaan dan kontinuitas bunga jantan anthesis menentukan stabilitas populasi penyerbuk di perkebunan (Sinaga *et al.*, 2025).



(a) (b)

Gambar 2. Bunga Jantan. (a) Bunga Anthesis, (b) Bunga Lewat Anthesis

Gambar 2 memperlihatkan morfologi bunga jantan kelapa sawit yang tersusun dalam spikelet ramping dan memanjang. Tampak jelas bentuk silindris spikelet yang berisi ribuan bunga jantan kecil. Warna coklat kekuningan menandakan fase anthesis, di mana antera melepaskan polen. Struktur yang terlihat padat dan seragam mendukung efisiensi distribusi polen di lapangan. Visual ini juga menekankan peran ganda infloresens jantan selain sebagai penghasil polen dalam jumlah masif, juga sebagai ekosistem mikro bagi populasi E. *kamerunicus*. Hubungan mutualistik ini sangat penting karena memastikan adanya polinasi silang yang optimal, sehingga mendukung pembentukan *fruitset* yang tinggi. Dengan demikian, morfologi bunga jantan tidak hanya memiliki implikasi reproduktif, tetapi juga ekologi yang fundamental bagi produktivitas kelapa sawit.

2.2 Polinasi pada Kelapa Sawit

Polinasi atau penyerbukan merupakan proses penting dalam reproduksi kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.), karena keberhasilan pembentukan buah (*fruitset*) sangat ditentukan oleh pertemuan antara polen dari bunga jantan dengan stigma bunga betina yang reseptif. Tanpa polinasi yang efektif, produksi tandan buah segar (TBS) akan menurun dan kualitas hasil turut terdampak. Gintoron *et al.* (2023) menjelaskan bahwa efektivitas polinasi pada kelapa sawit berkaitan erat dengan dinamika populasi *Elaeidobius kamerunicus*, ketersediaan bunga jantan anthesis, serta faktor lingkungan yang memengaruhi aktivitas penyerbuk. Oleh

karena itu, pemahaman mengenai mekanisme polinasi alami dan intervensi teknis menjadi bagian penting dalam manajemen produktivitas kebun modern.

Polinasi buatan atau *assisted pollination* (aspol) merupakan teknik pemindahan polen ke bunga betina secara terkontrol dengan bantuan manusia untuk memastikan terjadinya fertilisasi. Mohamed *et al.* (2022) menyatakan bahwa intervensi penyerbukan diperlukan pada kondisi populasi penyerbuk rendah atau ketika terjadi ketidaksinkronan antara anthesis bunga jantan dan reseptivitas bunga betina. Corley dan Tinker (2016) mendefinisikan aspol sebagai pemberian polen jantan ke bunga betina reseptif dalam jumlah terukur dan waktu yang tepat guna menjamin fertilisasi optimal. Definisi ini menegaskan bahwa keberhasilan aspol tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan polen, tetapi juga oleh ketepatan dosis dan timing aplikasi.

Aspol dilakukan untuk mencapai tujuan tertentu yang berkaitan dengan produktivitas dan kualitas hasil kebun, antara lain:

1. Meningkatkan *Fruitset*

   Riley *et al.* (2022) melaporkan bahwa peningkatan efektivitas penyerbukan berbanding lurus dengan kenaikan persentase pembentukan buah, sehingga intervensi penyerbukan dapat menjadi strategi untuk menekan kehilangan potensi produksi akibat kegagalan fertilisasi.
2. Memperbaiki Kualitas Tandan Buah Segar (TBS)

   Corley dan Tinker, (2016) menjelaskan bahwa *fruitset* yang tinggi menghasilkan tandan lebih padat dan seragam, dengan perkembangan biji yang lebih sempurna serta potensi rendemen minyak yang lebih baik.
3. Mengatasi Rendahnya Polinasi Alami

   Sinaga *et al.* (2025) menunjukkan bahwa ketersediaan bunga jantan anthesis berpengaruh signifikan terhadap populasi *E. kamerunicus*, yang pada gilirannya menentukan efektivitas polinasi alami. Pada kondisi populasi penyerbuk tidak stabil, intervensi polinasi menjadi langkah manajerial untuk menjaga konsistensi produksi.

2.2.1 Persiapan dan penyimpanan Polen

Polen merupakan komponen utama dalam proses polinasi, baik alami maupun buatan. Mutu polen sangat menentukan keberhasilan fertilisasi sehingga persiapan dan penyimpanannya harus dilakukan dengan prosedur yang terkontrol. Corley dan Tinker, (2016) menjelaskan bahwa polen kelapa sawit memiliki viabilitas tinggi hanya dalam waktu singkat setelah dilepaskan dari bunga jantan dan sangat sensitif terhadap kelembapan serta suhu lingkungan. Polen yang kehilangan viabilitas akan menurunkan *fruitset* meskipun dosis aplikasi mencukupi. Polen diperoleh dari bunga jantan yang berada pada fase anthesis penuh, yaitu saat antera terbuka dan serbuk sari mudah terlepas. Soh *et al.* (2017) dalam *Oil Palm Breeding*: *Genetics and Genomics* menjelaskan bahwa fase anthesis optimal ditandai dengan pelepasan polen maksimum serta kondisi morfologis bunga yang masih segar. Pengumpulan dilakukan dengan memotong spikelet bunga jantan, kemudian polen dipisahkan melalui proses pengayakan untuk memperoleh butiran yang bersih dan seragam.

Polen segar memiliki kadar air relatif tinggi sehingga rentan mengalami degradasi fisiologis apabila langsung disimpan. Corley dan Tinker, (2016) menyebutkan bahwa pengeringan dilakukan pada suhu rendah sekitar 35–40 °C

untuk menurunkan kadar air tanpa merusak struktur eksin polen. Taiz *et al*. (2018) menjelaskan bahwa stabilitas membran sel polen sangat dipengaruhi oleh kadar air dan suhu pengeringan, sehingga pengeringan yang berlebihan dapat menurunkan daya kecambah, sedangkan pengeringan yang kurang dapat memicu pertumbuhan mikroorganisme. Setelah kering, polen dimasukkan ke dalam wadah kedap udara untuk mencegah penyerapan kembali uap air dari lingkungan.

Penyimpanan polen bertujuan mempertahankan viabilitas hingga waktu aplikasi. Corley dan Tinker, (2016) menjelaskan bahwa penyimpanan suhu dingin sekitar 4 °C efektif untuk penggunaan jangka pendek, sedangkan penyimpanan suhu beku hingga -20 °C digunakan untuk periode lebih lama. Soh *et al.* (2017) menegaskan bahwa meskipun penyimpanan suhu rendah dapat memperpanjang masa simpan, viabilitas polen tetap menurun secara bertahap sehingga uji daya kecambah sebelum aplikasi sangat dianjurkan. Dalam praktik operasional, polen biasanya dicampur dengan bahan pembawa (*carrier*) seperti serbuk talk untuk mempermudah distribusi dan meningkatkan efisiensi aplikasi di lapangan. Corley dan Tinker, (2016) menjelaskan bahwa pencampuran ini membantu penyebaran polen lebih merata serta mencegah penggunaan berlebihan sehingga lebih efisien secara ekonomi.

2.2.2 Waktu Aplikasi Polen dan Faktor Lingkungan

Waktu aplikasi polen merupakan salah satu faktor kunci dalam polinasi buatan (assisted pollination). Keberhasilan fertilisasi sangat bergantung pada sinkronisasi antara pemberian polen dan fase reseptivitas bunga betina. Corley dan Tinker, (2016) menjelaskan bahwa stigma bunga betina hanya reseptif dalam periode singkat, umumnya 2–3 hari setelah spatha membuka, sehingga aplikasi polen harus dilakukan tepat pada fase tersebut. Tanda-tanda bunga betina reseptif meliputi warna stigma yang lebih pucat, permukaan lengket akibat eksudat, serta terbukanya struktur bunga secara optimal. Apabila polinasi dilakukan sebelum atau setelah fase reseptif, tingkat *fruitset* akan menurun secara signifikan.

Dalam praktik agronomi modern, aplikasi polen pada pagi hari dinilai lebih efektif karena kondisi mikroklimat lebih mendukung. Gintoron *et al.* (2023) melaporkan bahwa aktivitas penyerbuk dan stabilitas polen meningkat pada kondisi suhu relatif rendah dan kelembapan tinggi. Rentang suhu pagi hari sekitar 25–27 °C dengan kelembapan 80–90% membantu mempertahankan viabilitas polen setelah diaplikasikan pada stigma. Sebaliknya, suhu siang hari yang meningkat hingga 30–35 °C dapat mempercepat dehidrasi polen dan menurunkan peluang perkecambahan. Meskipun demikian, Corley dan Tinker., (2016) menegaskan bahwa apabila stigma masih dalam kondisi reseptif, polinasi siang hari tetap dapat menghasilkan *fruitset*, walaupun tingkat keberhasilannya cenderung lebih rendah dibandingkan pagi hari.

Aplikasi sore hari dapat menjadi alternatif ketika polinasi pagi tidak memungkinkan. Pada sore hari suhu mulai menurun dan kelembapan kembali meningkat, sehingga masih cukup mendukung proses fertilisasi. Namun, keberhasilan tetap dipengaruhi oleh stabilitas cuaca, terutama risiko hujan yang dapat mencuci polen sebelum terjadi perkecambahan pada stigma (Gintoron *et al.*, 2023). Keberhasilan pelaksanaan *assisted pollination* tidak hanya ditentukan oleh faktor waktu, tetapi juga oleh kondisi lingkungan seperti suhu, kelembapan udara, intensitas cahaya, dan curah hujan. Suhu optimal untuk perkecambahan polen

umumnya berada pada kisaran 25–30 °C (Corley dan Tinker, 2016). Suhu yang terlalu tinggi mempercepat hilangnya viabilitas polen, sedangkan suhu terlalu rendah dapat menghambat pertumbuhan tabung polen. Kelembapan tinggi membantu menjaga daya rekat stigma, namun kelembapan berlebihan berpotensi memicu pertumbuhan mikroorganisme pada permukaan bunga. Curah hujan tinggi menjadi kendala utama karena dapat mengurangi jumlah polen yang menempel pada stigma. Selain itu, angin kencang dapat mengganggu distribusi polen saat penyemprotan sehingga aplikasi sebaiknya dilakukan pada kondisi angin relatif tenang agar penyebaran lebih merata.

2.2.3 Alat yang Digunakan dalam Polinasi Buatan

Polinasi buatan (*assisted pollination*) tidak hanya memerlukan polen yang viabel dan timing yang tepat, tetapi juga alat yang digunakan untuk mengaplikasikan polen ke stigma bunga betina secara efisien. Dalam praktik modern, pemilihan alat berpengaruh pada efisiensi tenaga kerja, ketepatan dosis polen, dan keseragaman distribusi polen, khususnya pada areal perkebunan luas yang membutuhkan cakupan aplikatif besar (Gintoron *et al*. 2023).

Beberapa kategori alat dan pendekatan yang umum digunakan dalam polinasi buatan di perkebunan kelapa sawit adalah sebagai berikut:

1. Botol atau Tabung Manual

Alat paling sederhana berupa botol plastik atau tabung kecil yang dilengkapi ujung berlubang atau saringan halus, diisi dengan polen yang dicampur carrier (misalnya talk). Aplikasi dilakukan dengan cara mengocok atau menekan botol agar serbuk sari keluar dan menempel pada permukaan stigma. Pendekatan ini ekonomis dan mudah dibuat serta efektif untuk skala kecil sampai menengah, terutama bila jumlah bunga yang akan diaplikasikan tidak terlalu banyak.

2. Semprotan Tekanan Ringan (*Hand Sprayer*)

Pompa tangan dengan semprotan bertekanan rendah membantu distribusi polen yang lebih merata di permukaan stigma dibanding tabung sederhana. Alat ini cocok untuk kebun menengah karena tetap bergantung pada tenaga kerja manual namun meningkatkan keseragaman aplikasi.

3. Sistem Aplikasi Mekanis/Modifikasi

Beberapa inovasi yang dikembangkan dalam konteks budidaya kelapa sawit adalah alat penyebar polen hasil modifikasi atau sistem air blower ringan yang didesain untuk mempercepat penyebaran serbuk sari secara halus ke banyak bunga sekaligus. Meskipun jurnal terbaru belum memuat analisis eksperimen lengkap terhadap alat-alat tersebut, beberapa laporan internal dan skripsi mengindikasikan bahwa modifikasi alat penyebar polen *(e.g., mobile polen distributors*) dapat meningkatkan cakupan aplikasi di lapangan.

4. Pendekatan Kombinasi dengan Serangga Penyerbuk

Selain alat fisik, pendekatan assisted pollination kini juga dikombinasikan dengan teknik *hatch & carry*, yaitu pengembangan populasi penyerbuk alami (*Elaeidobius kamerunicus*) untuk mendukung aplikasi polinasi buatan. Pendekatan ini menunjukkan bahwa selain aplikasi manual, peran serangga penyerbuk yang dibantu secara teknis tetap penting dalam meningkatkan *fruitset* (Gintoron *et al.*, 2023).

Secara keseluruhan, meskipun artikel ilmiah peer-review terbaru khusus tentang alat polen buatan secara kuantitatif belum tersedia, prinsip pemilihan alat

masih merujuk pada efektifitas distribusi dan kapasitas aplikasi yang sesuai dengan skala operasi kebun. Integrasi inovasi alat dan strategi pendukung seperti *hatch & carry* dapat menjadi langkah optimasi praktis dalam manajemen assisted *pollination* di perkebunan kelapa sawit.

2.2.4 Faktor yang Mempengaruhi Keberhasilan Polinasi Buatan

Keberhasilan proses polinasi buatan pada tanaman kelapa sawit dipengaruhi oleh sejumlah faktor yang saling berhubungan, meliputi kondisi lingkungan, mutu serbuk sari (polen), dosis aplikasi, serta ketepatan waktu penerapan. Dosis polen merupakan salah satu faktor teknis terpenting dalam polinasi buatan. Polen yang diaplikasikan ke bunga betina harus cukup untuk membuahi seluruh bakal biji yang tersedia. Corley dan Tinker., (2016) menjelaskan bahwa dosis polen yang terlalu rendah menyebabkan banyak bakal biji tidak mengalami fertilisasi sehingga *fruitset* menurun signifikan. Sebaliknya, peningkatan dosis secara berlebihan tidak selalu meningkatkan *fruitset* secara proporsional dan dapat menimbulkan inefisiensi bahan.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa efektivitas polinasi sangat berkaitan dengan kepadatan dan distribusi polen yang memadai pada stigma. Swaray *et al*. (2022) melaporkan bahwa keberhasilan pembentukan buah pada hibrida kelapa sawit dipengaruhi oleh kecukupan transfer polen dan sinkronisasi fase reproduktif. Hal ini mengindikasikan pentingnya penentuan dosis optimum melalui uji lapangan sesuai kondisi kebun. Selain meningkatkan jumlah buah terbentuk, dosis yang tepat juga berkontribusi pada keseragaman perkembangan biji dan kualitas tandan buah segar. Waktu aplikasi polen merupakan faktor krusial berikutnya. Stigma bunga betina hanya berada dalam fase reseptif selama periode terbatas, umumnya 2–3 hari setelah spatha membuka (Corley dan Tinker, 2016). Kondisi mikroklimat sangat menentukan keberhasilan fertilisasi. Gintoron *et al*. (2023) menunjukkan bahwa suhu dan kelembapan memengaruhi aktivitas penyerbuk serta stabilitas polen di lapangan. Rentang suhu sekitar 25–27 ℃ dengan kelembapan tinggi (±80–90%) mendukung viabilitas polen setelah aplikasi, sedangkan suhu siang hari yang meningkat hingga 30–35 °C dapat mempercepat dehidrasi dan menurunkan peluang perkecambahan.

Selain dosis dan waktu, interaksi keduanya sangat menentukan hasil akhir. Dosis optimum tidak akan menghasilkan *fruitset* maksimal apabila diberikan di luar fase reseptif, dan aplikasi pada waktu terbaik tidak efektif apabila kualitas atau jumlah polen tidak mencukupi (Corley dan Tinker, 2016). Kombinasi sinkronisasi fase reseptif, dosis cukup, dan kondisi lingkungan mendukung dapat meningkatkan *fruitset* hingga lebih dari 80% dibandingkan tanpa intervensi.

Faktor pendukung lain yang turut memengaruhi keberhasilan polinasi buatan meliputi:

1. Viabilitas Polen, Stabilitas polen dipengaruhi oleh suhu dan kelembapan lingkungan sebelum serta saat aplikasi (Gintoron *et al.* 2023).
2. Lingkungan, Curah hujan tinggi dapat mengurangi efektivitas karena polen berpotensi tercuci sebelum terjadi fertilisasi. Intensitas cahaya dan suhu ekstrem juga memengaruhi pertumbuhan tabung polen (Swaray *et al.* 2022).
3. Teknik Aplikasi, Distribusi polen yang merata meningkatkan peluang semua bakal biji mengalami fertilisasi (Gintoron *et al.* 2023).

4. Sinkronisasi Pembungaan, Ketidaksinkronan antara anthesis jantan dan reseptivitas betina dapat menurunkan keberhasilan penyerbukan, sehingga intervensi polinasi diperlukan untuk menjaga stabilitas produksi (Swaray *et al.* 2022).

2.3 Morfologi Buah Kelapa Sawit

Brondolan adalah buah kelapa sawit yang lepas dari tandan ketika sudah mencapai tingkat kematangan fisiologis. Secara anatomi, brondolan tersusun atas tiga lapisan utama, yaitu eksokarp, mesokarp, dan endokarp. Eksokarp merupakan kulit luar yang licin dengan warna hijau saat muda dan berubah menjadi merah-oranye ketika matang penuh (Corley dan Tinker, 2016). Mesokarp adalah lapisan tebal berwarna oranye kekuningan yang menyimpan minyak sawit mentah (CPO) dalam jumlah tinggi, yang dapat mencapai 45–55% berat kering buah (Hartley, 1988). Endokarp merupakan lapisan keras yang melindungi biji (kernel), di mana kernel menghasilkan minyak inti sawit (PKO) yang berbeda komposisi kimianya dari CPO (Kushairi *et al.* 2001).

Brondolan juga berfungsi sebagai indikator panen. Panen umumnya dilakukan saat minimal 5–10 brondolan jatuh alami di piringan pohon, menandakan tandan telah masak fisiologis (Sobari *et al.* 2019). Penelitian terbaru bahkan menekankan bahwa perubahan warna dan tekstur brondolan dapat dipetakan dengan skala fenologis BBCH untuk menentukan titik panen optimal pada hibrida sawit interspesifik (Romero *et al.* 2025). Dengan demikian, morfologi brondolan tidak hanya memiliki makna botani, tetapi juga sangat penting dalam manajemen panen dan kualitas minyak sawit yang dihasilkan.

2.3.1 Pengertian *Fruitset*

Fruitset merupakan parameter reproduktif yang menunjukkan persentase keberhasilan bunga betina berkembang menjadi buah setelah proses penyerbukan dan fertilisasi berlangsung secara efektif. Secara kuantitatif, *fruitset* dihitung sebagai rasio jumlah buah normal yang terbentuk terhadap jumlah total bunga betina yang reseptif atau terserbuki, kemudian dikalikan 100% untuk memperoleh nilai persentase. Konsep ini digunakan secara luas dalam fisiologi tanaman dan agronomi sebagai indikator keberhasilan proses polinasi, viabilitas polen, serta sinkronisasi fenologi bunga. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa tingkat *fruitset* dipengaruhi oleh kualitas dan viabilitas polen, efektivitas polinator, serta faktor lingkungan seperti suhu dan kelembapan selama fase anthesis.

Riley *et al.* (2022) menegaskan bahwa pada kelapa sawit, keberadaan dan aktivitas serangga penyerbuk berhubungan langsung dengan peningkatan *fruitset* dan produktivitas tandan. Sementara itu, Tran *et al*. (2023) menjelaskan bahwa proses penyerbukan, pertumbuhan tabung polen, dan keberhasilan fertilisasi merupakan tahapan yang secara independen menentukan keberhasilan pembentukan buah. Selain faktor biologis, kondisi suhu *infloresens* juga dilaporkan berpengaruh signifikan terhadap keberhasilan *fruitset* sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian Keller. (2022). Dalam konteks kelapa sawit (*Elaeis guineensis*), *fruitset* menjadi indikator agronomis strategis karena berkorelasi langsung dengan produktivitas tandan buah segar (TBS) serta potensi rendemen minyak. Nilai *fruitset* yang rendah umumnya mencerminkan adanya gangguan

dalam proses penyerbukan, baik akibat keterbatasan polinator, rendahnya viabilitas polen, maupun ketidaksesuaian kondisi mikroklimat kebun.

2.3.2 Faktor-Faktor yang Memengaruhi *Fruitset*

Keberhasilan *fruitset* dipengaruhi oleh interaksi faktor biologis dan lingkungan yang menentukan efektivitas penyerbukan dan fertilisasi.

1. Viabilitas dan kualitas polen

Viabilitas polen menjadi determinan utama karena memengaruhi kemampuan polen berkecambah dan membentuk tabung polen hingga mencapai bakal biji. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penyimpanan pada suhu tinggi dan kelembapan tidak terkontrol mempercepat penurunan vigor polen sehingga menurunkan peluang *fruitset*. Studi oleh Tran *et al*. (2023) menegaskan bahwa keberhasilan pertumbuhan tabung polen secara langsung menentukan pembentukan buah normal. Selain itu, Riley *et al*. (2022) melaporkan bahwa efektivitas transfer polen oleh serangga penyerbuk pada kelapa sawit berkontribusi signifikan terhadap peningkatan *fruitset* dan hasil panen.

2. Reseptivitas stigma dan sinkronisasi anthesis.

Stigma memiliki periode reseptif yang relatif singkat, sehingga ketidaksinkronan antara ketersediaan polen dan fase reseptif bunga betina akan menurunkan tingkat keberhasilan pembuahan. Keller. (2022) menunjukkan bahwa suhu infloresens selama fase pembungaan berpengaruh terhadap keberhasilan *fruitset*, karena memengaruhi fisiologi bunga dan viabilitas polen secara simultan. Dengan demikian, faktor mikroklimat berperan dalam menjaga kesesuaian fenologi antara bunga jantan dan betina.

3. Peran polinator dan intensitas kunjungan.

Dalam sistem penyerbukan alami, keberadaan dan aktivitas serangga penyerbuk menjadi faktor penentu transfer polen yang efektif. Pada kelapa sawit, populasi dan frekuensi kunjungan serangga penyerbuk berhubungan positif dengan persentase *fruitset*. Penelitian Riley *et al*. (2022) membuktikan bahwa peningkatan aktivitas polinator secara nyata meningkatkan pembentukan buah dan produktivitas tandan.

4. Teknik aplikasi pada polinasi buatan.

Dalam praktik polinasi buatan, distribusi polen yang merata, dosis yang tepat, serta waktu aplikasi yang sesuai dengan fase reseptif stigma menjadi faktor teknis utama. Kajian agronomi mutakhir menunjukkan bahwa teknik aplikasi memiliki pengaruh lebih besar terhadap *fruitset* dibandingkan faktor edafik tertentu, selama kondisi tanaman berada dalam status hara optimal. Secara keseluruhan, keberhasilan *fruitset* tidak hanya ditentukan oleh satu variabel tunggal, melainkan oleh integrasi kualitas polen, sinkronisasi fenologi, efektivitas polinator, serta manajemen teknis penyerbukan. Pendekatan manajemen berbasis fisiologi reproduksi tanaman menjadi kunci dalam meningkatkan produktivitas perkebunan modern.

2.3.3 Hubungan antara Polinasi Buatan dan *Fruitset*

Polinasi buatan *(assisted pollination*) merupakan intervensi agronomis yang dilakukan ketika efektivitas polinasi alami tidak mencukupi untuk menjamin pembentukan buah optimal. Secara fisiologis, keberhasilan *fruitset* bergantung pada transfer polen viabel dalam jumlah memadai ke stigma yang berada pada

fase reseptif. Dalam sistem alami, proses ini sangat dipengaruhi oleh kepadatan dan aktivitas polinator, kondisi mikroklimat, serta sinkronisasi pembungaan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa ketika aktivitas polinator alami menurun, *fruitset* cenderung mengalami penurunan signifikan. Riley *et al*. (2022) membuktikan bahwa intensitas kunjungan serangga penyerbuk pada kelapa sawit berkorelasi positif dengan persentase *fruitset* dan produktivitas tandan. Dengan demikian, apabila populasi polinator terganggu misalnya akibat perubahan lingkungan atau praktik budidaya tertentu intervensi melalui polinasi buatan menjadi strategi kompensatif untuk menjaga stabilitas hasil.

Secara mekanistik, polinasi buatan memberikan kepastian distribusi polen yang lebih merata dan terkontrol dibandingkan sistem alami. Tran *et al*. (2023) menjelaskan bahwa keberhasilan pembentukan buah ditentukan oleh tiga tahapan utama: penempelan polen pada stigma, pertumbuhan tabung polen, dan fertilisasi. Polinasi buatan memungkinkan pengaturan dosis polen serta waktu aplikasi yang tepat pada fase reseptif, sehingga meningkatkan peluang keberhasilan ketiga tahapan tersebut secara simultan. Selain itu, faktor lingkungan seperti suhu selama fase pembungaan juga memengaruhi keberhasilan pembuahan. Keller. (2022) menunjukkan bahwa variasi suhu infloresens berpengaruh terhadap keberhasilan *fruitset*, sehingga dalam kondisi lingkungan kurang optimal, intervensi teknis seperti polinasi buatan menjadi semakin relevan. Dengan pengendalian dosis dan waktu aplikasi, praktik ini mampu meminimalkan risiko kegagalan fertilisasi dan menjaga konsistensi pembentukan buah.

Secara konseptual, hubungan antara polinasi buatan dan *fruitset* bersifat langsung dan kausal. Polinasi buatan meningkatkan probabilitas transfer polen viabel pada periode reseptif stigma, yang pada akhirnya meningkatkan persentase *fruitset*. Oleh karena itu, variabel dosis polen dan waktu aplikasi menjadi faktor kritis dalam penelitian ini, karena keduanya secara fisiologis menentukan efektivitas proses fertilisasi dan stabilitas produksi tanaman.

2.4 Kualitas Minyak

Kualitas minyak kelapa sawit dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk tingkat keberhasilan polinasi. Polinasi buatan yang efektif dapat meningkatkan rasio mesokarp, yang merupakan bagian utama penghasil minyak. Menurut studi oleh Putri *et al*. (2021), buah yang dihasilkan melalui polinasi buatan memiliki kadar minyak kasar (CPO) yang lebih tinggi dibandingkan dengan buah yang dihasilkan melalui polinasi alami. Hal ini disebabkan oleh pembentukan buah bernas yang lebih banyak, yang memiliki kandungan minyak lebih tinggi dibandingkan dengan buah kempes. Dengan demikian, penerapan polinasi buatan tidak hanya meningkatkan hasil buah, tetapi juga kualitas minyak yang dihasilkan.

Bunga kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) termasuk bunga tidak sempurna karena bunga jantan dan bunga betina terpisah, tetapi terdapat dalam satu individu (*monoecious*). Bunga jantan tersusun dalam tandan dengan jumlah yang sangat banyak, mengandung ribuan bunga kecil yang menghasilkan serbuk sari dalam jumlah besar. Serbuk sari ini berbentuk halus dan berwarna kekuningan hingga kecoklatan, dengan daya viabilitas yang terbatas tergantung kondisi lingkungan. Struktur bunga jantan juga memiliki benang sari (*stamen*) yang merupakan organ reproduksi utama untuk menghasilkan polen Sementara itu, bunga betina biasanya berukuran lebih besar dan tersusun rapat dalam tandan.

Bunga ini memiliki organ reproduksi utama berupa putik (carpel) yang terdiri dari stigma, style, dan ovarium. Stigma pada bunga betina bersifat lengket sehingga memudahkan penempelan serbuk sari selama proses penyerbukan.

Bunga betina akan mengalami proses perkembangan menuju pembentukan buah apabila terjadi polinasi dan pembuahan yang berhasil. Pada fase reseptif, bunga betina mengeluarkan aroma khas yang menarik serangga penyerbuk, seperti *Elaeidobius kamerunicus*. Fenologi pembungaan kelapa sawit sangat penting diperhatikan karena menentukan sinkronisasi antara bunga jantan yang melepaskan polen dan bunga betina yang berada dalam masa reseptif. Jika sinkronisasi tidak terjadi, maka tingkat keberhasilan pembuahan akan rendah sehingga *fruitset* menurun. Kondisi ini sering menjadi dasar dilakukan assisted pollination untuk meningkatkan efektivitas pembuahan. Oleh karena itu, pemahaman morfologi dan dinamika pembungaan sangat diperlukan dalam upaya optimasi produksi kelapa sawit.

2.4.1 Komponen Kualitas Minyak

Komponen utama yang menunjukkan kualitas minyak sawit mencakup rasio *oil to dry mesocarp* (O/DM), kandungan minyak kasar (CPO), dan rendemen minyak. Shaha *et al.* (2024) mencatat bahwa rasio O/DM adalah sekitar 2.89, sedangkan *Oil toWet Mesocarp* (O/WM) ratio sekitar 1.87, menunjukkan proporsi minyak yang tinggi dalam daging buah (Shaha *et al.*, 2024). Selain itu, Fitrah Murgianto *et al*. (2021) menemukan bahwa buah dengan jumlah brondolan bebas (*loose fruits*) lebih banyak - sekitar 5 buah per tandan menunjukkan *oil*-WM ratio sebesar 53,2%, lebih tinggi dibanding dengan tandan dengan hanya satu brondolan lepas (Murgianto *et al.*, 2021). Hal ini menggarisbawahi pentingnya penilaian visual kondisi buah sebagai indikator kualitas minyak.

Kualitas minyak kelapa sawit dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk tingkat keberhasilan polinasi. Polinasi buatan yang efektif dapat meningkatkan rasio mesokarp, yang merupakan bagian utama penghasil minyak. Menurut Putri *et al.* (2021), buah yang dihasilkan melalui polinasi buatan memiliki kadar minyak kasar (CPO) yang lebih tinggi dibandingkan dengan buah yang dihasilkan melalui polinasi alami. Hal ini disebabkan oleh pembentukan buah bernas yang lebih banyak, yang memiliki kandungan minyak lebih tinggi dibandingkan dengan buah kempes. Dengan demikian, penerapan polinasi buatan tidak hanya meningkatkan hasil buah, tetapi juga kualitas minyak yang dihasilkan.

2.4.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kualitas Minyak

Kualitas *crude palm oil* (CPO) dipengaruhi oleh kadar asam lemak bebas *(free fatty acids*/FFA), yang merupakan indikator utama mutu minyak sawit karena menggambarkan tingkat degradasi trigliserida akibat hidrolisis enzimatik. Kadar FFA yang tinggi menunjukkan penurunan kualitas minyak, memperburuk rasa, stabilitas oksidatif, dan nilai jual produk, sehingga kondisi panen, penanganan pascapanen, dan proses pengolahan berperan penting dalam menentukan mutu akhir minyak. Penelitian oleh Tan *et al.* (2023) menegaskan bahwa FFA dapat terbentuk sepanjang rantai produksi dari panen buah hingga proses di pabrik. FFA meningkat terutama ketika buah sawit mengalami kerusakan fisik atau bruising selama penanganan Tandan Buah Segar (TBS) sebelum sterilisasi di pabrik. Studi ini menunjukkan bahwa akumulasi FFA paling

cepat terjadi dalam 15 menit pertama setelah buah mengalami kerusakan, dan bahwa sistem konveyor di pabrik sebelum penyederhanaan menjadi titik kritis pembentukan FFA. Dengan demikian, mekanisme penghantaran dan penanganan TBS ke steriliser harus diminimalkan untuk menekan pembentukan FFA. Selain itu, Edyson *et al*. (2022) melaporkan bahwa beberapa faktor prapengolahan seperti keterlambatan pengiriman buah ke pabrik, penanganan buah yang tidak optimal, serta variasi tingkat kematangan buah secara signifikan memengaruhi kadar FFA dalam CPO.

Penelitian ini menganalisis sampel buah yang ditangani secara berbeda, lalu mengukur kadar FFA melalui metode titrasi berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI), dan menemukan bahwa masalah prapengolahan dapat menyebabkan peningkatan nilai FFA hingga lebih dari dua kali lipat dibanding buah normal. Oleh karena itu, pengurangan jeda waktu antara panen dan pengolahan serta peningkatan penanganan buah merupakan strategi penting untuk menekan kadar FFA. Faktor lain yang turut memengaruhi mutu minyak adalah tingkat kematangan buah. Buah yang dipanen pada fase matang optimal umumnya memiliki rasio mesokarp terhadap buah lebih tinggi, sehingga potensi minyak lebih banyak tetapi juga lebih rentan terhadap aktivitas lipase jika tidak segera diolah. Penelitian empiris menunjukkan bahwa limbah buah atau loose fruit yang dihasilkan akibat panen yang kurang presisi cenderung memiliki kadar FFA lebih tinggi dibanding buah yang dipanen pada fase optimal. Hal ini menunjukkan bahwa praktik panen yang tepat langsung berhubungan dengan rendahnya pembentukan FFA dan mempertahankan mutu CPO.

Lebih jauh lagi, penelitian lain yang tersedia mendukung bahwa penanganan FFB setelah panen, seperti waktu penyimpanan sebelum sterilisasi, pengaruh kerusakan mekanik selama transportasi, serta kondisi buah (misalnya tingkat kesehatan atau serangan hama) secara kolektif menghasilkan variasi kadar FFA yang nyata dalam CPO. FFA yang tinggi juga berkolerasi dengan kualitas pengolahan dan parameter lain seperti nilai peroksida dan indeks kelaikan pemutihan (*bleachability index*) yang turut menurun ketika FFA meningkat. Dengan demikian, secara umum faktor-faktor utama yang memengaruhi kualitas minyak kelapa sawit meliputi pengendalian waktu antara panen dan pengolahan, pengurangan kerusakan mekanis pada buah selama penanganan, serta praktik panen yang menghasilkan buah dengan kematangan optimal. Penerapan strategi manajemen pascapanen yang baik serta optimasi proses pabrik merupakan kunci dalam mempertahankan kadar FFA rendah sehingga CPO yang dihasilkan memenuhi standar mutu komoditas dan persyaratan perdagangan internasional.

2.4.3 Pengaruh Polinasi terhadap Kualitas Minyak

Proses polinasi memegang erat peranan krusial dalam menentukan mutu minyak kelapa sawit, sebab tahap ini secara langsung memengaruhitingkat kematangan buah serta pembentukan bagian-bagian penting buah, khususnya mesocarp yang menjadi sumber utama penghasil minyak. Polinasi yang berhasil dapat dipastikan dengan terbentuknya buah bernas (*normal fruit*), bukan buah kempes (*parthenocarpic fruit*). Buah bernas memiliki mesocarp tebal yang kaya minyak, sedangkan buah kempes umumnya tipis dan kandungan minyaknya rendah. Putri *et al*. (2021) menunjukkan bahwa buah hasil polinasi buatan mengandung crude palm oil (CPO) lebih tinggi dibanding buah dari polinasi

alami, karena jumlah buah kempes menurun drastis. Hal ini memperkuat peran polinasi dalam menentukan kualitas minyak sejak fase awal perkembangan buah.

Semakin tinggi *fruitset*, semakin tinggi pula proporsi mesocarp yang berkembang sempurna. Socha. (2022) melaporkan bahwa pemberian dosis polen optimal 0,1 g per malai betina, tidak hanya meningkatkan *fruitset* tetapi juga menaikkan rasio minyak terhadap tandan (*oil to bunch ratio*). Dengan demikian, kualitas minyak sangat dipengaruhi oleh tingkat keberhasilan polinasi, karena *fruitset* tinggi berbanding lurus dengan kadar minyak per tandan. Hartley. (1988) dalam teori klasiknya menambahkan bahwa tandan dengan *fruitset* rendah umumnya memiliki rendemen minyak lebih kecil akibat dominasi buah kempes. Polinasi buatan (*assisted pollination*) memberikan pengaruh signifikan terhadap oil extraction rate (OER). Mosquera-Montoya *et al.* (2023) melaporkan bahwa pada hibrida O×G, penerapan aspol mampu meningkatkan OER sebesar 6-27%, terutama jika dikombinasikan dengan panen pada optimum harvest point. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas minyak tidak hanya bergantung pada genetik tanaman, tetapi juga pada efektivitas polinasi buatan dan manajemen panen. Romero *et al.* (2025) menegaskan bahwa sinergi polinasi dengan waktu panen tepat berkontribusi besar dalam memaksimalkan kualitas minyak sawit. Kualitas minyak sawit juga dinilai dari aspek kimiawi, terutama kadar asam lemak bebas (FFA). Polinasi yang efektif menghasilkan buah sehat dengan tingkat FFA lebih rendah.

2.4.4 Inovasi Peningkatan Kualitas Minyak: Integrasi Polinasi, Panen Tepat Waktu, dan Pengolahan Pascapanen

Menjamin mutu kimia minyak tidak cukup melalui panen dan polinasi saja, diperlukan teknologi dan manajemen inovatif dalam seluruh rantai produksi. Integrasi polinasi buatan (aspol) dengan panen pada *optimum harvest point* (OHP) telah terbukti meningkatkan kualitas CPO. Mosquera-Montoya *et al.* (2023) melaporkan bahwa intervensi ini meningkatkan *oil extraction rate* (OER) hingga 27% indikasi kualitas minyak lebih tinggi dari segi rendemen dan kandungan minyak. Kombinasi polinasi dan uwaktu panen juga meningkatkan kandungan karoten, menurunkan FFA, dan menjaga DOBI stabil. Penanganan pascapanen yang cepat dan higienis merupakan langkah penting untuk meminimalkan aktivitas lipase dan pembentukan FFA.

Laporan dari Grant Riset Sawit 2024 menyoroti pentingnya pengelolaan pasca panen dengan teknologi terintegrasi untuk menjaga kualitas TBS dan CPO dalam konteks traceability dan keberlanjutan produk (BRIN, 2024). Sistem modern termasuk penyortiran buah, sterilisasi cepat, dan isolasi loose fruit untuk mengurangi kontaminasi dan oksidasi.

2.5 Penelitian Terdahulu

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi pengaruh polinasi buatan dan aplikasi hormon tanaman terhadap pembentukan buah dan produksi minyak pada kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) maupun hibridanya (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*). Studi-studi tersebut menunjukkan bahwa perbedaan ukuran dan dosis polen, sumber tanaman (konvensional atau kultur jaringan), serta pemberian hormon seperti IAA, NAA, 2,4-D, GA_3, dan ethephon berperan penting dalam meningkatkan keberhasilan pembentukan buah, *fruitset*, dan kandungan minyak tandan. Tabel penelitian terdahulu berikut disusun untuk merangkum temuan utama dari berbagai studi tersebut sebagai dasar teoritis dan pembanding bagi penelitian ini.

Tabel 2. Penelitian Terdahulu

Peneliti dan Tahun	Judul	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
Denael Jordan Banfun, Neny Andayani, & Wiwin Dyah Ully Parwati (2024)	Pengaruh Box Polinasi dan *Assisted Polinasi* terhadap *Fruitset* Kelapa Sawit Varietas Socfindo	Eksperimen lapangan dengan rancangan acak lengkap. Perlakuan: *Assisted Polinasi* dan Box Polinasi (masing-masing 2 blok) serta 1 blok kontrol. Lokasi di PT. Sumber Indah Perkasa (Sinarmas), Sungai Buaya Estate, Lampung (Nov 2023–Apr 2024).	Perlakuan berpengaruh nyata terhadap *fruitset*, berat janjang, jumlah buah jadi, buah tidak jadi, dan *parthenocarpy*. Assisted polinasi memberikan nilai *fruitset hingga* 51.30%, berat janjang sebesar 5.90 kg, dan jumlah buah jadi lebih tinggi hingga 2.76 kg, sedangkan box polinasi lebih tinggi pada buah tidak jadi dan *parthenocarpy*. Tidak ada pengaruh nyata terhadap jumlah spiklet.
Edyson, F. M., Murgianto, A. A., Ardiyanto, E. J., Astuti, E. J., & Ahmad, M. P.	*Preprocessing Factors Affected Free Fatty Acid Content in Crude Palm Oil Quality*	Analisis kuantitatif faktor prapengolahan terhadap kadar FFA menggunakan metode titrasi.	Keterlambatan panen dan penanganan yang tidak tepat meningkatkan kadar FFA secara signifikan. Pengolahan cepat menjaga mutu minyak.

(2022)			
Susanto, A., Prasetyo, A. E., & Priwiratama, H. (2020)	Hubungan kesehatan tanaman terhadap penyerbukan kelapa sawit	Observasional-komparatif pada kebun rakyat (Gunung Tua, Padang Lawas Utara). Periode Maret 2016 – Feb 2017. Membandingkan tanaman vigor "jagur" vs "kurus" pada Tahun Tanam 2000, 2006, 2010. Ukur: *fruitset*, fruit to bunch, produksi & viabilitas polen, populasi *Elaeidobius kamerunicus*, hara tanah & daun.	Tanaman kurus memiliki *fruitset* (±59 – 61%) dan *fruit to bunch* (±53 – 56%) lebih rendah daripada tanaman jagur (*fruitset* ±67 – 81%; *fruit to bunch* ±60 – 72%). *Fruitset* meningkat seiring umur tanaman. *Fruitset* dipengaruhi produksi & viabilitas polen serta populasi E. kamerunicus ≥ 20.000/ha, *fruit to bunch* dipengaruhi status hara tanah & daun.
Muhammad Aji Wiranda & Galuh Banowati (2022)	Kajian Pembentukan *Fruitset* Kelapa Sawit Pada Lahan Gambut dan Pasiran	Observasi lapangan di Januari – April 2021. Dua blok: lahan gambut (19,66 ha) & lahan pasiran (18,5 ha). Sampel 10 tandan/blok, dihitung jumlah buah jadi dan partenokarpi per 30 spikelet/tandan, dianalisis dengan uji t.	Rerata *fruitset* lahan gambut 58,21% dan pasiran 54,08% (kelas 3: 50 – 74%), tidak berbeda nyata secara statistik ($t(0,05) = 1,83 \geq t_hitung = 1,46$). Rendahnya nilai *fruitset* diduga akibat rendahnya kesuburan tanah, curah hujan tinggi, rendahnya agresivitas dan populasi serta penggumpalan polen.
Tan, B. A., *et al*. (2023)	*Free Fatty Acid Formation Points in Palm Oil Processing and the Impact on Oil Quality*	Analisis eksperimental pada rantai produksi CPO untuk mengidentifikasi titik pembentukan FFA.	Kualitas minyak sangat dipengaruhi oleh penanganan buah sebelum sterilisasi. Kerusakan buah mempercepat pembentukan FFA. Relevan terhadap hubungan *fruitset* optimal dan kualitas minyak.
Rendón *et al* (2022)	*Assessing the labor productivity of two methods of artificial pollination in oil palms*	Studi komparatif metode assisted pollination terhadap produktivitas dan keberhasilan pembentukan buah.	Assisted pollination meningkatkan efisiensi pembentukan buah dan hasil tandan dibanding metode konvensional. Memberikan dampak positif terhadap komponen hasil.

Christharina S. Gintoron, Muhamad Azmi Mohammed, Siti Nurlydia Sazali, Elvy Quatrin Deka, Kian Huat Ong, Imran Haider Shamsi, & Patricia Jie Hung King (2023)	*Factors Affecting Pollination and Pollinators in Oil Palm Plantations: A Review with an Emphasis on the Weevil (Jacq.)*	Studi review literatur sistematis berbasis artikel-artikel terkini terkait faktor abiotik–biotik yang memengaruhi efisiensi polinasi pada perkebunan kelapa sawit, terutama oleh kumbang penyerbuk *E. kamerunicus*.	Populasi *Elaeidobius kamerunicus* sangat menentukan keberhasilan polinasi dan *fruitset* kelapa sawit. Efisiensinya dipengaruhi faktor abiotik (curah hujan, suhu, angin, kelembaban, jenis tanah, jarak ke hutan alam) dan biotik (kualitas & kuantitas polen, sex ratio bunga, predator, nematoda parasit, pestisida, inbreeding/genetik). Kombinasi weevil + assisted pollination memberi *fruitset* tertinggi, sedangkan penyerbukan angin menghasilkan banyak buah partenokarpi.
Kaiyue Zhang, Chunling He, Shuaibing Wang, & Xiaogai Hou (2022)	*Influence of pollination methods on fruit development, fruit yield and oil quality in oil tree peony (T. Hong et J.X. Zhang)*	Eksperimen lapangan tahun 2019 di , , menggunakan 4 metode polinasi: polinasi lebah, polinasi tangan, polinasi angin, dan polinasi sendiri (selfing); dianalisis pertumbuhan buah, hasil buah, hasil minyak, serta mutu minyak biji.	Polinasi lebah meningkatkan laju pertumbuhan dan ukuran buah secara signifikan, meningkatkan jumlah biji per buah, meningkatkan hasil per buah 56,28% dibanding polinasi tangan, 59,42% dibanding angin, dan 126,27% dibanding selfing; hasil minyak naik 12,24% dibanding polinasi tangan; tidak ada perubahan signifikan kadar asam lemak tak jenuh.
Hassan Ali-Dinar, Maged	*Effects of Pollination Interventions, Plant Age and*	Percobaan lapangan (2018 –2019) pada 48 pohon kurma kultivar *Barhee*	Pohon muda hasil kultur jaringan (TC, 6 tahun) menunjukkan tingkat buah abnormal

Mohammed, & Muhammad Munir (2021)	*Source on Hormonal Patterns and Fruitset of Date Palm (L.)*	memakai rancangan acak kelompok lengkap 3 faktor: (1) umur pohon (6 vs 13 tahun), (2) sumber tanaman (anakan konvensional/CO vs kultur jaringan/TC), (3) dua teknik polinasi (naturally opened pollination/NOP vs forced opened pollination/FOP). Diuji kadar hormon IAA, GA_3, ABA hingga 84 hari setelah polinasi, dan dihitung rasio buah abnormal.	tinggi disertai IAA dan GA_3 rendah, ABA tinggi, sedangkan pohon anakan (CO) seumur menunjukkan IAA dan GA_3 tinggi, ABA rendah. Pada umur 13 tahun, pola hormon TC menyerupai CO, dan tingkat buah abnormal menurun drastis. Polinasi paksa (FOP) sedikit menurunkan IAA & GA_3 dibanding NOP.
Edison Daza, Iván Ayala-Díaz, Rodrigo Ruiz-Romero, & Hernán Mauricio Romero (2021)	*Effect of the application of plant hormones on the formation of parthenocarpic fruits and oil production in oil palm interspecific hybrids (×)*	Eksperimen lapangan pada kelapa sawit hibrida interspesifik OxG 'Coarí × La Mé' berumur 6 tahun di Barrancabermeja, . Rancangan acak lengkap blok, 20 ulangan/treatment, unit percobaan: 1 malai betina. Perlakuan: aplikasi hormon IAA (50–150 ppm), 2,4-D (10–50 ppm), NAA (100–300 ppm), ethephon (50–150 ppm), kontrol air, dan kontrol polinasi buatan (AP). Parameter: pembentukan tandan, berat tandan (BW), oil-to-bunch (O/B), *oil content* (OC), *fruitset*, dan profil asam lemak.	IAA dan ethephon gagal membentuk tandan secara konsisten (tingkat pembentukan <50%), menghasilkan buah abnormal kecil, banyak gugur. Sebaliknya, 2,4-D dan NAA berhasil menginduksi buah partenokarpik normal dengan tingkat pembentukan tandan tinggi (≥95% untuk NAA 300 ppm) dan O/B setara atau lebih tinggi dari polinasi buatan. NAA 200–300 ppm menghasilkan bobot dan kandungan minyak mendekati polinasi buatan, tanpa menurunkan kualitas profil asam lemak.