

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kedelai (*Glycine max L.*) merupakan komoditas pangan yang sangat penting setelah padi dan jagung, serta termasuk dalam kategori tanaman kacang-kacangan yang memiliki berbagai manfaat. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Sumadi dkk. (2017), kandungan protein kedelai cukup tinggi, yakni mencapai 37 hingga 43 persen, dan lemak sebesar sekitar 18 persen. Kadar protein yang terdapat dalam tanaman kedelai dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku potensial untuk produk olahan. Dengan semakin meningkatnya jumlah penduduk di Indonesia, permintaan terhadap kedelai untuk konsumsi juga akan mengalami peningkatan. Namun, kondisi ini tidak diimbangi dengan jumlah produksi kedelai yang ada di Indonesia (Wahyuni dan Kartika, 2022).

Berdasarkan data yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS) hingga bulan Desember 2023, kebutuhan nasional kedelai mencapai 2,7 juta ton, sementara produksi kedelai di Indonesia hanya berkisar antara 555.000 ton (BSIP, 2023). Penurunan produksi tanaman kedelai disebabkan oleh penggunaan benih yang bermutu rendah, yang ditandai dengan rendahnya viabilitas dan vigor benih. Adopsi benih bermutu tinggi diharapkan dapat meningkatkan hasil produksi tanaman, yang pada gilirannya akan memberikan keuntungan secara ekonomis serta mengatasi permasalahan yang berkaitan dengan vigor dan viabilitas benih yang rendah, serta dormansi fisiologis (Megasari dkk., 2022).

Penyimpanan yang tidak tepat dan kesalahan dalam penanganan benih dapat mengakibatkan terjadinya kemunduran pada benih tersebut. Benih yang mengalami kemunduran cenderung menghasilkan pertumbuhan yang tidak optimal. Oleh karena itu, diperlukan perlakuan tertentu sebelum proses penanaman (Rusmin, 2007 dalam Ilham, 2022). Salah satu langkah yang dapat diambil untuk mengatasi permasalahan ini adalah melalui proses invigorasi. Invigorasi merupakan suatu metode yang bertujuan untuk meningkatkan kembali vigor benih yang telah mengalami deteriorasi, serta penurunan kualitas. Perlakuan ini diberikan sebelum penanaman agar metabolisme benih dapat teraktivasi dan siap memasuki fase perkecambahan (Tefa, 2018 dalam Anisa dkk, 2023)

Bio-invigorasasi merupakan suatu teknologi yang diterapkan dalam proses perkecambahan benih dengan cara mengintegrasikan agen hayati pada fase imbibisi, yang bertujuan untuk mendorong pertumbuhan benih. Dalam praktik bio-invigorasasi benih, agen hayati yang digunakan berasal dari kelompok rhizobakteri. Agen hayati tersebut terkandung dalam kelompok Natural Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR). PGPR merupakan kelompok bakteri yang berperan penting dan memiliki kontribusi yang signifikan dalam mengkolonisasi rizosfer, yaitu lapisan tanah yang tipis (antara 1-2 mm) di sekeliling zona perakaran (Husein et al. , 2008). Bakteri yang terdapat dalam PGPR merupakan mikroba tanah yang berasosiasi dengan akar tanaman dan berfungsi untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman (Marfuah dan Majid, 2018).

1.2 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini yaitu :

1. Mendapatkan konsentrasi PGPR yang tepat untuk meningkatkan viabilitas dan vigor benih kedelai (*Glycine max L.*) melalui bio-invigorasasi.
2. Mendapatkan lama perendaman PGPR yang terbaik untuk meningkatkan viabilitas dan vigor benih kedelai (*Glycine max L.*) melalui bio-invigorasasi.
3. Mendapatkan kombinasi yang tepat antara konsentrasi dan lama perendaman PGPR untuk meningkatkan viabilitas dan vigor benih kedelai (*Glycine max L.*) melalui teknik bio-invigorasasi.

1.3 Kerangka Pemikiran

Tanaman kedelai sangat diminati di kalangan masyarakat Indonesia karena memiliki kandungan protein yang lebih tinggi dibandingkan dengan jenis kacang-kacangan lainnya (Loisa dkk, 2013 dalam Afriadi 2023). Kandungan protein dalam kedelai mencapai 35%, namun pada varietas unggul, kadar protein dapat mencapai 40 hingga 43%. Varietas kedelai Detap-1 memiliki sejumlah keunggulan, termasuk sensitivitas yang lebih tinggi terhadap hama dan penyakit.

Kedelai termasuk dalam golongan benih ortodoks yang memiliki kandungan lemak dan protein yang tinggi, sehingga memiliki kerentanan terhadap kerusakan, seperti kemunduran benih (Kurniyawati, 2022). Apabila benih disimpan dalam kondisi yang tidak memadai, maka benih tersebut akan mengalami kemunduran secara kontinu. Kemunduran ini mengakibatkan penurunan mutu baik dari segi kuantitatif maupun kualitatif. Laju kemunduran benih dapat dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu faktor internal dan faktor eksternal (Dinarto, 2010).

Salah satu solusi yang dapat diterapkan untuk meningkatkan mutu benih yang telah mengalami kemunduran adalah melalui proses invigorasi. Invigorasi merupakan suatu upaya alternatif untuk mengembalikan vigor benih yang telah mengalami deteriorasi, yang disebabkan oleh penyimpanan yang tidak tepat atau benih yang sudah kadaluwarsa, dengan melakukan perlakuan sebelum proses penanaman. Perlakuan ini bertujuan untuk mengaktifkan metabolisme benih sehingga benih siap memasuki fase perkecambahan (Tefa, 2018 dalam Anisa dkk, 2023). Proses perendaman benih menggunakan ekstrak bahan organik dalam bentuk cair yang dilengkapi dengan rizobakteri dikenal dengan sebutan bio-invigorasi. Dalam *bio-invigorasi*, perendaman benih dilakukan dengan bahan organik yang mengandung zat pengatur tumbuh (ZPT) serta *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas fluorescens* sebagai agensi hayati. Penggunaan rizobakteri yang berupa *Bacillus sp.* dan *Pseudomonas sp.* terbukti mampu meningkatkan indeks vigor benih, karena rizobakteri tersebut memiliki peran penting dalam melarutkan fosfat, mengikat nitrogen, serta mensintesis hormon auksin (Sutariati dan Wahab, 2012).

Priming biologis atau bio-invigorasi benih dapat dilakukan dengan memanfaatkan agen hayati dari kelompok *rhizobakteri*, seperti *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens*, *Aspergillus niger*, *Rhizobium sp.*, dan *Azotobacter sp.* Agen hayati dari kelompok rhizobakteri tersebut terkandung dalam *Natural Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR), yang berfungsi sebagai pemacu pertumbuhan tanaman (Marfuah dan Majid, 2018).

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Nasib (2016), dinyatakan bahwa konsentrasi PGPR sebesar 15% dan durasi perendaman tidak berpengaruh terhadap kecepatan perkecambahan benih papaya Sukma. Selanjutnya, penelitian

oleh Junaidi dkk. (2018) menunjukkan bahwa ekstrak air kelapa dengan konsentrasi 30% dan durasi perendaman selama 2 jam memberikan pengaruh positif yang

signifikan terhadap daya berkecambah benih tomat kadaluarsa, dengan presentase mencapai 83%, berbeda jauh dengan kontrol yang hanya mencatat angka 38,33%.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sari dkk. (2022), ditemukan bahwa kombinasi terbaik untuk viabilitas, pertumbuhan, dan hasil panen pertama diperoleh dari perlakuan konsentrasi ekstrak tomat sebesar 5% dan durasi perendaman benih dalam suspensi *Pseudomonas fluorescens* selama 1 jam. Selain itu, penelitian Nofiana (2024) menunjukkan bahwa lama perendaman PGPR pada benih kedelai selama 3 dan 6 jam dengan konsentrasi larutan masing-masing 6%, 12%, dan 24% tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan. Hal ini diduga disebabkan oleh durasi perendaman yang tidak efektif dalam meningkatkan viabilitas dan vigor benih kedelai yang telah mengalami kemunduran.

Berdasarkan temuan-temuan tersebut, penulis berkeinginan untuk melaksanakan penelitian guna meningkatkan viabilitas dan vigor benih kedelai dengan durasi perendaman selama 1 dan 2 jam. Sejalan dengan rekomendasi yang dihasilkan dari penelitian tersebut, peneliti ingin mengeksplorasi kemungkinan bahwa perendaman dengan durasi yang lebih singkat dapat meningkatkan viabilitas dan vigor benih kedelai.

1.4 Hipotesis

1. Terdapat konsentrasi PGPR yang dapat meningkatkan viabilitas dan vigor benih kedelai (*Glycine Max L.*) melalui bio-invigorasi.
2. Terdapat lama waktu perendaman PGPR yang dapat meningkatkan viabilitas dan vigor benih kedelai (*Glycine Max L.*) melalui bio-invigorasi.
3. Terdapat kombinasi antara lama perendaman dan konsentrasi PGPR yang tepat terhadap viabilitas dan vigor benih kacang kedelai (*Glycine Max L.*) bio-invigorasi.

1.5 Kontribusi Penelitian

1. Memberikan pengetahuan tentang konsentrasi PGPR yang tepat untuk meningkatkan viabilitas dan vigor benih kedelai (*Glycine max L.*) melalui bio-invigorasi.
2. Memberikan pengetahuan tentang lama perendaman yang tepat menggunakan PGPR untuk meningkatkan viabilitas dan vigor benih kedelai (*Glycine max L.*) melalui bio-invigorasi.

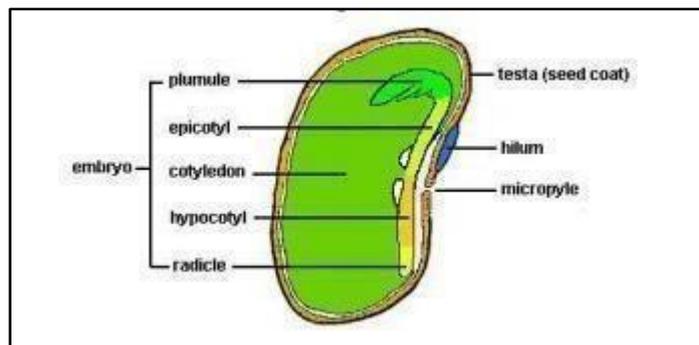
3. Memberikan pengetahuan tentang kombinasi antara lama perendaman dan konsentrasi yang tepat menggunakan PGPR untuk meningkatkan viabilitas dan vigor benih kedelai (*Glycine max L.*) melalui bio-invigorasasi

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Klasifikasi Tanaman Kedelai

Kedelai (*Glycine max* L. Merrill) adalah salah satu tanaman kacang-kacangan yang termasuk dalam famili Leguminosae, yang digunakan sebagai bahan makanan tambahan karena mengandung protein yang tinggi (Girsang, 2020). Tanaman kedelai diduga berasal dari dataran di Cina. Tanaman ini tumbuh di daerah pegunungan bagian tengah dan barat Cina, sedangkan di dataran rendah Indonesia mulai dibudidayakan pada abad ke-17 sebagai tanaman makanan dan rumput hijau. Penyebaran tanaman kedelai di Indonesia berawal dari daerah Manshukuo, kemudian menyebar ke daerah Manchuria, Jepang, serta negara-negara lain di Amerika dan Afrika (AKK, 2012). Menurut Girsang (2020), klasifikasi tanaman kedelai sebagai berikut:

Gambar 1. Morfologi Tanaman Kedelai



Kingdom	: Plantae
Divisi	: Spermatophyta
Subdivisi	: Angiospermae
Kelas	: Dicotyledoneae
Ordo	: Rosales
Famili	: Leguminosae
Subfamili	: Papilionoidae
Genus	: Glycine
Spesies	: <i>Glycine max</i> (L.) Merrill

Kedelai yang tumbuh secara liar di kawasan Asia Tenggara terdiri dari sekitar 40 spesies. Penyebaran geografis kedelai memengaruhi tipe-varietas yang ada. Penentuan varietas kedelai dilakukan berdasarkan beberapa faktor, antara lain umur, warna biji, serta tipe batang. Keunggulan suatu varietas dapat dievaluasi berdasarkan hasil panen, mutu hasil, ketahanan terhadap hama dan penyakit, serta toleransi terhadap cekaman lingkungan abiotik (Stefia, 2017). Berikut morfologi tanaman kedelai diantaranya yaitu akar, daun, batang, bunga, buah, dan biji.

2.2 Morfologi Tanaman Kedelai

2.2.1 Akar

Tanaman kedelai memiliki akar tunggang dan akar sekunder yang tumbuh dari akar tunggang tersebut. Panjang akar tunggang pada tanaman kedelai dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya kekerasan tanah, populasi tanaman, dan varietas (Feronica, 2021). Akar tunggang pada kedelai dapat memanjang hingga kedalaman 200 cm. Terdapat juga bulu akar yang terbentuk sebagai bagian dari akar, dengan tujuan untuk memperluas permukaan kontakannya dalam menyerap unsur hara. Akar tanaman kedelai tidak hanya berfungsi sebagai tempat bertumpunya tanaman dan sebagai alat pengangkut air serta unsur hara, melainkan juga sebagai lokasi di mana bintil-bintil akar terbentuk. Menurut Adisarwanto (2013), sistem perakaran kedelai memiliki ciri khas, yaitu adanya interaksi simbiosis antara bakteri nodul akar (*Rhizobium japonicum*) yang membentuk bintil akar. Bintil akar tersebut dapat bersimbiosis secara mutualistik dengan bakteri pengikat nitrogen *Bradyrhizobium japonicum*. Bakteri ini memiliki kemampuan untuk mengikat nitrogen langsung dari udara dan membentuk gas N_2 (nitrogen), yang kemudian dapat digunakan oleh tanaman kedelai setelah dioksidasi menjadi nitrat (NO_3^-) (Sobaeda, 2020). Proses pembesaran bintil akar akan berhenti pada minggu keempat, yaitu setelah terjadinya proses infeksi bakteri (Adie dan Krisnawati, 2016).

2.2.2 Daun

Kedelai merupakan tanaman dikotil yang memiliki bentuk daun tunggal serta daun majemuk (berdaun tiga) dengan tangkai yang relatif panjang. Warna daun pada tanaman ini bervariasi, mencakup hijau, hijau muda, dan hijau tua.

Setiap daun berbentuk oval, tipis, dan berwarna hijau, dengan permukaan yang dilapisi oleh bulu halus (trichoma) di kedua sisi, yang memiliki warna yang cerah (Subaeda, 2020). Panjang bulu pada tanaman kedelai dapat mencapai 1 mm, dengan lebar 0,0025 mm. Kepadatan bulu pada kedelai ini bervariasi, tergantung pada varietas kedelai yang bersangkutan (Afriadi, 2023). Tiap daun pada tanaman kedelai dilengkapi dengan sepasang stipula yang terletak pada dasar daun, di mana dasar daun ini dapat melekat pada bagian batang tanaman kedelai (Adie dan Krinawati, 2016).

2.2.3 Batang

Tanaman kedelai memiliki dua tipe pertumbuhan batang, yaitu tipe terbatas (determinate) dan tipe tidak terbatas (indeterminate). Batang dengan tipe determinate menunjukkan bahwa pertumbuhan tinggi tanaman dan penambahan jumlah daun akan terhenti pada saat tanaman memasuki fase pembungaan. Sebaliknya, tipe indeterminate dicirikan oleh pertumbuhan tinggi tanaman dan penambahan jumlah daun yang terus berlangsung meskipun tanaman telah memasuki fase pembungaan. Secara umum, bentuk batang kedelai cenderung sedang hingga tinggi, dengan ujung batang yang lebih ramping dibandingkan bagian tengahnya. Tipe pertumbuhan determinate umumnya memiliki varietas yang lebih unggul (Subaeda, 2020).

Kedelai memiliki batang yang tidak berkayu, jenis batang semak/perdu, memiliki bulu, batangnya berbentuk bulat dengan warna hijau dan mempunyai panjang yang bervariasi, yaitu berkisar antara 30 – 100 cm. Batang pada tanaman kedelai dapat membentuk 3 hingga 6 cabang. Proses percabangan pada tanaman kedelai ini akan mulai tumbuh pada saat tanaman kedelai mencapai ketinggian 20 cm (Afriadi, 2023).

2.2.4 Bunga

Tanaman kedelai memiliki bunga yang sempurna, di mana setiap bunga memiliki unsur jantan dan betina. Proses penyerbukan dapat terjadi ketika mahkota bunga masih tertutup, sehingga kemungkinan terjadinya kawin silang secara alami menjadi sangat kecil. Bunga kedelai terletak pada ruas-ruas batang dan memiliki warna ungu atau putih. Bunga kedelai muncul pada ketiak tangkai daun majemuk (Sobaeda, 2020).

Suhu dan kelembaban merupakan faktor yang sangat penting dalam proses pembentukan bunga. Ketika suhu berada pada tingkat yang tinggi dan kelembaban rendah, ketiak tangkai daun menerima jumlah sinar matahari yang lebih banyak. Proporsi ketiak tangkai daun pada setiap tanaman kedelai yang mampu membentuk polong berkisar antara 20% hingga 80%. Bunga yang rontok tidak akan dapat berlanjut pada proses pembentukan polong. Proses rontoknya bunga dapat terjadi pada setiap posisi buku antara 1 hingga 10 hari setelah awal terbentuknya bunga. Periode berbunga pada tanaman kedelai berlangsung cukup lama, yaitu sekitar 3 hingga 5 minggu di daerah subtropis dan 2 hingga 3 minggu di daerah tropis, seperti yang ditemukan di Indonesia (Ilham, 2022).

2.2.5 Buah

Kedelai memiliki buah yang berbentuk polong, di dalamnya terdapat biji-biji kedelai. Polong tanaman kedelai mulai terbentuk sekitar 7 hingga 10 hari setelah kemunculan bunga pertama. Panjang polong muda berkisar antara 1 cm. Jumlah polong yang terdapat pada setiap ketiak tangkai daun bervariasi antara 1 hingga 10 buah dalam setiap kelompok. Ukuran dan bentuk polong mencapai maksimum pada awal periode pemasakan biji (Ilham, 2022). Setiap polong mengandung biji kedelai yang bervariasi antara 1 hingga 3 biji. Polong kedelai ditutupi oleh bulu dan memiliki warna kuning kecoklatan atau abu-abu. Proses pematangan polong, yang pada awalnya berwarna hijau, akan berubah menjadi kehitaman seiring dengan fase generatif tanaman kedelai (masak). Warna biji kedelai bervariasi, meliputi kuning, hitam, hijau, dan coklat (Sobaeda, 2020).

2.2.6 Biji

Biji kedelai memiliki bentuk yang bervariasi, mulai dari lonjong hingga bulat. Namun, di Indonesia, mayoritas bentuk biji kedelai adalah lonjong (Sobaeda, 2022). Biji kedelai terdiri dari dua bagian utama, yaitu kulit biji dan janin (embrio). Pada kulit biji terdapat bagian yang disebut pusar (hilum) yang berwarna coklat. Di ujung hilum terdapat mikrofil, berupa lubang kecil yang terbentuk selama proses pembentukan biji. Kulit biji kedelai memiliki beberapa variasi warna, di antaranya kuning, hijau, coklat, hitam, serta kombinasi dari beberapa warna tersebut (Ilham, 2022).

2.3 Syarat Tumbuh Tanaman Kedelai

2.3.1 Iklim

Menurut Jayasumatra (2012) sebagaimana dikutip oleh Afriadi (2023), umumnya kondisi iklim yang paling ideal untuk budidaya tanaman kedelai terdapat pada daerah-daerah dengan suhu antara 25°C hingga 27°C, kelembaban udara rata-rata sebesar 65% selama 12 jam per hari, serta mendapatkan penyinaran matahari selama 10 jam per hari. Tanaman kedelai dapat tumbuh dalam beragam kondisi. Birnadi (2014) menyatakan bahwa tanaman kedelai dapat berkembang dengan baik pada ketinggian antara 50 hingga 150 meter di atas permukaan laut (mdpl). Ketersediaan air selama masa pertumbuhan merupakan faktor penentu bagi hasil kedelai. Apabila terjadi kekeringan pada fase pembungaan dan pengisian polong, maka kualitas dan kuantitas hasil panen akan mengalami penurunan. Curah hujan minimum yang dibutuhkan untuk pertumbuhan tanaman kedelai adalah sekitar 800 mm selama periode pertumbuhan yang berlangsung antara tiga hingga empat bulan.

2.3.2 Tanah

Tanaman kedelai dapat tumbuh pada berbagai jenis tanah dengan syarat *drainase* dan *aerasi* tanah cukup baik dengan ketersediaan air yang cukup selama pertumbuhan tanaman. Kondisi tanah untuk mencapai tingkat pertumbuhan dan produktivitas optimal yaitu pada tanah berstruktur lempung berpasir atau liat berpasir. Kedelai dapat tumbuh dengan baik pada pH tanah sekitar 6 – 6,8. Tanaman kedelai akan mengalami proses pertumbuhan yang lambat apabila pH tanahnya kurang dari 5,5 dikarenakan pada pH tanah tersebut terjadi proses keracunan yang disebabkan oleh aluminium (Afriadi, 2023).

Menurut Ilham (2022), kedelai ditanam pada tanah yang gembur, subur, kaya unsur hara dan bahan organik agar kedelai dapat tumbuh dengan baik dan optimal. Bahan organik yang cukup dalam tanah merupakan sumber makanan pada jasad renik yang pada akhirnya akan membebaskan unsur hara untuk pertumbuhan tanaman.

2.4 Viabilitas dan Vigor Benih

Mutu benih merupakan tahap awal yang sangat penting dalam keberhasilan suatu proses produksi, dan berkaitan erat dengan viabilitas serta vigor benih. Viabilitas dan vigor benih adalah komponen penilaian kualitas benih yang dipengaruhi oleh faktor-faktor internal maupun eksternal, seperti salinitas dan

temperatur.

Menurut Sari et al. (2022), viabilitas dapat didefinisikan sebagai salah satu tolak ukur daya kecambah, yang merupakan simulasi dari kemampuan benih untuk tumbuh dan berproduksi secara normal dalam kondisi optimal. Secara umum, viabilitas benih dapat diartikan sebagai kemampuan benih untuk tumbuh menjadi kecambah yang normal. Indeks viabilitas benih memiliki hubungan erat dengan viabilitas, serta jumlah benih yang berhasil berkecambah dari populasi benih tersebut (Ridha et al. , 2017).

Selanjutnya, Fatikhasari et al. (2021) menyatakan bahwa vigor benih merupakan indikator yang digunakan untuk mengetahui keseragaman dan kecepatan perkecambahan dalam kondisi suboptimal. Vigor benih juga dapat didefinisikan sebagai kemampuan benih untuk tumbuh secara normal dalam kondisi lapang ataupun lingkungan yang suboptimal. Vigor berkaitan dengan keadaan lingkungan, di mana benih yang tidak berkualitas baik akan mengalami proses perkecambahan yang tidak optimal. Semakin tinggi tingkat pertumbuhan suatu benih, maka vigor benih tersebut juga semakin kuat (Zani dan Anhar, 2021). Benih dengan vigor yang tinggi lebih mampu bertahan dalam kondisi suboptimal. Selain itu, benih yang memiliki vigor tinggi juga memiliki kemampuan untuk tumbuh lebih cepat, serta daya simpan yang lebih lama meskipun berada dalam kondisi yang kurang ideal.

Apabila vigor awal benih tidak dapat dipertahankan, maka benih yang disimpan akan mengalami penurunan mutu secara terus-menerus selama masa penyimpanan. Penurunan mutu ini dapat diamati melalui faktor fisiologis dan biokimia pada benih. Faktor fisiologis dapat terindikasi dari penurunan daya berkecambah, sedangkan faktor kimiawi dapat diindikasikan oleh penurunan aktivitas enzim, penurunan cadangan makanan, serta peningkatan nilai konduktivitas dari benih tersebut (Fathikasari et al. , 2022). Sifat kemunduran benih tidak dapat dihindari, namun dapat diminimalkan dengan melakukan pengolahan dan penyimpanan benih secara benar, terutama dalam hal kadar air dan kondisi lingkungan seperti kelembaban dan temperatur (Ridha dkk., 2017).

2.5 *Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)*

Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) merupakan kumpulan bakteri yang mampu hidup pada akar tanaman dengan tujuan sebagai pemacu

pertumbuhan tanaman dalam proses penyerapan unsur hara di dalam tanah, sehingga dapat dikatakan simbiosis mutualisme. Penggunaan PGPR mampu meminimalisir adanya serangan hama dan penyakit tanaman (Marfuah dan Majid, 2018). Menurut Mutiah dkk. (2023), menyatakan bahwa pemberian P G P R dalam tanah mampu meningkatkan kesuburan tanah serta menekan fitopagen.

Pembuatan PGPR dapat dilakukan secara alami dengan menggunakan akar bambu, akar alang-alang, dan akar bayam duri. Akar bambu banyak terdapat bakteri *Pseudomonas fluorescens* (PF) yang mampu meningkatkan kelarutan unsur P dalam tanah (Pratiwi dkk., 2017). PGPR masuk dalam kategori sejenis bakteri perakaran atau hidup disekitar perakaran tanaman. Bakteri jenis ini umumnya hidup dan berkembang dengan memanfaatkan eksudat yang keluar dari perakaran tanaman (Meidiantie dan Heru, 2012). Jenis bakteri yang diidentifikasi sebagai PGPR yaitu *Pseudomonas fluorescens* mampu menghasilkan Indole Acetic Acid (IAA) (Mutiah dkk., 2023).

Pseudomonas fluorescens (PF) merupakan bakteri gram negative, aerobik yang terdapat di dalam tanah pertanian mampu beradaptasi dengan baik untuk tumbuh di rizosfir. Rizobakteri ini memiliki banyak manfaat yaitu sebagai agen biocontrol serta meningkatkan pertumbuhan tanaman. Mekanismenya dengan menggunakan eksudat akar, berkoloni dan berkembang dengan baik pada lingkungan rizosfir (Sarkar dkk., 2022). Perendaman benih kedelai dengan menggunakan PGPR yang terkandung *P. fluorencens* mampu meningkatkan perkecambahan jika dibandingkan dengan control tanpa PGPR dan memicu dalam pertumbuhan tanaman kedelai lebih cepat (Sofiani dkk., 2016). Menurut Kalimi dan Wiryana (2009), menyatakan bahwa PGPR juga mampu meningkatkan tinggi tanaman, jumlah cabang, bobot basah, dan bobot kering.

Keberadaan mikroorganisme kelompok rhizobakteri akan menjadikan tanaman sangat baik dan sehat dibandingkan dengan tanaman yang tidak dikolonisasi bakteri tersebut (Sito, 2015). Hal ini dikarenakan terdapat aktivitas PGPR disekitar tanaman yang menstimulasi penyediaan unsur hara sebagai penyedia nutrisi tanaman. Akar mempunyai fungsi dalam menyerap unsur hara dan air sehingga sangat mempengaruhi dalam pertumbuhan tanaman akibat proses fotosintesis yang meningkat. Menurut Dewi (2007), proses fotosintesis

akan meningkat seiringnya pertumbuhan vegetative dan generative pada tanaman. Dapat disimpulkan bahwa PGPR memiliki peran penting bagi tanaman karena dapat meningkatkan kesehatan tanaman dan mendukung pertumbuhan tanaman secara signifikan.

2.6 Bio-Invigorasi

Invigorasi pada benih adalah perlakuan yang diberikan terhadap benih sebelum penanaman yang tujuannya untuk memperbaiki daya berkecambah dan kemampuan tumbuh kecambah. Salah satu perlakuan invigorasi yaitu dengan perlakuan hidrasi yaitu direndam, pembasahan dan pengeringan (Sucahyono dkk, 2013 dalam Megasari, 2021).

Bio-invigorasi merupakan teknologi yang digunakan pada perkecambahan benih dengan cara mengintegrasikan agensi hayati saat proses imbibisi pada benih berlangsung yang bertujuan memacu pertumbuhan pada benih. Agensi hayati yang dapat digunakan sebagai alternatif bio-invigorasi adalah mikroorganisme yang terkandung dalam *Plant Growth Promoting Rhizobacteri* (PGPR), agensi bio-kontrol, dan fungisida hayati (Marthandan et al., 2020). Bio-invigorasi yang diintegrasikan dengan agensi hayati dari kelompok rhizobakteri yang banyak ditemukan berkoloni disekitar perakaran tanaman atau lebih mudah ditemukan dalam kandungan PGPR terbukti mampu meningkatkan mutu fisiologis benih (Widanta et al., 2018)

Invigorasi dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu *hydropriming*, *osmopriming*, *chemical priming*, *biological priming*, *hormonal priming*, *sold matrix priming*, dan *nutripriming* (Marthandan dkk, 2020 dalam Megasari, 2021). Teknologi invigorasi benih yang menggunakan agensi hayati mampu berperan sebagai *Biofertilizer* dan *Biopestisides*. Invigorasi yang menggunakan agensi hayati disebut dengan *Biological Priming* atau bio-invigorasi yang bertujuan agar viabilitas, pertumbuhan, dan hasil tanaman meningkat (Mia dkk, 2010 dalam Megasari, 2021).

Bio-invigorasi yaitu dilakukan dengan cara merendam benih dengan bahan organik mengandung zat pengatur tumbuhan (ZPT), *B. subtilis* dan *P. fluoressssscens* sebagai agensi hayati. Perendaman benih memerlukan durasi

yang tepat, hal ini dikarenakan untuk menghindari terjadinya pembusukan pada benih. Apabila benih kadaluwarsa direndam terlalu lama benih akan kehilangan oksigen yang dapat menghambat proses respirasi sehingga mengakibatkan proses perkecambahannya akan terhambat (Zarah dkk., 2023).

2.7 Perkecambahan Kedelai

Menurut Artika dan Fitriani (2017) dalam Pasha (2022) perkecambahan merupakan proses metabolisme biji hingga dapat menghasilkan pertumbuhan dari komponen kecambah (plumula dan radikula). Perkecambahan dapat dilihat ketika plumula dan radikula tumbuh normal dalam jangka waktu tertentu sesuai dengan ketentuan ISTA (*International Seed Testing Association*). Kecambah sendiri didefinisikan sebagai tumbuhan kecil yang baru muncul dari biji dan hidupnya masih bergantung pada persediaan makanan yang terdapat dalam biji (Mudiana, 2007 dalam Pasya, 2022). Biji kedelai tidak mengalami masa dormansi, sehingga biji kedelai dapat langsung dilakukannya penanaman. Adapun evaluasi kecambah memiliki kriteria sebagai berikut:

a. Kecambah Normal

Adapun kecambah normal memiliki beberapa kriteria diantaranya sebagai berikut:

1. Sistem perakaran berkembang baik dengan akar primer yang panjang atau akar sekunder yang cukup.
2. Pada tipe perkecambahan epigeal, hipokotil tumbuh lurus dan memanjang, sedangkan pada tipe perkecambahan hypogeal, epikotil berkembang dengan baik.
3. Dua kotiledon yang biasanya berwarna hijau dan berbentuk seperti daun.
4. Satu atau dua daun primer yang berwarna hijau.
5. Terlihat ada tunas pucuk (Kepmentan, 2018).



Gambar 2. Kecambah Normal

b. Kecambah Abnormal

Adapun kecambah abnormal memiliki beberapa kriteria diantaranya sebagai berikut

1. Kecambah rusak, yaitu dengan satu atau lebih struktur esensialnya tidak ada.
2. Kecambah busuk, yaitu kecambah yang salah satu struktur esensialnya terkena penyakit atau busuk akibat infeksi primer sehingga menghambat perkembangan menjadi kecambah normal (Kepmentan, 2018).



Gambar 3. Kecambah Abnormal

c. Benih Keras

Benih keras merupakan benih yang tidak menyerap air sampai akhir pengujian yang disebabkan kulit *impermeable*, sehingga dalam benih dikategorikan benih berkulit keras (Megasari, 2021).

d. Benih Segar Tidak Tumbuh

Benih segar tidak tumbuh merupakan benih-benih yang membengkak setelah adanya proses imbibisi atau menyerap air, namun belum berkecambah sampai pada hari akhir pengujian (Megasari, 2021).

e. Benih Mati

Benih mati merupakan benih yang telah mengalami pembusukan sebelum berkecambah atau benih yang tidak tumbuh sampai jangka waktu pengujian yang ditentukan, akan tetapi benih bukan dalam keadaan dorman (Megasari, 2021).