

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Taksonomi Tanaman Bawang Merah

Salah satu komoditas hortikultura yang paling banyak dibudidayakan di seluruh dunia adalah bawang merah. Tanaman ini menjadi salah satu pilihan utama dalam berbagai sistem pertanian hortikultura karena sangat fleksibel dan menguntungkan. Tanaman ini termasuk dalam spesies *Allium ascalonicum* L., bersifat semusim, dan tumbuh dalam bentuk rumpun tegak dengan ketinggian berkisar antara 15 hingga 40 cm.

Kingdom	: Plantae
Divisi	: Spermatophyta
Subdivisi	: Angiospermae
Kelas	: Monocotyledonae
Ordo	: Liliales
Famili	: Liliaceae
Genus	: <i>Allium</i>
Spesies	: <i>Allium ascalonicum</i> L. (Dwijoseputro, 2016).

Salah satu tanaman hortikultura yang paling menguntungkan, bawang merah adalah jenis umbi dari genus *Allium*. Tanaman ini termasuk dalam kelompok umbi lapis dan dapat tumbuh selama dua musim. Bawang merah berasal dari famili *Liliaceae* dan termasuk tanaman semusim dengan daur hidup yang singkat. Tanaman ini dapat diperbanyak secara vegetatif dengan menggunakan umbi sebagai bahan tanam atau secara generatif dengan biji atau benih.

#### 2.2 Morfologi Tanaman Bawang Merah

Tanaman bawang merah memiliki banyak organ utama, dan masing-masing melakukan peran khusus untuk mendukung tumbuh kembang tanaman. Sistem perakaran, batang, daun, bunga, umbi, buah, dan biji adalah bagian dari struktur ini. Setiap organ melakukan fungsi penting dan berinteraksi satu sama lain dalam menjalankan proses fisiologis tertentu, seperti fotosintesis, reproduksi, penyerapan

air dan nutrisi, dan penyimpanan cadangan makanan, mulai dari penyerapan unsur hara, fotosintesis, reproduksi, hingga penyimpanan cadangan makanan.

### 2.2.1 Akar

Bawang merah memiliki akar serabut yang dangkal. Akar-akar tersebut tumbuh di kedalaman 15–30 cm di bawah permukaan tanah. Pola pertumbuhan rumpun yang dibentuk oleh struktur akar ini mendukung stabilitas tanaman dan meningkatkan efisiensi penyerapan air dan zat hara dari tanah. Karena masa tanamnya yang relatif singkat dan ketahanannya terhadap kekeringan yang rendah, tanaman ini digolongkan sebagai tanaman hortikultura. Pada fase awal pertumbuhan, akar bawang merah tumbuh cukup banyak. Namun, seiring pertambahan usia tanaman dan memasuki fase matang, akar-akar tersebut secara perlahan mengalami degenerasi hingga akhirnya mati satu per satu. Tanaman bawang merah memiliki akar utama yang berfungsi sebagai pusat pertumbuhan bagi akar-akar baru yang berkembang di sekitarnya. Secara morfologis, akar bawang merah umumnya berwarna putih dan tumbuh secara menyebar di sekitar umbi (Fajjriyah, 2017).



Gambar 2. 1 Akar Tanaman Bawang Merah

Sumber: Dokumentasi Pribadi (2025)

### 2.2.2 Batang

Dalam tanaman bawang merah, discus adalah batang asli. Struktur ini berbentuk silindris, pendek, agak pipih dan berukuran kecil dengan ujung yang meruncing, serta memiliki panjang sekitar 50 hingga 70 cm. Fungsi utama discus adalah sebagai titik tumbuh bagi tunas dan tempat tumbuhnya akar. Bagian atas dari discus sering disebut sebagai "batang semu" karena terdiri dari tumpukan pelepasan daun yang menyatu dan saling membungkus. Sementara itu, batang sejati

berada di bawah permukaan tanah dan seiring pertumbuhan tanaman, batang ini akan mengalami perubahan bentuk menjadi umbi lapis (BPPSDMP, 2021).



Gambar 2. 2 Batang Tanaman Bawang Merah

Sumber: Dokumentasi Pribadi (2025)

### 2.2.3 Daun

Daun tanaman bawang merah berbentuk memanjang dengan bagian dalam berongga dan ujung silindris yang meruncing. Warna daun dapat menunjukkan variasi, mulai dari hijau muda hingga hijau tua, tergantung pada tahap perkembangan tanaman serta faktor lingkungan yang memengaruhinya. Daun biasanya panjangnya antara 15 dan 40 cm, menunjukkan vitalitas tanaman. Bagian luar daun membungkus bagian dalamnya secara melingkar, dan jika dipotong melintang, akan terlihat struktur berlapis yang menyerupai cincin. Daun-daun ini menempel pada tangkai yang relatif pendek. Seiring bertambahnya umur tanaman, daun akan mengalami perubahan fisiologis seperti menguning dan kehilangan kekakuannya, sehingga tidak lagi berdiri tegak sebagaimana pada fase awal pertumbuhan. Daun memiliki peranan krusial dalam menjalankan fungsi fisiologis tanaman, khususnya dalam aktivitas fotosintesis dan respirasi, yang secara langsung memengaruhi tingkat kesehatan dan produktivitas tanaman bawang merah secara menyeluruh (Danurtha, 2022).



Gambar 2. 3 Daun Tanaman Bawang Merah

Sumber: Dokumentasi Pribadi (2025)

#### 2.2.4 Bunga

Bentuk umbel adalah jenis bunga majemuk yang ditemukan pada tanaman bawang merah. Setiap tandan dapat memuat antara 50 hingga 200 kuntum bunga. Secara morfologis, bunga memiliki putik yang berukuran kecil dan pendek, serta umumnya dilengkapi dengan lima hingga enam benang sari dan satu putik. Kelopak bunga berwarna hijau dan memperlihatkan guratan berwarna putih keperakan sebagai ciri khasnya. Bakal buah terletak di bagian atas bunga dan berbentuk menyerupai kubah. (Arya, 2018). Bunga pada tanaman bawang merah dapat melakukan penyerbukan sendiri maupun dibantu penyerbukan oleh hewan (serangga) dan juga oleh manusia (Fajjriyah, 2017).

#### 2.2.5 Umbi

Banyak jenis ubi bawang merah, dari besar hingga sedang. Warna kulit umbi bawang merah menunjukkan variasi yang cukup beragam, meliputi nuansa putih, kuning, merah muda, merah tua, hingga merah keunguan (Hakiki, 2015). Proses pembentukan umbi terjadi melalui pembesaran jaringan dasar yang berasal dari pelepasan daun bagian bawah yang mengalami modifikasi dan penyatuan lapisan-lapisan daun yang mengalami modifikasi. Proses ini dipengaruhi oleh mekanisme kerja unsur hara nitrogen (N), yang bertanggung jawab atas proses sintesis asam nukleat—komponen esensial bagi pembelahan dan perkembangan sel selama pembentukan umbi. pada proses pembelahan sel di dalam inti sel.

Buah bawang merah muda awalnya berwarna putih sebelum mengalami perubahan menjadi hitam saat matang. Bentuk buahnya bulat dengan ujung yang

tampak tumpul. Sementara itu, biji bawang merah berbentuk pipih, dan biji yang telah tua umumnya dimanfaatkan oleh petani sebagai bahan untuk membudidayakan tanaman bawang merah (Fajjriyah, 2017).



Gambar 2. 4 Umbi Tanaman Bawang Merah

Sumber: Dokumentasi Pribadi (2025)

### 2.3 Syarat Tumbuh Tanaman Bawang Merah

Pertumbuhan optimal tanaman bawang merah umumnya terjadi pada wilayah dengan ketinggian antara 0 hingga 400 meter di atas permukaan laut (mdpl). Meskipun demikian, tanaman ini memiliki kemampuan adaptasi yang cukup baik terhadap kondisi agroklimat di daerah dataran tinggi, bahkan hingga ketinggian sekitar 1.000 mdpl, meskipun efisiensi pertumbuhannya dapat bervariasi tergantung pada variabel lingkungan lainnya. Bawang merah idealnya dibudidayakan pada wilayah yang memiliki suhu antara 23 hingga 32°C, dengan tingkat pencahayaan minimal 70% dan kelembapan udara berkisar antara 50% hingga 70% (Fajjriyah, 2017). Untuk mendukung pembentukan umbi yang optimal, tanaman ini sebaiknya ditanam di area terbuka yang tidak terhalang pepohonan dan bebas dari kabut, karena kekurangan sinar matahari dapat menghambat proses fotosintesis secara maksimal.

Selain itu, angin kencang juga menjadi faktor yang harus dihindari dalam budidaya bawang merah. Kecepatan angin yang terlalu tinggi dapat menyebabkan tanaman roboh atau tercabut dari media tanam, mengingat sistem perakarannya yang dangkal dan berserabut (Pasigai, Abdul, Thaha, dan Nasir, 2016). Tanaman bawang merah akan tumbuh dengan baik di tanah yang subur, bertekstur gembur, dan penuh dengan bahan organik seperti humus. Tanah remah dengan sistem aerasi

dan drainase yang baik membantu pertumbuhan sistem perakaran dan proses pembentukan umbi.

Untuk budidaya bawang merah, tanah lempung berpasir adalah pilihan terbaik karena mampu menyeimbangkan kapasitas menahan air dan sirkulasi udara yang lancar. Tingkat keasaman tanah ideal untuk tanaman ini adalah antara 5,6 dan 6, yang menunjukkan kondisi netral hingga sedikit asam. Jika pH terlalu rendah, tanaman bawang merah cenderung tumbuh kerdil. Selain itu, unsur hara seperti sulfat juga sangat penting bagi tanaman ini, dengan tingkat kebutuhan bervariasi antara 50 hingga 90 ppm tergantung pada jenis tanah tempat tanaman dibudidayakan.

#### ***2.4 Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)***

Sekelompok bakteri yang disebut Rhizobacteria yang mendorong pertumbuhan tanaman, hidup bersimbiosis di zona rizosfer, yaitu area di sekitar perakaran tanaman. PGPR berkontribusi pada pertumbuhan tanaman melalui berbagai mekanisme biologis yang kompleks. Mikroorganisme ini dapat menginvasi area perakaran dan meningkatkan pertumbuhan tanaman baik pada fase vegetatif maupun generatif. Ini juga dapat meningkatkan produktivitas hasil panen secara keseluruhan. PGPR memiliki tiga fungsi utama dalam mendukung tanaman. Pertama, berperan sebagai biostimulan dengan menghasilkan fitohormon yang merangsang pertumbuhan. Kedua, sebagai biofertilizer yang membantu mempercepat proses penyerapan unsur hara. Ketiga, PGPR juga berfungsi sebagai agen bioprotektif yang mampu memberikan perlindungan terhadap tanaman dari serangan berbagai jenis patogen (Patading dan Ai, 2021). Secara umum, PGPR sangat penting karena mampu membantu penyerapan unsur hara makro seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), serta meningkatkan ketersediaan unsur hara mikro yang penting untuk metabolisme dan pertumbuhan tanaman, seperti seng (Zn). Selain itu, PGPR juga meningkatkan ketersediaan unsur hara mikro yang penting untuk pertumbuhan dan pertumbuhan tanaman.

Salah satu peran penting PGPR sebagai agen biostimulan adalah kemampuannya dalam menghasilkan fitohormon berupa Indole Acetic Acid (IAA), yaitu jenis hormon auksin yang secara alami disintesis oleh beberapa bagian

tanaman. IAA berperan dalam mengatur pertumbuhan akar, pemanjangan sel, serta diferensiasi jaringan, sehingga secara langsung mendukung perkembangan sistem perakaran dan peningkatan penyerapan nutrisi. Ini biasanya berhubungan dengan meristem apikal, akar, serta jaringan kambium (Siagian, Hidayat, dan Tyasmoro, 2019). Mekanisme utama PGPR dalam meningkatkan ketersediaan hara antara lain melalui fiksasi nitrogen bebas dari atmosfer oleh bakteri seperti *Azotobacter* dan *Azospirillum*, sebagai solubilisasi fosfat yaitu pelarut senyawa fosfat tidak larut menjadi bentuk yang tanaman dapat menyerapnya, oleh genus *Bacillus* dan *Pseudomonas*, produksi sidefor yaitu senyawa pengikat besi yang mempermudah penyerapan unsur mikro tertentu dan sebagai sintesis hormon tumbuh.

Akar tanaman yang berasosiasi dengan PGPR akan mengalami peningkatan panjang dan jumlah rambut akar, sehingga luas permukaan kontak dengan tanah bertambah dan efisiensi penyerapan unsur hara meningkat. Dengan meningkatnya ketersediaan dan penyerapan hara tanaman menunjukkan pertumbuhan vegetatif yang lebih optimal termasuk peningkatan jumlah daun tinggi tanaman dan produksi biomassa.

*Bacillus subtilis*, salah satu spesies bakteri yang berfungsi sebagai PGPR, telah terbukti mampu meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman. Bakteri ini membantu berbagai aktivitas fisiologis tanaman, seperti fiksasi nitrogen, melarutkan senyawa fosfat, dan pembuatan fitohormon yang merangsang pertumbuhan, serta perlindungan terhadap serangan patogen tanah, penyerapan fosfor dan nitrogen secara signifikan pada tanaman hortikultura. Keberhasilan PGPR dalam mendukung pertumbuhan tanaman sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kondisi lingkungan, ketersediaan bahan organik dalam tanah, serta kemampuan bakteri tersebut untuk beradaptasi dengan jenis tanaman dan karakteristik tanah tempatnya hidup.

Proses biosintesis IAA oleh bakteri dilakukan melalui pemanfaatan eksudat akar sebagai sumber energi, yang mengandung asam amino L-triptofan sebagai prekursor utama dalam pembentukan hormon tersebut. Keberadaan L-triptofan memungkinkan bakteri untuk mensintesis Indole Acetic Acid secara efisien dalam lingkungan rizosfer (Aini, Yamika, Azizah, dan Sukmarani, 2019) Hormon IAA yang dihasilkan oleh bakteri rhizosfer memacu pertumbuhan akar dengan

meningkatkan pemanjangan dan pembelahan sel sehingga luas permukaan akar meningkat dan berdampak pada peningkatan penyerapan hara mineral (Cahyani, Putrayani, Hasrullah, Ersyan, Aulia, dan Jaya, 2017). Menurut Gumelar dan Maryani (2020), Pembentukan umbi bawang merah dibantu oleh hormon pertumbuhan, terutama IAA yang dibuat oleh rhizobakteri. Ini pada akhirnya meningkatkan produktivitas tanaman.

PGPR berperan sebagai pupuk hayati (biofertilizer) dengan kemampuan menambahkan nitrogen dan melarutkan fosfat di dalam tanah. Menurut Cahyani, Nuraini, dan Pratomo (2018), PGPR memiliki peran dalam meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara esensial, khususnya nitrogen (N), yang secara langsung memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan vegetatif tanaman, termasuk percepatan pertumbuhan dan peningkatan jumlah daun. Beberapa jenis bakteri penambat nitrogen non-simbiotik dua jenis mikroorganisme yang tergolong dalam kelompok PGPR antara lain *Azotobacter sp.* dan *Azospirillum sp.*. Kedua jenis bakteri ini mampu mengikat nitrogen bebas ( $N_2$ ) dari atmosfer serta menguraikan bahan organik yang mengandung nitrogen, sehingga nitrogen tersebut menjadi tersedia bagi tanaman. *Azotobacter sp.*, yang merupakan bakteri gram-negatif, mengikat nitrogen dari udara dan mengonversinya menjadi senyawa ammonium ( $NH_4^+$ ). Senyawa ini kemudian digunakan oleh tanaman untuk membentuk protein-protein penting. Di samping itu, nitrogen memegang peranan penting dalam sintesis klorofil pada jaringan daun, yang berfungsi sebagai penyerap energi cahaya matahari guna mendukung berlangsungnya proses fotosintesis secara optimal (Baihaqi, Yamika dan Aini, 2018).

Beberapa jenis PGPR memiliki kemampuan untuk melarutkan fosfor yang terikat pada partikel tanah, sehingga meningkatkan ketersediaannya bagi tanaman. Beberapa jenis mikroorganisme yang berkontribusi dalam proses tersebut antara lain berasal dari genus *Aspergillus*, *Pseudomonas*, dan *Bacillus*, yang masing-masing memiliki peran spesifik dalam meningkatkan ketersediaan unsur hara serta mendukung pertumbuhan tanaman (Cahyani *et al.*, 2018). Penelitian yang dilakukan oleh Despita dan Rachmadiyanto (2021) Bakteri dari genus *Bacillus* dapat menghasilkan enzim fosfatase, yang berfungsi untuk menguraikan senyawa fosfat organik menjadi bentuk anorganik. Transformasi ini meningkatkan

ketersediaan fosfor di dalam tanah, membuatnya lebih mudah diakses tanaman untuk membantu aktivitas metabolisme dan meningkatkan pertumbuhannya. Pelarutan fosfat oleh mikroorganisme berlangsung melalui mekanisme peningkatan kelarutan senyawa fosfat organik yang disertai dengan sekresi asam-asam organik, seperti asam sitrat, glutamat, dan suksinat. Asam-asam tersebut bereaksi dengan ion logam seperti  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ , dan  $Mg^{2+}$ , membentuk senyawa kompleks yang stabil, sehingga memungkinkan pelepasan ion fosfat dari ikatannya. Fosfor yang telah tersedia kemudian diserap oleh tanaman dalam bentuk ion  $H_2PO_4^-$  dan  $HPO_4^{2-}$ , yang berperan esensial dalam mendukung proses fisiologis tanaman, khususnya selama fase pertumbuhan generatif (Wardhani, Yuliana dan Munir, 2019). Selain berfungsi dalam meningkatkan ketersediaan fosfor di dalam tanah, bakteri pelarut fosfat juga berpotensi menghasilkan zat pengatur tumbuh tanaman (ZPT). Kemampuan ini umumnya dimiliki oleh mikroorganisme yang berdasarkan pada permukaan akar tanaman, seperti *Pseudomonas fluorescens*, yang diketahui mampu mendukung pertumbuhan tanaman melalui mekanisme biologis yang kompleks. Selain kelompok bakteri pelarut fosfat, terdapat pula bakteri pelarut kalium yang berfungsi melarutkan unsur kalium (K) dari mineral seperti ortoklas dan illit. Mikroorganisme yang termasuk dalam kelompok bakteri pelarut fosfat cukup beragam, di antaranya adalah *Clostridium*, *Thiobacillus*, *Pseudomonas*, *Burkholderia*, *Bacillus mucilaginosus*, *Bacillus edaphicus*, *Bacillus circulans*, *Bacillus megaterium*, *Arthrobacter sp.*, serta *Paenibacillus sp.* Seluruh bakteri tersebut memiliki kemampuan untuk meningkatkan ketersediaan fosfor melalui proses pelarutan senyawa fosfat, baik secara kimia maupun biologis, sehingga mendukung pertumbuhan tanaman secara lebih optimal (Vullandari, 2017).

Yulistiana, Widowati dan Sutanto (2020), menyatakan bahwa bakteri rhizosfer selain berkontribusi pada proses pembentukan tanah, dan perbaikan kualitas tanah, dan siklus hara juga berperan sebagai pengendali hidup terhadap penyakit. Peran PGPR sebagai bioprotektan melalui produksi siderofor yang merupakan senyawa pengkhelat besi ( $Fe^{3+}$ ) spesifik. Salah satu mekanisme pertahanan yang dimiliki PGPR adalah kemampuan menghasilkan senyawa siderofor, yang berfungsi mengikat unsur besi di wilayah rizosfer sehingga tidak dapat dimanfaatkan oleh

mikroorganisme patogen. Dengan demikian, patogen kesulitan memperoleh unsur besi yang esensial bagi pertumbuhannya. Selain itu, PGPR juga mampu memproduksi sejumlah enzim penting seperti selulase, protease, dan kitinase, yang berperan sebagai agen antipatogen. Enzim-enzim ini memiliki sifat toksik terhadap berbagai jenis patogen tanaman, sehingga mendukung perlindungan biologis tanaman secara alami (Wijayanti, 2018).

Menurut Baihaqi *et al.*, (2018), terdapat dua metode umum dalam pemberian PGPR pada tanaman, yaitu melalui perendaman benih dan penyiraman di area sekitar perakaran. Tujuan dari perendaman benih adalah agar bakteri dapat mengkolonisasi benih sedini mungkin, sehingga mempercepat pemutusan masa dormansi. Sementara itu, aplikasi PGPR melalui penyiraman berfungsi sebagai langkah pelengkap untuk meningkatkan konsentrasi mikroba menguntungkan di zona rizosfer.

Menurut Ginting dan Tyasmoro (2017), beberapa parameter pertumbuhan tanaman bawang merah (*Allium ascalonicum* L. varietas Bauji) ditingkatkan oleh penerapan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR). Ini termasuk jumlah dan luas daun, jumlah umbi, bobot segar umbi, dan diameter umbi. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Lehar, Arifin, dan Sine (2018) menemukan bahwa tanaman bawang merah lokal dari Sabu Raijua dapat mencapai tinggi 42,45 cm, menghasilkan 13,89 anakan, dan total 57,54 helai daun setelah diberikan PGPR pada konsentrasi 20 ml/l.

## 2.5 Peran Pupuk Hayati PGPR Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman

PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*) merupakan kelompok mikroorganisme yang hidup di zona rizosfer atau sekitar sistem perakaran tanaman, yang memiliki peran strategis dalam menunjang pertumbuhan tanaman, meningkatkan kesuburan tanah, serta berkontribusi terhadap peningkatan hasil panen. PGPR adalah jenis pupuk hayati dengan tiga peran utama. Pertama, berfungsi sebagai biofertilizer yang mempercepat pertumbuhan tanaman dengan meningkatkan efisiensi penyerapan hara. Kedua, berfungsi sebagai biostimulan yang meningkatkan pertumbuhan tanaman dengan menghasilkan fitohormon

seperti sitokinin, giberelin, dan IAA. Terakhir, berfungsi sebagai bioprotektan yang melindungi tanaman dari patogen melalui mekanisme kompetisi.

PGPR berperan dalam mendukung pertumbuhan tanaman melalui sintesis dan regulasi berbagai hormon pertumbuhan di zona perakaran, seperti etilen, sitokinin, giberelin, dan indole-3-acetic acid (IAA). Di samping itu, mikroorganisme ini juga berkontribusi terhadap penyediaan unsur hara melalui mekanisme biofertilisasi, yang meliputi fiksasi nitrogen bebas ( $N_2$ ) secara asimbiosis, pelarutan fosfor (P) yang terikat dalam tanah, serta pengendalian patogen tanah melalui produksi metabolit sekunder yang bersifat antimikroba.

Menurut penelitian Rasyadan, Nugraheni dan Saptorini (2022), penggunaan Pupuk Hayati yang diaplikasikan pada tanaman sawi pakcoy memberikan pertumbuhan yang baik pada tanaman sawi pakcoy yang tinggi dan menghasilkan lebih banyak daun. Salah satu fungsi bakteri *Pseudomonas flouresens*, yang banyak ditemukan dalam pupuk hayati, adalah meningkatkan kelarutan unsur fosfor (P) dalam tanah. sehingga memperbaiki ketersediaan nutrisi tersebut bagi tanaman. Pupuk Hayati menguntungkan sebagai biostimulan, biofertilizer, dan bioprotectant (Mulyadi, 2018).

Pupuk Hayati terdiri dari mikroorganisme perakaran yang memberikan berbagai manfaat yang bersifat langsung maupun tidak langsung. Melalui berbagai mekanisme fungsional yang kompleks, pupuk hayati dapat membantu pertumbuhan tanaman secara langsung. Beberapa kemampuan utama yang dimiliki oleh mikroorganisme dalam pupuk hayati meliputi produksi fitohormon yang berfungsi dalam merangsang pertumbuhan tanaman, peningkatan efisiensi proses fiksasi nitrogen, perbaikan ketersediaan unsur hara esensial seperti fosfor, sulfur, besi, dan tembaga, serta dukungan terhadap proses kolonisasi akar oleh mikroba menguntungkan. Secara fungsional, pupuk hayati berperan secara langsung melalui tiga mekanisme utama, yaitu fiksasi nitrogen secara biologis (Biological Nitrogen Fixation atau BNF), pelarutan senyawa fosfat dalam tanah, serta sintesis berbagai jenis fitohormon yang penting bagi perkembangan tanaman (Dinas Pertanian, 2023).

Secara tidak langsung, pupuk hayati juga berperan dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui mekanisme pengendalian terhadap patogen

penyebab penyakit tanaman (fitopatogen). Sebagai agen bioprotektan, pupuk hayati berperan dalam menekan aktivitas organisme patogen melalui mekanisme antagonistik, salah satunya dengan memproduksi berbagai senyawa antimikroba. Senyawa-senyawa tersebut mencakup antibiotik, siderofor, enzim kitinase, serta hidrogen sianida (HCN), yang secara kolektif mampu menghambat pertumbuhan atau bahkan mematikan patogen di sekitar zona perakaran tanaman. Selain itu, mikroorganisme dalam pupuk hayati juga bersaing dengan patogen dalam memperebutkan nutrisi di lingkungan perakaran, serta mampu merangsang ketahanan sistemik tanaman yang memperkuat respons alami tanaman terhadap serangan penyakit (Anzuay, Frola, Angelina dan Taurian, 2015).

## 2.6 Pupuk NPK

Pupuk majemuk NPK termasuk ke dalam jenis pupuk anorganik yang paling banyak diaplikasikan dalam praktik budidaya pertanian, hal ini disebabkan oleh kandungan tiga unsur hara makro yang bersifat esensial, yakni nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Salah satu keunggulan utama pupuk ini adalah kemudahannya dalam hal penyimpanan dan distribusi, serta komposisi nutrisinya yang lengkap sehingga sering kali tidak memerlukan kombinasi dengan jenis pupuk tambahan lainnya untuk mencukupi kebutuhan hara tanaman. Selain itu, pupuk NPK memiliki peran krusial dalam mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal dan meningkatkan hasil produksi secara keseluruhan.

Tanaman melakukan dua peran utama unsur nitrogen (N), yaitu merangsang pertumbuhan, terutama selama fase vegetatif, dan berpartisipasi dalam pembentukan klorofil yang penting untuk fotosintesis. Membentuk protein, lemak, dan bahan kimia organik lainnya adalah tugas tambahan. Salah satu unsur hara makro yang paling penting adalah fosfor (P), yang membantu pertumbuhan sistem perakaran, terutama pada tahap awal perkembangan akar tanaman muda. Fosfor juga membantu dalam berbagai proses metabolisme sel, seperti proses asimilasi dan respirasi, serta berkontribusi dalam mempercepat pembentukan dan pematangan biji maupun buah dan juga berkontribusi dalam sintesis berbagai protein fungsional yang esensial bagi kelangsungan pertumbuhan dan reproduksi tanaman. Di sisi lain, kalium (K) berkontribusi besar dalam pembentukan

karbohidrat dan protein. Unsur ini juga memperkuat struktur fisik tanaman, sehingga bagian seperti daun, bunga, dan buah menjadi lebih tahan terhadap kerontokan. Tidak hanya itu, kalium juga membantu tanaman bertahan dalam kondisi lingkungan yang menantang, seperti kekeringan dan serangan patogen (Efendi, 2017).

Pupuk majemuk NPK memiliki kemampuan untuk menyediakan tiga unsur hara makro nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) dalam komposisi yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan fisiologis tanaman. Ini adalah salah satu keunggulan utama pupuk majemuk NPK. Karakteristik ini membuatnya lebih efektif dan berguna daripada pupuk tunggal yang hanya mengandung satu jenis hara. Petani sering menggunakan formulasi NPK 16-16-16. Formula ini mengandung 16% nitrogen, dengan 9,5 persen dalam bentuk amonium dan 6,5 persen dalam bentuk nitrat. Pupukan ini memiliki keuntungan dari segi karakteristik fisik karena tidak terlalu higroskopis. Ini membuatnya lebih stabil selama penyimpanan dan tidak mudah menggumpal (Listari, Sumardi, dan Djamilah, 2019).

## 2.7 Mekanisme Penyerapan Unsur Hara

Unsur hara merupakan komponen nutrisi esensial yang diperlukan oleh tanaman guna menunjang proses pertumbuhan dan perkembangan secara optimal. Tanaman menyerap unsur hara dari dua kelompok utama: unsur hara makro dan mikro. Unsur mikro hanya dapat diserap ketika tersedia dalam bentuk ion terlarut. Ada tiga cara umum di mana akar tanaman menyerap unsur hara: difusi, aliran massa, dan intersepsi akar, masing-masing dipengaruhi oleh ketersediaan ion di dalam tanah, aktivitas akar, serta kondisi lingkungan sekitar zona perakaran utama.

### 2.7.1 Intersepsi Akar

Salah satu mekanisme penyerapan unsur hara adalah intersepsi akar, yang terjadi selama pertumbuhan akar tanaman. Proses ini berlangsung ketika akar memanjang, membentuk cabang-cabang baru, dan memperluas jaringan perakarannya. Perkembangan tersebut memungkinkan sistem akar menjangkau bagian media tanam yang sebelumnya belum tersentuh, sehingga memperbesar potensi penyerapan nutrisi. Kedekatan posisi unsur hara terhadap sistem perakaran

sangat menentukan efisiensi penyerapan nutrien oleh tanaman. Semakin dekat letak ion hara dengan permukaan akar, khususnya bulu-bulu akar, maka semakin tinggi peluang terjadinya penempelan dan difusi ke dalam jaringan tanaman.

Setelah mencapai permukaan akar, unsur hara tersebut akan diserap melalui berbagai mekanisme fisiologis, seperti difusi pasif, transport aktif, atau melalui jalur apoplas dan simplas. Berdasarkan perbedaan antara jumlah unsur hara yang tersedia di permukaan akar (pasokan) dengan jumlah yang diserap oleh akar, dapat terbentuk zona penimbunan (*accumulation zone*), yaitu area dengan akumulasi unsur hara di permukaan akar, serta zona pengurasan (*depletion zone*), yaitu area dengan penurunan konsentrasi unsur hara di sekitar permukaan akar (Wiratmaja, 2016).

#### 2.7.2 Aliran Massa

Aliran massa merupakan salah satu mekanisme penyerapan unsur hara oleh tanaman yang terjadi melalui pergerakan larutan tanah yang mengandung air dan unsur mineral menuju permukaan akar. Proses ini dipicu oleh transpirasi, yakni hilangnya air dari jaringan daun melalui stomata, yang menciptakan daya hisap sehingga air dan ion hara terangkut secara bersamaan ke zona rizosfer. Mekanisme ini dipicu oleh adanya gradien potensial air, di mana gaya kohesi antar molekul air menciptakan tarikan berantai mulai dari penguapan air di daun hingga pergerakan air dari tanah menuju akar. Saat molekul air menguap dari permukaan daun, kekosongan yang terbentuk segera digantikan oleh molekul air dari lapisan di bawahnya, yang pada akhirnya menarik larutan dari luar sel epidermis akar ke dalam, sembari membawa unsur hara yang berada dalam kontak langsung.

Mekanisme aliran massa berlangsung secara pasif, tanpa memerlukan energi metabolismik dari tanaman, dan memiliki peran esensial dalam memfasilitasi pergerakan larutan hara dari dalam tanah ke permukaan sistem perakaran tanaman. Efektivitas penyerapan melalui jalur ini sangat dipengaruhi oleh dua faktor utama, yakni jumlah ion hara dalam larutan tanah dan volume air yang ditranspirasikan oleh tanaman. Guna mengevaluasi efisiensi mekanisme ini, digunakan parameter yang dikenal sebagai koefisien transpirasi, yaitu jumlah air yang diuapkan oleh tanaman per satuan bobot kering tajuk. Nilai koefisien ini umumnya berkisar antara

300 hingga 600 liter air per kilogram berat kering tajuk tanaman, atau per satuan luas hektar.

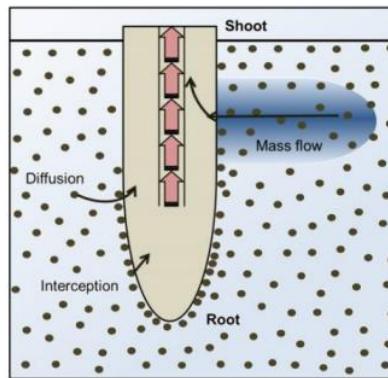
Sejumlah variabel memengaruhi efisiensi aliran massa dalam membawa unsur hara ke permukaan akar, antara lain: (1) kondisi fisik dan kimia media tanam, (2) faktor iklim seperti suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya, (3) tingkat kelarutan serta mobilitas unsur hara, dan (4) jenis atau spesies tanaman yang dibudidayakan.

### 2.7.3 Difusi

Difusi merupakan mekanisme perpindahan molekul unsur hara dari area konsentrasi tinggi ke area konsentrasi rendah sampai kondisi keseimbangan tercapai. Proses ini bersifat pasif dan terjadi secara alami sebagai respons terhadap perbedaan gradien konsentrasi di sekitar zona perakaran tanaman. Dalam konteks perakaran tanaman, difusi terjadi ketika unsur hara berpindah dari larutan tanah menuju permukaan akar akibat adanya perbedaan konsentrasi atau concentration gradient antara kedua area tersebut. Berdasarkan temuan dari berbagai studi, diketahui bahwa unsur hara seperti kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) umumnya diserap oleh tanaman melalui mekanisme aliran massa yang dipicu oleh proses transpirasi. Sebaliknya, unsur kalium (K) dan fosfor (P) cenderung ditransportasikan ke zona perakaran melalui mekanisme difusi, sebagai respons terhadap gradien konsentrasi ion dalam larutan tanah.

Mengingat bahwa proses difusi tidak dapat diukur secara langsung di lapangan, estimasi jumlah unsur hara yang diserap melalui mekanisme ini dilakukan secara tidak langsung. Pendekatan yang digunakan adalah dengan menghitung selisih antara total penyerapan hara oleh tanaman dan akumulasi penyerapan yang terjadi melalui mekanisme aliran massa serta intersepsi akar selama pertumbuhan (Wiratmaja, 2016).

Konsentrasi unsur hara di zona rhizosfer umumnya lebih rendah dibandingkan dengan daerah di luar zona tersebut. Perbedaan konsentrasi ini mendorong terjadinya pergerakan unsur hara dari wilayah non-rhizosfer ke wilayah rhizosfer. Akibatnya, unsur hara yang sebelumnya tidak berada dalam kontak langsung dengan permukaan akar akan berpindah dan akhirnya dapat diserap oleh tanaman.



Sumber : Nurlaly, 2020

## 2.8 Interaksi PGPR dan Pupuk NPK

Penggunaan pupuk hayati dan NPK memiliki hubungan yang erat, karena mikroorganisme dari pupuk hayati dapat membantu tanaman untuk melarutkan fosfor sehingga penggunaan pupuk NPK dapat lebih efektif diserap oleh tanaman (Anisa, 2020).

Menurut penelitian Kezia (2020) Kombinasi antara pupuk hayati dan pupuk NPK menunjukkan interaksi sinergis yang mampu mendukung peningkatan pertumbuhan tanaman secara signifikan. Kondisi tersebut terjadi karena adanya mikroorganisme dalam pupuk hayati yang berkontribusi dalam meningkatkan efisiensi perolehan dan penyerapan unsur hara oleh tanaman dari dalam tanah. Dengan demikian, perpaduan kedua jenis pupuk ini dapat memperkuat ketersediaan nutrisi serta mengoptimalkan proses fisiologis tanaman yang mendukung pertumbuhan dan produktivitas. Penerapan pupuk hayati secara bersamaan dengan pupuk anorganik NPK telah menunjukkan efektivitas dalam meningkatkan jumlah daun tanaman secara nyata. Peningkatan ini erat kaitannya dengan peran aktif rhizobakteri yang terkandung dalam pupuk hayati, yang bekerja melalui berbagai mekanisme biologis untuk merangsang pertumbuhan tanaman. Salah satu mekanisme utamanya adalah peningkatan efisiensi penyerapan unsur hara dan produksi senyawa fitohormon. Melalui aktivitas metabolismik mikroorganisme tersebut, terjadi stimulasi terhadap akumulasi unsur-unsur hara esensial seperti nitrogen (N) dan fosfor (P), serta senyawa pendukung lainnya yang

berkontribusi terhadap proses fisiologis tanaman, khususnya dalam fase pertumbuhan vegetatif, sehingga merangsang pembentukan daun dalam jumlah lebih banyak.

Pupuk hayati dan NPK mepengaruhi hasil bobot, karena mikroorganisme pupuk hayati dapat mensintesis auksin yang mendorong pembelahan sel. Penggunaan pupuk hayati memiliki potensi untuk mengurangi ketergantungan terhadap pupuk anorganik seperti NPK. Hal ini menjadikannya sebagai salah satu strategi budidaya tanaman yang lebih ramah lingkungan, karena dapat menekan penumpukan residu bahan kimia di dalam tanah. Keberadaan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) dalam pupuk hayati berkontribusi secara signifikan terhadap peningkatan pertumbuhan vegetatif, produktivitas hasil panen, serta perbaikan kualitas dan kesuburan tanah secara menyeluruh. Menurut temuan yang dipaparkan oleh Kezia (2020), pemanfaatan pupuk hayati terbukti efektif dalam menyediakan nutrien penting yang dibutuhkan tanaman. Ketersediaan unsur hara yang mencukupi ini memungkinkan dilakukannya pengurangan dosis pupuk anorganik, terutama NPK, secara signifikan tanpa menimbulkan penurunan terhadap performa pertumbuhan tanaman.