II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembibitan Kelapa Sawit

Tanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan salah satu komoditas perkebunan strategis yang memberikan kontribusi besar terhadap perekonomian Indonesia melalui produksi minyak sawit mentah (*crude palm oil*/CPO) dan berbagai produk turunannya (Simanihuruk, 2021). Indonesia juga dikenal sebagai produsen sekaligus eksportir minyak sawit terbesar di dunia sehingga keberhasilan budidaya kelapa sawit menjadi faktor penting dalam mendukung produktivitas sektor perkebunan nasional (PPKS, 2020). Salah satu tahapan yang menentukan keberhasilan budidaya tersebut adalah pembibitan, karena kualitas bibit akan memengaruhi pertumbuhan tanaman setelah dipindahkan ke lapangan (Amri *et al.,* 2018). Pembibitan yang dilakukan sesuai standar teknis mampu menghasilkan bibit yang sehat, seragam, dan memiliki daya adaptasi tinggi terhadap lingkungan tumbuh (Sinuraya, 2019).

Pembibitan kelapa sawit merupakan tahap awal dalam siklus budidaya yang bertujuan menghasilkan bibit berkualitas sebelum ditanam di lapangan (Nasution *et al.,* 2020). Tahap ini berlangsung sejak kecambah mulai ditanam hingga bibit siap dipindahkan ke areal tanam permanen dengan umur sekitar 10–12 bulan (Nugroho dan Suhartanto, 2017). Selama masa pembibitan, bibit mengalami pertumbuhan akar, batang, dan daun secara intensif sehingga membutuhkan kondisi media tanam, air, dan unsur hara yang optimal (Hapsoh *et al.,* 2020). Bibit yang tumbuh normal pada fase pembibitan akan memiliki kemampuan adaptasi yang lebih baik ketika menghadapi kondisi lingkungan di lapangan (Sari *et al.,* 2022). Oleh karena itu, kualitas pembibitan menjadi dasar dalam menentukan produktivitas tanaman kelapa sawit selama masa produksi yang dapat mencapai lebih dari 25 tahun (PPKS, 2020). Penggunaan bibit unggul merupakan salah satu faktor utama yang menentukan keberhasilan usaha perkebunan kelapa sawit (Lubis *et al.,* 2019). Bibit unggul berasal dari kecambah bersertifikat yang memiliki potensi genetik tinggi, pertumbuhan seragam, dan produktivitas yang baik (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2022). Selain faktor genetik, keberhasilan pembibitan juga dipengaruhi oleh teknik budidaya seperti penyiraman, pemupukan, pengendalian gulma, dan pengendalian hama penyakit yang dilakukan secara tepat (*Nasution et al.,* 2020). Kesalahan dalam pengelolaan pembibitan dapat menyebabkan pertumbuhan bibit tidak seragam, sistem perakaran kurang berkembang, dan menurunkan kualitas bibit saat dipindahkan ke lapangan (Rosnina *et al.,* 2019). Dengan demikian, pembibitan harus dilaksanakan secara efektif dan sesuai dengan standar operasional pembibitan kelapa sawit (PPKS, 2020).

Sistem pembibitan kelapa sawit umumnya dilakukan melalui dua metode, yaitu sistem pembibitan satu tahap (*single stage nursery*) dan sistem pembibitan dua tahap (*double-stage nursery*) (Nugroho dan Suhartanto, 2017). Pada sistem satu tahap, kecambah langsung ditanam pada *polybag* berukuran besar hingga bibit siap dipindahkan ke lapangan (Lubis *et al.,* 2019). Sementara itu, sistem dua tahap dilakukan dengan menanam kecambah terlebih dahulu pada *polybag* kecil di pembibitan awal (*pre nursery*), kemudian dipindahkan ke *polybag* besar pada pembibitan utama (*main nursery*) setelah bibit berumur sekitar tiga bulan (Widiastuti *et al.,* 2021). Sistem dua tahap lebih banyak diterapkan di perusahaan perkebunan karena memudahkan pengawasan pertumbuhan bibit, meningkatkan

efisiensi penggunaan media tanam, dan mempermudah proses seleksi bibit sejak fase awal pertumbuhan (PPKS, 2020). Selain itu, sistem ini mampu menghasilkan bibit yang lebih seragam sebelum memasuki fase pembibitan utama (Rosnina *et al.,* 2019).

2.2 Syarat Tumbuh Kelapa Sawit

Tanaman kelapa sawit dapat tumbuh dengan baik pada tanah dengan kadar pH 4-6,5. Tingkat keasaman (pH) yang optimum untuk sawit adalah 5,0-5,5 (Hidayat, 2023). Kelapa sawit menghendaki tanah yang gembur, subur, datar, berdrainase baik dan memiliki lapisan solum cukup dalam kuramh lebih 80 cm tanpa lapisan padas. Pemenuhan syarat tumbuh ini penting sebagai acuan dalam perkembangan, pertumbuhan, dan produksi kelapa sawit (Nora dan Mual, 2018). Secara umum, kondisi iklim yang cocok bagi kelapa sawit berada pada kisaran 15° LU–15° LS. Kelapa sawit menghendaki curah hujan sebesar 2.000–2.500 mm/tahun dengan periode bulan kering (<75 mm/bulan) tidak lebih dari dua bulan, dan idealnya curah hujan tersebut terbagi merata sepanjang tahun tanpa periode kering yang tegas (Samuel, 2024). Pada tahap *pre nursery*, kebutuhan curah hujan relatif kecil sehingga pemasangan naungan menjadi prioritas untuk mengurangi terpaan air hujan yang tinggi, yang dapat mengganggu pertumbuhan kecambah (Nora dan Mual, 2018).

Suhu rata-rata tahunan yang mendukung pertumbuhan dan produksi sawit berkisar antara 24°-29° C, dengan produksi terbaik antara 25°-27° C. Kelembaban optimum 80-90% dengan kecepatan angin 5-6 km/jam (Samuel, 2024). Pada fase *pre nursery*, suhu tinggi bukan menjadi faktor pembatas utama bagi keberlangsungan hidup bibit, pada tahap ini perlakuan yang lebih relevan adalah pemasangan naungan/pelindung seperti pelepah kelapa atau paranet (dengan intensitas cahaya masuk sekitar 50%) untuk menekan suhu dan intensitas cahaya yang berlebihan. Ketinggian lokasi (*altitude*) perkebunan kelapa sawit yang ideal berkisar antara 0–500 m di atas permukaan laut (Kristalisasi, 2025). Lama penyinaran matahari yang baik bagi kelapa sawit adalah 5–7 jam/hari, dengan minimal 5 jam per hari sepanjang tahun, sedangkan pada tahap *pre nursery* intensitas cahaya yang dikehendaki hanya sekitar 50% dari pencahayaan total (Nora dan Mual, 2018).

2.3 Morfologi Tanaman Kekapa Sawit

Kelapa Sawit (*Elaeis guinensis* Jacq.) merupakan tanaman perkebunan dari famili (*Arecaceae*) yang memiliki peranan penting sebagai penghasil minyak nabati. Komoditas ini banyak dibudidayakan di Indonesia karena memiliki nilai ekonomi dan menjadi salah satu komoditas unggulan sektor perkebunan (Hazra *et al.,* 2023). Kelapa sawit juga memiliki potensi produktivitas yang tinggi sehingga berperan penting dalam memenuhi kebutuhan minyak nabati serta mendukung perkembangan industri perkebunan di Indonesia (Efendi *et al*., 2023). Klasifikasi tanaman kelapa sawit (Masdiah, 2024).

Kingdom : *Plantae*
Divisi : *Magnoliophyta*
Kelas : *Liliopsida*
Ordo : *Arecales*
Famili : *Arecaceae*
Genus : *Elaeis*
Spesies : *Elaeis guineensis* Jacq.

2.3.1 Akar Kelapa sawit

Akar tanaman kelapa sawit berfungsi sebagai penunjang struktur batang, penyerap air dan unsur hara dari dalam tanah, sekaligus sebagai alat respirasi. Sistem perakaran tanaman kelapa sawit merupakan sistem akar serabut. Perakarannya sangat kuat karena tumbuh ke bawah dan ke samping membentuk akar *primer, sekunder, tertier*, dan *kuartener* (Mongana *et al*., 2020). Akar *primer* tumbuh ke bawah hingga mendekati batas permukaan air tanah, sementara akar *sekunder*, *tersier*, dan *kuarter* tumbuh menyebar sejajar permukaan air tanah, bahkan sebagian mengarah ke lapisan atas tanah yang lebih kaya unsur hara (Nasution *et al*., 2020). Kelapa sawit juga memiliki akar nafas yang muncul di atas permukaan atau di dalam air tanah. Penyebaran akar paling banyak berada pada tanah lapisan atas. Akar primer tertier dan kuarter merupakan bagian akar yang paling dekat dengan permukaan tanah. Kedua akar ini paling banyak ditemukan pada 2-2.5 m dari pangkal batang dan sebagian besar berada di luar piringan (Dewi, 2015).

2.3.2 Batang Kelapa Sawit

Batang kelapa sawit tidak bisa bercabang karena titik tumbuhnya hanya satu. Oleh sebab itu, arah tumbuhnya hanya satu (vertikal atau ke atas). Titik tumbuh ini akan membentuk daun dan ruas-ruas batang yang menambah tinggi tanaman secara bertahap. Secara alami, tinggi tanaman kelapa sawit dapat mencapai 25 m (Marcelian, 2023). Batang kelapa sawit berdiameter 25-75 cm, namun di perkebunan umumnya 45-65 cm, pangkal batang lebih besar pada tanaman yang lebih tua. Batang kelapa sawit merupakan batang tunggal yang tidak bercabang. Laju pertumbuhan batang di pengaruhi oleh faktor genetik dan lingkungan Di Indonesia dan Malaysia pertumbuhan tinggi batang rata-rata 45 cm/tahun dan bisa mencapai 100 cm/tahun bila berada pada kondisi yang sangat cocok (Herdiana *et al*., 2020). Tinggi batang bisa mencapai 20 m lebih namun umumnya diperkebunan hanya berkisar antara 15-18 m (Yudistira *et al.,* 2021). Batang kelapa sawit biasanya terbungkus oleh pelepah daun sehingga batang tampak lebih besar, bila dipangkas maka akan terlihat berbentuk spiral yang mengarah keatas biasanya sisa pelepah ini akan lepas setelah usia 10 tahun.

2.3.3 Daun Kelapa Sawit

Daun merupakan tempat tanaman mengolah energi dan makanan (melalui fotosintesis yaitu proses tanaman mengubah sinar matahari, air, dan udara menjadi makanan), di mana bentuk, jumlah, dan susunan daun sangat memengaruhi seberapa baik tanaman menangkap sinar matahari (Idris *et al*., 2020). Seperti tanaman palma lainnya, daun kelapa sawit merupakan daun majemuk (satu tangkai daun terdiri dari banyak helai kecil, bukan satu helai tunggal) berwarna hijau tua dengan pelepah berwarna sedikit lebih muda, berbentuk menyirip dan tersusun roset (berkumpul melingkar rapat) pada ujung batang. Tanaman kelapa sawit memiliki 40 hingga 55 helai daun dan dapat mencapai 60 helai daun bila tidak dipangkas. Jumlah pelepah yang sengaja dipertahankan (tidak dipangkas) pada setiap pohon turut memengaruhi kemampuan tanaman berfotosintesis dan hasil panen tandan buah segar (Lubis dan Iskandar, 2018). Tanaman kelapa sawit yang lebih tua membentuk 2-3 daun setiap bulannya, sedangkan tanaman yang lebih muda menghasilkan 3-4 daun perbulan (Yudistira *et al*., 2021). Produksi daun ini

dipengaruhi oleh faktor umur, lingkungan, musim, iklim, dan genetik. Produksi daun meningkat hingga umur 6-7 tahun, kemudian menurun pada usia 12 tahun, selanjutnya produksi daun tetap berkisar antara 22-24 daun pertahun. Menurut Sianturi (1990) dikebun percobaan RISPA Pagar Merbaujenis Dura menghasilakan 12,5 daun dalam 6 bulan. Jadi hal ini menujukan ada pengaruh genetik terhadap produksi daun.

2.4 Media Tanam dengan Kondisi Salinitas

Tanah atau media tanam salin didefinisikan sebagai kondisi tanah yang mengandung konsentrasi garam-garam terlarut dalam jumlah tinggi sehingga memengaruhi nilai daya hantar listrik atau *electrical conductivity* (EC) dan kemampuan tanaman dalam menyerap air (Kusuma *et al.,* 2021). Pengukuran salinitas tanah secara umum dilakukan melalui EC ekstrak jenuh (ECe), di mana semakin tinggi konsentrasi ion terlarut seperti Na^+, Cl^-, Ca^{2+}, dan Mg^{2+} dalam larutan tanah maka nilai EC akan semakin meningkat (Wijaya dan Hidayat, 2019). Peningkatan EC tersebut berbanding lurus dengan peningkatan tekanan osmotik larutan tanah, sehingga air menjadi semakin sulit diserap oleh akar karena potensial air media menjadi lebih rendah dibandingkan potensial air pada jaringan akar (Kartika dan Suryanto, 2021). Kondisi ini pada akhirnya menimbulkan gejala yang secara fisiologis menyerupai kekeringan meskipun kandungan air pada media sebenarnya masih tersedia. Pada penelitian salinitas kelapa sawit, tingkat cekaman umumnya dikendalikan melalui protokol salinisasi media berbasis penambahan NaCl dengan konsentrasi tertentu, yang menghasilkan gradien EC dan potensial air yang terukur pada ekstrak jenuh substrat (Vieira *et al.,* 2020). Dengan demikian, pemahaman mengenai konsep dasar salinitas tanah menjadi penting sebagai landasan untuk menjelaskan bagaimana kondisi tersebut dapat memengaruhi pertumbuhan tanaman perkebunan, termasuk kelapa sawit.

Salinitas pada tanah atau media tanam dapat terjadi melalui faktor alami maupun faktor antropogenik yang saling berinteraksi dalam mempercepat akumulasi garam pada zona perakaran. Faktor alami meliputi intrusi air laut ke daratan, pengaruh pasang surut pada lahan pesisir, serta tingginya laju evaporasi yang menyebabkan garam terkonsentrasi di permukaan tanah akibat pergerakan kapiler air tanah ke atas (Rahman dan Putri, 2023). Sementara itu, faktor antropogenik umumnya berkaitan dengan penggunaan air irigasi berkadar garam tinggi, sistem drainase yang buruk sehingga garam tidak dapat tercuci dari profil tanah, serta praktik pengelolaan lahan yang kurang memperhatikan keseimbangan hidrologi kawasan (Saputra dan Lestari, 2024). Kondisi ini menjadi relevan bagi lahan perkebunan kelapa sawit, mengingat sebagian area budi daya kelapa sawit berada di wilayah tropis dataran rendah dan pesisir yang secara alami rentan terhadap intrusi air laut serta memiliki tingkat drainase yang tidak selalu optimal (Gunawan *et al*., 2018). Selain itu, perluasan areal kelapa sawit ke luar kawasan hutan hujan tropis dengan curah hujan tinggi turut mendorong ketergantungan pada sistem irigasi buatan, yang apabila menggunakan sumber air bersalinitas tinggi dapat mempercepat proses salinisasi media tanam. Oleh karena itu, kombinasi antara kondisi geografis pesisir dan praktik pengelolaan air yang kurang tepat menjadikan salinitas sebagai salah satu kendala abiotik potensial pada budi daya kelapa sawit di lahan marginal.

Salinitas memengaruhi pertumbuhan tanaman melalui tiga mekanisme utama yang saling berkaitan, yaitu cekaman osmotik, toksisitas ion spesifik berupa

Na^+ dan Cl^-, serta gangguan keseimbangan unsur hara (Hidayat dan Purnomo, 2020). Pada fase awal, peningkatan konsentrasi garam di sekitar zona perakaran menurunkan potensial air media sehingga tanaman mengalami kesulitan menyerap air meskipun kadar air tanah tergolong cukup, suatu kondisi yang dikenal sebagai fase osmotik dari cekaman salinitas (Nugroho dan Prasetyo, 2019). Apabila cekaman berlangsung lebih lama, ion Na^+ dan Cl^- yang terserap dalam jumlah berlebih akan terakumulasi di dalam jaringan, terutama pada daun tua, sehingga mempercepat proses senesensi dan menurunkan kapasitas fotosintesis tanaman secara keseluruhan (Wibowo *et al*., 2023). Akumulasi Na^+ dalam sitoplasma juga dapat mengganggu penyerapan dan translokasi unsur hara esensial seperti K^+, Ca^{2+}, dan Mg^{2+} akibat kompetisi pada situs transpor membran, sehingga menimbulkan ketidakseimbangan hara yang berdampak pada metabolisme sel. Interaksi ketiga mekanisme tersebut menjelaskan mengapa dampak salinitas terhadap tanaman bersifat bertahap, dimulai dari gangguan fisiologis ringan hingga kerusakan jaringan yang bersifat permanen apabila tingkat dan durasi cekaman terus meningkat.

Pada tanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.), salinitas terbukti memberikan dampak negatif terhadap berbagai parameter pertumbuhan vegetatif, baik pada fase pembibitan awal maupun pembibitan utama. Peningkatan konsentrasi garam pada media tanam dilaporkan menurunkan tinggi tanaman, jumlah daun, diameter batang, serta menghambat perkembangan sistem perakaran bibit kelapa sawit dibandingkan kondisi tanpa cekaman (Gunawan *et al*., 2018). Selain parameter pertumbuhan linear, salinitas juga berpengaruh terhadap biomassa tajuk dan akar, di mana penurunan bobot kering tajuk dan akar menjadi indikator penting dalam menilai tingkat toleransi genotipe kelapa sawit terhadap kondisi salin (Febrianto *et al.,* 2026). Respons tersebut tidak seragam antarvarietas, karena perbedaan genotipe kelapa sawit menunjukkan tingkat sensitivitas yang berbeda terhadap salinitas, sebagaimana ditunjukkan pada pengujian ketahanan beberapa varietas kelapa sawit pada tanah salin dengan penambahan bahan pembenah. Tingkat respons pertumbuhan juga dipengaruhi oleh umur tanaman serta lama paparan cekaman, sebab bibit yang lebih muda pada fase *pre nursery* cenderung lebih rentan dibandingkan tanaman yang telah melewati fase adaptasi awal (Vieira *et al.,* 2020). Dengan demikian, evaluasi terhadap parameter morfologi dan biomassa menjadi indikator praktis yang umum digunakan dalam seleksi awal genotipe kelapa sawit toleran salinitas pada tahap pembibitan.

Selain berdampak pada pertumbuhan morfologis, salinitas juga memengaruhi berbagai proses fisiologis penting pada tanaman kelapa sawit, terutama yang berkaitan dengan aktivitas fotosintesis dan pertukaran gas. Cekaman NaCl pada media tanam kelapa sawit terbukti menurunkan laju asimilasi CO_2, konduktansi stomata, dan laju transpirasi, yang berkorelasi dengan peningkatan dosis NaCl yang diberikan (Vieira *et al.,* 2020). Cekaman salinitas juga berdampak pada penurunan indeks kandungan klorofil dan variabel fluoresensi klorofil, yang mengindikasikan gangguan pada aparatus fotosintesis akibat efek osmotik dan toksisitas ion . Analisis pada tingkat molekuler turut menunjukkan bahwa salinitas memicu perubahan ekspresi gen yang berkaitan dengan faktor transkripsi dan jalur metabolisme energi pada daun kelapa sawit, yang berkontribusi terhadap penurunan kapasitas fisiologis tanaman secara keseluruhan (Firmansyah, 2018). Rangkaian perubahan fisiologis tersebut pada akhirnya bermuara pada penurunan status air

tanaman serta ketidakseimbangan ion di dalam jaringan, yang secara langsung menghambat pertumbuhan kelapa sawit pada kondisi salin.

Sistem perakaran merupakan organ yang pertama kali merespons kondisi salinitas karena berperan sebagai antarmuka utama antara tanaman dan larutan tanah bergaram. Pada kelapa sawit, peningkatan dosis NaCl pada substrat tanam dilaporkan menyebabkan ketidakseimbangan ion pada jaringan akar, terutama akumulasi Na^+ dan Cl^- yang tidak diimbangi dengan penyerapan Ca^{2+}, K^+, dan Mg^{2+} secara memadai. Kondisi ini berdampak pada terhambatnya perkembangan akar, baik akar primer, sekunder, maupun tersier, sehingga kapasitas akar dalam menyerap air dan hara menjadi berkurang secara signifikan. Parameter panjang akar, volume akar, dan bobot kering akar bahkan dinyatakan sebagai variabel yang paling informatif dalam membedakan tingkat toleransi salinitas antarvarietas kelapa sawit pada fase pembibitan awal (Febrianto *et al.,* 2026). Perbandingan pola respons molekuler antara cekaman salinitas dan cekaman kekeringan pada kelapa sawit turut menunjukkan adanya kemiripan mekanisme pada tahap awal, khususnya terkait efek osmotik yang memengaruhi perkembangan jaringan akar (Salgado *et al.,* 2022). Penambahan bahan pembenah organik seperti asam humat pada media salin terbukti mampu memperbaiki kondisi perakaran kelapa sawit dibandingkan tanpa perlakuan, yang mengindikasikan bahwa perbaikan lingkungan perakaran menjadi salah satu strategi penting dalam mengurangi dampak salinitas terhadap sistem akar (Gunawan *et al*., 2018).

Berbagai strategi pengelolaan telah dikembangkan untuk membantu tanaman kelapa sawit tumbuh lebih baik pada kondisi media atau tanah salin. Pendekatan pertama berkaitan dengan pengelolaan air dan sistem drainase, di mana perbaikan drainase dapat mempercepat pencucian garam dari zona perakaran sekaligus mencegah naiknya muka air tanah bergaram akibat kapilaritas (*Sujadi et al.*, 2020). Pendekatan kedua adalah penggunaan bahan organik atau asam humat, yang bekerja melalui mekanisme peningkatan kapasitas tukar kation, perbaikan struktur media, serta peningkatan ketersediaan hara sehingga mengurangi dominasi ion Na^+ pada kompleks jerapan tanah (Setiawati *et al*., 2022). Pada kelapa sawit, penambahan asam humat pada media salin terbukti meningkatkan ketahanan bibit dibandingkan media salin tanpa perlakuan, yang diduga berkaitan dengan perbaikan penyerapan hara esensial dan penurunan tekanan osmotik pada media (Gunawan *et al*., 2018). Strategi lain berupa pemilihan genotipe atau varietas kelapa sawit yang secara alami memiliki mekanisme toleransi lebih baik, misalnya melalui kemampuan mengatur kerapatan stomata atau efisiensi eksklusi ion Na^+ pada jaringan. Selain itu, pemanfaatan mikroorganisme yang berasosiasi dengan perakaran turut menjadi strategi yang berkembang, mengingat mikroorganisme tersebut dapat membantu tanaman memproduksi osmolit pelindung dan memperbaiki penyerapan hara pada kondisi salin (Putri *et al*., 2025).

Beberapa penelitian terdahulu secara khusus telah menguji pengelolaan kelapa sawit pada kondisi tanah atau media salin menggunakan pendekatan agronomis. Gunawan *et al*., (2018) melakukan pengujian ketahanan beberapa varietas kelapa sawit pada tanah salin dengan penambahan asam humat, dan menemukan bahwa kombinasi varietas tertentu dengan pemberian asam humat mampu memperbaiki parameter pertumbuhan bibit dibandingkan kontrol tanpa perlakuan. Pada penelitian lain, Gunawan, Purba, dan Siregar (2018) mengevaluasi respons toleransi bibit kelapa sawit terhadap kondisi tanah salin dan melaporkan

adanya variasi respons pertumbuhan yang dipengaruhi oleh tingkat salinitas media serta lama masa pembibitan. Sejalan dengan hal tersebut, Febrianto *et al.,* (2026) mengkaji respons morfologi dan biomassa beberapa varietas kelapa sawit pada kondisi salin di fase pembibitan awal, dan menyimpulkan bahwa parameter panjang tajuk, panjang akar, serta bobot kering tajuk dan akar merupakan variabel yang paling efektif digunakan untuk seleksi dini genotipe toleran salinitas. Ketiga penelitian tersebut secara konsisten menunjukkan bahwa kombinasi antara pemilihan genotipe dan perbaikan kondisi media, seperti melalui penambahan bahan organik, menjadi pendekatan yang relevan untuk diterapkan pada pembibitan kelapa sawit di lahan bersalinitas tinggi.

Penelitian mengenai respons kelapa sawit terhadap kondisi salinitas telah dilakukan dengan berbagai tingkat tekanan garam untuk mengetahui perubahan pertumbuhan dan kemampuan adaptasi tanaman pada lingkungan salin. Penelitian pada bibit kelapa sawit menunjukkan bahwa peningkatan salinitas dapat memengaruhi pertumbuhan vegetatif, termasuk tinggi tanaman, diameter batang, jumlah daun, kandungan klorofil, serta perkembangan akar dan tajuk (Himawan *et al.*, 2026). Pada bagian perakaran, salinitas tinggi terbukti menurunkan pertumbuhan akar kelapa sawit, sedangkan tanaman menunjukkan mekanisme adaptasi melalui perubahan morfologi akar dan penyesuaian terhadap kondisi lingkungan perakaran (Firmansyah, 2021). Pemberian larutan NaCl pada media tanam juga menunjukkan bahwa kondisi salin dapat menurunkan pertumbuhan kelapa sawit dan menyebabkan perubahan morfologi serta anatomi tanaman, terutama ketika salinitas berlangsung bersamaan dengan genangan (Firmansyah, 2018). Selain tingkat salinitas, perbedaan varietas juga dapat memengaruhi respons bibit kelapa sawit terhadap tanah salin karena setiap varietas menunjukkan kemampuan pertumbuhan yang berbeda pada tingkat salinitas tertentu (Gunawan *et al*., 2018). Penggunaan bahan pembenah seperti asam humat juga dilaporkan dapat memengaruhi karakteristik morfologi bibit kelapa sawit yang ditanam pada media tanah salin sehingga berpotensi digunakan sebagai salah satu pendekatan pengelolaan tanaman pada kondisi tersebut (Febrianto *et al*., 2020).

2.5 *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR)

Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR**)** merupakan kelompok bakteri menguntungkan yang hidup dan berkembangbiakdi sekitar daerah perakaran tanaman, yang dikenal sebagai rizosfer. Wilayah rizosfer ini dipengaruhi langsung oleh aktivitas akar tanaman, sehingga menjadi tempat interaksi yang intensif antara akar dan mikroorganisme tanah (Ariyani *et al*., 2021). PGPR dikelompokkan sebagai pupuk hayati atau biofertilizer karena mampu merangsang pertumbuhan tanaman tanpa menimbulkan residu kimia seperti pupuk anorganik (Hamdayanty *et al*., 2022). Aktivitas PGPR memberi keuntungan bagi pertumbuhan tanaman, baik secara langsung maupun secara tidak langsung. Pengaruh langsung terjadi ketika PGPR membantu tanaman menyerap unsur hara dari dalam tanah serta menghasilkan hormon tumbuh yang mempercepat perkembangan akar dan tunas (Wahyuni *et al*., 2020). Pengaruh tidak langsung terjadi ketika PGPR menekan pertumbuhan patogen tanah dengan menghasilkan senyawa antimikroba, sehingga tanaman menjadi lebih tahan terhadap serangan penyakit (Elfina *et al*., 2024). PGPR mampu berkoloni pada perakaran tanaman dengan baik, sehingga

akar dapat menyerap sekresi mikroba yang bermanfaat bagi pertumbuhan akar dan menghambat invasi patogen (Probowati *et al*., 2021).

PGPR berperan dalam meningkatkan produksi tanaman dengan cara,
(1) memacu atau merangsang pertumbuhan (biostimulan) dengan mensintesis dan mengatur konsentrasi berbagai zat pengatur tumbuh (fitohormon) seperti IAA, giberelin, sitokinin, dan etilen dalam lingkungan akar.
(2) sebagai penyedia hara (*biofertilize*r) dengan memfiksasi N2 dari udara secara asimbiosis dan melarutkan hara P yang terkait didalam tanah.
(3) sebagai pengendali patogen yang berasal dari tanah (bioprotektan) dengan cara menghasilkan berbagai senyawa atau metabolit anti patogen (McMillan, 2007).

Beberapa PGPR yang telah dikembangkan dan dimanfaatkan sebagai agen pengendali biologi yaitu, *Actinopales* sp., *Alcaligenes* sp., *Agrobacterium* sp., *Amorphosporangium* sp., *Arthrobacter* sp., *Bacillus* sp., *Cellulomonas* sp., *Enterobacter* sp., *Erwinia* sp., *Flavobacterium* sp., *Hafnia* sp., *Micromonospora* sp., *Pseudomonas* sp., *Rhizobium* sp., *Bradyrhizobium* sp., *Serratia* sp., *Streptomyces* sp., dan *Xanthomonas* sp. (McMillan, 2007).

PGPR memiliki peran sebagai biostimulan dan pertumbuhan dan ketahanan tanaman krisan terhadap penyakit. *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) dapat dimanfaatkan guna mencukupi kebutuhan nutrisi tanaman. Nutrisi tanaman yang terpenuhi secara optimal menjadikan tanaman dapat tumbuh baik. Perlakuan penelitian terdiri dari aplikasi mikroba tunggal, masing-masing adalah *Azotobacter* sp., *Azospirillum* sp., *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., dan perlakuan konsorsium dari keempat mikroba, perlakuan pupuk organik cair (POC) sebagai pembanding dalam pemenuhan kebutuhan nutrisi tanaman dan kontrol sesuai dengan perlakuan petani krisan. Menurut penelitian Abadi dan Sektiono, (2017) diperoleh hasil yang berbeda nyata antara perlakuan mikroba tunggal dengan konsorsium mikroba PGPR terhadap pertumbuhan dan kualitas bunga krisan.

2.5.1 *Azotobacter* sp.

Azotobacter sp. merupakan bakteri Gram negatif yang memiliki bentuk sel bervariasi, mulai dari bulat hingga batang pendek, serta bersifat aerob obligat (Sari dan Wibowo, 2021). Bakteri ini mampu bergerak menggunakan flagel dan tumbuh optimal pada kondisi lingkungan dengan suhu sedang serta pH mendekati netral. Menurut Rahman *et al*. (2022), *Azotobacter* berperan penting sebagai pupuk hayati karena kemampuannya memfiksasi nitrogen bebas dari atmosfer melalui aktivitas enzim nitrogenase. Nitrogen hasil fiksasi tersebut tersedia bagi tanaman dalam bentuk amonium yang mudah diserap oleh bibit kelapa sawit. Selain itu, *Azotobacter* termasuk kelompok *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) yang mampu menghasilkan fitohormon seperti *Indole Acetic Acid* (IAA), *sitokinin*, dan *giberelin*. Fitohormon tersebut berperan dalam merangsang pembelahan sel dan pemanjangan akar pada fase awal pertumbuhan bibit. Penelitian oleh Putri *et al*., (2020) menunjukkan bahwa aplikasi *Azotobacter* meningkatkan perkembangan sistem perakaran bibit sawit. *Azotobacter* juga memproduksi *eksopolisakarida* yang membantu melindungi enzim nitrogenase dari paparan oksigen. Senyawa ini sekaligus memperbaiki struktur fisik media tanam dalam *polybag*. Dengan berbagai mekanisme tersebut, *Azotobacter* mendukung pertumbuhan bibit secara fisiologis dan biologis (Utami *et al*., 2023).

Aplikasi *Azotobacter* pada *rhizosfer* kelapa sawit terbukti meningkatkan ketersediaan nitrogen tanah secara berkelanjutan. Menurut Kurniawan *et al*., (2021), *Azotobacter chroococcum* mampu menyumbang nitrogen tanah tanpa ketergantungan penuh pada pupuk anorganik. Selain fiksasi nitrogen, bakteri ini juga berperan dalam meningkatkan ketersediaan fosfor melalui mekanisme pelarutan fosfat tidak larut. Mekanisme tersebut membantu meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara oleh bibit kelapa sawit. Penelitian oleh Lestari dan Handayani (2022) menunjukkan bahwa inokulasi *Azotobacter* memperbaiki agregasi tanah dan aerasi media pembibitan. Kondisi fisik tanah yang lebih baik mendukung perkembangan akar dan penyerapan air. *Azotobacter* juga mampu menghasilkan senyawa *siderofor* dan antimikroba yang menekan pertumbuhan patogen tular tanah. Menurut Pranata *et al*., (2020), aktivitas tersebut efektif mengurangi serangan Fusarium sp. pada fase *pre nursery*. Selain itu, penggunaan Azotobacter memungkinkan pengurangan dosis pupuk nitrogen tanpa menurunkan vigor bibit.

2.5.2 *Azospirillum* sp.

Azospirillum sp. adalah bakteri Gram negatif berbentuk spiral atau vibrioid yang hidup bebas di zona rhizosfer bibit kelapa sawit dan bersifat mikroaerofilik, sehingga mampu beradaptasi pada kondisi oksigen rendah di sekitar akar. Menurut Sari dan Hidayat (2021), karakter mikroaerofilik ini memungkinkan *Azospirillum* sp. mempertahankan aktivitas metaboliknya di media tanam yang padat. Bakteri ini tumbuh optimal pada suhu menengah hingga tinggi dan pH netral, sesuai dengan persyaratan media pembibitan sawit tropis. Penelitian Prasetyo *et al*. (2022) menemukan bahwa *Azospirillum brasilense* mampu berfiksasi nitrogen bebas dari atmosfer secara konsisten, yang menyediakan N tambahan bagi bibit. Fiksasi nitrogen ini sangat penting untuk mendukung pertumbuhan awal bibit yang cepat dan sehat. Selain fiksasi N, *Azospirillum* sp. juga memproduksi *Indole Acetic Acid* (IAA) yang merangsang pemanjangan akar primer dan sekunder. Senyawa sitokinin dan giberelin yang dihasilkan membantu mempercepat pembelahan sel meristem pada tunas. Produksi siderofor oleh *Azospirillum* sp. dapat mengikat besi sehingga menekan pertumbuhan patogen akar seperti *Pythium* sp. Aktivitas degradasi selulosa oleh bakteri ini turut berkontribusi dalam pembentukan humus tanah yang memperbaiki struktur media tanam. Dengan berbagai mekanisme tersebut, *Azospirillum* sp. menjadi kandidat PGPR terbaik untuk pembibitan kelapa sawit.

Dalam sistem pembibitan, *Azospirillum* sp. berperan dalam peningkatan efisiensi penyerapan hara makro, terutama melalui pelarutan fosfat oleh sekresi asam organik yang menurunkan pH rhizosfer. Menurut Rahmawati *et al*. (2020), aktivitas pelarutan fosfat ini meningkatkan ketersediaan unsur hara yang dapat diserap oleh akar bibit. Azospirillum juga menghasilkan biosurfaktan yang memperbaiki sifat fisik tanah seperti hidrofobisitas, sehingga meningkatkan penetrasi air dan aerasi media tanam. Penelitian Lestari *et al*. (2021) menunjukkan bahwa aplikasi *Azospirillum* sp. pada bibit DxP meningkatkan ketahanan terhadap fase kekeringan pra-pembibitan. Hal ini berdampak positif pada vigor dan kelangsungan hidup bibit saat pemindahan ke lapangan. Konsorsium *Azospirillum* sp. dengan *Bacillus* sp. telah terbukti menghasilkan bibit dengan diameter batang yang lebih tebal, menunjukkan sinergi antar PGPR. Produksi hormon tanaman yang optimal juga mendukung proliferasi akar lateral, memperkuat sistem penyerapan

hara. Selain itu, *Azospirillum* sp. mampu menghasilkan metabolit yang memicu Induced Systemic Resistance (ISR), meningkatkan daya tahan bibit terhadap serangan hama dan patogen. Efek positif kombinasi biologis ini dapat mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia. Dengan demikian, *Azospirillum* sp. berkontribusi terhadap sistem pembibitan yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Aplikasi *Azospirillum* sp. dalam bibit kelapa sawit telah menunjukkan hasil positif pada uji lapangan, termasuk peningkatan panjang akar serta jumlah daun yang signifikan. Penelitian oleh Nugroho *et al*. (2022) melaporkan bahwa inokulasi *Azospirillum* brasilense mampu meningkatkan panjang akar bibit hingga 20% dibandingkan kontrol tanpa bakteri. Bakteri ini juga adaptif terhadap kondisi tanah marginal seperti Ultisol dan Gambut, di mana respons positif terhadap N-total tanah diamati setelah inokulasi. *Azospirillum* sp. menunjukkan kemampuan kompetitif tinggi terhadap mikroba tanah lainnya karena produksi metabolit yang kuat. Menurut Suryanti *et al*., (2021), penggunaan dosis yang tepat dapat memaksimalkan peningkatan nutrisi dan pertumbuhan vegetatif bibit sawit. Selain itu, aplikasi *Azospirillum* sp. telah terbukti mengurangi kebutuhan pupuk NPK hingga setengahnya tanpa mengurangi vigor bibit. Hal ini berdampak positif terhadap biaya operasional dan pengurangan emisi gas rumah kaca dari pupuk kimia sintetis. Produksi biosurfaktan dan metabolit lain juga membantu pembentukan struktur tanah yang lebih stabil di polibag. Efek ini menjadikan *Azospirillum* sp. pendorong utama dalam praktik pembibitan yang berwawasan lingkungan. Secara keseluruhan, integrasi *Azospirillum* sp. ke dalam program pembibitan kelapa sawit mendukung standar produksi bibit berkelanjutan.

2.5.3 *Pseudomonas* sp.

Pseudomonas sp. merupakan bakteri Gram negatif berbentuk batang yang motil dengan flagel polar sehingga memiliki kemampuan kolonisasi yang tinggi di zona rhizosfer bibit kelapa sawit. Menurut Sari *et al.,* (2020), sifat motil ini memungkinkan bakteri bergerak aktif menuju eksudat akar yang kaya nutrisi. Bakteri ini mampu beradaptasi pada beragam kondisi media tanam yang berbeda dan tetap mempertahankan populasinya. Aktivitas kolonisasi yang baik meningkatkan kompetisi terhadap mikroba tular tanah yang merugikan. *Pseudomonas* sp. juga diketahui mampu mendegradasi kompleks organik seperti selulosa yang terakumulasi di media tanam. Penelitian Rahmawati *et al*., (2021) menunjukkan bahwa degradasi selulosa oleh *Pseudomonas* sp. meningkatkan sirkulasi karbon di tanah pembibitan. Selain itu, kemampuan ini membantu bakteri bertahan dalam jangka waktu lama pada kondisi radikal bibit. Keberadaan *Pseudomonas* sp. di rhizosfer mampu memperbaiki struktur fisik media tanam sehingga aerasi meningkat. Kondisi aerasi yang lebih baik mendukung pertumbuhan akar dan aktivitas mikroba lain yang saling menguntungkan. Sehingga, *Pseudomonas* sp. perlu dipertimbangkan sebagai komponen utama mikroba pembibitan yang efektif.

Sebagai PGPR, *Pseudomonas* sp. memegang peran penting dalam meningkatkan ketersediaan unsur hara di media tanam pembibitan sawit. Melalui proses solubilisasi fosfat dengan produksi asam organik di rhizosfer, fosfat tak larut menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman; hal ini dilaporkan oleh Putri *et al*. (2020). Peningkatan ketersediaan fosfat berdampak langsung pada efisiensi penyerapan nutrisi oleh bibit kelapa sawit. Selain itu, bakteri ini juga mampu

meningkatkan ketersediaan kalium sehingga serapan unsur makro untuk pembentukan batang lebih optimal. *Pseudomonas* sp. juga mensintesis fitohormon seperti *Indole Acetic Acid* (IAA) yang berperan dalam pembelahan sel dan pemanjangan akar. Produksi IAA oleh *Pseudomonas* sp. telah dilaporkan mampu meningkatkan biomassa akar bibit secara signifikan. Penelitian oleh Lestari *et al*. (2022) menyatakan bahwa aplikasi PGPR ini dapat merangsang perkembangan akar lateral dan menambah panjang akar primer bibit. Akar yang lebih panjang dan bercabang meningkat kemampuan tumbuhan menyerap air serta hara. Efek sinergis antar mekanisme ini menghasilkan pertumbuhan vegetatif bibit yang lebih cepat. Dengan demikian, *Pseudomonas* sp. menawarkan keuntungan agronomis signifikan pada tahap awal pertumbuhan bibit sawit.

Selain meningkatkan nutrisi, *Pseudomonas* sp. juga berperan dalam pengendalian hayati patogen tanah yang sering menyerang bibit sawit. Bakteri ini menghasilkan senyawa antimikroba, termasuk antibakteri dan antifungi, yang dapat menekan pertumbuhan patogen akar seperti jamur *Fusarium* dan *Rhizoctonia* spp. Penelitian oleh Prasetyo *et al*., (2022) menunjukkan bahwa enzim hidrolitik seperti kitinase dan glukanase yang diproduksi oleh *Pseudomonas* sp. mampu mendegradasi dinding sel patogen jamur. Selain itu, aktivitas biologis ini juga meningkatkan resistensi tanaman terhadap infeksi awal yang sering menyebabkan rebah bibit. *Pseudomonas* sp. juga mampu menstimulasi sistem pertahanan tanaman melalui *Induced Systemic Resistance* (ISR). ISR merupakan respons fisiologis yang meningkatkan kemampuan tanaman melawan patogen berikutnya. Kehadiran biofilm yang dibentuk oleh *Pseudomonas* sp. di permukaan akar juga meningkatkan stabilitas populasi bakteri. Biofilm menciptakan komunitas mikroba yang lebih tangguh terhadap tekanan lingkungan. Dengan banyaknya mekanisme tersebut, aplikasi *Pseudomonas* sp. menjadi strategi berkelanjutan dalam produksi bibit kelapa sawit. Pendekatan ini dapat membantu mengurangi pemakaian pestisida kimia yang berdampak negatif terhadap lingkungan.

2.5.4 *Bacillus* sp.

Bacillus sp. merupakan bakteri rizosfer Gram positif yang banyak dimanfaatkan sebagai agen hayati pada pembibitan kelapa sawit karena kemampuannya membentuk endospora yang tahan terhadap (Widodo dan Santoso, 2019). Endospora memungkinkan bakteri tetap viabel selama penyimpanan dan setelah aplikasi di lapangan. Penelitian oleh Yuliani *et al*., (2021) melaporkan bahwa aplikasi *Bacillus* sp. mampu meningkatkan populasi mikroba menguntungkan di media tanam *pre nursery* kelapa sawit. Selain itu, *Bacillus* sp. diketahui menghasilkan berbagai enzim hidrolitik seperti *selulase* dan *protease* yang berperan dalam dekomposisi bahan organik. Aktivitas tersebut berkontribusi terhadap peningkatan ketersediaan unsur hara tanah. Menurut Lestari *et al.,* (2022), peningkatan aktivitas enzim tanah berbanding lurus dengan pertumbuhan bibit kelapa sawit. *Bacillus* sp. juga mampu beradaptasi pada kisaran pH tanah pembibitan. Adaptasi ini menjadikan bakteri tersebut stabil dalam berbagai kondisi media. Oleh karena itu, *Bacillus* sp. dinilai potensial sebagai mikroba pendukung pertumbuhan bibit. Pemanfaatannya sejalan dengan konsep pertanian berkelanjutan.

Sebagai PGPR, *Bacillus* sp. berperan dalam meningkatkan efisiensi penyerapan hara tanaman. Menurut Rahmawati *et al*., (2020), *Bacillus* sp. mampu

melarutkan fosfat tidak tersedia menjadi bentuk yang dapat diserap tanaman. Selain fosfat, bakteri ini juga meningkatkan ketersediaan kalium dan nitrogen tanah. Produksi fitohormon seperti IAA berkontribusi terhadap pemanjangan akar dan pembentukan rambut akar. Penelitian oleh Prasetyo *et al*., (2021) menunjukkan bahwa inokulasi *Bacillus* sp. meningkatkan panjang akar primer bibit kelapa sawit. Sistem perakaran yang lebih baik meningkatkan daya serap air. Selain itu, bakteri ini mampu memperbaiki struktur fisik media tanam. Media menjadi lebih porous dan memiliki aerasi yang baik. Kondisi tersebut mendukung pertumbuhan bibit yang sehat. Dengan demikian, *Bacillus* sp. berfungsi sebagai biofertilizer alami.

Bacillus sp. juga berperan sebagai agen pengendali hayati patogen tular tanah. Bakteri ini menghasilkan senyawa antimikroba yang mampu menekan pertumbuhan jamur patogen. Menurut Suwandi *et al*., (2019), *Bacillus* sp. efektif menghambat patogen penyebab penyakit rebah kecambah. Mekanisme pengendalian meliputi antibiosis dan kompetisi ruang serta nutrisi. Selain itu, *Bacillus* sp. mampu menginduksi ketahanan sistemik tanaman. Induksi ini meningkatkan respons pertahanan bibit terhadap infeksi patogen. Penelitian oleh Balai Penelitian Tanaman Palma (2022) menunjukkan bahwa agen hayati berbasis *Bacillus* dapat menekan intensitas penyakit pembibitan sawit. Penggunaan agen hayati juga mengurangi ketergantungan fungisida kimia. Hal ini berdampak positif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, *Bacillus* sp. berpotensi besar mendukung pembibitan sawit ramah lingkungan.

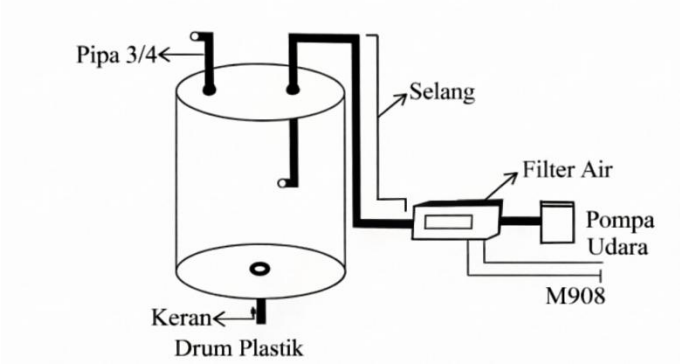
2.6 Bioreaktor LSF (*Liquid State Fermentation*)

Bioreaktor merupakan tabung atau wadah reaktor yang dirancang untuk mengolah cairan atau limbah organik melalui proses fermentasi dengan bantuan mikroorganisme, seperti bakteri, jamur, maupun patogen tertentu (Baskoro *et al*., 2017). Proses fermentasi dalam bioreaktor berlangsung secara terkendali sehingga aktivitas mikroorganisme dapat dimaksimalkan untuk menghasilkan produk yang diinginkan. Bioreaktor banyak dimanfaatkan dalam bidang pertanian, lingkungan, dan bioteknologi karena mampu meningkatkan efisiensi pengolahan bahan organik. Menurut Putra *et al.,* (2020), penggunaan bioreaktor dapat mempercepat dekomposisi bahan organik dan meningkatkan kualitas produk hasil fermentasi. Selain itu, bioreaktor memungkinkan pengendalian faktor lingkungan seperti suhu, pH, dan aerasi. Pengendalian kondisi tersebut sangat penting untuk menjaga kestabilan pertumbuhan mikroorganisme. Bioreaktor juga berperan dalam mengurangi pencemaran lingkungan akibat limbah cair organik. Hal ini sejalan dengan penelitian Wulandari *et al*., (2021) yang menyatakan bahwa bioreaktor efektif menurunkan beban pencemar limbah organik. Dengan demikian, bioreaktor tidak hanya berfungsi sebagai alat fermentasi, tetapi juga sebagai teknologi ramah lingkungan. Oleh karena itu, pemanfaatan bioreaktor terus dikembangkan dalam berbagai skala, mulai dari laboratorium hingga industri.

Bioreaktor yang digunakan dalam penelitian ini adalah bioreaktor LSF (*Liquid State Fermentation*) berbahan dasar drum plastik yang dimodifikasi. Modifikasi dilakukan dengan penambahan beberapa lubang sebagai jalur aliran masuk dan keluar air serta cairan pupuk mikroba. Sistem LSF memanfaatkan media cair sebagai tempat tumbuh mikroorganisme sehingga nutrisi lebih mudah diserap. Menurut Hasibuan (2023), bioreaktor LSF berfungsi sebagai wadah pertumbuhan dan perbanyakan mikroba yang dilakukan sesuai prosedur operasional. Komponen

utama bioreaktor LSF meliputi drum plastik, selang air, filter air, pipa, keran air, dan mesin pompa. Komponen tersebut berfungsi untuk menjaga sirkulasi cairan dan suplai oksigen selama proses fermentasi. Penelitian oleh Siregar *et al*., (2022) menunjukkan bahwa desain bioreaktor LSF sederhana tetap mampu mendukung pertumbuhan mikroba secara optimal. Penggunaan drum plastik dipilih karena mudah diperoleh dan ekonomis. Selain itu, sistem LSF relatif mudah dioperasikan oleh peneliti. Dengan demikian, bioreaktor LSF menjadi pilihan yang efisien dan aplikatif dalam penelitian berbasis mikroba.

Pada awal perkembangannya, bioreaktor digunakan terutama untuk keperluan kultivasi mikroba dalam bidang mikrobiologi. Menurut Saptari (2021), bioreaktor berfungsi sebagai media untuk memperbanyak mikroorganisme dalam kondisi terkontrol. Seiring berkembangnya teknik kultur sel tanaman, fungsi bioreaktor mengalami perluasan. Bioreaktor kemudian dimanfaatkan untuk produksi metabolit sekunder pada tanaman. Metabolit sekunder merupakan senyawa yang dihasilkan melalui jalur metabolisme tertentu. Senyawa ini tidak berperan langsung dalam pertumbuhan tanaman, namun memiliki nilai biologis dan ekonomi yang tinggi (Saptari, 2021). Penelitian oleh Nugroho *et al*., (2020) menyatakan bahwa bioreaktor mampu meningkatkan produksi metabolit sekunder secara konsisten. Selain itu, penggunaan bioreaktor memungkinkan produksi senyawa tersebut dalam jumlah besar. Hal ini memberikan peluang pengembangan bioteknologi pertanian yang berkelanjutan. Oleh karena itu, bioreaktor menjadi teknologi penting dalam penelitian mikroba dan kultur sel tanaman modern.



Gambar 1. Desain Bioreaktor
Sumber: Ramadhan 2021

1. Drum Plastik berfungsi tempat pembuatan pupuk mikroba cair yang akan difermentasikan dalam waktu tertentu dengan kapasitas 50 Liter
2. Selang sebagai aliran air dari keran ke drum plastik
3. Filter Air berfungsi penyaring air dari keran untuk menjernikan air dan menyerap kotoran dari air keran tersebut dengan dua filter yaitu filter kotoran atau kuman dari keran sedangkan filter putih untuk mengsterilkan air tersebut dan dialirkan ke drum.
4. Pipa ¾ berfungsi sebagai tempat keluarnya udara dari dalam bioreaktor.
5. Mesin pompa/blower berfungsi sebagai alat pengaduk larutan, memberi kan udara serta untuk menghomogenkan bakteri yang dihasilkan melalui sirkulasi udara.
6. Keran digunakan untuk mengeluarkan hasil perbanyakan pupuk mikroba cair

2.7 Kecambah Kelapa Sawit Damimas D x P

Keberhasilan budidaya kelapa sawit sejak fase awal pembibitan sangat ditentukan oleh kualitas bahan tanaman yang digunakan, karena bahan tanaman merupakan faktor genetik dasar yang tidak dapat diperbaiki melalui teknik budidaya pada tahap selanjutnya (Elidar dan Purwati, 2021). Bahan tanaman unggul harus memiliki identitas genetik yang jelas atau legitim, yaitu berasal dari persilangan terkontrol antara pohon induk terpilih dengan silsilah yang dapat ditelusuri, sehingga potensi produktivitasnya dapat diprediksi secara lebih akurat (Isharyadi *et al.,* 2022). Sebaliknya, penggunaan kecambah asalan atau tidak bersertifikat berisiko menghasilkan populasi tanaman yang tidak seragam akibat segregasi genetik, yang pada akhirnya berdampak pada rendahnya produktivitas tandan buah segar maupun kadar minyak (Elidar dan Purwati, 2021). Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS) menegaskan bahwa bahan tanam unggul berupa kecambah maupun bibit yang telah melalui program pemuliaan dan pengujian bertahun-tahun merupakan modal utama untuk mendapatkan produktivitas tinggi, sehingga penggunaannya menjadi prasyarat mutlak dalam usaha perkebunan kelapa sawit skala komersial maupun penelitian (Pusat Penelitian Kelapa Sawit, n.d.). Sumber benih yang digunakan pun harus berasal dari produsen resmi yang telah ditetapkan oleh Kementerian Pertanian, mengingat proses produksinya diawasi secara ketat mulai dari kebun induk hingga distribusi kecambah ke pengguna akhir (Isharyadi *et al.,* 2022). Dengan demikian, kualitas dan keseragaman bahan tanaman sejak fase pembibitan menjadi fondasi penting yang memengaruhi keseragaman pertumbuhan awal serta potensi pertumbuhan tanaman kelapa sawit secara keseluruhan.

DxP Dami Mas merupakan salah satu varietas benih kelapa sawit unggul di Indonesia yang diproduksi oleh PT Dami Mas Sejahtera, anak perusahaan dari Sinar Mas Agribusiness and Food (PT Sinar Mas Agro Resources and Technology Tbk) (PT Sinar Mas Agro Resources and Technology Tbk, 2025). Bahan tanaman ini berasal dari persilangan terkontrol antara pohon induk Dura (Deli Dura) sebagai tetua betina dengan pohon induk Pisifera terpilih sebagai tetua jantan, sehingga menghasilkan keturunan Tenera dengan identitas genetik yang dapat ditelusuri melalui program pemuliaan perusahaan (Golden Agri-Resources, 2026). Secara umum, skema persilangan Dura dengan Pisifera untuk menghasilkan Tenera merupakan metode standar dalam industri perbenihan kelapa sawit di Indonesia, karena kombinasi genetik tersebut menghasilkan tanaman dengan ketebalan cangkang lebih tipis dan kandungan minyak per tandan yang lebih tinggi dibandingkan tipe induknya (Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia, 2026). Produksi kecambah DxP Dami Mas dilakukan dengan dukungan riset yang berkesinambungan serta penerapan teknologi seleksi genetik untuk menjaga kemurnian material tanam yang dihasilkan (PT Sinar Mas Agro Resources and Technology Tbk, 2025). Perlu ditegaskan bahwa identitas dan karakteristik DxP Dami Mas yang dijelaskan di atas bersumber dari publikasi resmi produsen benih, sedangkan sifat toleransi terhadap cekaman salinitas belum dapat dinyatakan pada tahap ini karena belum tersedia publikasi ilmiah yang secara khusus mengujinya.

DxP Dami Mas dipilih sebagai salah satu bahan tanaman unggul dalam budidaya kelapa sawit karena karakter pertumbuhan dan potensi produksinya yang telah teruji melalui program pemuliaan dan pengujian lapangan oleh produsennya.

Berdasarkan informasi resmi produsen, varietas ini memiliki potensi produksi tandan buah segar yang tinggi dengan masa panen yang relatif lebih cepat dibandingkan bahan tanaman konvensional, serta tingkat ekstraksi minyak yang kompetitif (Golden Agri-Resources, 2026). Selain aspek produktivitas, produsen benih ini turut menekankan pentingnya kemurnian genetik dan rendahnya tingkat kontaminasi tipe Dura pada populasi tanaman yang dihasilkan, sebagai indikator konsistensi mutu bahan tanaman dari generasi ke generasi (PT Sinar Mas Agro Resources and Technology Tbk, 2025). Keunggulan semacam ini penting dipertimbangkan dalam pemilihan bahan tanaman penelitian, karena bahan tanaman dengan potensi genetik yang jelas dan tervalidasi cenderung menghasilkan populasi tanaman yang lebih seragam dibandingkan bahan tanaman tanpa identitas genetik yang pasti (Isharyadi *et al.,* 2022). Komitmen riset berkelanjutan yang dilakukan oleh produsen benih ini turut ditunjukkan melalui partisipasi aktif dalam forum dan pameran industri kelapa sawit nasional untuk memperkenalkan inovasi hasil pemuliaannya (Kantor Berita Sawit, 2026). Meskipun demikian, data produksi dan keunggulan agronomis tersebut merupakan hasil pengujian pada kondisi lahan normal, sehingga tidak dapat serta-merta digunakan sebagai dasar untuk menyimpulkan performa DxP Dami Mas pada kondisi cekaman abiotik seperti salinitas.

Penggunaan kecambah yang berasal dari satu varietas atau bahan tanaman yang sama merupakan syarat metodologis penting dalam penelitian eksperimental di bidang agronomi, khususnya penelitian yang melibatkan beberapa taraf perlakuan seperti tingkat salinitas dan dosis PGPR. Keseragaman identitas genetik bahan tanaman diperlukan untuk mengurangi variasi biologis yang bersumber dari perbedaan genetik antarindividu, sehingga respons pertumbuhan yang teramati dapat dikaitkan secara lebih valid dengan perlakuan yang diberikan, bukan dengan perbedaan latar belakang genetik tanaman (Faizah *et al.,* 2016). Penelusuran genetik pada progeni kelapa sawit menggunakan penanda molekuler seperti Simple Sequence Repeat (SSR) telah membuktikan bahwa variasi genetik antarprogeni dapat memengaruhi keragaan pertumbuhan tanaman, sehingga kontrol terhadap sumber bahan tanaman menjadi krusial dalam desain percobaan (Faizah *et al.,* 2016). Selain itu, jaminan mutu genetik benih kelapa sawit yang diproduksi secara terstandardisasi turut mengurangi risiko segregasi sifat yang dapat menjadi sumber bias dalam interpretasi hasil penelitian (Isharyadi *et al.,* 2022). Praktik penggunaan satu genotipe seragam pada penelitian cekaman abiotik kelapa sawit juga telah diterapkan pada penelitian internasional, misalnya penggunaan klon dari genotipe tunggal untuk mengevaluasi respons morfofisiologi terhadap salinitas agar variasi antarindividu dapat diminimalkan (Vieira *et al.,* 2020). Dengan demikian, pemilihan kecambah dari satu sumber benih yang identitas genetiknya jelas menjadi dasar metodologis yang penting agar hasil penelitian mengenai pengaruh salinitas dan PGPR dapat diinterpretasikan secara lebih akurat.

Fase kecambah dan *pre nursery* merupakan periode kritis dalam siklus pembibitan kelapa sawit karena pada fase inilah pembentukan awal sistem perakaran, daun pertama, dan struktur vegetatif dasar tanaman berlangsung. Vigor bibit yang baik menjadi prasyarat keberhasilan produksi kelapa sawit, dan selain faktor genetik bahan tanaman, kondisi media serta ketersediaan hara pada awal pertumbuhan bibit turut berperan penting dalam menentukan penampilan bibit secara keseluruhan (Rosnina, 2019). Pengamatan terhadap parameter pertumbuhan

seperti tinggi tanaman, jumlah daun, diameter batang, serta perkembangan akar pada fase *pre nursery* menjadi indikator awal yang umum digunakan untuk menilai kualitas bibit sebelum dipindahkan ke tahap pembibitan utama (Adileksana *et al.,* 2020). Kondisi media tanam yang kurang optimal pada fase *pre nursery*, termasuk gangguan berupa cekaman abiotik, dapat berdampak signifikan terhadap pertumbuhan awal tanaman dan pada akhirnya menentukan kualitas bibit yang akan digunakan pada tahap pembibitan berikutnya (Rosnina, 2019). Oleh karena sistem perakaran dan jaringan vegetatif pada fase ini masih dalam tahap pembentukan awal, tanaman pada fase kecambah dan *pre nursery* umumnya lebih sensitif terhadap perubahan kondisi lingkungan dibandingkan tanaman pada fase pembibitan utama (Adileksana *et al.,* 2020). Karakteristik inilah yang menjadikan fase *pre nursery* sebagai fase yang tepat untuk mengevaluasi respons awal tanaman kelapa sawit terhadap cekaman salinitas secara lebih sensitif dan terkontrol.

Penggunaan kecambah DxP Dami Mas dalam penelitian ini dikaitkan dengan kebutuhan untuk mengevaluasi respons morfologi dan fisiologi bahan tanaman tersebut terhadap media bersalinitas tinggi secara lebih terkontrol. Pemilihan satu sumber bahan tanaman yang seragam memungkinkan perbedaan respons pertumbuhan antar perlakuan salinitas dan dosis PGPR dapat diamati tanpa tercampur oleh variasi genetik dari sumber bahan tanaman yang berbeda-beda (Vieira *et al.,* 2020). Parameter morfologi yang relevan untuk diamati meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, diameter batang, serta perkembangan akar, sementara parameter fisiologis yang relevan mencakup biomassa tajuk dan akar, kadar air jaringan, kandungan klorofil, dan indikator fisiologis lain seperti konduktansi stomata (Song *et al.,* 2022). Penekanan penting yang perlu digarisbawahi adalah bahwa penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana DxP Dami Mas merespons kondisi salinitas tinggi, bukan untuk membuktikan atau mengklaim sejak awal bahwa varietas ini bersifat toleran terhadap salinitas. Pendekatan semacam ini penting mengingat data resmi produsen benih hanya menjelaskan performa agronomis pada kondisi lahan normal, sehingga responsnya pada kondisi cekaman abiotik seperti salinitas perlu dibuktikan melalui pengujian ilmiah tersendiri (PT Sinar Mas Agro Resources and Technology Tbk, 2025). Dengan kerangka berpikir tersebut, penggunaan kecambah DxP Dami Mas pada penelitian ini diposisikan sebagai objek uji, bukan sebagai bahan tanaman yang telah terbukti unggul dalam menghadapi kondisi salin.

Penelitian terdahulu mengenai respons kelapa sawit terhadap salinitas, terutama pada fase kecambah atau bibit muda, secara konsisten menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi NaCl pada media tanam berdampak negatif terhadap berbagai parameter morfofisiologi tanaman. Pemberian NaCl bertingkat pada substrat tanam bibit kelapa sawit terbukti menurunkan laju asimilasi CO_2, konduktansi stomata, dan transpirasi, yang berkorelasi dengan peningkatan dosis NaCl yang diberikan (Vieira *et al.,* 2020). Selain berdampak pada aktivitas fisiologis daun, cekaman salinitas juga menyebabkan ketidakseimbangan ion pada jaringan akar dan daun kelapa sawit, ditandai dengan akumulasi Na^+ dan Cl^- yang tidak diimbangi penyerapan hara esensial seperti K^+, Ca^{2+}, dan Mg^{2+} secara memadai (Vieira *et al.,* 2020). Pada tingkat molekuler, cekaman NaCl tinggi pada kelapa sawit turut memicu perubahan ekspresi gen yang berkaitan dengan faktor transkripsi dan jalur metabolisme, yang berkontribusi terhadap penurunan kapasitas fisiologis tanaman secara menyeluruh (Salgado *et al.,* 2021). Secara umum,

mekanisme yang mendasari seluruh respons tersebut dapat dijelaskan melalui cekaman osmotik yang menurunkan potensial air media serta toksisitas ion spesifik yang mengganggu keseimbangan hara di dalam jaringan tanaman (Munns dan Tester, 2008). Penelitian-penelitian tersebut secara khusus menggunakan *Elaeis guineensis* dengan bahan tanaman yang identitas genetiknya jelas, sehingga temuannya relevan sebagai dasar perbandingan bagi penelitian mengenai respons DxP Dami Mas terhadap salinitas.

Beberapa penelitian terdahulu juga telah mengevaluasi respons beberapa varietas atau genotipe kelapa sawit terhadap kondisi tanah salin, dan secara umum menunjukkan bahwa perbedaan latar belakang genetik dapat menyebabkan perbedaan respons pertumbuhan dan fisiologi terhadap cekaman tersebut. Gunawan *et al*., (2018) mengevaluasi respons toleransi bibit kelapa sawit pada kondisi tanah salin dan menemukan adanya variasi respons pertumbuhan yang dipengaruhi oleh tingkat salinitas media. Pada penelitian lain, Gunawan *et al*., (2018) menguji ketahanan beberapa varietas kelapa sawit pada tanah salin dengan penambahan asam humat, dan menemukan bahwa kombinasi varietas tertentu dengan perlakuan tersebut menghasilkan performa pertumbuhan yang lebih baik dibandingkan kontrol. Sejalan dengan itu, Febrianto *et al.,* (2026) mengkaji respons morfologi dan biomassa beberapa varietas kelapa sawit pada kondisi salin di fase pembibitan awal dan menyimpulkan bahwa parameter panjang akar, panjang tajuk, serta bobot kering tajuk dan akar merupakan variabel yang efektif digunakan untuk membedakan tingkat toleransi antarvarietas. Berdasarkan penelusuran yang telah dilakukan, belum ditemukan publikasi ilmiah yang secara khusus menguji respons kecambah atau bibit DxP Dami Mas terhadap kondisi salinitas tinggi, sehingga hal ini menjadi kesenjangan penelitian yang nyata dan menjadi salah satu alasan penting dilakukannya penelitian ini, bukan sesuatu yang diasumsikan atau disimpulkan secara prematur.

Berdasarkan sintesis pembahasan di atas, penggunaan kecambah DxP Dami Mas dalam penelitian ini didasarkan pada beberapa pertimbangan ilmiah yang saling berkaitan. Pertama, DxP Dami Mas merupakan bahan tanaman kelapa sawit unggul dengan identitas genetik yang jelas, karena berasal dari persilangan terkontrol antara pohon induk Dura dan Pisifera terpilih yang diproduksi oleh produsen benih resmi (PT Sinar Mas Agro Resources and Technology Tbk, 2025). Kedua, kecambah yang digunakan berasal dari sumber benih yang dapat dipertanggungjawabkan secara kelembagaan, mengingat PT Dami Mas Sejahtera merupakan salah satu produsen benih resmi yang ditetapkan pemerintah untuk mengedarkan kecambah kelapa sawit bersertifikat (Isharyadi *et al.,* 2022). Ketiga, penggunaan bahan tanaman yang seragam dari satu sumber genetik diperlukan untuk mengurangi variasi biologis yang tidak berasal dari perlakuan penelitian, sehingga respons terhadap salinitas dan PGPR dapat diinterpretasikan secara lebih valid (Faizah *et al.,* 2016). Keempat, fase kecambah dan *pre nursery* dipilih karena merupakan fase yang sensitif terhadap gangguan lingkungan sekaligus penting dalam pembentukan awal sistem perakaran dan vegetatif tanaman (Rosnina, 2019). Kelima, penelitian ini secara tegas tidak mengasumsikan atau mengklaim bahwa DxP Dami Mas bersifat toleran terhadap salinitas, mengingat belum tersedia bukti ilmiah yang mendukung klaim tersebut, sehingga performa varietas ini terhadap cekaman salin justru menjadi pertanyaan yang hendak dijawab melalui penelitian ini. Keenam, dengan mempertimbangkan bahwa cekaman salinitas dapat

menghambat pertumbuhan dan proses fisiologis kelapa sawit sebagaimana ditunjukkan pada penelitian terdahulu (Salgado *et al.,* 2021), penelitian ini menjadi relevan untuk mengetahui respons morfofisiologi kecambah DxP Dami Mas terhadap kondisi salinitas tinggi sekaligus menjajaki kemungkinan peran PGPR dalam membantu tanaman menghadapi cekaman tersebut.