

FISIOLOGI TUMBUHAN

**Rizki Nisfi Ramdhini
Muliana GH
Latifa Nuraini
Danang Budi Setyawan
Ria Megasari
Muhammad Rifqi Hariri
Magfirah Rasyid
Irfan Martiansyah
Aulia Rahmawati
Hida Arliani N.A**



GETPRESS INDONESIA

FISIOLOGI TUMBUHAN

Penulis :

Rizki Nisfi Ramdhini
Muliana GH
Latifa Nuraini
Danang Budi Setyawan
Ria Megasari
Muhammad Rifqi Hariri
Magfirah Rasyid
Irfan Martiansyah
Aulia Rahmawati
Hida Arliani N.A

ISBN :

Editor : Dr. Oktavianis, M.Biomed.
Tri Putri Wahyuni, S.Pd.

Penyunting: Yuliatr Novita, M.Hum.

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd.

Penerbit: CVGETPRESS INDONESIA
Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi:

Jl. Palarik RT 01 RW 06, Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tengah, Padang, Sumatera Barat

website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, November 2023

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur kehadiran Allah SWT, atas limpahan rahmat dan hidayahNya, maka Penulisan Buku dengan judul Fisiologi Tumbuhan dapat diselesaikan dengan kerjasama tim penulis. Fisiologi Tumbuhan merupakan buku yang memberikan pemahaman mengenai bagian-bagian tumbuhan mulai dari organel sampai jaringan yang berkaitan dengan proses pertumbuhan, perkembangan, dan respon terhadap perubahan lingkungan. Buku ini berisikan bahasan mengenai Struktur dan Fungsi Sel Tumbuhan, Air & Unsur Hara Mineral, Enzim dan Metabolisme, Fotosintesis, Respirasi Sel, Metabolisme N dan S, Pertumbuhan dan Perkembangan, Bahan Organik Primer dan Sekunder, Gerak pada Tumbuhan, dan Stress Fisiologis.

Buku ini masih banyak kekurangan dalam penyusunannya. Oleh karena itu, kami sangat mengharapkan kritik dan saran demi perbaikan dan kesempurnaan buku ini selanjutnya. Kami mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian Buku ini. Semoga Buku ini dapat menjadi sumber referensi dan literatur yang mudah dipahami.

Padang, Oktober 2023
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL.....	vii
BAB 1 STRUKTUR DAN FUNGSI SEL TUMBUHAN	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Struktur dan Fungsi Sel Tumbuhan.....	2
1.2.1 Bagian Eksternal Sel	2
1.2.2 Bagian Internal Sel	4
DAFTAR PUSTAKA.....	13
BAB 2 AIR & UNSUR HARA MINERAL.....	15
2.1 Pendahuluan	15
2.2 Air dan Peranannya bagi Tumbuhan	20
2.3 Unsur Hara Makro	21
2.3.1 Karbon (C).....	21
2.3.2 Oksigen (O)	22
2.3.3 Hidrogen (H)	22
2.3.4 Nitrogen (N)	22
2.3.5 Fosfor (P).....	22
2.3.6 Kalium (K).....	23
2.3.7 Kalsium (Ca).....	23
2.3.8 Magnesium (Mg)	24
2.3.9 Belerang (S).....	24
2.4 Unsur Hara Mikro	25
2.4.1 Besi (Fe)	25
2.4.2 Mangan (Mn)	25
2.4.3 Seng (Zn).....	25
2.4.4 Boron (B)	26
2.4.5 Molybdenum (Mo).....	26
2.4.6 Klorin (Cl).....	27
2.4.7 Nikel (Ni)	27
2.4.8 Tembaga (Cu)	27
2.5 Interaksi Air dan Unsur Hara pada Tumbuhan	28
DAFTAR PUSTAKA.....	31
BAB 3 ENZIM DAN METABOLISME.....	33
3.1 Pengenalan Metabolisme dan Enzym	33
3.2 Modifikasi Metabolit pada Tumbuhan	38
DAFTAR PUSTAKA.....	43
BAB 4 FOTOSINTESIS.....	44
4.1 Dasar-Dasar Fotosintesis	44

4.1.1 Peran Fotosintesis untuk Kehidupan	44
4.1.2 Sejarah Penemuan Fotosintesis	46
4.2 Kloroplas: Struktur Penunjang Fotosintesis.....	48
4.2.1 Morfologi dan Struktur Kloroplas	48
4.2.2 Peran Kloroplas dalam Fotosintesis.....	49
4.2.3 Arti Penting Kloroplas	50
4.3 Reaksi Terang	51
4.3.1 Tahap-Tahap Reaksi Terang	51
4.3.2 Peran Reaksi Terang	52
4.4 Reaksi Gelap (Siklus Calvin).....	53
4.4.1 Tahap-Tahap Siklus Calvin	53
4.4.2 Peran Siklus Calvin.....	54
4.5 Fotosintesis Tanaman C4 dan CAM	55
4.5.1 Fotosintesis pada Tanaman C4.....	55
4.5.2 Fotosintesis pada Tanaman CAM (Crassulacean Acid Metabolism)	56
4.6 Fotorespirasi.....	58
4.7 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Fotosintesis	60
DAFTAR PUSTAKA.....	63
BAB 5 RESPIRASI SEL	65
5.1 Pengertian	65
5.2 Jenis – Jenis Respirasi	68
5.2.1 Respirasi Aerobik (aerob)	69
5.2.2 Respirasi Anaerobik (Anaerob).....	77
5.3 Faktor yang Mempengaruhi Respirasi	77
DAFTAR PUSTAKA.....	80
BAB 6 METABOLISME N DAN S.....	81
6.1 Pendahuluan	81
6.2 Metabolisme Nitrogen	83
6.3 Metabolisme Sulfur	87
DAFTAR PUSTAKA.....	90
BAB 7 PERTUMBUHAN DAN PERKEMBANGAN	95
7.1 Pengertian Pertumbuhan dan PerkembanganTumbuhan	95
7.1.1 Pengertian Pertumbuhan.....	95
7.1.2 Pengertian Perkembangan	97
7.2 Fase Pertumbuhan dan Perkembangan.....	98
7.2.1 Perkecambahan	98
7.2.2 Pertumbuhan Primer	102
7.2.3 Pertumbuhan Sekunder.....	104
7.3 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Pertumbuhan dan Perkembangan.....	106

7.3.1 Faktor Internal.....	107
7.3.2 Faktor Eksternal.....	109
DAFTAR PUSTAKA.....	112
BAB 8 BAHAN ORGANIK PRIMER DAN SEKUNDER.....	113
8.1 Pendahuluan	113
8.2 Bahan Organik.....	114
8.2.1 Pengertian Bahan Organik.....	114
8.2.2 Klasifikasi Bahan Organik	116
8.2.3 Sumber Bahan Organik	118
8.2.4 Pengaruh Berbagai Faktor Terhadap Kadar Bahan Organik Tanah.....	121
8.2.5. Peran Bahan Organik	123
8.2.6 Manfaat Bahan Organik Untuk Mendukung Fisiologi Tumbuhan	127
8.2.7. Model Siklus Karbon Organik yang Terlibat dengan Pertumbuhan Tanaman.....	130
DAFTAR PUSTAKA.....	134
BAB 9 GERAK PADA TUMBUHAN	145
9.1 Pendahuluan	145
9.2 Gerak Esionom/Etionom.....	146
9.2.1 Gerak Tropisme	146
9.2.2 Gerak Nasti	149
9.2.3 Gerak Taksis.....	151
9.3 Gerak Endonom	152
9.2.1 Gerak Higroskopis	152
9.2.2 Gerak Nutasi.....	152
DAFTAR PUSTAKA.....	153
BAB 10 STRESS FISILOGIS.....	155
10.1 Pendahuluan	155
10.2 Faktor Stress pada Tanaman	156
10.3 Adaptasi Tanaman Terhadap Stress Fisiologis.....	157
10.3.1 Adaptasi Konstitutif	157
10.3.2 Adaptasi Fakultatif/ Terinduksi	158
10.4 Respon Fisiologi Terhadap Stress	159
10.4.1 Respon Fisiologi terhadap Stress Kekeringan dan Genangan.....	159
10.4.2 Respon Fisiologi terhadap Stress Salinitas.....	161
10.4.3 Respon Fisiologi terhadap Stress Suhu Tinggi.....	162
10.4.4 Respon Fisiologi Stress Cahaya Intoleran	164
10.4.5 Respon Fisiologi terhadap Stress Masam.....	165
DAFTAR PUSTAKA.....	166

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Struktur Membran Sel	2
Gambar 1.2 Lapisan Dinding Sel	3
Gambar 1.3. Struktur Dinding Sel	3
Gambar 1.4 Struktur Nukleus.....	5
Gambar 1.5 Struktur Mitokondria.....	7
Gambar 1.6 Struktur Ribosom	8
Gambar 1.7 Struktur RE.....	9
Gambar 1.8 Struktur Aparatus Golgi.....	10
Gambar 1.9 Struktur Plastida	11
Gambar 1.10 Struktur Vakuola.....	12
Gambar 2.1 Struktur penampang Melintang Akar	15
Gambar 2.2 Transportasi Ekstravaskular pada Tumbuhan	17
Gambar 2.3 Ketersediaan Air dan Mineral Tanah	19
Gambar 2.4. Dolomit	24
Gambar 2.5. Kekurangan Unsur Hara Pada Tumbuhan.....	28
Gambar 3.1 Reaksi Eksergonik Digabungkan dengan Reaksi Endergonik	39
Gambar 3.2 Struktur Inti Metabolit Sekunder Tumbuhan	40
Gambar 3.3 Modifikasi Metabolit Sekunder Sebagai Respon Terhadap Pathogen.....	43
Gambar 4.1 Proses Reaksi Fotosintesis	47
Gambar 4.2 Struktur Kloroplas	50
Gambar 4.3. Proses Reaksi Terang.....	52
Gambar 4.4 Proses Siklus Calvin pada Reaksi Gelap.....	55
Gambar 4.5 Proses Reaksi Fotosintesis Pada Tanaman C4	57
Gambar 4.6 Proses Reaksi Fotosintesis Pada Tanaman CAM	58
Gambar 4.7. Proses Reaksi Fotorespirasi pada Tumbuhan C3.....	60
Gambar 5.1 Proses dan Tahapan Glikolisis, Perubahan Glukosa Menjadi Asam Piruvat	71
Gambar 5.2 Siklus Krebs.....	75
Gambar 6.1 Gambaran Skematis Fluks Nitrogen dan Sulfur dalam Efisiensi Penggunaan Nutrien pada Tumbuhan	82
Gambar 6.2 Model Konseptual Metabolisme Nitrogen pada Tumbuhan	84
Gambar 6.3 Transporter Nitrogen dan Enzim yang Berperan dalam Penyerapan dan Metabolisme Nitrogen pada Populus trichocarpa	85
Gambar 6.4 Simbiosis Antara Bakteri Penambat Nitrogen dan Akar Tumbuhan	86

Gambar 6.5 Metabolisme Asimilasi Sulfur pada Kompartemen Subseluler Sel Tumbuhan	88
Gambar 6.6 Regulasi Positif dan Negatif pada Metabolisme Asimilasi Sulfur	89
Gambar 7.1 Pertumbuhan dan Perkembangan Tumbuhan	98
Gambar 7.2 Kotiledon Berdaging Menyimpan Makanan yang Diserap dari Endosperma Sebelum Benih Itu Berkecambah.....	99
Gambar 7.3 Perkecambahan dan Perkembangan Biji	100
Gambar 7.4 Perbedaan Perkecambahan Epigeal dan Hipogeal	102
Gambar 7.5 Pertumbuhan Primer dan Pertumbuhan Sekunder	105
Gambar 8.1 Diagram Metode Fraksinasi fisik yang Paling Umum Digunakan untuk Mengisolasi Bahan Organik Berdasarkan Ukuran atau Kepadatan yang Terikat Mineral dalam Fraksi Ukuran Partikel dan Agregat Primer	125
Gambar 8.2 Model Siklus Bahan Organik Karbon	133
Gambar 10.1 Diagram Fotosintesis C3,C4,dan CAM.....	158
Gambar 10.2 Visual Tanaman Barley pada Berbagai Konsentrasi NaCl.....	162
Gambar 10.3 Suhu Tinggi Menginduksi Terjadinya Penghambatan Evolusi Oksigen dan Aktivitas PSII	163

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Bentuk Unsur Hara Berupa Kation & Anion yang Diserap Tanaman.....	30
Tabel 3.1. Klasifikasi Organisme Berdasarkan Sumber Energi dan Karbon.....	35

BAB 1

STRUKTUR DAN FUNGSI SEL TUMBUHAN

Oleh Rizki Nisfi Ramdhini

1.1 Pendahuluan

Fisiologi tumbuhan adalah ilmu yang mempelajari tentang fungsi dari setiap bagian tumbuhan yang meliputi sel, jaringan dan organ dalam proses pertumbuhan, perkembangan dan respon tumbuhan terhadap lingkungan. Tumbuhan sendiri merupakan organisme autotrof yang tersusun atas banyak sel (multiseluler). Sama halnya dengan makhluk hidup lainnya, sel tumbuhan memiliki pengertian sebagai unit struktural dan fungsional terkecil penyusun tumbuhan. Dalam hal ini, dapat disimpulkan bahwa seluruh fungsi kehidupan pada tumbuhan diatur dan berlangsung di dalam sel (Koryati, 2021). Tumbuhan memiliki tipe sel eukariot dimana inti sel (nukleus) dilapisi oleh membran sebagai *barrier*, sehingga materi genetik yang terdapat di dalam inti sel terpisah dari bagian sel lainnya.

Sel tumbuhan terdiri dari membran plasma, protoplasma dan dinding sel. Membran plasma merupakan bagian terluar dari sel yang berfungsi mengatur keluar masuk zat dan bersifat semipermeabel. Protoplasma merupakan sitosol yang terdiri sitoplasma dan neukloplasma. Sitoplasma merupakan tempat beradanya organela seperti mitokondria, retikulum endoplasma, ribosom, badan golgi dan plastida, nukleoplasma merupakan sitosol di dalam inti sel yang berperan menjaga bentuk dan struktur inti sel. Dinding sel merupakan matriks ekstraseluler yang berperan untuk

melindungi bagian dalam sel dari lingkungan luar (Starr, 2012; Rosanti, 2013).

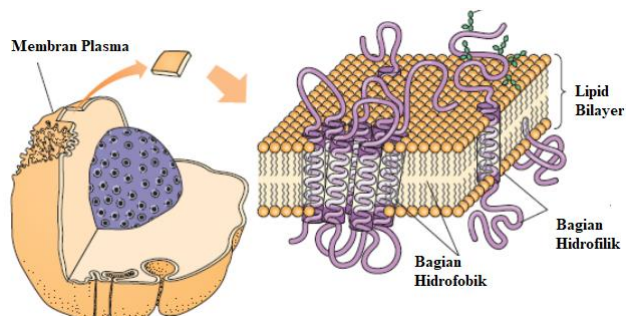
1.2 Struktur dan Fungsi Sel Tumbuhan

Sel pada tumbuhan terdiri dari struktur eksternal dan internal. Bagian eksternal terdiri membran sel dan dinding sel, sedangkan bagian internal terdiri dari nukleus, sitoplasma dan sitoskeleton.

1.2.1 Bagian Eksternal Sel

1. Membran Sel

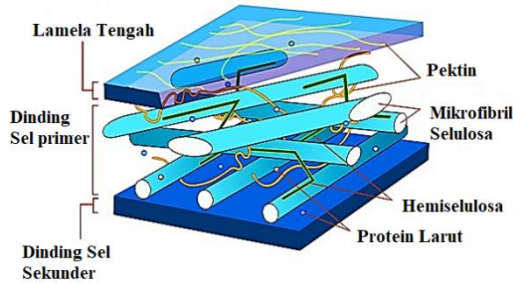
Membran sel merupakan lapisan tipis berukuran 7,5-10 nm yang berfungsi sebagai pembentuk dan pelindung sel. Membran sel bersifat semipermeabel, sehingga hanya molekul atau ion tertentu yang dapat melewati membran sel secara aktif maupun pasif. Dalam hal ini membran sel berperan mengatur keluar dan masuknya zat dari luar ke dalam sel atau sebaliknya. Secara strukturnya, membran sel terdiri dari bilayer fosfolipid, yakni lapisan membran dengan bagian fosfat yang bersifat hidrofilik (mudah bercampur dengan air) dan lapisan membran dengan bagian lipid yang bersifat hidrofobik (tidak mudah bercampur dengan air). (Gambar 1.1) Struktur membran sel demikian dapat sebagai pengontrol perubahan permeabilitas ion dalam komunikasi sel dan sebagai pelindung organela sel di dalamnya.



Gambar 1.1. Struktur Membran Sel

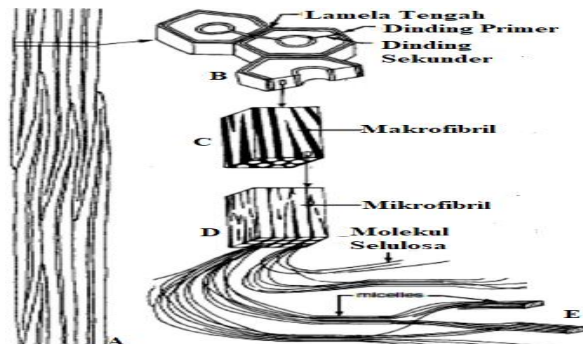
2. Dinding Sel

Dinding sel merupakan matriks ekstraseluler berukuran $0,1 \mu\text{m}$ yang melapisi bagian luar dari membran sel tumbuhan. Dinding sel pada tumbuhan terdiri dari tiga lapisan dinding sel, yakni lapisan primer, lamela dan sekunder (Gambar 1.2).



Gambar 1.2 Lapisan Dinding Sel

Lapisan primer merupakan lapisan tipis yang dibentuk oleh sel kali pertama. Lapisan primer terletak di bagian paling dalam dari dinding sel, bersifat permeabel dan memiliki komponen utama sel yakni selulosa. Molekul selulosa terhimpun menjadi sekumpulan berkas yang disebut mikrofibril. Struktur mikrofibril berupa rantai molekul selulosa tersusun teratur yang disebut misel (Gambar 1.3).



Gambar 1.3

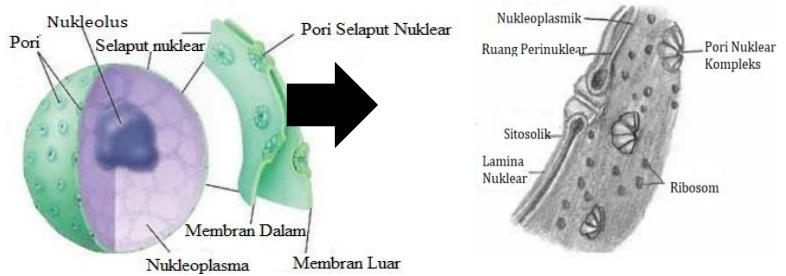
Struktur Dinding Sel: (A) berkas sel serat; (B) Satu lapis dinding primer dan tiga lapis dinding sekunder; (C) Makrofibril selulosa (putih) dan ruang antar fibril (hitam); (D) Mikrofibril (putih); (E) Struktur mikrofibril

Lapisan lamela tengah merupakan lapisan terluar dari dinding sel, memiliki komponen sel penyusun yaitu pektin yang berfungsi menempelkan satu sel dengan sel yang lainnya. Dinding sel sekunder adalah lapisan yang terbentuk saat sel dewasa. Lapisan tersebut memiliki ukuran yang lebih tebal dibandingkan lapisan sebelumnya, serta tersusun dari komponen selulosa dan lignin. Lignin merupakan polimer fenol yang terbentuk dari polimerisasi tiga unit monomer utama. Lignin mengandung beberapa lignin p-hidroksifenil. Lignifikasi mulai pada substansi interseluler di bagian tengah lamela, kemudian menyebar menjadi lapisan dinding sel primer dan pada akhirnya membentuk dinding sel sekunder. Lignin mempunyai fungsi utama sebagai antimikroba dan berperan dalam transport air dan pendukung mekanik pada evolusi tumbuhan rendah

1.2.2 Bagian Internal Sel

1. Nukleus (Inti Sel)

Nukleus (Inti Sel) merupakan bagian sel yang berperan sebagai seluruh aktivitas pada sel eukariotik. Hal ini dikarenakan di dalam nukleus terdapat materi genetik berupa DNA yang tersimpan di dalam kromosom. Nukleus berukuran 10-20 μm , memiliki selaput nuklear berupa struktur selaput ganda (*lipid bilayer*) berpori yang dipisahkan oleh ruang perinuklear. Selain berfungsi sebagai pemisah nukleus dengan sitoplasma, selaput nuklear juga berfungsi untuk mengatur keluar dan masuknya zat-zat ke atau dari nukleus. Struktur selaput nuklear dapat dilihat pada Gambar 1.4, dimana selaput nuklear terdiri atas selaput dalam (nukleoplasmik) dan selaput luar (sitosolik) yang terdapat ribosom sebagai tempat terjadinya sintesa protein.



Gambar 1.4 Struktur Nukleus (Raven, PH & Johnson, 2002)

Pada Gambar 1.4 menunjukkan bahwa di dalam nukleus juga terdapat nukleolus dan nukleoplasma. Nukleolus atau disebut juga anak inti merupakan komponen dasar sel yang terletak di dalam nukleus dengan karakteristik berbentuk padat, gelap dan tidak bermembran. Nukleolus berfungsi sebagai tempat terjadinya biogenesis ribosom melalui proses transkripsi RNA ribosom yang selanjutnya diangkut menuju sitoplasma untuk proses sintesa protein. Nukleoplasma atau disebut juga cairan inti merupakan substansi transparan berbentuk cairan kental seperti gel (semi-solid), tersusun dari protein, garam mineral, DNA, RNA dan kromatin. Dalam fungsinya, nukleoplasma berperan sebagai media suspensi untuk organela yang berada di dalam nukleus, tempat mengolah berbagai enzim yang diperlukan untuk proses metabolisme sel dan menjaga stabilitas bentuk dan struktur nukleus.

2. Sitoplasma

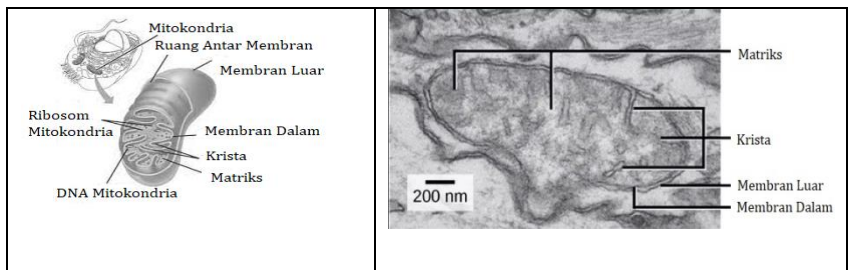
Sitoplasma merupakan matriks berbentuk cairan (sitosol) yang terletak di dalam membran plasma dan di luar nukleus. Sitoplasma berfungsi sebagai tempat menyimpan bahan-bahan yang diperlukan dalam proses metabolisme sel, seperti air, karbohidrat, protein, lemak, garam mineral dan vitamin. Selain itu, sitoplasma juga berfungsi sebagai tempat untuk organel sel menjalankan fungsinya. Organel sel yang terdapat dalam

sitoplasma pada sel tumbuhan diantaranya mitokondria, ribosom, retikulum endoplasma, aparatus golgi, plastida dan vakuola.

a. Mitokondria

Merupakan organel terbesar di dalam sitosol sel eukariotik dengan memiliki ukuran diameter antara 0,5–1 μm dan panjang 1-4 μm . Struktur mitokondria terdiri atas membran luar, membran dalam, ruang antar membran, krista dan matriks. (1) Membran luar merupakan bagian terluar dari mitokondria yang tersusun atas fosfolipid dengan ukuran diameter 60-75 Å. Pada membran tersebut, terdapat porin yang merupakan protein membran integral. Porin berupa pori-pori yang bergantung pada tegangan anion *Voltage-dependent anion channel* (VDAC) pada membran membentuk saluran sebagai transportasi berbagai molekul ke luar dan masuk mitokondria seperti nukleotida, ion dan hasil metabolisme antara sitosol dan ruang antar membran. Selain itu, pada membran luar mitokondria juga terdapat beberapa enzim *monoamine oxidase* (MAO), *rotenone-insensitive NADH-cytochrome c-reductase* (RI-NCR), *kynurenine hydroxylase* (KAT) dan asam lemak Co-A ligase. Enzim-enzim tersebut terlibat dalam proses pemanjangan rantai asam lemak, oksidasi epinefrin dan degradasi triptofan. (2) Membran dalam merupakan bagian dalam dari mitokondria yang tersusun atas protein fosfolipid dengan protein integral membran diantaranya NADH dehidrogenase, Suksinat dehidrogenase, Sitokrom c reduktase, Sitokrom c oksidase. Berdasarkan strukturnya, membran dalam mengelilingi matriks berisi cairan yang membentuk lekukan atau lipatan ke dalam krista. Berbeda dengan membran luar, membran dalam mitokondria tidak ditemukan adanya porin. Oleh karena itu, membran dalam tidak mudah dilalui oleh molekul atau ion jika tanpa adanya transport berenergi. (3) Ruang antar membran atau disebut juga

perimitokondrial merupakan ruang yang berada diantara membran luar dan membran dalam mitokondria. Ruang tersebut mengandung ion dan molekul sama seperti di sitosol. Selain itu, terdapat juga protein sitokrom c yang berperan sebagai pembawa elektron dalam proses transport elektron. (4) Krista merupakan lipatan dari membran dalam mitokondria yang memberikan perluasan berkelok kelok seperti labirin. Perluasan tersebut sebagai reaksi dalam mitokondria untuk meningkatkan produksi ATP. (5) Matriks merupakan ruang paling dalam dari mitokondria yang dilapisi oleh membran dalam dan berfungsi sebagai tempat terjadinya metabolisme sel seperti oksidasi piruvat (respirasi seluler) dan asam lemak. Di dalam matriks mitokondria terdapat protein, ribosom, RNA dan DNA sirkuler. Adanya ribosom menjadikan mitokondria mampu melakukan proses sintesis protein, dan adanya DNA sirkuler mampu mengkode enzim dan protein yang diperlukan dalam aktivitas mitokondria dalam produksi ATP. Struktur mitokondria dapat dilihat pada Gambar 1.5.

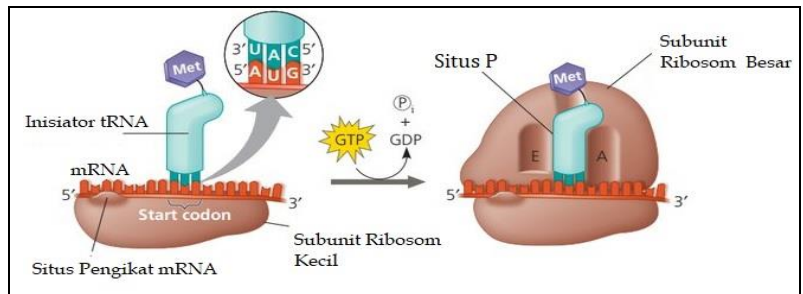


Gambar 1.5 Struktur Mitokondria

b. Ribosom

Ribosom merupakan organel sel berukuran kecil dengan diameter antara 15-12 nm. Ribosom terdiri dari protein dan RNA ribosomal RNA (rRNA) yang merupakan tempat terjadinya sintesis protein. Setiap ribosom memiliki 1 subunit berukuran besar dan 1 subunit berukuran kecil. Di dalam sel, ribosom tersuspensi di

sitosol, melekat pada retikulum endoplasma (RE) kasar atau membran sel. Ribosom sendiri memiliki fungsi sebagai penerjemah mRNA dalam proses pembentukan rantai polipeptida (protein) melalui asam amino yang dibawa oleh tRNA pada proses translasi. Dalam hal ini ribosom menyediakan situs A, P dan E sebagai tempat tRNA menemukan kodon yang sesuai dengan cetakan mRNA dan mengirimkan asam aminonya. Situs A sebagai lokasi untuk mengikat tRNA-aminoasil, yang melekat pada tRNA dengan asam amino berikutnya yang kemudian ditambahkan ke rantai polipeptida. Situs P situs sebagai lokasi untuk mengikat tRNA-peptidyl, yang merupakan agen pengikat tRNA yang melekat pada rantai polipeptida yang sedang tumbuh. Situs E sebagai tempat tRNA dilepaskan. Struktur ribosom dapat dilihat pada Gambar 1.6.

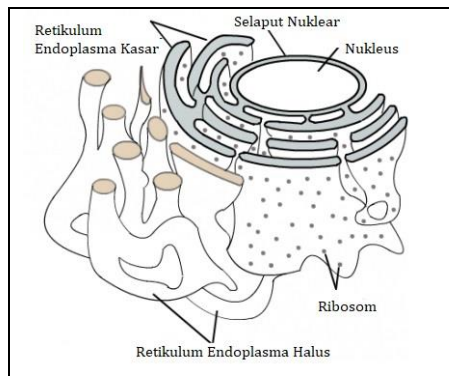


Gambar 1.6 Struktur Ribosom (Campbell *et al.*, 2008)

c. Retikulum Endoplasma

Retikulum endoplasma (RE) merupakan sistem vakuolar kompleks yang terdiri atas dua lapis membran sebagai pembatas sisternal dan sitosol. Retikulum Endoplasma membentang dari nukleus ke seluruh sitoplasma hingga ke bagian tepi sel, serta terhubung langsung dengan selaput nuklear. Terdapat 2 tipe RE diantaranya RE kasar dan RE halus. Pada RE kasar bagian luarnya terdapat ribosom dan berfungsi untuk sintesis

protein, sehingga saat ribosom menghasilkan rantai polipeptida selanjutnya berulir melalui membran RE kasar dan masuk ke dalam lumen. Sedangkan RE halus tidak terdapat ribosom yang berfungsi untuk sintesis lemak dan steroid. RE memiliki tiga komponen utama diantaranya cisternae, vesikel dan tubulus. Cisternae berupa struktur seperti kantung pipih panjang, tidak bercabang yang tersusun dalam bentuk bundel paralel, memiliki diameter antara 40-50 μm dan sebagai tempat ribosom untuk menempel. Vesikel berupa struktur berbentuk bulat yang banyak ditemukan di ujung sisterna dan tubulus. Tubulus merupakan ruang tubular berdinding halus, bercabang dan memiliki diameter 50-100 μm . Struktur RE dapat dilihat pada Gambar 1.7.

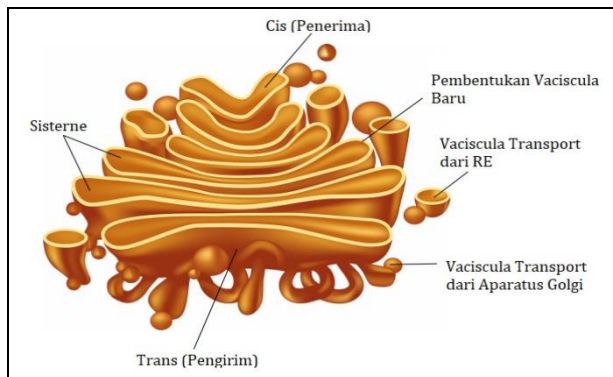


Gambar 1.7 Struktur RE

d. Aparatus Golgi

Aparatus golgi atau disebut juga badan golgi merupakan organel sel berupa kantung berbentuk cakram bercabang, terdapat pembuluh di bagian ujung serta adanya gelembung-gelembung kecil. Ruang pada aparatus golgi berlapis-lapis yang ditutupi oleh membran berbentuk pipih. Berbeda dengan RE, aparatus golgi memiliki 2 komponen utama, yaitu cis dan trans. Komponen cis menerima vesikel yang berasal dari RE

Kasar, yang kemudian oleh aparatus golgi akan diserap menuju ruang ke ruangan untuk lebih lanjut memproses isi dari vesikel. Ruang-ruang aparatus golgi akan terjadi pergerakan dari cis menuju trans. Di bagian inilah ruangan-ruangan tersebut akan memecahkan dirinya dan membentuk vesikel, dan siap untuk disalurkan ke bagian-bagian sel yang lain atau ke luar sel. Dalam hal ini, aparatus golgi berfungsi sebagai organ sekresi terhadap zat-zat yang masih dibutuhkan oleh sel. Selain itu, aparatus golgi juga berfungsi untuk menyimpan, mengemas, melipat, menyortir, dan memodifikasi protein menjadi protein fungsional. Di dalam vesikel transport, aparatus golgi sebagai perantara protein yang berasal dari RE untuk dibawa ke luar sel. Struktur aparatus golgi dapat dilihat pada Gambar 1.8



Gambar 1.8 Struktur Aparatus Golgi

e. Plastida

Plastida merupakan organel sel yang hanya ditemukan pada tumbuhan yang aktif membelah diri dan berdiferensiasi. Struktur plastida berbentuk oval dan cakram dengan diameter 4-6 μm , memiliki membran rangkap yang terdapat sistem membran dan matriks yang mengandung pigmen. Struktur plastida terdiri dari membran luar sebagai pengatur keluar masuknya zat; ruang antar membran bersifat semipermeabel; membran

dalam sebagai pelindung stroma; stroma sebagai tempat terjadinya reaksi gelap dalam proses fotosintesis; lumen tilakoid sebagai penyimpan pigmen fotosintesis; membran tilakoid terlibat dalam reaksi gelap dalam proses fotosintesis; granum berupa tumpukan tilakoid yang berisi kloroplas; ribosom sebagai tempat sintesis protein, DNA plastida dan plastoglobula (Gambar 1.8).

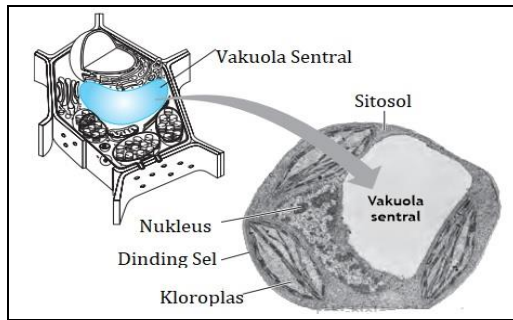


Gambar 1.9 Struktur Plastida

f. Vakuola

Vakuola merupakan organel sel yang memiliki struktur yang berongga dan bermembran. Vakuola sel tumbuhan muda umumnya memiliki vakuola kecil dan akan menjadi satu dengan yang vakuola kecil lainnya membentuk vakuola sentral. Hal tersebut terjadi akibat adanya penambahan air yang dapat menimbulkan tekanan di dalam vakuola. Vakuola sentral terkandung pigmen, cadangan makanan, limbah metabolisme, dan garam. Selain itu, di dalam vakuola sentra juga terdapat berbagai macam bahan kimiawi yang dapat memecah berbagai makromolekul dan berperan penting dalam pertumbuhan tanaman. Vakuola mempunyai beberapa fungsi pada sel tumbuhan, di antaranya berperan dalam turgiditas dan bentuk sel, tempat penyimpanan dan

penimbunan, serta berperan dalam proses homeostasis. Struktur vakuola dapat dilihat pada Gambar 1.10.



Gambar 1.10 Struktur Vakuola

DAFTAR PUSTAKA

- Koryati, T. 2021. *Fisiologi Tumbuhan*. Medan: Yayasan Kita Menulis.
- Rosanti, D. 2013. *Morfologi Tumbuhan*. 1 ed. Jakarta: Erlangga.
- Starr, C. dkk 2012. *Biologi: Kesatuan dan Keragaman Makhluk Hidup*. 12 ed. Jakarta: Penebar Swadaya.

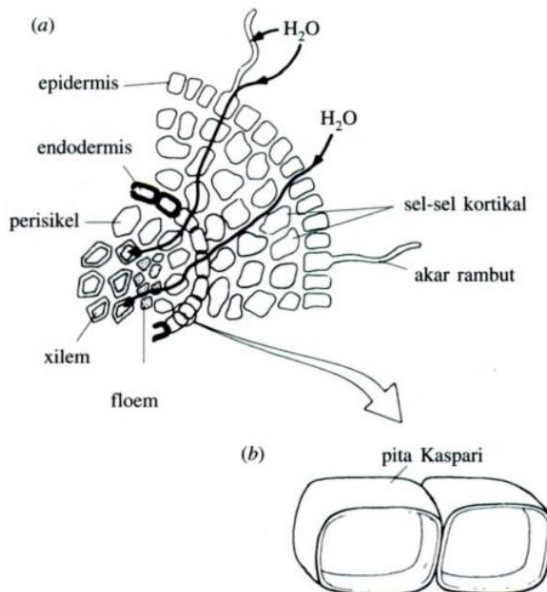
BAB 2

AIR & UNSUR HARA MINERAL

Oleh Muliana GH

2.1 Pendahuluan

Air merupakan komponen utama dari makhluk hidup. Air merupakan medium dari berbagai reaksi kimia dan metabolisme tubuh makhluk hidup, termasuk tumbuhan. Tumbuhan memperoleh air melalui proses penyerapan air yang tersedia di dalam tanah (Advinda, 2018). Berikut ini adalah gambar penampang melintang struktur akar tumbuhan yang berperan menyerap air dari dalam tanah.



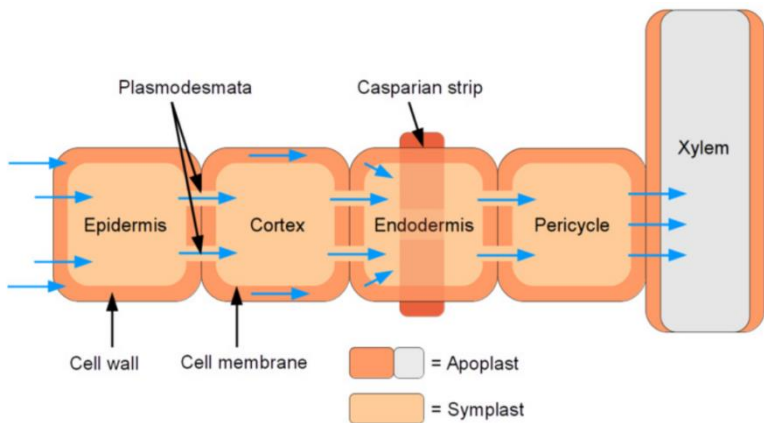
Gambar 2.1 Struktur penampang melintang akar
Sumber gambar : Schaum's Outlines Biologi, 2006

Air, unsur hara (mineral terlarut) serta gas, masuk ke dalam tubuh tumbuhan melalui rambut akar. Hal ini terjadi karena perbedaan tekanan osmotik dalam rambut akar. Tekanan osmotik dalam rambut akar biasanya lebih tinggi dibandingkan dengan tanah sekitar, sehingga memungkinkan terjadinya aliran air masuk secara terus menerus melalui rambut-rambut akar. Hal tersebut mengakibatkan suatu tekanan di daerah akar. Tekanan akar tersebut adalah bagian dari dinamika sehingga terjadi pergerakan air dari akar ke batang serta seluruh bagian tumbuhan lainnya (Fried & George, 2006). Unsur hara merupakan zat-zat yang dibutuhkan oleh tumbuhan pada siklus hidupnya, untuk melaksanakan kegiatan fisiologi tumbuhan, serta untuk pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan. Unsur hara yang dibutuhkan tumbuhan dalam jumlah besar disebut unsur hara makro, sedangkan unsur hara yang dibutuhkan tumbuhan dalam jumlah yang kecil/sedikit disebut unsur hara mikro. Unsur hara makro meliputi nitrogen, fosfor, kalium, kalsium, magnesium, belerang. Sedangkan unsur hara mikro yakni besi, mangan, seng, boron, molibdenum, klorin, nikel. Unsur hara ini diperoleh oleh tumbuhan dari tanah, melalui proses penyerapan oleh organ akar.

Ketersediaan unsur hara di dalam tanah serta pemberian pupuk sangat berpengaruh pada pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan (Irfan, 2013). Unsur hara yang dibutuhkan tumbuhan diperoleh oleh akar dari dalam tanah. Kekurangan unsur hara tumbuhan bisa ditambahkan melalui pemberian pupuk. Air pada tanah, merupakan larutan tanah yang mengandung unsur hara mineral terlarut. Akar tumbuhan menyerap larutan air tanah ini. Air serta unsur hara/garam mineral diangkut oleh tumbuhan dari akar ke seluruh tubuh tumbuhan, melalui proses pengangkutan oleh jaringan pengangkut. Meski demikian, juga terdapat mekanisme pengangkutan air serta garam mineral yang tidak secara langsung, yakni di luar dari jaringan pembuluh. Pengangkutan air dan mineral yang melalui jaringan pembuluh disebut pengangkutan intravaskuler, sedangkan pengangkutan air serta garam mineral

yang yang tidak melalui jaringan pembuluh disebut pengangkutan ekstravaskuler.

Pengangkutan ekstravaskuler adalah proses penyerapan dan pengangkutan air dari tanah menuju tubuh tumbuhan melewati satu ke sel lain, dimana pengangkutan ini terjadi secara horizontal. Dimana pengangkutan air dimulai dari penyerapan oleh rambut/bulu akar, kemudian menuju ke sel-sel pada jaringan epidermis akar. Lalu air bergerak menuju korteks, kemudian dilanjutkan ke sel-sel endodermis dan menuju ke silinder pusat (stele). Air yang telah sampai di korteks kemudian didistribusikan ke sel-sel tubuh tumbuhan untuk keperluan metabolisme tubuh tumbuhan. Pengangkutan ekstravaskuler terjadi secara simplas maupun apoplas.



Gambar 2.2 Transportasi ekstravaskular pada tumbuhan
Sumber gambar : erlanggapedia.erlanggaonline.co.id

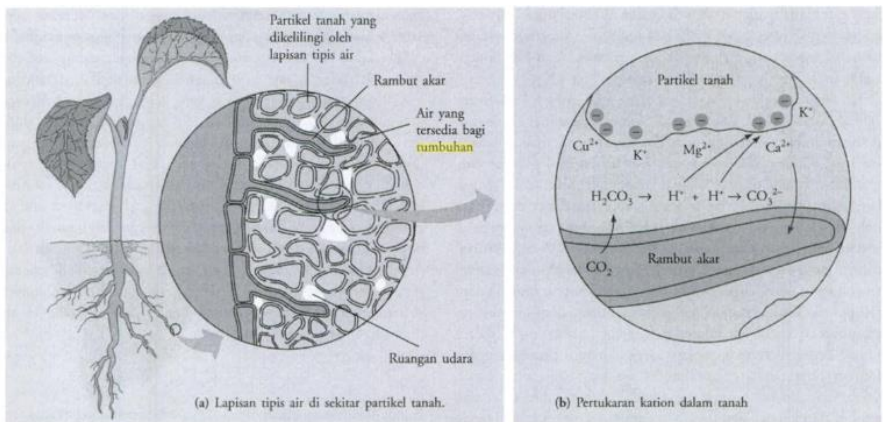
Gambar 2.2 adalah gambar diagramatis tentang transportasi ekstravaskular pada tumbuhan yang meliputi pengangkutan secara aploplas dan simplas. Pengangkutan secara apoplas, yakni pengangkutan air melalui dinding sel maupun ruang antar sel, yang terjadi secara difusi ataupun transpor pasif. Pengangkutan apoplas adalah pengangkutan melalui bagian sel tumbuhan yang tidak hidup. Pengangkutan zat secara simplas adalah pengangkutan air menuju

ke dalam tubuh tumbuhan melalui bagian hidup dari sel tumbuhan. Dimana air tersebut diangkut ke dalam sel melalui transpor aktif maupun osmosis, melalui plasmodesmata sel tumbuhan.

Pengangkutan intravaskular adalah pengangkutan air serta zat terlarut lainnya di dalam berkas pembuluh, yakni xilem dan floem. Jika pengangkutan ekstrasvaskular adalah pengangkutan secara horizontal, maka pengangkutan intravaskular adalah pengangkutan air dan zat terlarut secara vertikal. Pengangkutan air dan zat terlarut lainnya, yakni dengan penyerapan zat dari rambut akar, kemudian menuju jaringan epidermis lalu ke korteks, kemudian menuju ke sel-sel endodermis. Air dan zat terlarut tersebut masuk ke dalam jaringan pembuluh xilem, yakni xilem akar. Lalu dilanjutkan menuju ke xilem batang dan xilem daun. Proses yang terjadi di dalam xilem daun, adalah terjadi distribusi zat-zat yang dibutuhkan ke jaringan parenkim sebagai bahan baku untuk proses fotosintesis. Hasil dari proses fotosintesis yang terjadi di daun, kemudian diangkut melalui pembuluh floem ke seluruh tubuh tumbuhan. Hasil dari proses fotosintesis yang diangkut ini adalah glukosa. Hasil fotosintesis berupa oksigen, dikeluarkan melalui mulut daun (stomata). Air serta sisa metabolisme lainnya dikeluarkan melalui proses transpirasi.

Ketika terjadi hujan, air akan masuk ke tanah melalui pori-pori tanah. Air tersebut mengalir ke bagian ruangan yang lebih besar pada tanah. Sedangkan air yang masuk ke ruangan yang lebih kecil pada tanah, air tersebut akan ditahan oleh tanah karena adanya gaya tarik oleh partikel-partikel tanah (karena permukaan tersebut memiliki muatan listrik). Air ini menempel dengan kuat pada partikel tanah yang bersifat hidrofilik, sehingga air tidak dapat diserap oleh tumbuhan. Air yang dapat diserap oleh tumbuhan adalah air yang tidak terikat begitu kuat oleh tanah. Beberapa mineral yang terdapat di dalam tanah, misalnya mineral yang bermuatan positif seperti kalsium (Ca^{2+}), kalium (K^+), serta magnesium (Mg^{2+}) menempel dengan tanah karena daya tarik listrik ke permukaan partikel tanah liat yang bermuatan negatif. Tanah liat pada tanah ini membantu mencegah penghanyutan unsur

hara/mineral selama terjadi hujan yang lebat atau aliran air karena partikel yang berukuran lebih kecil/halus menghasilkan luas permukaan yang lebih banyak untuk terjadi pengikatan unsur hara/mineral. Namun, partikel tanah liat harus melepaskan mineral yang terikat tersebut ke larutan tanah sehingga tumbuhan dapat menyerap larutan tersebut. Mineral yang tidak terikat secara kuat oleh partikel tanah adalah mineral yang bermuatan positif. Yakni fosfat (H_2PO_4^-), sulfat (SO_4^{2-}), serta nitrat (NO_3^-). Partikel yang tidak terikat kuat ini akan tercuci lebih cepat. Mineral yang bermuatan positif ini dapat digunakan oleh tumbuhan ketika ion hidrogen yang ada di dalam tanah menggantikan ion mineral dari partikel tanah liat tersebut. Proses yang sedemikian kompleks ini disebut *cation exchange* atau pertukaran kation. Proses ini dirangsang oleh akar itu sendiri, ketika akan mensekresikan H^+ serta senyawa lainnya yang membentuk asam dalam larutan tanah. Reaksi yang terjadi dapat dilihat pada gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2.3 Ketersediaan air dan mineral tanah
Sumber gambar : Campbell et al, 2003

Pada gambar 2.3 di atas, dapat diketahui bahwa (a), Tumbuhan tidak dapat menyerap atau mengekstrak semua air yang ada di dalam tanah, karena sebagian air dapat terikat kuat dengan partikel tanah yang bersifat hidrofilik. Hidrofilik artinya suka air, kebalikan dari hidrofobik. Air yang dapat diserap oleh akar tanaman adalah air yang terikat kurang kuat dengan partikel tanah. Sedangkan partikel air yang terikat kuat dengan partikel tanah,, sulit diserap oleh akar tanaman. Pada bagian B gambar 2.3 dapat kita lihat bahwa ion hidrogen yang ada pada larutan tanah membantu membuat nutrisi tertentu menjadi tersedia bagi tumbuhan dengan cara menggantikan mineral bermuatan positif (disebut kation) yang terikat kuat ke permukaan partikel tanah yang halus. Selain mensekresikan ion H^+ , tumbuhan juga menyumbangkan H^+ ke dalam tanah melalui pembebasan CO_2 ke dalam larutan tanah, sehingga CO_2 tersebut akan bereaksi dengan air membentuk asam karbonat (H_2CO_3).

2.2 Air dan Peranannya bagi Tumbuhan

Air merupakan komponen penting bagi tumbuhan karena berfungsi sebagai pelarut serta terlibat dalam berbagai proses fisiologi dan metabolisme tumbuhan. Peranan air bagi tumbuhan yakni berperan dalam transportasi zat pada tubuh tumbuhan, sebagai pelarut, berperan dalam regulasi suhu, serta berperan pada proses fotosintesis. Peranan air pada tumbuhan yakni sebagai transportasi zat-zat atau molekul penting melalui aliran air juga osmosis. Air berperan dalam transportasi zat-zat yang dibutuhkan tanaman dari akar, ke seluruh bagian tumbuhan yang membutuhkan, melalui jaringan pembuluh xilem. Zat-zat yang dibawa oleh air adalah zat-zat seperti mineral, nutrisi, serta zat organik lainnya. Melalui aliran air serta proses osmosis, nutrisi/zat hara yang terlarut dalam air tanah dapat diserap oleh akar kemudian didistribusikan ke seluruh bagian tumbuhan yakni daun, batang, bunga dan buah. Air berperan dalam proses osmosis, yakni pergerakan air melalui membran sel dari daerah konsentrasi rendah (hipotonis) ke daerah konsentrasi tinggi

(hipertonis). Air yang masuk ke sel-sel akar membantu dalam penyerapan serta pengangkutan unsur hara.

Peranan air sebagai pelarut, yakni air melarutkan nutrisi yang dibutuhkan oleh tumbuhan. Nutrisi yang dibutuhkan tumbuhan diperoleh dari akar. Nutrisi yang larut dalam air dapat diangkut dari tanah, melalui organ akar ke seluruh tubuh tumbuhan. Air membantu melarutkan unsur hara yang ada disekitar akar tanaman, sehingga dapat diserap oleh akar dan digunakan oleh tumbuhan. Salah satu peranan air bagi tumbuhan adalah berperan dalam proses perkecambahan, yakni berperan dalam mematahkan dormansi biji untuk melanjutkan ke proses perkecambahan. Biji yang direndam sebelum di tanam, akan mengalami proses imbibisi air yang mengaktifkan hormon giberelin, yang menjadi awal mula dari proses perkecambahan biji tumbuhan. Air berperan dalam regulasi suhu tubuh organisme, termasuk tumbuhan. Air berperan dalam menjaga suhu optimal dalam jaringan tumbuhan melalui proses evaporasi. Penguapan air melalui stomata di daun membantuk menurunkan suhu tumbuhan saat suhu lingkungan tinggi. Air berperan pada proses fotosintesis. Secara umum, air adalah komponen penting pada proses fotosintesis. Pada reaksi fotosintesis, secara sederhana bahan utama yang dibutuhkan adalah air dan karbon dioksida. Pada proses fotosintesis, tumbuhan menggunakan air, karbon dioksida serta energi matahari untuk menghasilkan glukosa dan oksigen. Proses fotosintesis ini memungkinkan tumbuhan dalam mensintesis makanannya sendiri serta menghasilkan energi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan.

2.3 Unsur Hara Makro

2.3.1 Karbon (C)

Unsur karbon merupakan unsur mikronutrien atau unsur hara makro yang dibutuhkan oleh tumbuhan. Unsur karbon merupakan komponen utama dari senyawa-senyawa organik

tumbuhan. Tumbuhan menyerap unsur karbon dalam bentuk gas CO_2 .

2.3.2 Oksigen (O)

Unsur oksigen adalah unsur hara makro, dibutuhkan dalam jumlah banyak. Tumbuhan menyerap oksigen dalam bentuk gas O_2 . Unsur oksigen merupakan komponen utama dari senyawa-senyawa organik tumbuhan.

2.3.3 Hidrogen (H)

Hidrogen merupakan unsur hara makro yang dibutuhkan tumbuhan. Hidrogen yang tersedia bagi tumbuhan, yang dapat diserap tumbuhan dalam bentuk H_2O . Hidrogen merupakan komponen utama dari senyawa-senyawa organik dari tumbuhan.

2.3.4 Nitrogen (N)

Nitrogen adalah unsur hara tumbuhan yang berfungsi dalam pertumbuhan vegetatif seperti menambah ukuran tumbuhan, meningkatkan jumlah anakan, serta meningkatkan jumlah rumpun (Patti dkk, 2013). Nitrogen merupakan mineral yang penting karena berperan sebagai unsur penyusun asam nukleat, fosfolipid, protein, hormon, koenzim-koenzim, serta penyusun molekul organik penting lainnya. Tumbuhan menyerap nitrogen dalam bentuk amonium (NH_4^+) atau dalam bentuk nitrat (NO_3^-). Dalam menyerap nitrogen, tumbuhan dibantu oleh mikroba-mikroba tanah yang dapat memfiksasi nitrogen.

2.3.5 Fosfor (P)

Fosfor bagi tumbuhan dapat diperoleh di tanah dalam bentuk organik maupun anorganik. Fungsi zat hara fosfor bagi tumbuhan antara lain berfungsi dalam pembesaran dan pembelahan sel tumbuhan, berperan pada proses respirasi,

proses fotosintesis, serta transfer dan penyimpanan energi pada tumbuhan (Amelia dkk, 2021).

2.3.6 Kalium (K)

Unsur hara kalium (K) merupakan unsur hara makro yang berperan dalam metabolisme, pertumbuhan dan produktivitas tumbuhan (Manurung dkk, 2017). Kalium berperan dalam proses pembentukan dan transfer karbohidrat dalam tumbuhan, berperan dalam sintesis protein, serta berperan dalam proses fotosintesis. Tumbuhan menyerap kalium dalam bentuk kation (K^+). Kalium berfungsi sebagai kofaktor yang berfungsi pada proses sintesis protein. Kalium juga merupakan zat terlarut utama yang berperan dalam menjaga keseimbangan air di dalam sel tumbuhan. Ion kalium (K^+) berperan pada proses pergerakan sitoplasma. Sumber unsur kalium diperoleh tumbuhan dari dalam tanah, yakni mineral yang mengandung K, misalnya pada kalium feldspar yang merupakan komponen batuan beku dan mika. Sumber lain dari unsur K yakni berasal dari pupuk, seperti kalium klorida, kalium sulfat, kalium magnesium sulfat, kalium nitrat, ataupun dari pupuk kandang.

2.3.7 Kalsium (Ca)

Unsur hara makro lainnya adalah unsur hara kalsium (Ca). Pada tumbuhan, kalsium (Ca) berfungsi dalam membentuk protein, regulasi struktur membran serta aktivasi aliran ion pada akar, berperan pada proses pembentukan membran, dan menetralkan asam organik hasil dari aktivitas metabolisme (Mardaus dkk, 2019). Bentuk kalsium yang dapat dimanfaatkan tumbuhan yakni dalam bentuk ion Ca^{2+} . Peranan dari unsur hara kalsium yakni berperan dalam pembentukan serta stabilitas dinding sel, berperan dalam pemeliharaan permeabilitas membran serta struktur membran sel. Unsur kalium juga berperan dalam mengaktifkan enzim-enzim penting bagi tumbuhan, juga berperan dalam mengatur

beberapa respons sel tumbuhan terhadap rangsang. Sumber kalsium bisa diperoleh dari alam, yakni dari batu-batuan kapur serta sisa-sisa tumbuhan. Contoh mineral dari alam yang mengandung unsur Ca adalah dolomit / $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

Physical Properties of Dolomite	
Chemical Classification	carbonate
Color	colorless, white, pink, green, gray, brown, black
Streak	white
Luster	vitreous, pearly
Diaphaneity	transparent to translucent
Cleavage	perfect, rhombohedral, three directions
Mohs Hardness	3.5 to 4
Specific Gravity	2.8 to 2.9
Diagnostic Properties	rhombohedral cleavage, powdered form effervesces weakly in dilute HCl, hardness
Chemical Composition	$(\text{CaMg})(\text{CO}_3)_2$
Crystal System	hexagonal
Uses	construction aggregate, cement manufacture, dimension stone, calcined to produce lime, sometimes an oil and gas reservoir, a source of magnesia for the chemical industry, agricultural soil treatments, metallurgical flux

Gambar 2.4. Dolomit
 Sumber gambar : geologinesia.com

2.3.8 Magnesium (Mg)

Unsur hara Magnesium berperan sebagai komponen inti dari klorofil, juga sebagai kofaktor pada beberapa enzim, misalnya pada enzim rubisco dan nitrogenase (Ginting, 2014). Unsur hara magnesium berfungsi sebagai komponen klorofil, juga berperan dalam mengaktifkan beberapa enzim. Tumbuhan menyerap unsur magnesium dalam bentuk ion Mg^{2+} .

2.3.9 Belerang (S)

Unsur hara belerang atau sulfur (S) secara umum berperan dalam proses biokimia dan fisiologi tumbuhan. Unsur belerang berperan sebagai komponen penting protein tumbuhan. Belerang berperan dalam membentuk ikatan sulfida diantara asam amino dan protein. Unsur hara belerang

berfungsi sebagai komponen protein, juga komponen koenzim. Protein yang mengandung belerang penting untuk berbagai proses biokimia tumbuhan, yakni fotosintesis, respirasi, serta aktivitas sintesis enzim. Tumbuhan menyerap unsur belerang dalam bentuk senyawa SO_4^{2-} .

2.4 Unsur Hara Mikro

2.4.1 Besi (Fe)

Salah satu unsur hara yang dibutuhkan tanaman, yakni zat besi (Fe) memegang peranan penting pada metabolisme tumbuhan, yakni sebagai komponen pembentuk kloroplas (Gelyaman, 2018). Zat besi merupakan unsur hara mikro, artinya dibutuhkan dalam jumlah yang sedikit. Namun, zat besi merupakan unsur hara yang penting dan keberadaannya harus terpenuhi bagi tumbuhan. Zat besi bagi tumbuhan dapat diperoleh dari air di alam atau dari larutan tanah. Tumbuhan menyerap unsur hara besi dalam bentuk ion Fe^{2+} atau Fe^{3+} . Unsur hara besi berfungsi sebagai komponen sitokrom. Unsur hara besi juga berperan dalam mengaktifkan beberapa enzim.

2.4.2 Mangan (Mn)

Unsur hara mangan (Mn) termasuk unsur hara mikro. Zat hara mangan memiliki peranan penting pada metabolisme N, berperan dalam pengaktifan enzim, serta berperan pada proses fotosintesis tumbuhan (Seran, 2017). Zat hara mangan terdapat di tanah atau di bebatuan primer dalam bentuk feromagnesit.

2.4.3 Seng (Zn)

Unsur hara seng (Zn) berperan pada berbagai proses metabolik yang terjadi pada tumbuhan, yakni pada proses sintesis protein, proses pembentukan enzim, juga pada proses pembelahan sel. Seng ditemukan sebagai komponen pada beberapa enzim metabolik pada tumbuhan. Seng

berperan pada proses perkembangan biji serta pembentukan klorofil. Unsur hara seng dapat diperoleh tumbuhan melalui mineral dalam tanah, maupun dari bahan organik seperti pupuk kandang dan pupuk kompos yang mengandung seng. Ketersediaan unsur hara seng dalam tanah bervariasi tergantung pada kandungan bahan organik yang terdapat dalam tanah.

2.4.4 Boron (B)

Unsur hara boron (B) bagi tumbuhan berperan dalam perkembangan dinding sel, pembentukan jaringan pembuluh, perkembangan akar, pengaturan metabolisme karbohidrat dan hormon pada tumbuhan. Unsur hara boron dapat diperoleh tumbuhan dalam bentuk senyawa borat dalam tanah. Ketersediaan unsur boron dalam tanah dipengaruhi oleh pH tanah serta tekstur tanah. Tanah yang bersifat asam dan berpasir cenderung memiliki ketersediaan boron yang rendah, sedangkan tanah berpasir yang berlebihan dapat menyebabkan defisiensi boron pada tumbuhan. Tumbuhan menyerap unsur hara boron dalam bentuk H_2BO_3^- . Unsur hara boron berperan sebagai kofaktor yang dibutuhkan dalam proses sintesis klorofil. Unsur hara boron juga terlibat dalam mekanisme transpor karbohidrat, serta sintesis dari asam nukleat.

2.4.5 Molybdenum (Mo)

Unsur hara molybdenum pada tumbuhan berperan sebagai komponen enzim nitrat reduktase. Enzim ini berfungsi mereduksi ion nitrat menjadi ion nitrit. Unsur hara Mo juga berfungsi sebagai katalis pada beberapa enzim tumbuhan. Peranan lain dari unsur Mo adalah mengaktifkan enzim nitrat reduktase, nitrogenase, serta xantine oksidase. Ketersediaan molybdenum dipengaruhi oleh pH tanah, ketersediaan Mo meningkat dengan meningkatkannya pH tanah. Molybdenum

dapat ditemukan di tanah sebagai senyawa molibdat. Tumbuhan menyerap unsur molybdenum dalam bentuk MoO_4^{2-} .

2.4.6 Klorin (Cl)

Unsur hara klorin (Cl) berperan dalam proses fotosintesis, yakni dalam transportasi elektron pada reaksi terang. Pada proses reaksi terang fotosintesis, klorin berperan dalam proses pemecahan air. Klorin juga berperan dalam pembentukan ion klorida yang terlibat dalam keseimbangan air dan tekanan osmotik sel tumbuhan. Sumber klorin dapat ditemukan pada tanah yang mengandung garam-garam organik. Tumbuhan menyerap unsur klorin dalam bentuk ion Cl^- .

2.4.7 Nikel (Ni)

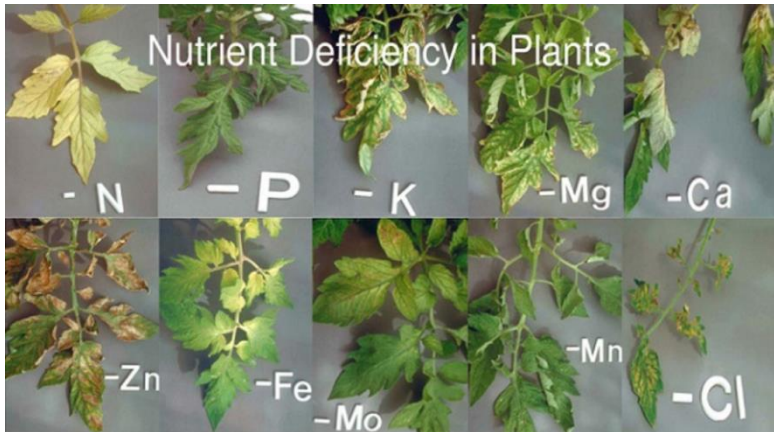
Unsur hara nikel berperan dalam aktivitas enzim, yakni enzim yang terlibat pada metabolisme nitrogen serta metabolisme asam amino pada tumbuhan. Unsur hara nikel berfungsi sebagai kofaktor enzim yang terlibat dalam metabolisme protein. Tumbuhan dapat memperoleh unsur hara nikel dari dalam tanah. Ketersediaan nikel di dalam tanah dapat bervariasi, tergantung pada jenis tanah serta faktor lingkungan. Tumbuhan menyerap unsur hara nikel dalam bentuk ion Ni^{2+} .

2.4.8 Tembaga (Cu)

Unsur tembaga (Cu) merupakan unsur mikronutrien, artinya dibutuhkan dalam jumlah yang sedikit oleh tumbuhan. Tumbuhan menyerap tembaga dalam bentuk Cu^+ atau Cu^{2+} . Unsur tembaga berperan dalam biosintesis lignin, yakni komponen dari dinding sel tumbuhan. Tembaga juga berperan sebagai komponen enzim-enzim redoks.

Tumbuhan membutuhkan unsur hara dalam jumlah yang cukup. Kelebihan atau kekurangan unsur hara dapat mempengaruhi kondisi biokimia dan fisiologi tubuh tumbuhan, juga memperahui

kenampakan morfologi tumbuhan. Gambar 2.5 di bawah ini memperlihatkan morfologi tanaman tomat (daun) jika mengalami defisiensi beberapa unsur hara.



Gambar 2.5. Kekurangan unsur hara pada tumbuhan

Sumber gambar : theplantguide.net

Kelebihan unsur hara tertentu pada tumbuhan dapat menyebabkan tumbuhan keracunan. Sedangkan kekurangan unsur hara tertentu dapat menyebabkan defisiensi unsur hara yang berpengaruh terhadap aktivitas fisiologis-biokimia dari tumbuhan. Defisiensi unsur hara besi (Fe) misalnya, pada tumbuhan menunjukkan warna kekuningan pada daun muda, kemudian mempengaruhi warna daun yang lebih tua. Tumbuhan yang kekurangan unsur hara magnesium (Mg) dapat diketahui dengan memperhatikan gejala klorosis pada daun-daun tua.

2.5 Interaksi Air dan Unsur Hara pada Tumbuhan

Tumbuhan memerlukan lingkungan yang sesuai agar bisa tumbuh dan berkembang dengan optimal. Lingkungan yang sesuai yakni lingkungan yang menyediakan air dan unsur hara mineral yang dibutuhkan oleh tumbuhan. Ketersediaan air dan unsur hara di lingkungan tumbuh tumbuhan dapat

mempengaruhi proses fisiologi tumbuhan. Lingkungan dengan kadar air dan unsur hara yang cukup bagi tumbuhan dapat menjadikan tumbuhan tumbuh dengan optimal. Selain itu, faktor lain yang mendukung pertumbuhan tumbuhan yakni intensitas cahaya, suhu, curah hujan, serta faktor lingkungan lainnya juga turut berpengaruh bagi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan.

Peranan air bagi tumbuhan sangat penting. Untuk setiap bahan organik yang dibentuk oleh tumbuhan, setidaknya dibutuhkan sekitar 500 g air (Advinda, 2018). Air diserap oleh organ akar, kemudian ditransportasikan ke seluruh tubuh tumbuhan untuk keperluan proses fisiologi dan metabolisme tumbuhan, lalu kembali ke atmosfer melalui proses penguapan. Keseimbangan jumlah air pada tubuh tumbuhan sangat penting. Kekurangan kadar air pada tumbuhan mengakibatkan tumbuhan mengalami defisit air dan pada akhirnya akan mengganggu proses-proses biokimia yang terjadi pada protoplasma sel tumbuhan. Unsur hara yang dibutuhkan tumbuhan bisa diperoleh dari media tanam ataupun tanah tempat tumbuhan tersebut tumbuh. Adapun pada lingkungan tumbuh tumbuhan yang kekurangan unsur hara, maka kekurangan tersebut dapat dipenuhi dengan pemberian pupuk. Pemberian pupuk dapat melengkapi kebutuhan unsur hara bagi tumbuhan. Salah satu sumber unsur hara bagi tanaman dapat diperoleh dari teh kompos (Berek, 2017). Teh kompos yang digunakan sebagai pupuk atau sumber hara bagi tumbuhan dalam bentuk terlarut dapat bermanfaat dalam menambahkan atau mengoreksi kekurangan unsur hara bagi tumbuhan. Unsur-unsur hara yang diserap oleh tumbuhan ada yang diserap dari udara, yaitu unsur karbon, unsur oksigen, serta unsur hidrogen. Unsur hara yakni mineral lainnya diserap tumbuhan dari dalam tanah, dalam bentuk ion positif dan ion negatif. Ion positif disebut kation, sedangkan ion negatif disebut anion. Bentuk unsur-unsur hara yang diserap tumbuhan dalam bentuk kation dan anion dapat dilihat pada tabel 3.1 berikut ini :

Tabel 2.1 Bentuk unsur hara berupa kation & anion yang diserap tanaman
Sumber : Endah & Zaenal, 2002

Jenis Unsur Hara	Simbol	Bentuk yang Diserap oleh Tanaman	
		Kation (+)	Anion (-)
Nitrogen	N	NH_4^+	NO_3^-
Fosfor	P	—	H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}
Kalium	K	K^+	—
Magnesium	Mg	Mg^{2+}	—
Kalsium	Ca	Ca^{2+}	—
Sulfur	S	—	SO_4^{2-}
Mangan	Mn	Mn^{2+}	—
Boron	B	—	BO_3^{2-}
Molibdenum	Mo	—	MoO_4^{2-}
Tembaga	Cu	Cu^{2+} atau Cu^{3+}	—
Seng	Zn	Zn^{2+}	—
Besi	Fe	Fe^{2+} atau Fe^{3+}	—

Air berpengaruh secara signifikan pada penyerapan unsur-unsur hara tumbuhan. Tumbuhan memerlukan air untuk mengangkut nutrisi/unsur hara dari lingkungan menuju ke akar, untuk selanjutnya diedarkan oleh akar ke seluruh tubuh tumbuhan. Tumbuhan yang berada pada lingkungan dengan kondisi air yang berlebih atau kekurangan, dapat mempengaruhi penyerapan unsur hara oleh tumbuhan. Air yang berlebihan akan menyebabkan akar tergenang, sehingga dapat merusak akar. Tumbuhan yang berada pada lingkungan yang kekurangan air dapat mengganggu tumbuhan, yakni menghambat kemampuan tumbuhan untuk menyerap nutrisi secara efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- Advinda, Linda. (2018). *Dasar-Dasar Fisiologi Tumbuhan*. Penerbit Deepublish, Yogyakarta.
- Amelia, Elin., Setyawati, Ety Rosa., & Putra, Dian Pratama. (2021). Pengaruh Pemberian Pupupk Fosfor dan Dolomit terhadap Pertumbuhan Legum *Mucuna bracteata*. *Jurnal Agromast*, 6(2) : 1-6.
- Berek, Arnoldus Klau. (2017). *Compost tea and its use as a souse of nutrients and agents of plant security*. Savana Cendana : Jurnal pertanian konservasi lahan kering, 2(4) : 68-70. <https://doi.org/10.32938/sc.v2i04.214>.
- Campbell, Neil A, Jane B Reece dn Lwrence G. Mitchell. (2003). *Biologi Edisi Kelima Jilid II*. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Endah, Joesi dan Zaenal Abidin. (2002). *Membuat Tanaman Buah Kombinasi*. PT AgroMedia Pustaka, Depok.
- Fried, George H dan George J. Hademenos. (2005). *Schaum's Outlines Biologi Edisi Kedua*. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- GH, Muliana. (2023). *Tentang Calathea*. CV Jejak Publisher, Jawa Barat.
- GH, Muliana., Pratiwi, Andi Citra., Muis, Abd., Azis, Andi Asmawati., Sari, Dian Dwi Ulan & Sahribulan. (2023). Optimalisasi Pemanfaatan Pekarangan Rumah dalam Menanam Toga (Tanaman Obat Keluarga) bagi Masyarakat di Desa Tritiro Kec. Bontotiro Kab, Bulukumba. *Jurnal Abdi Negeriku*, 2(1) : 31-37.
- Handayanto, Eko, Nurul Muddarisna dan Amrullah Fiqri. (2017). *Pengelolaan Kesuburan Tanah*. Universitas Brawijaya Press, Malang.
- Irfan, Mokhamad. (2013). Respon Bawang Merah (*Allium ascalonicum* L) terhadap Zat Pengatur Tumbuh dan Unsur Hara. *Jurnal Agroteknologi*, 3(2) : 35-40.

- Gelyaman, Gebharus Djugian. (2018). *Factors Affecting The Bioavailability of Iron For Plants*. JSLK, 1(1) : 14-16. <https://doi.org/10.32938/slk.v1i1.439>
- Ginting, Candra. (2014). *Nutrisi Tanaman*. Instiper Yogyakarta, Sleman.
- Kramer, Paul J. (1983). *Water Relations of Plants*. Academic Press, London.
- Manurung, Rinto., Gunawan, Joni., Hazriani, Rini., & Suharmoko, Johan. (2017). Pemetaan Status Unsur Hara N, P dan K Tanah pada Perkebunan Kelapa Sawit di Lahan Gambut. *Pedon Tropika Jurnal Ilmu Tanah dan Sumber Daya Lahan*, 3(1) : 89-96. <http://dx.doi.org/10.26418/pedontropika.v3i1.23438>.
- Mardaus, Sari, Intan., & Yusuf, Elfi Yenny. (2019). Produksi Tanaman Tomat (*Solanum lycopersicum* L.) dengan Pemberian SP-36 dan Dolomit di Tanah Gambut. *Jurnal Agro Indragiri*, 4(2) : 25-35. <https://doi.org/10.32520/jai.v4i2.1271>.
- Patti, P. S., Kaya, E., & Silahooy, Ch. (2013). Analisis Status Nitrogen Tanah dalam Kaitannya dengan Serapan N oleh Tanaman Padi Sawah di Desa Waimital, Kecamatan Kairatu, Kabupaten Seram Bagian Barat. *Agrologia*, 2(1) : 51-58. DOI: 10.30598/a.v2i1.278.
- Seran, Regina. (2017). Pengaruh Mangan Sebagai Unsur Hara Mikro Esensial Terhadap Kesuburan Tanah dan Tanaman. *Bio-Edu: Jurnal Pendidikan Biologi* 2(1) : 13-14.
- Wahyuni, Sri, Elly Purwanti, Samsun Hadi, dan Diani Fatmawati. (2019). *Anatomi Fisiologi Tumbuhan*. Penerbit Universitas Muhammadiyah Malang, Malang.

BAB 3

ENZIM DAN METABOLISME

Oleh Latifa Nuraini

A. Pendahuluan

3.1 Pengenalan Metabolisme dan Enzym

Istilah metabolisme sering digunakan untuk menggambarkan semua reaksi kimia yang berkaitan dengan sel. Proses seluler seperti pembentukan atau penguraian molekul kompleks terjadi melalui serangkaian reaksi kimia bertahap yang saling berhubungan yang disebut jalur metabolisme. Ada 2 istilah reaksi yang sering digunakan yaitu eksergonik dan endergonic. Reaksi yang bersifat spontan dan mengeluarkan energi merupakan reaksi eksergonik, sedangkan reaksi endergonic memerlukan energi untuk dapat berlangsung. Istilah anabolisme mengacu pada jalur metabolisme endergonic yang terlibat dalam biosintesis, mengubah bahan penyusun molekul sederhana menjadi molekul yang lebih kompleks, dan dipicu oleh penggunaan energi seluler. Sebaliknya, istilah katabolisme mengacu pada jalur eksergonik yang memecah molekul kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana. Energi molekul yang disimpan dalam ikatan molekul kompleks dilepaskan melalui jalur katabolik dan dipanen sedemikian rupa sehingga dapat digunakan untuk menghasilkan molekul berenergi tinggi, yang digunakan untuk menggerakkan jalur anabolik. Jadi, dalam hal energi dan molekul, sel terus menyeimbangkan katabolisme dengan anabolisme.

Metabolisme dapat dibedakan berdasarkan sumber energi dan karbon penyusunnya. Organisme dapat diidentifikasi berdasarkan sumber karbon yang digunakannya untuk metabolisme serta sumber energinya. Organisme yang mengubah karbon dioksida anorganik misalnya CO₂ diubah menjadi senyawa karbon organik adalah autotrof. Tumbuhan dan cyanobacteria adalah contoh autotrof yang terkenal. Sebaliknya, heterotrof bergantung pada senyawa karbon organik yang lebih kompleks sebagai nutrisi dari sumber autotrof. Banyak organisme, mulai dari manusia hingga bermacam-macam prokariota, termasuk *Escherichia coli* yang banyak dipelajari, bersifat heterotrofik. Organisme juga dapat diidentifikasi berdasarkan sumber energi yang digunakannya. Semua energi berasal dari transfer elektron, namun sumber elektron berbeda antara berbagai jenis organisme. Organisme yang memperoleh energi untuk transfer elektron dari cahaya adalah fototrof, sedangkan kemotrof memperoleh energi untuk transfer elektron dengan memutus ikatan kimia. Ada dua jenis kemotrof: organotrof dan litotrof. Organotrof, termasuk manusia, jamur, dan banyak prokariota, merupakan kemotrof yang memperoleh energi dari senyawa organik. Litotrof adalah kemotrof yang memperoleh energi dari senyawa anorganik, termasuk hidrogen sulfida (H₂S) dan besi tereduksi. Strategi yang digunakan untuk memperoleh karbon dan energi dapat digabungkan untuk mengklasifikasikan organisme berdasarkan jenis nutrisinya. Kebanyakan organisme bersifat kemoheterotrof karena mereka menggunakan molekul organik sebagai sumber elektron dan karbon (Tabel 3.1).

Tabel 3.1. Klasifikasi Organisme Berdasarkan Sumber Energi dan Karbon

	Klasifikasi	Sumber energi	Sumber Karbon	Contoh
Kemotrof	kemoautotrof	kimia	anorganik	H, S, Fe, N, CO ₂
	kemoheterotrof	kimia	Komponen organik	Semua hewan, jamur, protozoa, dan bakteri
Fototrof	fotoautotrof	cahaya	anorganik	Semua tumbuhan, alga, cyanobakteria, bakteri sulfur (hijau dan ungu)
	fotoheterotrof	cahaya	Komponen organik	Bakteria non-sulfur (hijau dan ungu), heliobakteria

Sumber: dimodifikasi dari libretexts biology (2023).

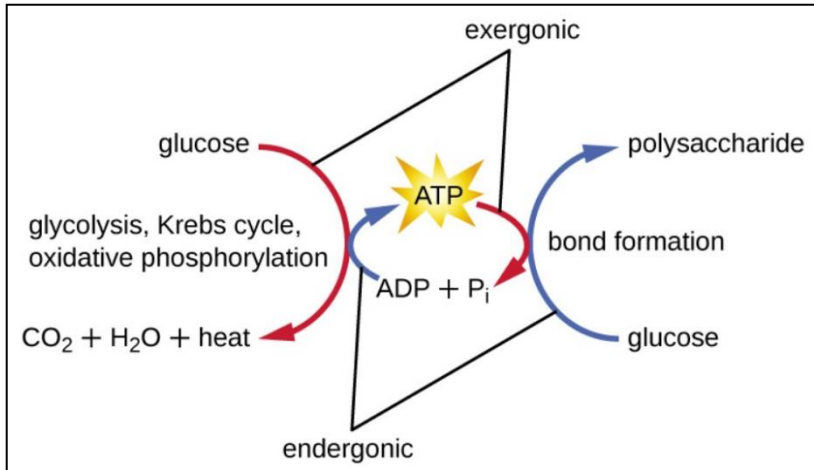
Transfer elektron antar molekul penting karena sebagian besar energi yang disimpan dalam atom dan digunakan untuk fungsi sel bahan bakar berbentuk elektron berenergi tinggi. Perpindahan energi dalam bentuk elektron memungkinkan sel untuk mentransfer dan menggunakan energi secara bertahap; yaitu, dalam paket-paket kecil, bukan dalam satu ledakan yang bersifat destruktif. Reaksi yang menghilangkan elektron dari molekul donor dan membiarkannya teroksidasi adalah reaksi oksidasi; reaksi yang menambahkan elektron ke molekul akseptor dan membiarkannya tereduksi disebut reaksi reduksi. Karena elektron dapat berpindah dari satu molekul ke molekul lainnya, oksidasi dan reduksi terjadi secara bersamaan. Pasangan reaksi ini disebut reaksi oksidasi-reduksi, atau reaksi redoks.

Transfer elektron antar molekul penting karena sebagian besar energi yang disimpan dalam atom dan digunakan untuk fungsi sel bahan bakar berbentuk elektron berenergi tinggi. Perpindahan energi dalam bentuk elektron memungkinkan sel untuk mentransfer dan menggunakan energi secara bertahap; yaitu, dalam paket-paket kecil, bukan dalam satu ledakan yang bersifat destruktif. Reaksi yang menghilangkan elektron dari molekul donor dan membiarkannya teroksidasi adalah reaksi oksidasi; reaksi yang menambahkan elektron ke molekul akseptor dan membiarkannya tereduksi disebut reaksi reduksi. Karena elektron dapat berpindah dari satu molekul ke molekul lainnya, oksidasi dan reduksi terjadi secara bersamaan. Pasangan reaksi ini disebut reaksi oksidasi-reduksi, atau reaksi redoks.

Energi yang dilepaskan dari pemecahan ikatan kimia dalam nutrisi dapat disimpan melalui reduksi pembawa elektron atau dalam ikatan adenosin trifosfat (ATP). Dalam sistem kehidupan, sekelompok kecil senyawa berfungsi sebagai pembawa elektron bergerak, yaitu molekul yang mengikat dan memindahkan elektron berenergi tinggi antar senyawa dalam suatu jalur. Pembawa elektron utama yang akan kita bahas berasal dari kelompok vitamin B dan merupakan turunan dari nukleotida; yaitu nikotinamida adenin dinukleotida, nikotin adenin dinukleotida fosfat, dan flavin adenin dinukleotida. Senyawa ini dapat dengan mudah direduksi atau dioksidasi. Nicotinamide adenine dinucleotide (NAD⁺/NADH) adalah pembawa elektron bergerak yang paling umum digunakan dalam katabolisme. NAD⁺ adalah bentuk molekul yang teroksidasi; NADH adalah bentuk molekul yang tereduksi. Nikotin adenin dinukleotida fosfat (NADP⁺), bentuk teroksidasi dari varian NAD⁺ yang mengandung gugus fosfat tambahan, merupakan pembawa elektron penting lainnya; itu membentuk NADPH ketika direduksi. Bentuk teroksidasi dari flavin adenin dinukleotida adalah FAD, dan bentuk tereduksinya adalah FADH₂. Baik NAD⁺/NADH dan FAD/FADH₂ banyak digunakan dalam ekstraksi energi dari gula selama katabolisme pada

kemoheterotrof, sedangkan $\text{NADP}^+/\text{NADPH}$ memainkan peran penting dalam reaksi anabolik dan fotosintesis. Secara kolektif, FADH_2 , NADH , dan NADPH sering disebut memiliki daya pereduksi karena kemampuannya mendonorkan elektron ke berbagai reaksi kimia.

Sel hidup harus mampu menangani energi yang dilepaskan selama katabolisme sedemikian rupa sehingga memungkinkan sel menyimpan energi dengan aman dan melepaskannya untuk digunakan hanya jika diperlukan. Sel-sel hidup mencapai hal ini dengan menggunakan senyawa adenosin trifosfat (ATP). ATP sering disebut “mata uang energi” sel, dan, seperti mata uang, senyawa serbaguna ini dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi sel. Inti dari ATP adalah molekul adenosin monofosfat (AMP), yang terdiri dari molekul adenin yang terikat pada molekul ribosa dan satu gugus fosfat. Ribosa adalah gula lima karbon yang ditemukan di RNA, dan AMP adalah salah satu nukleotida dalam RNA. Penambahan gugus fosfat kedua pada molekul inti ini menghasilkan pembentukan adenosin difosfat (ADP); penambahan gugus fosfat ketiga membentuk ATP. Menambahkan gugus fosfat ke suatu molekul, suatu proses yang disebut fosforilasi, membutuhkan energi. Gugus fosfat bermuatan negatif sehingga akan saling tolak menolak jika disusun secara seri, seperti pada ADP dan ATP. Tolakan ini membuat molekul ADP dan ATP pada dasarnya tidak stabil. Jadi, ikatan antara gugus fosfat (satu pada ADP dan dua pada ATP) disebut ikatan fosfat berenergi tinggi. Ketika ikatan berenergi tinggi ini dipecah untuk melepaskan satu fosfat (disebut fosfat anorganik $[\text{Pi}]$) atau dua gugus fosfat yang terhubung (disebut pirofosfat $[\text{PPi}]$) dari ATP melalui proses yang disebut defosforilasi, energi dilepaskan untuk menggerakkan reaksi endergonik (Gambar 3.1).



Gambar 3.1 Reaksi eksergonik digabungkan dengan reaksi endergonik

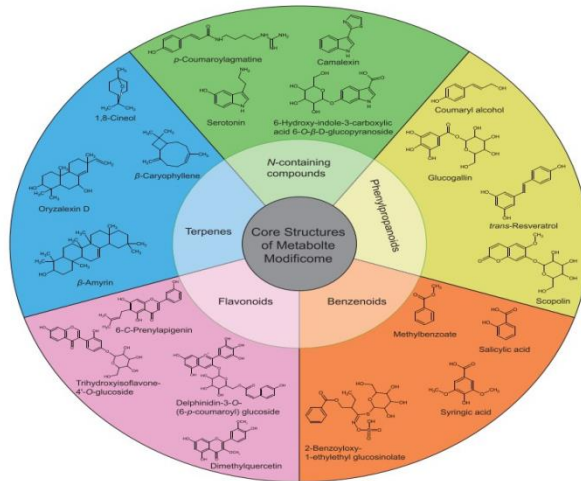
Sumber: Dimodifikasi dari libretxts biology (2023).

3.2 Modifikasi Metabolit pada Tumbuhan

Enzim merupakan biokatalis yang berperan penting dalam produksi biomolekul makhluk hidup khususnya tumbuhan. Enzim pada tumbuhan terlibat dalam aktivitas seluler mendasar dan sangat penting untuk regulasi pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Penelitian tentang eksplorasi dan karakterisasi enzim yang dilakukan oleh kalangan peneliti masa kini akan membantu pemahaman tentang enzim-enzim dan jalur metabolismenya sehingga bermanfaat untuk meningkatkan kesehatan tanaman maupun makhluk hidup lainnya yaitu hewan dan manusia. Selanjutnya, penelitian terkini terkait regulasi enzim dan metabolisme pada tumbuhan biasanya digunakan dalam penelitian menggunakan tanaman transgenik. Enzim yang terdapat pada tanaman transgenik dapat dirakit dengan struktur yang lebih menguntungkan untuk pemuliaan tanaman. Selain itu pemanfaatan pada bidang biomedis dan komersial lainnya masih terbuka luas. Oleh karena itu, untuk mempermudah pemahaman mengenai enzim dan metabolismenya, tanaman

transgenic dapat menawarkan alternatif yang baik untuk mempelajari ekspresi gen-gen dengan lebih baik dan produksi enzim skala besar.

Metabolisme tumbuhan terbagi menjadi dua yaitu primer dan sekunder. Metabolisme primer berlangsung pada sebagian besar spesies tumbuhan dan sangat mirip dengan spesies non-tumbuhan. Sedangkan metabolisme sekunder pada tumbuhan adalah kemampuan metabolisme tambahan untuk mensintesis sejumlah senyawa khusus dan membentuk sebagian besar senyawanya. Kelompok besar senyawa inilah yang memberikan tumbuhan memiliki pertahanan yang efektif terhadap tantangan tekanan biotik maupun abiotik. Struktur senyawa tumbuhan terdiri dari berbagai rantai carbon yang tersusun membentuk rantai carbon dan turunannya. Rantai carbon ini terbentuk atas reaksi glikolisis, asilasi, metilasi, hidroksilasi, dan penilasi struktur inti metabolit sekunder. Beberapa contoh struktur senyawa tumbuhan adalah: Senyawa yang mengandung N, fenilpropanoid, benzenoid, flavonoid, dan terpen (Gambar 2).



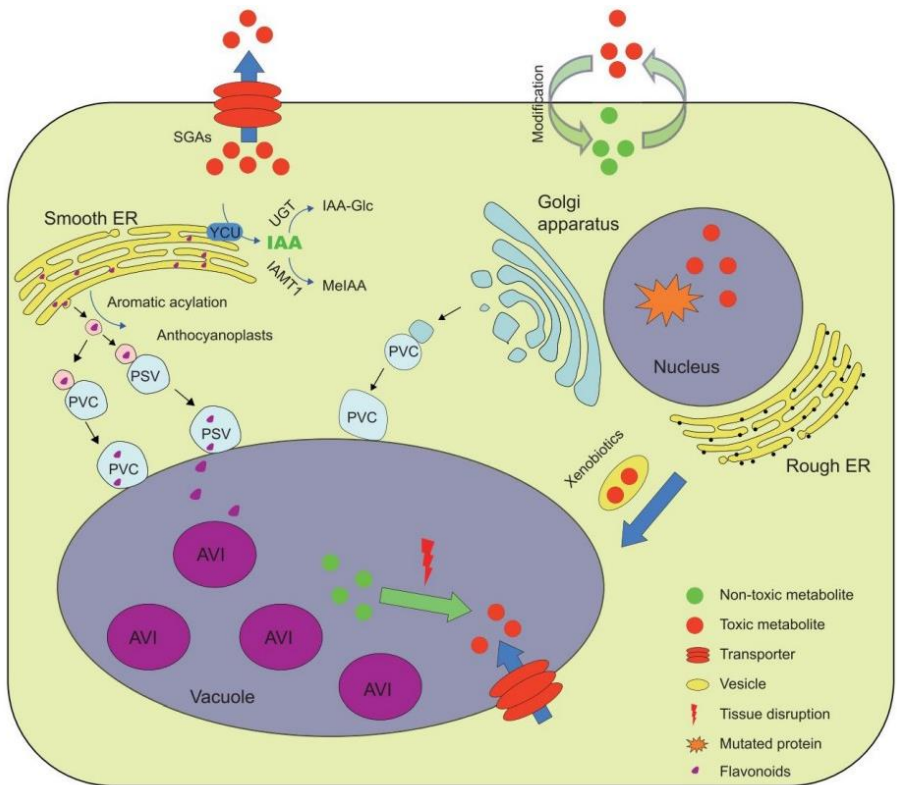
Gambar 3.2 Struktur inti metabolit sekunder tumbuhan
Sumber: Gambar dimodifikasi dari S Wang et al (2019); D'auria and Gershenzon (2005)

Proses metabolisme tumbuhan berpengaruh terhadap proses evolusi. Hal tersebut berpengaruh karena tumbuhan memiliki sensitifitas yang sangat tinggi terhadap perubahan lingkungan dan dapat beradaptasi dengan cepat untuk meminimalkan dampak buruk dari perubahan lingkungan tersebut. Respons adaptif ini bergantung pada integrasi pertumbuhan, perkembangan, dan metabolisme. Berbagai penelitian menyebutkan bahwa proses perubahan ini menyebabkan keragaman pada tumbuhan terjadi karena modifikasi gugus glikosil, karboksil, metil, dan hidroksil oleh masing-masing glikosiltransferase, asiltransferase, metiltransferase, dan sitokrom P450s yang merupakan modifikasi kimia mendasar. Metabolit yang dimodifikasi inilah yang telah merubah polaritas, volatilitas, dan stabilitas kimia dalam sel dan mempengaruhi kemampuan interaksi dengan senyawa lain maupun aktivitas biologisnya.

Pada banyak spesies tanaman, modifikasi antosianin adalah yang paling banyak dilakukan oleh para pemulia tanaman. Modifikasi dilakukan melalui glikosilasi, asilasi, atau metilasi yang memberikan sifat penyerap cahaya, stabilitas dalam larutan, bioavailabilitas, dan kemampuan berinteraksi dengan molekul lain. Ada dua jenis asilasi utama yaitu asilasi aromatik dan asilasi alifatik. Asilasi aromatik melibatkan penambahan gugus kumaroil dan sinapoil, yang menyebabkan stabilisasi molekul dan mengintensifkan warna antosianin. Sedangkan asilasi alifatik penting untuk kelarutan dalam air, stabilitas, dan ketahanan enzimatis. Modifikasi warna pada antosianin terasilasi lebih stabil jika dibandingkan dengan non-asilasi pada kondisi sel yang sama.

Pada tumbuhan tertentu, proses metabolisme dilakukan tumbuhan dengan tujuan untuk melindungi diri dari patogen dan herbivora atau untuk melindungi tanaman disekitarnya. Enzim-enzim yang terkait dengan jalur metabolisme ini sangat beragam substrat, fungsi dalam proses detoksifikasi, dan peran potensialnya dalam perkembangan dan homeostatisnya.

Gambar 3.2 berikut menjelaskan mekanisme utama modifikasi metabolit sekunder dalam pemeliharaan homeostatis sel tumbuhan. Metabolit toksik diubah menjadi tidak toksik melalui berbagai modifikasi, seperti glikolisasi steroid glikoalkaloid (SGA) dan xenobiotik. Flavonoid disintesis pada permukaan sitosol membrane reticulum endoplasma (ER) melalui aksi kompleks enzim biosintetik, dan aglikon ini kemudian mengalami berbagai modifikasi, seperti glikosilasi dan asilasi, dan produk diangkut oleh vakuola penyimpanan protein (PSV), dan kompartemen pra-vakuolar (PVC). Pada tanaman tembakau, asilasi aromatic antosianin merupakan faktor penting dalam pembentukan inklusi vakuolar antosianik (AVI). Modifikasi seperti glikosilasi dan metilasi mempunyai pengaruh penting terhadap penyimpanan dan aktivitas asam indole-3-asetat (IAA). IAA diubah menjadi IAA-glukosa (IAA-Glc) dan metil-IAA (MeIAA) melalui katalis UDP glukosiltransferase (UGT) dan IAA methyltransferase 1 (IAMT1). Gambar panah hijau dan panah biru masing-masing mewakili reaksi enzimatik dan transport transmembran (Gambar 3.3).



Gambar 3.3 Modifikasi Metabolit Sekunder Sebagai Respon Terhadap Pathogen

Sumber: gambar dimodifikasi dari S Wang et al (2019); Sirikantaramas et al (2007); Zhao and Dixon (2010); dan Korasick (2013).

DAFTAR PUSTAKA

- D'Auria, J.C., and Gershenzon, J. (2005). The secondary metabolism of *Arabidopsis thaliana*: glowing like a weed. *Curr. Opin. Plan Biol.* 8: 308-316.
- S Wang, S Alseekh, AR Fernie, J Luo. (2019). The structure and function of major plant metabolite modification. *Molecular Plant*. Vol 12 pp 899-919.
- Sirikantaramas S, Yamazaki M, and Saito K. (2007). Mechanism of resistance to self-produced toxic secondary metabolites in plants. *Phytochem. Rev.* 7: 7:467-477.
- Zhao J and Dixon RA. (2010). The 'ins' and 'out' of flavonoid transport. *Trends Plant Sci.* 20:576-585.
- Korsick DA, Enders TA, and Strader LC. (2013). Auxin biosynthesis and storage forms. *J.Exp. Bot.* 64: 2541-2555.
- Libretexts Biology. (Diakses pada tanggal 25 September 2023). https://bio.libretexts.org/Courses/Prince_Georges_Community_College/.

BAB 4

FOTOSINTESIS

Oleh Danang Budi Setyawan

4.1 Dasar-Dasar Fotosintesis

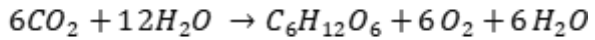
4.1.1 Peran Fotosintesis untuk Kehidupan

Fotosintesis adalah salah satu proses biokimia pada organisme berklorofil untuk menghasilkan sumber energi. Proses ini bukan hanya sekadar rangkaian reaksi kimia kompleks dalam sel tumbuhan dan alga, tetapi merupakan pondasi dari kehidupan di bumi kita. Dalam bab ini, kita akan menjelaskan secara rinci peran fotosintesis sebagai kunci ekosistem bumi serta peran fotosintesis dapat mendukung keberlanjutan seluruh kehidupan di planet ini.

Fotosintesis berperan penting dalam memproduksi oksigen di atmosfer Bumi. Tumbuhan dan alga memanfaatkan karbondioksida (CO_2) dari udara dan air, melalui proses fotosintesis dan menghasilkan oksigen sebagai produk sampingan. Lebih dari setengah oksigen yang kita hirup setiap hari berasal dari organisme laut seperti tumbuhan air dan mikroalga. Tanpa fotosintesis, kita tidak akan memiliki sumber oksigen yang cukup untuk mendukung kehidupan makhluk hidup keseluruhan.

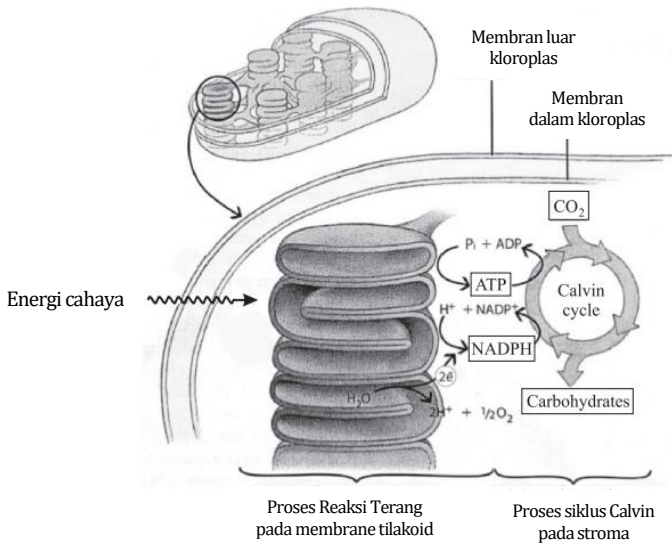
Fotosintesis juga merupakan dasar rantai makanan di Bumi. Selain menghasilkan oksigen, tumbuhan dan alga menggunakan energi matahari untuk mengubah CO_2 menjadi senyawa organik sumber energi seperti glukosa. Proses pembentukan sumber energi ini disebut dengan anabolisme. Tanpa fotosintesis, rantai makanan ini akan runtuh, dan

kehidupan di daratan akan terancam. Reaksi fotosintesis dapat digambarkan secara sederhana sebagai berikut:



Dalam proses reaksi fotosintesis terdapat beberapa konsep dasar ditunjukkan secara ringkas pada gambar 1, yaitu:

1. Penangkapan Cahaya: Fotosintesis dimulai dengan penangkapan cahaya matahari oleh pigmen fotosintesis, terutama klorofil, yang terletak dalam kloroplas sel tumbuhan dan alga. Klorofil mampu menangkap energi cahaya dan mengubahnya menjadi energi kimia.
2. Reaksi terang (*Light Reactions*): Energi cahaya yang ditangkap oleh klorofil digunakan dalam tahap terang untuk menghasilkan energi kimia dalam bentuk ATP (adenosine triphosphate) dan NADPH (nicotinamide adenine dinucleotide phosphate). Selama tahap ini, molekul air dipecah menjadi O_2 , elektron, dan proton.
3. Reaksi gelap (*Calvin Cycle*): Energi kimia yang dihasilkan selama tahap terang digunakan dalam tahap gelap untuk mengubah CO_2 menjadi senyawa organik, terutama glukosa. Proses ini melibatkan sejumlah reaksi kimia kompleks yang menggunakan ATP dan NADPH sebagai sumber energi.



Gambar 4.1. Proses Reaksi Fotosintesis

(Kochhar dan Gujral, 2020)

4.1.2 Sejarah Penemuan Fotosintesis

Awal mula penelitian mengenai proses fotosintesis dimulai sekitar 300 tahun yang lalu. Bermula dari seorang ilmuwan bernama Jan Baptista van Helmont dari Belanda menyampaikan ide mengenai air merupakan salah satu komponen reaktan penting dalam suatu percobaan. Jan Baptista van Helmont dan Joseph Priestley melakukan eksperimen yang berkaitan dengan pertukaran gas oleh tumbuhan. Van Helmont melakukan eksperimen pertama yang mencatat pertumbuhan tanaman yang sebanding dengan penambahan air, sementara Priestley menemukan bahwa tanaman dapat menghasilkan oksigen yang diperlukan untuk respirasi hewan. Kemudian Hales pada tahun 1772, seorang ilmuwan Bernama Joseph Prisetley mengatakan bahwa tumbuhan memiliki peran dalam memurnikan udara. Priestley bersama rekannya, Jan Ingenhousz, melakukan percobaan dan menemukan bahwa fotosintes dapat terjadi dengan kehadiran

cahaya dan terjadi pada tumbuhan hijau. Namun, dalam percobaannya baru diketahui bahwa terjadi pemurnian udara oleh tumbuhan. Adapun udara murni merupakan oksigen (O_2) dan tidak murni merupakan CO_2 baru dikemukakan oleh seorang ilmuwan Perancis bernama Antoine Lavoisier pada tahun 1785.

Pada tahun 1845, ilmuwan seperti Julius Robert von Mayer dan Julius Sachs memperkenalkan konsep CO_2 sebagai bahan dasar yang dibutuhkan oleh tumbuhan selama fotosintesis. Mayer juga mengemukakan konsep tentang konversi energi dalam fotosintesis. Teori tersebut didukung oleh penemuan Theodore Engelmann pada tahun 1883 bahwa pada filamen mikroalga yang disinari spektrum cahaya, bakteri banyak terkumpul pada spektrum cahaya biru dan merah. Selain itu, penemuan Julius von Sachs mengabarkan bahwa kloroplast merupakan organel yang berperan dalam fiksasi CO_2 dan pelepasan O_2 . Abad ke-20 menyaksikan penelitian lebih lanjut tentang fotosintesis. Melalui penggunaan teknologi yang lebih canggih, para ilmuwan seperti C.B. van Niel dan Robert Emerson menjelajahi reaksi kimia yang terlibat dalam fotosintesis dan memahami peran foton dalam reaksi terang. Pada tahun 1940-an, ilmuwan Melvin Calvin mengungkapkan serangkaian reaksi kimia yang sekarang dikenal sebagai siklus Calvin, yang menggambarkan reaksi gelap fotosintesis. Ini adalah langkah besar dalam pemahaman mekanisme fotosintesis. Pada tahun 1950-an, penelitian lebih lanjut mengenai reaksi fotosistem, tempat terjadinya penangkapan cahaya dalam fotosintesis, mengungkapkan lebih banyak rincian tentang tahap terang. Penelitian ini juga mendukung perkembangan fotosintesis sintetik, yaitu upaya manusia untuk meniru proses fotosintesis untuk menghasilkan energi.

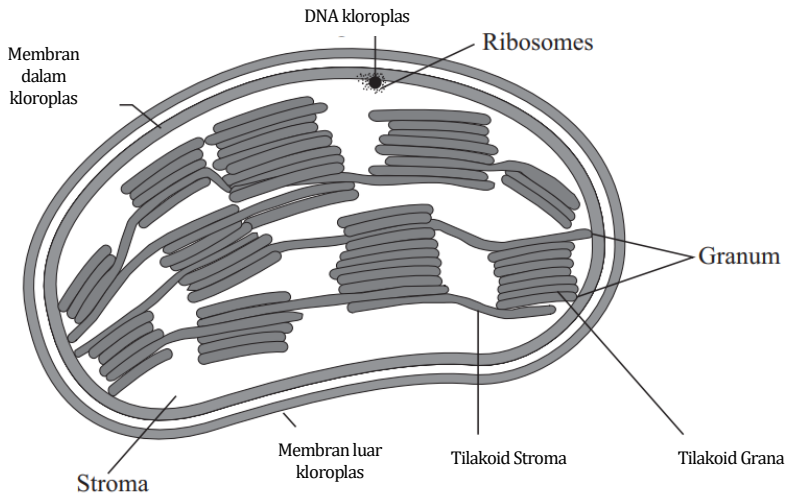
4.2 Kloroplas: Struktur Penunjang Fotosintesis

Kloroplas adalah organel berbentuk seperti biji kacang hijau yang menjadi pusat kegiatan fotosintesis dalam sel tumbuhan dan alga. Ini adalah struktur vital yang memungkinkan organisme autotrof, seperti tumbuhan, untuk mengubah energi matahari menjadi energi kimia yang tersimpan dalam senyawa organik dan menghasilkan oksigen. Mari kita telusuri lebih dalam tentang komponen penting ini yang mendukung kehidupan di Bumi.

4.2.1 Morfologi dan Struktur Kloroplas

Secara morfologi, kloroplas memiliki bentuk yang menyerupai biskuit berbentuk cakram dengan diameter sekitar 2 hingga 10 mikrometer. Ini terdiri dari beberapa struktur utama, dengan rincian seperti terlihat pada gambar 4.2:

1. **Membran Tilakoid:** Kloroplas mengandung staks tilakoid, yang merupakan membran internal berlapis-lapis. Tilakoid ini mengandung pigmen fotosintesis, termasuk klorofil, yang menangkap energi cahaya matahari selama tahap terang fotosintesis.
2. **Stroma:** Stroma adalah cairan yang mengisi ruang di antara tilakoid. Ini mengandung enzim dan molekul yang diperlukan untuk tahap gelap fotosintesis, yang dikenal sebagai siklus Calvin.



Gambar 4.2 Struktur Kloroplas

(Kochhar dan Gujral, 2020)

4.2.2 Peran Kloroplas dalam Fotosintesis

Kloroplas adalah "pabrik" fotosintesis, tempat proses ini terjadi. Proses fotosintesis dapat dibagi menjadi dua tahap utama:

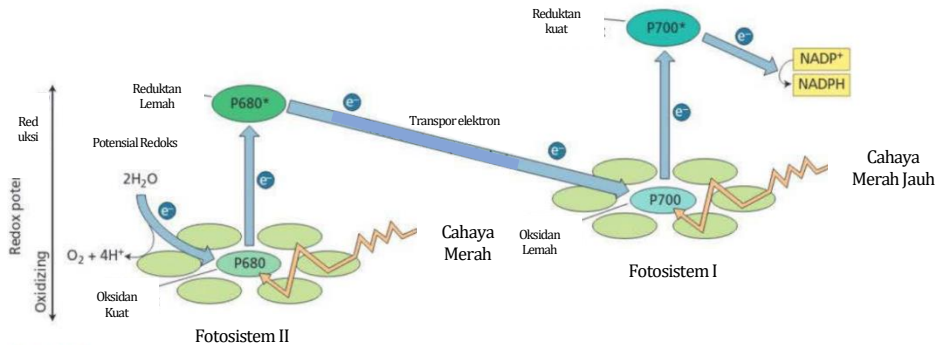
- **Reaksi Terang:** Reaksi ini terjadi di membran tilakoid, tempat klorofil menangkap energi cahaya matahari. Energi ini digunakan untuk memecah molekul air menjadi oksigen, elektron, dan proton. Oksigen dilepaskan ke atmosfer sebagai produk sampingan, sedangkan elektron digunakan dalam reaksi selanjutnya.
- **Reaksi Gelap:** Reaksi gelap terjadi di stroma kloroplas. Di sini, molekul CO_2 diubah menjadi senyawa organik seperti glukosa melalui serangkaian reaksi kimia yang rumit. Proses ini memerlukan energi yang disediakan oleh ATP dan NADPH yang dihasilkan selama tahap terang.

4.2.3 Arti Penting Kloroplas

Kloroplas memiliki peran sentral dalam menjaga keseimbangan ekosistem Bumi. Ini adalah produsen utama oksigen yang kita hirup setiap hari dan menyediakan dasar rantai makanan di planet ini. Tumbuhan hijau, yang mengandung kloroplas, adalah sumber makanan bagi manusia dan hewan. Selain itu, fotosintesis mengurangi kadar karbon dioksida di atmosfer, membantu mengendalikan perubahan iklim global. Selain itu, kloroplas memungkinkan tumbuhan untuk beradaptasi terhadap lingkungan mereka. Tumbuhan dapat mengatur jumlah kloroplas mereka dan mengubah struktur tilakoid untuk mengoptimalkan penangkapan cahaya matahari dalam kondisi berbeda. Dalam pandangan keseluruhan, kloroplas adalah mesin hijau yang memainkan peran kunci dalam menjaga keberlanjutan kehidupan di Bumi. Dengan kemampuannya untuk mengubah sinar matahari menjadi sumber energi dan nutrisi, kloroplas adalah salah satu elemen terpenting dalam kehidupan di planet ini.

4.3 Reaksi Terang

Reaksi terang adalah salah satu tahap penting dalam proses fotosintesis yang terjadi dalam kloroplas tumbuhan, alga, dan beberapa bakteri fotosintetik. Tahap ini merupakan langkah awal dalam konversi energi cahaya matahari menjadi energi kimia yang dapat digunakan oleh sel.



Gambar 4.3 Proses Reaksi Terang

(Sumber: Taiz, dkk. 2018)

4.3.1 Tahap-Tahap Reaksi Terang

1. **Penangkapan Energi Cahaya:** Klorofil dan pigmen lainnya di tilakoid memiliki kemampuan untuk menyerap energi cahaya matahari. Saat molekul klorofil menangkap foton (partikel cahaya), mereka mengalami perubahan energi yang menghasilkan elektron berenergi tinggi.
2. **Penguraian Molekul Air:** Energi dari elektron berenergi tinggi digunakan untuk memecah molekul air (H_2O) yang diambil oleh tumbuhan melalui proses yang disebut fotolisis air. Fotolisis air menghasilkan O_2 , elektron, dan proton (H^+). Oksigen dihasilkan sebagai produk sampingan dan dilepaskan ke atmosfer.

3. Pelepasan Energi: Elektron yang dihasilkan selama fotolisis air dilepaskan dari molekul klorofil dan melewati serangkaian protein membran yang disebut rantai transport elektron. Selama perjalanan ini, energi elektron digunakan untuk memompa proton ke dalam tilakoid, menciptakan gradien elektrokimia di sepanjang membran tilakoid.
4. Pembentukan ATP: Gradien elektrokimia yang dihasilkan oleh rantai transport elektron digunakan untuk menghasilkan energi ATP melalui enzim ATP synthase. ATP adalah molekul yang mengandung energi yang sangat penting untuk reaksi kimia dalam sel.
5. Penghasilan NADPH: Selain ATP, elektron berenergi tinggi juga digunakan untuk mereduksi molekul NADP^+ menjadi NADPH. NADPH adalah molekul pembawa elektron yang akan digunakan dalam tahap gelap fotosintesis (siklus Calvin) untuk mengubah CO_2 menjadi senyawa organik.

4.3.2 Peran Reaksi Terang

Reaksi terang (Gambar 5.3) adalah langkah kunci dalam fotosintesis karena menghasilkan ATP dan NADPH yang dibutuhkan selama reaksi gelap (Siklus Calvin) untuk mengubah karbon dioksida (CO_2) menjadi senyawa organik seperti glukosa. Selain itu, reaksi terang juga menghasilkan oksigen (O_2) sebagai produk sampingan yang dilepaskan ke atmosfer dan digunakan oleh berbagai makhluk hidup untuk bernapas. Dengan demikian, reaksi terang adalah langkah awal yang vital dalam proses fotosintesis, di mana energi cahaya matahari diubah menjadi bentuk energi kimia yang dapat digunakan oleh sel untuk pertumbuhan, perkembangan, dan fungsi seluler lainnya.

4.4 Reaksi Gelap (Siklus Calvin)

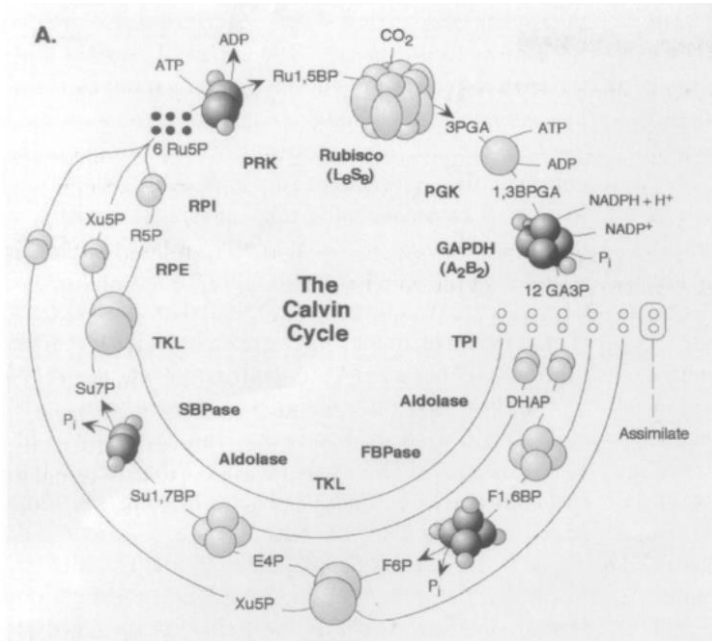
Siklus Calvin, juga dikenal sebagai siklus Calvin-Benson atau siklus Calvin-Benson-Bassham, adalah salah satu tahap dalam proses fotosintesis yang terjadi di kloroplas sel tumbuhan, alga, dan bakteri fotosintetik. Siklus ini merupakan reaksi gelap fotosintesis terjadinya reaksi CO_2 diubah menjadi senyawa organik, seperti glukosa. Siklus Calvin terjadi dalam stroma, yang adalah cairan yang mengisi ruang di antara tilakoid dalam kloroplas. Proses reaksi gelap sering juga disebut dengan asimilasi karbon.

4.4.1 Tahap-Tahap Siklus Calvin

Siklus Calvin melibatkan serangkaian reaksi kimia yang kompleks, yang dapat dibagi menjadi tiga tahap utama (Gambar 4.4):

1. Fiksasi Karbon (*Carbon Fixation*): Tahap pertama dalam siklus Calvin adalah fiksasi karbon. Pada tahap ini, CO_2 dari atmosfer diambil oleh enzim ribulosa-1,5-bisfosfat karboksilase/oksigenase (RuBisCO) dan diikat ke ribulosa-1,5-bisfosfat (RuBP), yang merupakan molekul lima atom karbon. Hasilnya adalah pembentukan dua molekul 3-fosfoglisarat (3-PGA) yang memiliki tiga atom karbon.
2. Reduksi: Tahap kedua dalam siklus Calvin adalah tahap reduksi. Dalam tahap ini, ATP (adenosine triphosphate) dan NADPH (nicotinamide adenine dinucleotide phosphate) yang dihasilkan selama reaksi terang (light reactions) digunakan untuk mengubah 3-PGA menjadi gliseraldehida-3-fosfat (G3P), yang merupakan senyawa yang lebih kaya energi dan memiliki tiga atom karbon juga. Sebagian besar G3P yang dihasilkan kembali ke tahap pertama untuk membentuk RuBP dalam proses yang memerlukan energi ATP tambahan.

3. Regenerasi RuBP: Tahap terakhir dalam siklus Calvin adalah regenerasi RuBP. G3P yang tersisa dari tahap kedua digunakan untuk menghasilkan RuBP melalui serangkaian reaksi kimia. RuBP ini kemudian kembali ke tahap pertama untuk memulai siklus baru. Proses regenerasi ini memerlukan konsumsi ATP yang dihasilkan selama reaksi terang.



Gambar 4.4 Proses Siklus Calvin pada Reaksi Gelap

(Sumber: Martin, dkk. 2000)

4.4.2 Peran Siklus Calvin

Siklus Calvin adalah bagian penting dari fotosintesis karena mengubah CO₂ menjadi senyawa organik yang lebih kompleks, seperti glukosa. Proses ini memerlukan energi ATP dan NADPH yang dihasilkan selama reaksi terang, sehingga senyawa organik yang dihasilkan dapat digunakan sebagai sumber energi dan bahan bangunan untuk pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan. Selain itu, siklus Calvin juga

berkontribusi pada pengendalian kadar CO₂ di atmosfer Bumi dengan mengambil CO₂ dari udara selama fotosintesis. Ini memiliki dampak penting dalam mitigasi perubahan iklim global. Dalam pandangan keseluruhan, Siklus Calvin adalah tahap gelap yang penting dalam fotosintesis, yang berperan dalam menghasilkan senyawa organik, mengendalikan CO₂ di atmosfer, dan mendukung keberlanjutan kehidupan di Bumi.

4.5 Fotosintesis Tanaman C4 dan CAM

Tanaman C4 dan CAM adalah dua strategi fotosintesis yang dikembangkan oleh tumbuhan sebagai adaptasi terhadap kondisi lingkungan yang berbeda. Berikut adalah penjelasan tentang proses fotosintesis pada tanaman C4 dan CAM:

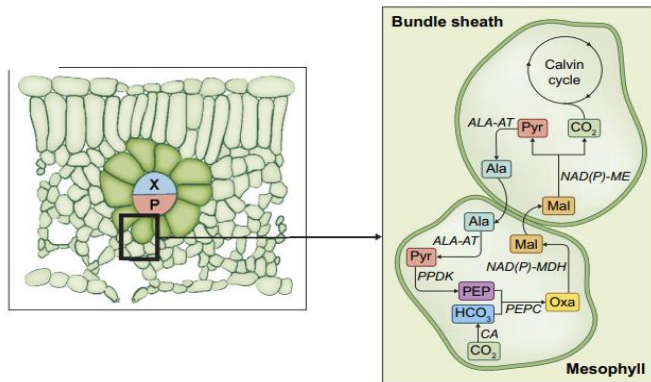
4.5.1 Fotosintesis pada Tanaman C4

Proses fotosintesis tanaman C4 merupakan bentuk adaptasi tumbuhan yang berkembang pada lingkungan yang panas dan kering. Beberapa contoh tumbuhan antara lain jagung, tebu, dan sorgum. Proses reaksi tanaman C4 (Gambar 4.5) sebagai berikut:

1. **Fiksasi Karbon Awal:** Pada tanaman C4, fotosintesis dimulai dengan fiksasi CO₂ pada sel khusus yang disebut sel mesofil. Sel mesofil ini memiliki enzim PEP karboksilase (fosfoenolpiruvat karboksilase), yang memiliki afinitas yang tinggi terhadap CO₂. PEP karboksilase menggabungkan CO₂ dengan fosfoenolpiruvat (PEP) untuk membentuk asam oksaloasetat (OAA), yang memiliki empat atom karbon.
2. **Transfer CO₂ ke Sel *Bundle Sheath*:** OAA yang dihasilkan dalam sel mesofil diubah menjadi malat atau aspartat dan ditransport ke sel *bundle sheath* melalui jalur transport khusus. Sel *bundle sheath* mengandung enzim RuBisCO (ribulosa-1,5-bisfosfat karboksilase/oksigenase), yang

bertanggung jawab untuk fiksasi CO_2 menjadi senyawa organik.

3. Fiksasi Ulang CO_2 dalam Sel Bundle Sheath: Dalam sel bundle sheath, CO_2 dilepaskan dari malat atau aspartat dan dimasukkan ke dalam siklus Calvin, di mana ia diubah menjadi senyawa organik yang lebih kompleks. Ini memungkinkan tumbuhan C_4 untuk mengatasi permasalahan fiksasi oksigen oleh RuBisCO, yang sering terjadi pada tumbuhan C_3 .
4. Reaksi Terang: Proses fotosintesis pada tanaman C_4 juga melibatkan tahap terang yang sama seperti pada tanaman C_3 dan C_4 . Tahap terang terjadi di tilakoid kloroplas dan melibatkan penangkapan cahaya matahari, produksi ATP, dan NADPH.



Gambar 4.5. Proses Reaksi Fotosintesis Pada Tanaman C_4

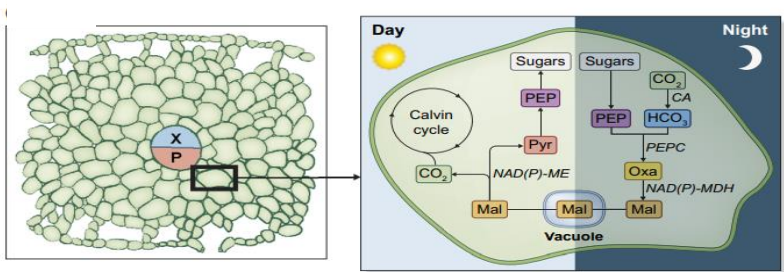
(Sumber: Edwards, 2019)

4.5.2 Fotosintesis pada Tanaman CAM (Crassulacean Acid Metabolism)

Proses fotosintesis tanaman CAM merupakan bentuk adaptasi tumbuhan yang berkembang pada lingkungan yang panas dan kering khususnya pada tumbuhan crassulacean. Beberapa contoh tumbuhan antara lain jagung, tebu, dan

sorgum. Proses reaksi tanaman C4 (Gambar 4.6) sebagai berikut:

1. Pemisahan Waktu: Tanaman CAM melakukan fotosintesis pada dua tahap terpisah dalam satu hari untuk menghindari penguapan air yang tinggi selama siang hari. Pada malam hari, stomata pada daun terbuka, dan CO₂ diambil dari udara dan diikat menjadi asam organik, seperti asam malat, yang disimpan dalam vakuola sel.
2. Penyimpanan Asam Organik: Selama siang hari, stomata ditutup untuk menghindari penguapan air berlebihan. Pada saat itu, tanaman menggunakan asam organik yang telah disimpan dalam vakuola sebagai sumber CO₂ untuk fotosintesis di sel kloroplas.
3. Tahap Terang: Seperti pada tanaman C3 dan C4, tahap terang pada tanaman CAM terjadi di tilakoid kloroplas. Energi cahaya matahari digunakan untuk menghasilkan ATP dan NADPH, yang diperlukan untuk reaksi gelap atau reduksi CO₂ menjadi senyawa organik.



Gambar 4.6 Proses Reaksi Fotosintesis Pada Tanaman CAM

(Sumber: Edwards, 2019)

Kesimpulannya, tanaman C4 dan CAM memiliki strategi khusus untuk mengatasi permasalahan terkait dengan pengambilan CO₂ dan penggunaan air selama fotosintesis. Tanaman C4 menggunakan sel mesofil dan sel bundle sheath untuk memisahkan fiksasi CO₂, sementara tanaman CAM memisahkan waktu antara pengambilan CO₂ dan tahap terang.

Kedua strategi ini adalah adaptasi terhadap kondisi lingkungan yang kering dan panas di mana tumbuhan perlu mengoptimalkan penggunaan air dan CO₂.

4.6 Fotorespirasi

Fotorespirasi adalah proses metabolik yang terjadi pada tanaman, terutama pada kloroplas sel-sel daun, ketika terjadi interaksi antara oksigen (O₂) dan CO₂ dalam kondisi tertentu. Proses ini sering dilihat sebagai proses yang tidak produktif dan menghambat karena bersaing dengan fotosintesis, proses utama di mana tumbuhan mengubah energi cahaya matahari menjadi energi kimia dalam bentuk glukosa dan senyawa organik lainnya. Penyebab utama terjadinya fotorespirasi adalah ketika tanaman mengalami stres lingkungan, seperti paparan intensitas cahaya yang tinggi atau suhu yang naik. Di bawah kondisi ini, stomata pada daun tumbuhan mungkin akan menutup untuk menghindari penguapan air yang berlebihan. Ketika stomata tertutup, ketersediaan CO₂ di dalam sel-sel daun dapat menurun, sementara O₂ yang dihasilkan selama fotosintesis tetap berada dalam sel.

Proses fotorespirasi dimulai ketika enzim RuBisCO (ribulosa-1,5-bisfosfat karboksilase/oksigenase) yang biasanya berperan dalam fiksasi CO₂, secara tidak sengaja mengikat O₂ alih-alih CO₂. Hasil dari interaksi ini adalah pembentukan senyawa 2-fosfoglikolat (2-PG) dan 3-fosfoglikarat (3-PGA), yang memulai rangkaian reaksi yang melibatkan organel sel seperti peroksisom, mitokondria, dan kloroplas (Gambar 4.7).

seperti panas dan kekeringan. Ini adalah salah satu contoh adaptasi evolusioner yang memungkinkan tumbuhan untuk bertahan di berbagai ekosistem.

4.7 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Fotosintesis

Fotosintesis adalah proses kompleks yang sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor. Faktor-faktor ini memengaruhi sejauh mana tumbuhan dapat melakukan fotosintesis dengan efisien. Berikut adalah beberapa faktor penting yang mempengaruhi fotosintesis:

1. **Intensitas Cahaya Matahari:** Intensitas cahaya matahari adalah salah satu faktor terpenting yang memengaruhi fotosintesis. Tumbuhan membutuhkan cahaya matahari sebagai sumber energi untuk menggerakkan tahap terang (light reactions) fotosintesis. Kadar cahaya yang cukup akan meningkatkan laju fotosintesis, sedangkan kurangnya cahaya akan menghambatnya.
2. **Ketersediaan Karbon Dioksida (CO_2):** Karbon dioksida (CO_2) adalah salah satu bahan baku utama dalam fotosintesis. Tingkat CO_2 yang lebih tinggi dapat meningkatkan laju fotosintesis jika semua faktor lainnya mencukupi. Di lingkungan dengan konsentrasi CO_2 yang rendah, fotosintesis dapat terhambat.
3. **Suhu:** Suhu memengaruhi kecepatan reaksi kimia dalam fotosintesis. Suhu yang optimal akan meningkatkan laju fotosintesis. Namun, suhu yang terlalu rendah dapat memperlambat aktivitas enzim, sementara suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan denaturasi enzim dan mengurangi efisiensi fotosintesis.
4. **Ketersediaan Air:** Air adalah komponen penting dalam fotosintesis karena digunakan dalam fotolisis air, tahap awal reaksi terang. Ketersediaan air yang mencukupi akan memastikan fotosintesis berjalan lancar. Kekurangan air dapat

menyebabkan stomata menutup, menghambat pengambilan CO₂, dan mengurangi laju fotosintesis.

5. Nutrisi Tanah: Nutrien seperti nitrogen, fosfor, kalium, dan magnesium diperlukan untuk produksi klorofil dan komponen lain yang terlibat dalam fotosintesis. Kekurangan nutrisi ini dapat menghambat kemampuan tumbuhan untuk melakukan fotosintesis dengan efisien.
6. Kehadiran Enzim RuBisCO: RuBisCO (ribulosa-1,5-bisfosfat karboksilase/oksigenase) adalah enzim kunci dalam fiksasi karbon dalam siklus Calvin. Kehadiran enzim ini dalam sel tumbuhan sangat penting untuk fotosintesis yang efisien.
7. Kepadatan Stomata: Stomata adalah struktur mikroskopis pada daun yang mengatur pertukaran gas antara tumbuhan dan atmosfer. Kepadatan stomata yang lebih tinggi pada permukaan daun dapat meningkatkan akses CO₂ ke sel tumbuhan, meningkatkan laju fotosintesis.
8. Genetik dan Jenis Tumbuhan: Jenis tumbuhan memiliki perbedaan genetik dalam kapasitas fotosintesis mereka. Beberapa tumbuhan, seperti tanaman C₄ dan CAM, memiliki adaptasi khusus untuk meningkatkan efisiensi fotosintesis di lingkungan tertentu.
9. Stres Lingkungan: Faktor-faktor lingkungan seperti kekeringan, polusi udara, dan radiasi UV dapat mengganggu proses fotosintesis dan mengurangi efisiensinya.
10. Usia Tanaman: Tanaman yang lebih muda cenderung memiliki tingkat fotosintesis yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanaman yang lebih tua.
11. Penyakit dan Serangan Hama: Penyakit dan serangan hama pada tanaman dapat merusak struktur dan fungsi sel, termasuk kloroplas, yang dapat menghambat fotosintesis.

Faktor-faktor ini saling berinteraksi dan dapat berdampak pada sejauh mana tumbuhan dapat melakukan fotosintesis. Ketika semua faktor tersebut dalam kondisi optimal, tumbuhan dapat melakukan fotosintesis dengan efisien, menghasilkan oksigen, dan menghasilkan senyawa organik yang mendukung pertumbuhan dan perkembangan mereka.

DAFTAR PUSTAKA

- Blankenship, R.E. 2021. *Molecular Mechanisms of Photosynthesis 3rd edition*. UK: Wiley.
- Eberhard, S., Finazzi, G., & Wollman, F. 2008. The Dynamics of Photosynthesis. *The Annual Review of Genetics* vol 42, 463 – 515. DOI: 10.1146/annurev.genet.42.110807.091452.
- Edwards, E. J. 2019. Evolutionary trajectories, accessibility and other metaphors: the case of C4 and CAM photosynthesis. *New Phytologist* vol. 233 (4), 1742 – 1755. <https://doi.org/10.1111/nph.15851>.
- Evans, J.R. 2013. Improving Photosynthesis. *Plant Physiology* 162(4), 1780 - 1793. doi: 10.1104/pp.113.219006.
- Martin, W., Scheibe, R., & Schnarrenberger, C. (2000). The Calvin Cycle and Its Regulation. *Advances in Photosynthesis and Respiration*, 9 – 51. doi:10.1007/0-306-48137-5_2.
- Kochhar, S. L., & Gujral, S. K. 2020. *Plant Physiology: Theory and Applications 2nd Edition*. New York: Cambridge University Press.
- Peterhansel, C. & Maurino, V.G. 2011. Photorespiration Redesigned. *Plant Physiology* 155, 49 – 55. doi: 10.1104/pp.110.165019.
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. 2018. *Fundamentals of Plant Physiology 1st Edition*. New York: Oxford University Press.
- Wang, D., Heckathron, S.A., Barua, D., dkk. 2008. Effects of Elevated CO₂ on the tolerance of Photosynthesis to Accute Heat Stress in C3, C4, and CAM Species. *American Journal of Botany* 95(2), 165 – 176.

BAB 5

RESPIRASI SEL

Oleh Ria Megasari

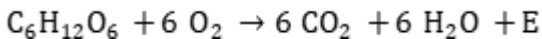
5.1 Pengertian

Respirasi sel adalah cara paling umum untuk memisahkan molekul alami kompleks yang kaya akan energi yang diharapkan menjadi produk sampingan energi yang lebih rendah (siklus katabolik) di tingkat sel. Baik siang maupun malam hari, kita bernafas. Kita sadar bahwa semua makhluk hidup, termasuk tumbuhan, membutuhkan energi untuk beraktivitas (Campbell, 2002). Semua sel aktif bernafas, melepaskan CO₂ dalam jumlah yang sama dan menyerap oksigen. Dalam kondisi tertentu, protein, asam organik, pati, fruktan, sukrosa, dan lemak semuanya dapat digunakan sebagai substrat untuk respirasi. Senyawa tersebut dioksidasi menjadi CO₂ dan O₂ yang diserap direduksi menjadi H₂O dalam reaksi yang dikenal sebagai oksidasi-reduksi (Harahap, 2012). Semua bagian tumbuhan bernafas; tumbuhan tingkat tinggi bernafas melalui daun, batang, dan akarnya. Secara kimia, respirasi aerobik menghasilkan glukosa (karbohidrat), yang merupakan kebalikan dari fotosintesis. Pembakaran glukosa oleh oksigen selama respirasi menghasilkan produksi energi, dan respirasi terjadi di dalam sel-sel jaringan yang membentuk semua bagian tumbuhan (Santyasa, 2005).

Namun, tidak semua tumbuhan hijau bernafas dengan menyerap oksigen dari lingkungannya. Tidak ada tanaman yang memiliki klorofil yang dapat bernafas tanpa oksigen. Proses pernapasan digunakan untuk mendapatkan energi. Energi akan dilepaskan saat tumbuhan bernafas. Tumbuhan anaerobik mendapatkan energinya dengan memecah unsur-unsur yang

mereka butuhkan untuk bertahan hidup. Selama proses tersebut, karbondioksida dan uap air akan tercipta melalui respirasi aerobik/anaerobik. Tubuh membutuhkan oksigen, sehingga uap air dan gas dihilangkan, dan karbon dioksida dihilangkan melalui difusi. Stomata pada permukaan daun dan inti sel pada kulit batang merupakan tempat masuk dan keluarnya gas dari tumbuhan. Proses keluar masuknya gas juga dapat berlangsung di dalam tanah melalui akar tanaman. Tumbuhan yang tumbuh subur di lingkungan berlumpur atau berawa memiliki akar yang menonjol dari tanah. Akar napas adalah nama dari akar ini. Komponen katalitik, yang juga disebut sebagai enzim, diperlukan untuk siklus reaksi pernapasan (idealnya, pernapasan itu sendiri). Pencampuran dengan fungsi enzim atau menggabungkan situs aktifnya dimungkinkan oleh sejumlah proses kimia. Aktivitas enzim akan terhambat akibat penggunaan ini (Kimbal, 1983).

Tumbuhan dan makhluk hidup lainnya sama-sama membutuhkan respirasi untuk bertahan hidup. Tumbuhan melakukan proses respirasi untuk mengubah energi kimia menjadi energi yang dibutuhkan untuk kehidupan. Tumbuhan menghasilkan oksigen 10 kali lebih banyak sepanjang siang hari melalui fotosintesis daripada melalui respirasi. Akibatnya, proses fotosintesis memanfaatkan CO₂ yang dihasilkan oleh respirasi. Bagian dari oksigen yang tercipta selama fotosintesis digunakan oleh tumbuhan selama respirasi; melalui daun, oksigen yang tersisa berdifusi ke udara. Berikut ini adalah reaksi yang terjadi selama respirasi:



Glikolisis, siklus Krebs, dan transpor elektron adalah tiga tahap di mana glukosa dipecah menjadi H₂O, CO₂, dan energi. Glikolisis adalah proses dimana setiap molekul glukosa menghasilkan dua molekul asam piruvat, dua molekul NADH, yang menyediakan elektron berenergi tinggi, dan dua molekul ATP. Siklus Krebs, juga dikenal sebagai siklus trikarboksilat atau siklus asam sitrat, adalah

penguraian asam piruvat secara aerobik menjadi CO_2 , H_2 , dan energi kimia. Rantai transpor elektron pernapasan adalah bagian dari reaksi ini. Melalui stomata pada daun tanaman, tubuh akhirnya mengeluarkan produk sampingan dari respirasi. Tumbuhan mendapatkan berbagai keuntungan dari respirasi. Bahan kimia yang dihasilkan oleh mekanisme respirasi ini sangat penting untuk pembentuk tubuh tanaman. Beberapa zat tersebut antara lain karotenoid, lipid, sterol, pigmen flavonoid seperti antosianin, beberapa senyawa aromatik seperti lignin, asam amino untuk protein, nukleotida untuk asam nukleat, dan karbon untuk pigmen proklorofil seperti klorofil dan sitokrom. Sementara itu, energi dari oksidasi selama respirasi dapat digunakan untuk mensintesis molekul tambahan yang diperlukan untuk pertumbuhan.

Beberapa faktor di bawah ini, dapat memengaruhi laju respirasi:

- a. Ketersediaan substrat
Tanaman yang memiliki sedikit substrat juga akan bernafas dengan lambat. Di sisi lain, respirasi juga akan lebih cepat jika tersedia banyak substrat.
- b. Suhu
Laju respirasi biasanya meningkat dengan naiknya suhu sebesar 10°C . Namun, ini bervariasi dari setiap jenis tanaman
- c. Ketersediaan Oksigen
Jumlah oksigen yang tersedia akan berpengaruh pada laju respirasi, tetapi besarnya efek ini bervariasi dari setiap spesies. Bahkan pada tumbuhan yang sama, efek oksigen bervariasi dari satu organ dengan yang lainnya.
- d. Jenis tanaman dan umur
Metabolisme setiap spesies unik, sehingga jumlah respirasi yang dibutuhkan juga akan berbeda-beda. Tanaman yang lebih muda melakukan respirasi lebih baik daripada tanaman yang lebih tua. (Ross, 1995)

5.2 Jenis – Jenis Respirasi

Selama proses respirasi, di berbagai bagian tanaman, terjadi pertukaran gas dalam jumlah yang relatif lebih rendah. Oleh karena itu, setiap bagian tumbuhan memenuhi dan memelihara kebutuhan energinya sendiri. Daun, akar, dan batang tanaman cenderung bertukar gas secara terpisah. Stomata adalah pori-pori kecil yang ditemukan di daun yang membantu pertukaran gas. Sel-sel pada daun akan menggunakan oksigen yang dikonsumsi tanaman melalui stomata. Pada gilirannya, ini membantu pemecahan glukosa menjadi air dan karbon dioksida.

Daun tanaman terdiri dari pori-pori kecil yang kita sebut stomata. Selama proses respirasi, pertukaran gas pada daun terjadi melalui stomata. Oksigen dari lingkungan memasuki daun melalui stomata dan mencapai sel melalui proses difusi. Oksigen yang masuk ke sel-sel daun akan digunakan dalam proses respirasi. Dan karbon dioksida yang dihasilkan selama proses ini menyebar keluar dari daun melalui stomata ke udara. Fotosintesis adalah reaksi pada daun yang membuat glukosa dan proses respirasi memecahnya lebih lanjut. Pada reaksi fotosintesis, energi cahaya adalah energi yang masuk ke dalam reaksi, sedangkan pada respirasi, energi kimia adalah energi yang keluar.

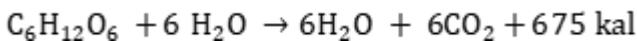
Akar tanaman berada di bawah tanah tetapi sel-sel akar juga membutuhkan oksigen untuk melakukan proses respirasi dan pelepasan energi. Akar tanaman mengambil udara dari ruang antara partikel tanah. Udara yang ada dalam partikel tanah ini bersentuhan dengan rambut akar. Oksigen dari udara yang terdapat dalam partikel tanah cenderung berdifusi ke dalam rambut akar dan mencapai sel-sel akar. Di sini digunakan untuk proses respirasi. Karbon dioksida yang dihasilkan dalam sel-sel akar selama proses respirasi dilepaskan melalui rambut akar yang sama melalui proses difusi.

Jika tanaman dalam pot disiram berlebihan untuk jangka waktu yang lebih lama, pada akhirnya akan mati karena banyak air mengeluarkan udara yang ada di antara partikel tanah. Karena itu,

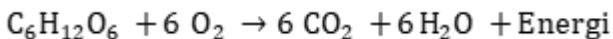
oksigen tidak sampai ke akar untuk membawa respirasi aerobik kita. Oleh karena itu, akar tanaman cenderung bernafas secara anaerobik dan menghasilkan alkohol, yang dapat membunuh tanaman. Inilah alasan benih yang berkecambah bernafas melalui respirasi anaerob karena dilapisi dengan kulit benih yang mencegah oksigen masuk melaluinya. Pada batang tumbuhan, udara berdifusi ke dalam stomata dan cenderung bergerak melalui berbagai bagian sel untuk melakukan proses respirasi. Pada tahap ini, karbon dioksida yang dilepaskan juga menyebar melalui stomata. Lentisel melakukan pertukaran gas ini di tanaman berkayu atau lebih tinggi. Jika kita berbicara tentang respirasi tumbuhan, ada dua sistem respirasi yang berbeda pada tumbuhan tergantung pada ada tidaknya oksigen.

5.2.1 Respirasi Aerobik (aerob)

Respirasi aerobik adalah respirasi yang terjadi ketika oksigen hadir. Dalam respirasi anaerob pada tumbuhan, oksigen digunakan untuk memutus ikatan kimia dalam glukosa untuk membebaskan energi dalam volume yang lebih tinggi. Sebagian besar hewan bernafas secara aerobik dan proses respirasi aerobik terjadi di mitokondria sel. Reaksi yang terjadi pada proses respirasi aerob sebagai berikut:



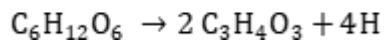
Faktanya, hasilnya sama sekali tidak sesederhana itu. Dari awal hingga pembentukan energi, ada banyak tahapan yang harus dilalui. Fungsi utama respirasi adalah gerakan terkontrol dan oksidasi senyawa organik untuk menghasilkan energi untuk pertumbuhan dan pemeliharaan tanaman. Mula-mula, kita akan melihat keseluruhan oksidasi dari satu molekul heksosa di bawah ini:



Karbohidrat seperti glukosa mengalami empat tahap reaksi respirasi, yang juga dikenal sebagai reaksi biologis. Empat tahapan antara lain:

1. Glikolisis

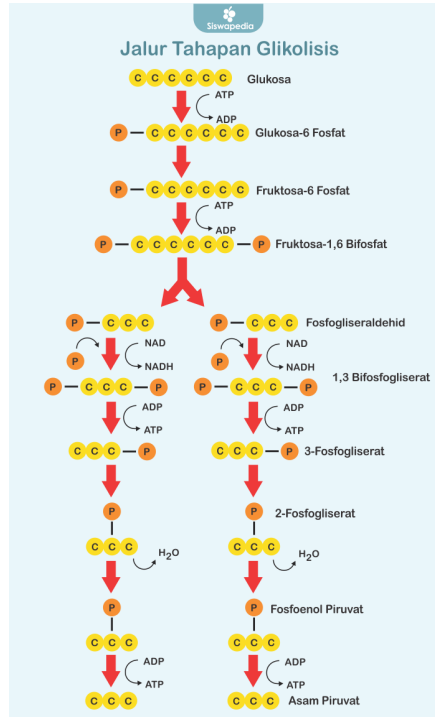
Glikolisis adalah serangkaian reaksi yang terjadi selama sistol untuk menghasilkan asam piruvat dari glukosa, glukosa-1-P, dan fruktosa. (Lakitan, 2013). Respirasi anaerobik atau fermentasi juga didasarkan pada jalur reaksi ini, yang juga dikenal sebagai jalur Embden-Meyerhoff Parnas (EMP) setelah tiga peneliti utama. Berikut ini ringkasan reaksi glikolisis (Harahap, 2012):



Glukosa

Piruvat

Langkah pertama dalam respirasi aerobik, glikolisis mengubah glukosa menjadi energi. Respirasi aerobik adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan tahap ini, yang terjadi ketika jaringan mengandung oksigen. Karena ATP adalah molekul yang menyimpan energi, energi yang dihasilkan selama proses glikolisis digunakan dalam berbagai proses yang membutuhkan energi.



Gambar 5.1 Proses dan Tahapan Glikolisis, Perubahan Glukosa Menjadi Asam Piruvat

(Sumber: <https://www.siswapedia.com/proses-dan-tahapan-glikolisis/>)

Proses dan tahapan terjadinya glikolisis

- Enzim heksokinase digunakan untuk mengubah glukosa menjadi glukosa 6-fosfat terlebih dahulu. Pada titik ini, dibutuhkan ATP, juga dikenal sebagai adenosin trifosfat, yang dapat melepaskan energi dan mengubahnya menjadi ADP.
- Enzim phosphohexose isomerase kemudian akan mengkatalisis konversi glukosa 6-fosfat menjadi fruktosa 6-fosfat.

- c) Enzim fosfofruktokinase akan mengkatalisis konversi fruktosa 6-fosfat menjadi fruktosa 1,6-bifosfat, yang membutuhkan ATP untuk energi..
- d) Selain itu, reaksi yang dikatalisis oleh enzim aldolase menghasilkan pemecahan 1,6-bifosfat, yang memiliki enam atom C, menjadi gliserilaldehid 3-fosfat, yang memiliki tiga atom C, dan dihidroksil aseton fosfat, yang memiliki tiga atom C.
- e) Dengan bantuan enzim triose fosfat isomerase, salah satu molekul dihidroksil aseton fosfat yang dihasilkan diubah menjadi gliserilaldehid 3-fosfat. enzim apa yang saling bekerja sama? Ini menunjukkan bahwa ia mampu mengubah dihidroksil aseton fosfat menjadi gliserilaldehid 3-fosfat.
- f) Enzim gliserilaldehid 3-fosfat dehidrogenase membantu dalam transformasi gliserilaldehid 3-fosfat menjadi 1,3-bifosfoglisarat. NADH dibuat selama proses ini.
- g) Kemudian, pada saat itu, 1,3 bifosfoglisarat diubah menjadi 3-fosfoglisarat dengan bantuan senyawa fosfoglisarat kinase. ATP adalah bentuk energi yang dilepaskan selama reaksi ini.
- h) Selain itu, enzim fosfoglisarat mutase membantu dalam transformasi 3-fosfoglisarat menjadi 2-fosfoglisarat.
- i) Dengan bantuan enzim enolase, 2-fosfoglisarat diubah menjadi fosfoenol piruvat.
- j) Enzim piruvat kinase kemudian akan mengkatalisis transformasi piruvat fosfoenol

menjadi piruvat. ATP juga diproduksi pada tahap ini.

2. Dekarboksilasi Oksidatif Piruvat

Dengan melepaskan CO_2 , asam piruvat, senyawa 3C, diubah menjadi Asetil-CoA, senyawa 2C. Glikolisis adalah proses di mana karbohidrat dipecah dalam kondisi anaerobik, menghasilkan produksi asam piruvat. Namun, jika ada oksigen, dekarboksilasi oksidatif asam piruvat menghasilkan pembentukan asetil-KoA. Reaksi yang sangat kompleks ini membutuhkan sejumlah kofaktor dari kompleks enzim. Koenzim (CoA-SH), tiamin pirofosfat (TPP), NAD, dan asam lipoat adalah kofaktor yang diperlukan untuk keberhasilan pembentukan asetil-KoA. Ada empat langkah reaksi dalam proses pembentukan asam piruvat-asetil-KoA, yaitu:

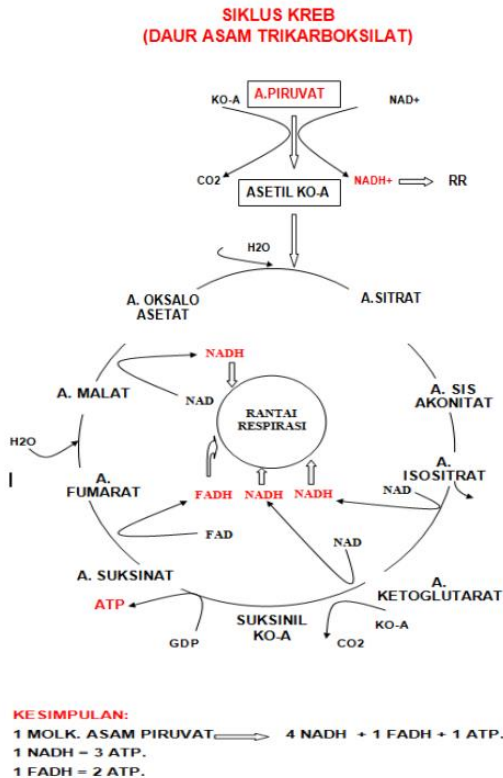
- a) Asam piruvat didekarboksilasi setelah kompleks antara TPP dan piruvat terbentuk.
- b) Setelah dekarboksilasi, unit asetilaldehid yang tertinggal bereaksi dengan asam lipoat membentuk kompleks asam asetil lipoat. Aldehid dioksidasi menjadi asam dan asam lipoat direduksi dalam reaksi ini. Bersama dengan asam lipoat, asam yang baru terbentuk membentuk thioester.
- c) Reaksi menghasilkan asetil CoA dan asam lipoat tereduksi dari pelepasan gugus asetil dari asam lipoat ke koenzim A-SH.
- d) Dengan mentransfer elektron dari asam lipoat tereduksi ke NAD, asam lipoat teroksidasi meregenerasi dirinya sendiri. Reaksi terakhir ini penting karena memastikan asam piruvat selalu

dapat menghasilkan asetil S-CoA dari asam lipoat teroksidasi. Selain itu, rantai pernapasan (sistem transpor elektron) akan menerima dua elektron yang ditransfer ke NAD untuk membentuk NADH₂, yang akan menghasilkan tiga molekul ATP.

Dekarboksilasi oksidatif asam piruvat menjadi asetil-S-CoA ini berlangsung dalam mitokondria.

3. Siklus Krebs (Daur Sitrat)

Karena pentingnya asam sitrat sebagai zat antara yang penting, Siklus Krebs juga dikenal sebagai Siklus Asam Sitrat. karena senyawa perantara, asam sitrat atau asam isositrat, memiliki tiga gugus karboksil, ini juga dikenal sebagai Siklus Asam Trikarboksilat. Mitokondria adalah tempat berlangsungnya reaksi siklus Krebs (Lakitan, 2013). Siklus Krebs dimulai dengan oksidasi piruvat, yang menghasilkan pelepasan karbon dioksida (CO₂) dan merupakan langkah pertama. Reaksi dekarboksilasi piruvat ini menggunakan thiamin (Vitamin B1) dalam bentuk terfosforilasi sebagai gugus prostetik setelah unit asetat dengan sisa 2-C bergabung dengan senyawa yang mengandung belerang yang disebut koenzim A (disingkat CoA). Peran penting yang dimainkan vitamin B1 pada tumbuhan dijelaskan oleh peran ini. Selama reaksi yang mengarah pada pembentukan asetil koenzim A (CoA), asam piruvat dehidrogenase merupakan enzim yang berperan dalam pelepasan CO₂ dan pelepasan 2 atom H. Ada tiga sampai empat enzim berbeda dalam kompleks ini. NAD⁺ akan mengambil atom H yang dibebaskan dan menggunakannya untuk membuat NADH. Reaksi siklus Krebs lainnya dapat terlihat pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2 Siklus Krebs

(Sumber: Bahan Ajar Respirasi dan fotorespirasi, Unud)

Beberapa elektron dari asam organik perantara ditransfer ke NAD^+ atau FAD melalui siklus Krebs. NADP^+ jarang terdeteksi di mitokondria tanaman, dan tidak ada enzim dehidrogenase dalam siklus ini yang menggunakan NADP^+ sebagai akseptor elektron. Kebalikannya berlaku untuk kloroplas, di mana terdapat konsentrasi NADP yang tinggi dan konsentrasi NAD^+ yang rendah. Selama proses konversi koenzim A suksinat menjadi asam suksinat, tidak

hanya produk penting NADH dan FADH₂ yang diproduksi oleh Krebs, tetapi juga molekul ATP diproduksi dengan menggabungkan ADP dan Pi. Kehilangan bersih kedua atom karbon dari asetil KoA disebabkan oleh pelepasan dua molekul CO₂ tambahan selama reaksi siklus Krebs, yang menjelaskan mengapa ada produk CO₂ dari ringkasan respirasi tetapi tidak ada O₂ yang diserap selama reaksi siklus Krebs (Lakitan, 2013).

Berikut ini adalah fungsi utama siklus Krebs:

- a) Konversi NAD⁺ dan FAD menjadi donor elektron NADH dan FADH₂, yang kemudian akan dioksidasi untuk menghasilkan ATP.
 - b) Sintesis langsung dalam jumlah terbatas ATP (satu ATP untuk setiap piruvat teroksidasi).
 - c) Pengembangan kerangka karbon yang dapat dimanfaatkan dalam produksi asam amino tertentu, yang selanjutnya akan diubah menjadi molekul yang lebih besar.
4. Sistem Pengangkutan Elektron.

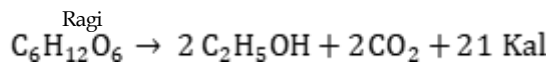
Pada langkah terakhir, substrat menghasilkan hidrogen dengan menggabungkannya dengan air. Transpor elektron, juga dikenal sebagai sistem transpor atau transpor elektron, terjadi di sepanjang rantai sistem redoks agar hal ini dapat terjadi. ATP dibuat dari energi yang dilepaskan oleh transpor elektron ini (Harahap, 2012).

Fosforilasi oksidatif adalah istilah lain untuk proses pembuatan ATP dalam rantai pernapasan sistem transpor elektron. Seperti yang dinyatakan sebelumnya, keseluruhan proses oksidasi biologis memiliki dua tujuan: menghasilkan energi dan menyediakan senyawa untuk sintesis sebagai zat antara. Jika Anda mengambil satu molekul glukosa sebagai titik awal oksidasi, jumlah molekul ATP yang

dihasilkan oleh oksidasi biologis adalah 38. (Harahap, 2012).

5.2.2 Respirasi Anaerobik (Anaerob)

Respirasi anaerob adalah proses pemecahan karbohidrat untuk menghasilkan energi tanpa menggunakan oksigen. Senyawa tertentu, seperti asetal dehidra dan asam piruvat fosfoenolat, digunakan dalam respirasi anaerobik untuk mengikat hidrogen dan menghasilkan asam laktat atau alkohol. Jaringan tanpa oksigen, tanaman terendam air, biji dengan kulit tebal yang menyulitkan oksigen untuk menembus, sel jamur dan bakteri anaerob semuanya mengalami respirasi anaerob. Dalam fermentasi, glukosa berfungsi sebagai bahan awal untuk respirasi aerobik. Alkohol juga dapat dibuat dari bahan mentah seperti fruktosa, galaktosa, dan maltosa, selain glukosa. Alkohol, karbon dioksida, dan energi adalah hasil akhirnya. Energi yang dihasilkan lebih sedikit dari respirasi aerobik karena glukosa tidak sepenuhnya dipecah menjadi air dan karbon dioksida. Persamaan reaksinya:



Persamaan reaksi memperjelas bahwa oksigen tidak diperlukan. Bakteri anaerob penyebab tetanus seperti *Clostridium tetani* tidak dapat bertahan hidup di luar ruangan. Jika luka ditutup agar bakteri bisa menjadi lebih subur, infeksi tetanus bisa terjadi (Lukman, 1997).

5.3 Faktor yang Mempengaruhi Respirasi

Respirasi tanaman sangat dipengaruhi oleh sejumlah faktor, antara lain; (Lakitan, 2013)

1. Ketersediaan Substrat. Secara alami, ketersediaan substrat mempengaruhi laju respirasi. Laju respirasi yang lambat juga merupakan tanda rendahnya cadangan pati, fruktan, dan gula pada tumbuhan. Protein juga dapat teroksidasi

pada tanaman saat kelaparan (kekurangan cadangan makanan) parah. Protein dipecah oleh hidrolisis menjadi asam amino individu, yang kemudian dipecah oleh siklus Krebs dan reaksi glikolitik. Asam alfa-ketoglutarat dan asam axaloacetic akan diproduksi dengan mengubah asam glutamat dan aspartat. Asam pituvat diproduksi ketika alanin teroksidasi. Sebagian besar protein dan senyawa yang mengandung nitrogen dalam kloroplas akan terurai saat daun mulai menguning. Sintesis glutamin dan asparagin akan memanfaatkan ion amonium yang dilepaskan sebagai hasil dekomposisi ini. Tanaman tidak akan diracuni oleh amonium sebagai akibatnya.

2. Ketersediaan Oksigen. Laju respirasi akan dipengaruhi oleh ketersediaan oksigen, tetapi besarnya efek ini bervariasi antar spesies bahkan antar organ tumbuhan. Fluktuasi normal kandungan oksigen di udara memiliki sedikit efek pada laju respirasi karena jumlah oksigen yang dibutuhkan jauh lebih sedikit daripada jumlah oksigen di udara. Mitokondria dapat berfungsi normal pada konsentrasi oksigen serendah 0,05%, sedangkan konsentrasi oksigen di udara berkisar sekitar 21%. Ini terutama disebabkan oleh afinitas oksigen yang tinggi dari sitokrom oksidase. Ketika media tumbuh tergenang (semua pori tanah terisi air), sistem akar tanaman mengalami kekurangan oksigen, yang memperlambat laju respirasi. Ini karena oksigen bergerak jauh lebih lambat melalui air dari pada melalui udara.
3. Suhu. Nilai Q_{10} untuk respirasi antara suhu 5°C sampai 25°C adalah antara 2,0 sampai 2,5. Ini menunjukkan bahwa laju respirasi akan lebih dari dua kali lipat untuk rentang suhu ini untuk setiap kenaikan suhu 10°C. Laju respirasi masih meningkat, tetapi dengan nilai Q_{10} yang lebih rendah, ketika suhu dinaikkan menjadi 35°C. Dipercayai bahwa penetrasi oksigen yang tidak memadai melalui kutikula atau peridermis menjadi penyebab penurunan nilai Q_{10} . Karena beberapa enzim yang terlibat akan mulai mengalami

denaturasi pada suhu yang lebih tinggi lagi (sekitar 40°C), laju respirasi akan mulai melambat.

4. Tipe dan Umur Tumbuhan. Laju respirasi berbagai jenis tumbuhan juga berbeda karena perbedaan morfologinya. Ketika diukur dengan berat kering, bakteri dan jamur biasanya menunjukkan tingkat respirasi yang lebih tinggi daripada tanaman yang lebih tinggi. Perbedaan ini terutama disebabkan oleh bakteri dan jamur, keduanya tidak memiliki sel kayu non-meristematik, yang menunjukkan tingkat respirasi yang lebih tinggi daripada jaringan yang lebih tua dan mengandung sejumlah kecil senyawa yang terakumulasi sebagai cadangan makanan. Karena ATP, NADH, dan NADPH digunakan dalam pertumbuhan untuk sintesis protein, blok pembangun dinding sel, komponen membran, dan asam nukleat, terdapat korelasi yang kuat antara laju pertumbuhan dan laju respirasi. Ketersediaan ADP, NAD^+ , dan NADP^+ untuk respirasi akan meningkat akibat penggunaan ATP, NADH, dan NADPH.

Laju respirasi tumbuhan akan dipengaruhi oleh umurnya. Pada saat perkecambahan, laju respirasi tinggi, dan tetap tinggi selama fase pertumbuhan vegetatif awal (laju pertumbuhan juga tinggi), dan kemudian menurun seiring bertambahnya usia tanaman. Pada awal pertumbuhan buah, saat sel sedang aktif membelah, respirasi pada organ buah juga tinggi kemudian menurun. Namun penurunan laju respirasi ini diikuti dengan peningkatan laju respirasi pada beberapa buah, seperti apel. Istilah untuk fenomena ini adalah klimakterik. Etilena yang terbentuk di jaringan buah merangsang peningkatan laju respirasi ini selama klimakterik, yang terjadi bersamaan dengan tahap pematangan penuh buah.

DAFTAR PUSTAKA

- Campbell, R.M. (2002) *Biologi*. Jakarta: Erlangga.
- Harahap, F. (2012) *Fisiologi Tumbuhan*. 1st edn. Edited by M.Y. Nasution. Medan: UNIMED PRESS.
- Kimbal, J.W. (1983) *Biologi, Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Lakitan, B. (2013) *Dasar - Dasar Fisiologi Tumbuhan*. Jakarta: Rajawali Press.
- Lukman, D. (1997) *Buku ajar Fisiologi Tumbuhan*. Jakarta: PT. Gramedia.
- Ross (1995) *Fisiologi Tumbuhan*. Bandung: ITB.
- Santyasa, I.W. (2005) Model Pembelajaran inovatif dalam implementasi kurikulum berbasis kompetensi, *Makalah disampaikan Dalam Penataran Guru-Guru SMP, SMA, dan SMK se Kabupaten Jembrana Juni-Juli*.

BAB 6

METABOLISME N DAN S

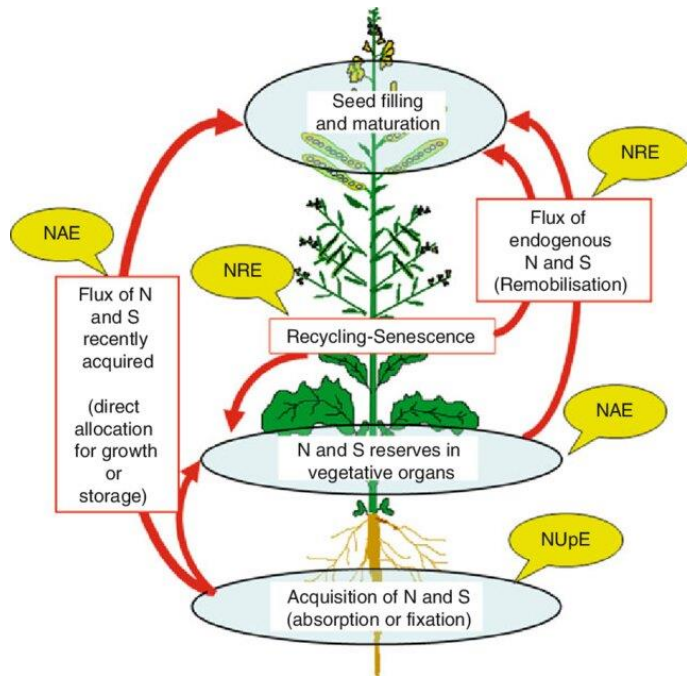
Oleh Muhammad Rifqi Hariri

6.1 Pendahuluan

Metabolisme nitrogen dan sulfur pada tumbuhan sangat penting karena kedua elemen ini merupakan komponen utama asam amino, protein, dan beberapa senyawa lainnya (La Ode Sumarlin, 2023). Nitrogen (N) dan sulfur (S) diperoleh oleh tumbuhan melalui proses penyerapan dari tanah. Selanjutnya, metabolisme N dan S terdiri dari serangkaian reaksi kimia yang terjadi di dalam sel tumbuhan untuk menggunakan dan mengubah kedua elemen tersebut menjadi molekul yang berguna untuk pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan (Suhandri & Anggraini, 2022). Nitrogen adalah elemen penting yang diperlukan dalam jumlah besar oleh tumbuhan. Tumbuhan mengambil nitrogen dalam bentuk senyawa seperti nitrat (NO_3^-) dan amonium (NH_4^+) (Koryati et al., 2022). Proses penyerapan ini melibatkan akar tumbuhan yang menggunakan struktur khusus yang disebut rambut akar untuk meningkatkan luas permukaan penyerapan. Setelah diserap oleh akar tumbuhan, senyawa nitrogen diangkut ke sel melalui xylem (Bailey & Leegood, 2016).

Sulfur juga merupakan elemen penting dalam metabolisme tumbuhan. Tumbuhan mengambil sulfur dalam bentuk senyawa seperti sulfat (SO_4^{2-}) dari tanah (Bhardwaj et al., 2021). Proses penyerapan sulfur oleh akar tumbuhan mirip dengan penyerapan nitrogen. Sulfur diangkut ke dalam sel melalui xilem, dan proses metabolik dimulai. Sulfur digunakan dalam berbagai reaksi untuk membentuk senyawa organik seperti tiol, vitamin, dan cofactor enzim di dalam sel tumbuhan (Khan et al., 2014). Salah satu

senyawa yang penting adalah asam amino metionin dan sistin (Hendrix et al., 2017). Kedua asam amino ini mengandung sulfur dan digunakan untuk membangun protein. Selain itu, sulfur juga diperlukan dalam pembentukan senyawa antioksidan dan berperan dalam penyimpanan energi (Tariq et al., 2023). Metabolisme sulfur juga berkaitan erat dengan metabolisme nitrogen (Gambar 6.1). Sulfur berperan dalam sintesis beberapa asam amino yang mengandung nitrogen, seperti sistin dan metionin. Selain itu, sulfur juga berfungsi dalam mempertahankan pH sel dan menetralkan racun yang terbentuk selama metabolisme.

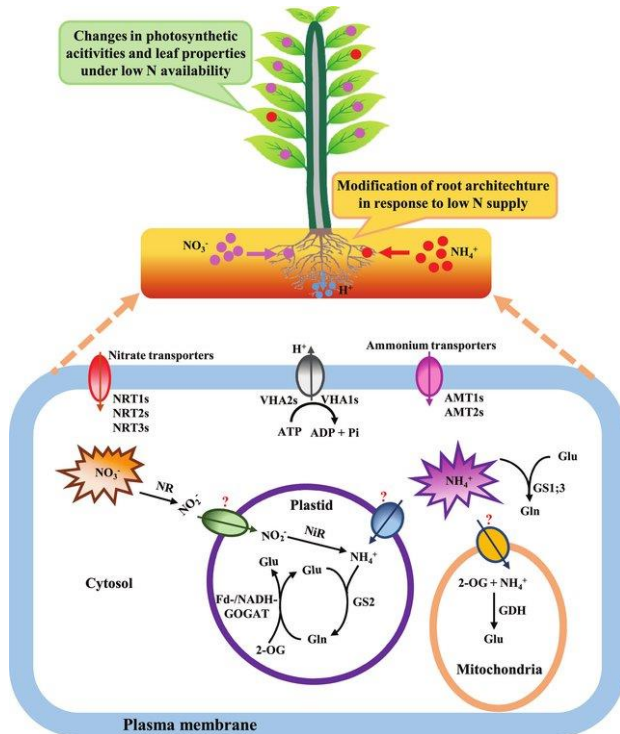


Gambar 6.1 Gambaran Skematis Fluks Nitrogen dan Sulfur dalam Efisiensi Penggunaan Nutrien pada Tumbuhan
(Sumber: Salon et al., 2014)

6.2 Metabolisme Nitrogen

Metabolisme nitrogen pada tumbuhan adalah suatu proses yang terjadi dalam tubuh tumbuhan untuk memanfaatkan dan mengatur ketersediaan unsur nitrogen. Unsur nitrogen sangat penting bagi tumbuhan karena merupakan bagian dari senyawa yang terlibat dalam pertumbuhan dan perkembangan (Oliveira et al., 2014; Mitra, 2017). Proses metabolisme nitrogen melibatkan beberapa tahapan seperti penyerapan, transportasi, dan penggunaan nitrogen dalam tubuh tumbuhan (Leghari et al., 2016). Penyerapan nitrogen oleh tumbuhan terjadi melalui akar. Unsur nitrogen dalam bentuk amonium (NH_4^+) dan nitrat (NO_3^-) dapat diserap oleh akar tumbuhan melalui molekul transport aktif (Gambar 6.2) (Luo et al., 2013). Amonium dapat langsung diserap, sedangkan nitrat harus diubah menjadi amonium melalui tahap reduksi (O'Brien et al., 2016; Wang et al., 2018). Proses penyerapan nitrogen merupakan langkah pertama dalam metabolisme nitrogen, yang memungkinkan tumbuhan untuk menggunakan nitrogen yang ada dalam tanah.

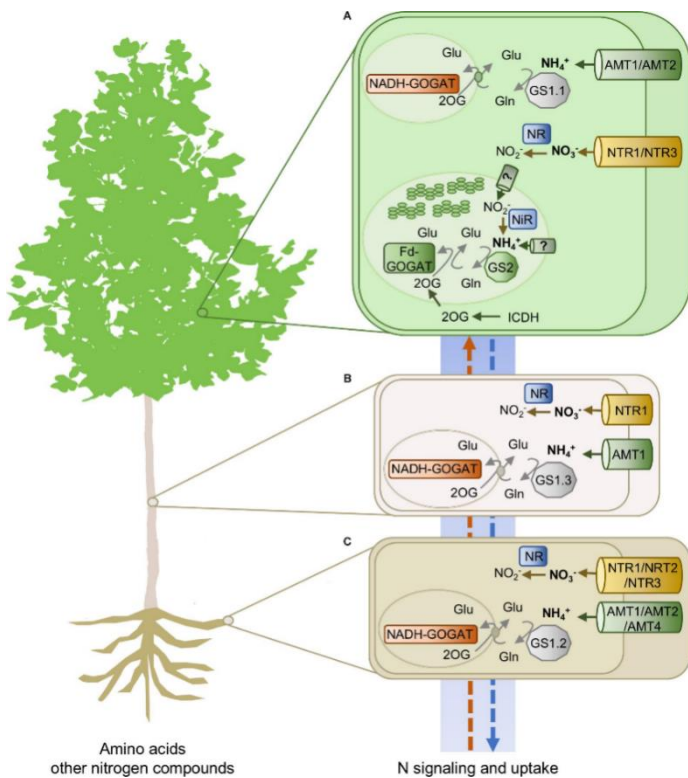
Setelah penyerapan, tumbuhan harus mengatur transportasi nitrogen ke bagian yang membutuhkannya. Nitrogen yang diserap oleh akar akan dikirim ke bagian atas tanaman melalui xilem, yang merupakan jaringan pengangkut air dan unsur hara (Oliveira et al., 2013; Baslam et al., 2020). Pada perjalanan menuju bagian atas tumbuhan, nitrogen dapat disimpan dalam bentuk nitrat dalam akar atau dalam bentuk amida pada daun dan batang. Penyimpanan nitrogen ini memungkinkan tumbuhan untuk mengatur kebutuhan nitrogennya sesuai dengan keadaan. Setelah diterima oleh bagian atas tanaman, nitrogen akan digunakan dalam berbagai proses metabolisme. Salah satu penggunaan nitrogen yang paling penting adalah dalam sintesis protein (Muñoz-Huerta et al., 2013). Protein merupakan senyawa yang terdiri dari rantai asam amino, di mana nitrogen merupakan salah satu komponen penting dalam asam amino. Oleh karena itu, kehadiran nitrogen sangat penting dalam proses sintesis protein yang berperan dalam pembentukan jaringan baru dan pertumbuhan tanaman (Barker & Bryson, 2016).



Gambar 6.2 Model Konseptual Metabolisme Nitrogen pada Tumbuhan
(Sumber: Luo et al., 2013)

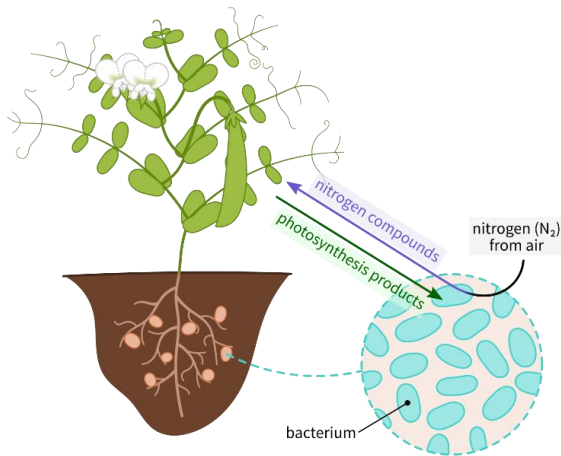
Selain digunakan dalam sintesis protein, nitrogen juga diperlukan dalam pembentukan senyawa lain yang penting, seperti asam nukleat dan klorofil (Muñoz-Huerta et al., 2013; Kishorekumar et al., 2020). Asam nukleat, seperti DNA dan RNA, mengandung nitrogen dan merupakan perangkat penyimpanan dan transmisi informasi genetik dalam tumbuhan. Klorofil, pigmen hijau yang terkandung dalam kloroplas, juga membutuhkan nitrogen dalam struktur molekulnya (Kishorekumar et al., 2020). Klorofil berperan dalam proses fotosintesis, yang merupakan proses utama dalam menghasilkan energi bagi tumbuhan.

Pada saat tumbuhan mengalami kelebihan nitrogen, mereka juga memiliki mekanisme untuk mengatasi masalah ini. Kelebihan nitrogen dapat menyebabkan toksisitas pada tumbuhan karena nitrogen menumpuk dalam bentuk ammonium (Bittsánszky et al., 2015). Untuk mengatasi masalah tersebut, tumbuhan dapat mengubah amonium menjadi nitrat melalui proses yang disebut nitrifikasi. Nitrat kemudian dapat diserap kembali oleh akar atau dikonversi menjadi senyawa yang tidak beracun untuk disimpan (Gambar 6.3) (Cánovas et al., 2013; Barker & Bryson, 2016).



Gambar 6.3 Transporter Nitrogen dan Enzim yang Berperan dalam Penyerapan dan Metabolism Nitrogen pada *Populus trichocarpa* (Sumber: Cánovas et al., 2013)

Selain itu, tumbuhan juga memiliki mekanisme untuk mengambil nitrogen dari sumber lain seperti udara. Beberapa jenis tumbuhan memiliki kemampuan untuk bersimbiosis dengan bakteri yang hidup di akar mereka, yang disebut bakteri penambat nitrogen (Gambar 6.4) (Briggs, 2021). Bakteri ini dapat mengambil nitrogen dari udara dan mengubahnya menjadi amonium yang dapat digunakan oleh tumbuhan. Proses ini dikenal sebagai fiksasi nitrogen, dan memungkinkan tumbuhan untuk memperoleh nitrogen dari sumber yang tidak tersedia secara langsung dari tanah (Santi et al., 2013; Mahmud et al., 2020).

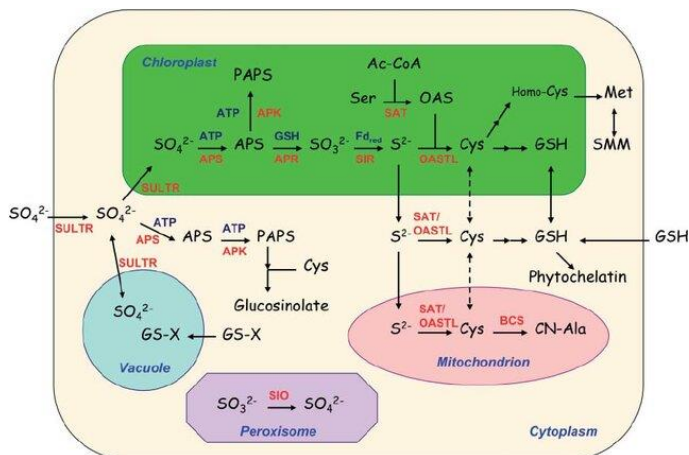


Gambar 6.4 Simbiosis Antara Bakteri Penambat Nitrogen dan Akar Tumbuhan
(Sumber: Briggs, 2021)

6.3 Metabolisme Sulfur

Metabolisme sulfur pada tumbuhan adalah salah satu aspek penting dalam kehidupan tumbuhan. Sulfur merupakan salah satu unsur esensial bagi tumbuhan, bersama dengan karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, fosfor, dan potassium (Oliveira et al., 2014; Mitra, 2017). Unsur ini digunakan oleh tumbuhan untuk sintesis protein, pertumbuhan, dan perkembangan yang normal. Metabolisme sulfur pada tumbuhan merupakan proses yang kompleks dan penting bagi kehidupan dan perkembangan tumbuhan. Tumbuhan menggunakan sulfur untuk sintesis protein, pertumbuhan, dan perkembangan yang normal (Speiser et al., 2018). Proses ini melibatkan serangkaian reaksi kimia dan regulasi genetik yang kompleks, yang dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi sulfur, faktor hormonal, dan faktor lingkungan lainnya (Ahanger et al., 2016; Koprivova & Kopriva, 2016).

Proses metabolisme sulfur pada tumbuhan melibatkan beberapa langkah penting. Pertama, sulfur diserap oleh akar tumbuhan dari substrat tanah dalam bentuk senyawa sederhana seperti sulfat (SO_4^{2-}) (Gambar 6.5) (Saito, 2004). Sulfat ini kemudian diangkut melalui xilem ke seluruh bagian tanaman, seperti daun dan batang. Selanjutnya, di dalam sel, ion sulfat dianggap terlibat dalam laju respirasi serta berbagai proses metabolisme lainnya (Burkhardt & Hunsche, 2013).

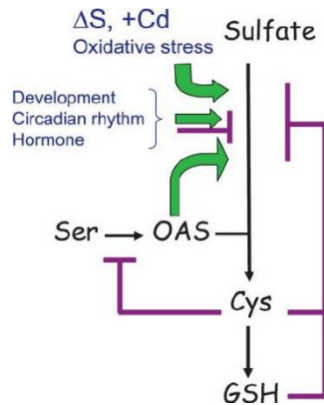


Gambar 6.5 Metabolisme Asimilasi Sulfur pada Kompartemen Subseluler Sel Tumbuhan
(Sumber: Saito, 2004)

Setelah diangkut ke seluruh bagian tanaman, sulfat dipecah menjadi senyawa organik yang lebih kompleks seperti asam amino metionin atau cistein (Hendrix et al., 2017). Proses ini melibatkan serangkaian reaksi kimia yang dikatalisis oleh sejumlah enzim, termasuk enzim keluarga adenosina 5'-fosfosulfat (APS) reduktase, PAP reduktase, serta enzim yang terlibat dalam metabolisme metionin dan cistein (Lehmann, 2013).

Asam amino metionin adalah salah satu asam amino yang penting dalam sintesis protein dan merupakan senyawa yang mengandung sulfur dalam jumlah besar pada tumbuhan (Hendrix et al., 2017). Metionin juga merupakan senyawa awal untuk sintesis kanton, glutathione, serta senyawa metabolik penting lainnya. Selain itu, metionin juga berperan dalam proses metilasi yang sangat penting dalam regulasi genetik dan metabolisme tumbuhan (Châtelain et al., 2013; Sauter et al., 2013). Sampai saat ini, banyak penelitian yang dilakukan untuk mengungkap mekanisme regulasi metabolisme sulfur pada tumbuhan. Ditemukan bahwa regulasi ekspresi gen-gen yang terlibat dalam metabolisme sulfur sangat kompleks dan berkaitan erat dengan keadaan nutrisi sulfur di lingkungan tumbuhan. Ketersediaan sulfur dalam tanah dapat mempengaruhi

ekspresi gen-gen yang terlibat dalam penyerapan dan transportasi sulfat, atau gen-gen yang terlibat dalam sintesis senyawa organik sulfur seperti metionin atau cistein (Hendrix et al., 2017; Tariq et al., 2023). Selain itu, juga ditemukan bahwa regulasi metabolisme sulfur dikendalikan oleh berbagai sinyal hormonal dan faktor lingkungan lainnya (Gambar 6.6) (Saito, 2004). Hormon seperti etilen dan asam salisilat telah terbukti mempengaruhi ekspresi gen-gen yang terlibat dalam metabolisme sulfur pada tumbuhan (Mahajan et al., 2023). Faktor-faktor lingkungan seperti cahaya, suhu, dan kelembaban juga diketahui dapat mempengaruhi metabolisme sulfur pada tumbuhan (Capaldi et al., 2015; Ahmad et al., 2016).



Gambar 6.6 Regulasi Positif dan Negatif pada Metabolisme Asimilasi Sulfur
(Sumber: Saito, 2004)

DAFTAR PUSTAKA

- Ahanger, M. A., Morad-Talab, N., Abd-Allah, E. F., Ahmad, P., & Hajiboland, R. (2016). Plant growth under drought stress: Significance of mineral nutrients. *Water stress and crop plants: a sustainable approach*, 2, 649-668.
- Ahmad, N., Malagoli, M., Wirtz, M., & Hell, R. (2016). Drought stress in maize causes differential acclimation responses of glutathione and sulfur metabolism in leaves and roots. *BMC Plant Biology*, 16, 1-15.
- Anonim. (2023). Chloroplast in Plant Leaf. <https://www.vecteezy.com/vector-art/372957-diagram-showing-chloroplast-in-plant-leaf>
- Bailey, K. J., & Leegood, R. C. (2016). Nitrogen recycling from the xylem in rice leaves: dependence upon metabolism and associated changes in xylem hydraulics. *Journal of Experimental Botany*, 67(9), 2901-2911.
- Barker, A. V., & Bryson, G. M. (2016). Nitrogen. In *Handbook of plant nutrition* (pp. 37-66). CRC Press.
- Baslam, M., Mitsui, T., Sueyoshi, K., & Ohyama, T. (2020). Recent advances in carbon and nitrogen metabolism in C3 plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(1), 318.
- Bhardwaj, A. K., Rajwar, D., & Nagaraja, M. S. (2021). Soil fertility problems and management. *Managing salt-affected soils for sustainable agriculture*. ICAR, New Delhi, 386-407.
- Bittsánszky, A., Pilinszky, K., Gyulai, G., & Komives, T. (2015). Overcoming ammonium toxicity. *Plant Science*, 231, 184-190.
- Briggs, G. M. (2021). *Rhizobium: nitrogen fixing bacteria*. Geneseo.edu; Milne Open Textbooks. <https://milnepublishing.geneseo.edu/botany/chapter/rhizobium/>
- Burkhardt, J., & Hunsche, M. (2013). "Breath figures" on leaf surfaces—formation and effects of microscopic leaf wetness. *Frontiers in plant science*, 4, 422.

- Cánovas, F. M., Cañas, R. A., de la Torre, F. N., Pascual, M. B., Castro-Rodríguez, V., & Avila, C. (2018). Nitrogen metabolism and biomass production in forest trees. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1449.
- Capaldi, F. R., Gratão, P. L., Reis, A. R., Lima, L. W., & Azevedo, R. A. (2015). Sulfur metabolism and stress defense responses in plants. *Tropical Plant Biology*, 8, 60-73.
- Châtelain, E., Satour, P., Laugier, E., Ly Vu, B., Payet, N., Rey, P., & Montrichard, F. (2013). Evidence for participation of the methionine sulfoxide reductase repair system in plant seed longevity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(9), 3633-3638.
- Hendrix, S., Schroeder, P., Keunen, E., Huber, C., & Cuypers, A. (2017). Molecular and cellular aspects of contaminant toxicity in plants: the importance of sulphur and associated signalling pathways. *Advances in botanical research*, 83, 223-276.
- Khan, N. A., Khan, M. I. R., Asgher, M., Fatma, M., Masood, A., & Syeed, S. (2014). Salinity tolerance in plants: revisiting the role of sulfur metabolites. *J Plant Biochem Physiol*, 2(120), 2.
- Kishorekumar, R., Bulle, M., Wany, A., & Gupta, K. J. (2020). An overview of important enzymes involved in nitrogen assimilation of plants. *Nitrogen metabolism in plants: methods and protocols*, 1-13.
- Koprivova, A., & Kopriva, S. (2016). Hormonal control of sulfate uptake and assimilation. *Plant Molecular Biology*, 91(6), 617-627.
- Koryati, T., Fatimah, F., & Sojuangan, D. (2022). Peranan Rhizobium Dalam Fiksasi N Tanaman Legum. *Jurnal Penelitian Bidang Ilmu Pertanian*, 20(3), 8-17.
- La Ode Sumarlin, M. S. (2023). BIOKIMIA: Dasar-Dasar Biomolekul dan Konsep Metabolisme. PT. RajaGrafindo Persada-Rajawali Pers.
- Laghari, S. J., Wahocho, N. A., Laghari, G. M., HafeezLaghari, A., MustafaBhabhan, G., HussainTalpur, K., ... & Lashari, A. A. (2016). Role of nitrogen for plant growth and development: A review. *Advances in Environmental Biology*, 10(9), 209-219.

- Lehmann, S. (2013). *Sulfite dehydrogenases in organotrophic bacteria: enzymes, genes and regulation* (Doctoral dissertation).
- Luo, J., Li, H., Liu, T., Polle, A., Peng, C., & Luo, Z. B. (2013). Nitrogen metabolism of two contrasting poplar species during acclimation to limiting nitrogen availability. *Journal of experimental botany*, 64(14), 4207-4224.
- Mahajan, M., Nazir, F., Jahan, B., Siddiqui, M. H., Iqbal, N., & Khan, M. I. R. (2023). Salicylic Acid Mitigates Arsenic Stress in Rice (*Oryza sativa*) via Modulation of Nitrogen-Sulfur Assimilation, Ethylene Biosynthesis, and Defense Systems. *Agriculture*, 13(7), 1293.
- Mahmud, K., Makaju, S., Ibrahim, R., & Missaoui, A. (2020). Current progress in nitrogen fixing plants and microbiome research. *Plants*, 9(1), 97.
- Mitra, G. (2017). Essential plant nutrients and recent concepts about their uptake. *Essential Plant Nutrients: Uptake, Use Efficiency, and Management*, 3-36.
- Muñoz-Huerta, R. F., Guevara-Gonzalez, R. G., Contreras-Medina, L. M., Torres-Pacheco, I., Prado-Olivarez, J., & Ocampo-Velazquez, R. V. (2013). A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: advantages, disadvantages and recent advances. *sensors*, 13(8), 10823-10843.
- O'Brien, J. A., Vega, A., Bouguyon, E., Krouk, G., Gojon, A., Coruzzi, G., & Gutiérrez, R. A. (2016). Nitrate transport, sensing, and responses in plants. *Molecular plant*, 9(6), 837-856.
- Oliveira, H. C., Freschi, L., & Sodek, L. (2013). Nitrogen metabolism and translocation in soybean plants subjected to root oxygen deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 66, 141-149.
- Oliveira, M., Moura, G. M., Zardetto, G., Cardoso, B. K., Alves, A. A. R., Tsukui, A., ... & Gazim, Z. C. (2014). Effect of sulphur on yield and chemical composition of essential oil of *Ocimum basilicum* L. *Afr. J. Agric. Res*, 9, 688-694.
- Saito, K. (2004). Sulfur assimilatory metabolism. The long and smelling road. *Plant physiology*, 136(1), 2443-2450.

- Salon, C., Bataillé, M. P., Gallardo, K., Jeudy, C., Santoni, A. L., Trouverie, J., ... & Avice, J. C. (2014). 34 S and 15 N Labelling to Model S and N Flux in Plants and Determine the Different Components of N and S Use Efficiency. *Plant Metabolic Flux Analysis: Methods and Protocols*, 335-346.
- Santi, C., Bogusz, D., & Franche, C. (2013). Biological nitrogen fixation in non-legume plants. *Annals of botany*, 111(5), 743-767.
- Sauter, M., Moffatt, B., Saechao, M. C., Hell, R., & Wirtz, M. (2013). Methionine salvage and S-adenosylmethionine: essential links between sulfur, ethylene and polyamine biosynthesis. *Biochemical Journal*, 451(2), 145-154.
- Speiser, A., Silbermann, M., Dong, Y., Haberland, S., Uslu, V. V., Wang, S., ... & Hell, R. (2018). Sulfur partitioning between glutathione and protein synthesis determines plant growth. *Plant Physiology*, 177(3), 927-937.
- Suhandri, A., & Anggraini, M. P. (2022). METABOLISME DALAM PERSPEKTIF AL-QUR'AN. *Journal Development and Research in Education*, 2(1), 36-44.
- Tariq, A., Zeng, F., Graciano, C., Ullah, A., Sadia, S., Ahmed, Z., ... & Zhang, Z. (2023). Regulation of Metabolites by Nutrients in Plants. *Plant Ionomics: Sensing, Signaling, and Regulation*, 1-18.
- Wang, Y. Y., Cheng, Y. H., Chen, K. E., & Tsay, Y. F. (2018). Nitrate transport, signaling, and use efficiency. *Annual review of plant biology*, 69, 85-122.

BAB 7

PERTUMBUHAN DAN PERKEMBANGAN

Oleh Magfirah Rasyid

7.1 Pengertian Pertumbuhan dan Perkembangan Tumbuhan

7.1.1 Pengertian Pertumbuhan

Pertumbuhan adalah istilah kuantitatif, yang berkaitan dengan perubahan ukuran dan massa. Sel merupakan bagian dari tumbuhan yang pertumbuhannya hanyalah peningkatan volume yang tidak dapat diubah, sedangkan untuk bagian jaringan dan organ, pertumbuhannya mencerminkan peningkatan jumlah dan ukuran sel (Hopkins and Huner, 2009). Hal ini dapat dilakukan melalui pengukuran pada pertambahan volume, misalnya tinggi batang dan penambahan massa ditentukan dengan mengukur lingkaran batang (Fauziah, 2021). Pertumbuhan merupakan ciri yang fundamental untuk semua makhluk hidup dan terjadi sebagai akibat dari beberapa proses metabolisme.

Contohnya pada biji kacang yang berkecambah pada tempat yang gelap. Ketika embrio ditempatkan pada tempat yang gelap, maka benih akan mulai tumbuh dan menghasilkan sumbu tunas yang panjangnya bisa mencapai 10 hingga 12 inchi. Pengukuran panjang dan lebar daun juga merupakan langkah yang tepat dalam menentukan pertumbuhan daun. Panjang dan lebar tidak hanya menjadi ukuran dari jumlah pertumbuhan, tetapi rasio panjang dan lebar juga akan memberikan informasi tentang pola pertumbuhan daun (Hopkins and Huner, 2009).

Pertumbuhan merupakan salah satu sifat dari makhluk, misalnya biji hidup namun hanya akan tumbuh ketika di sekitarnya tersedia air, oksigen dan suhu pertumbuhan yang sesuai. Pertumbuhan berpusat pada proses yang disebut asimilasi yang memanfaatkan protein dan gula dalam membangun segenap bagian tumbuhan, yang melibatkan sintesis bahan hidup dari bahan mati (Tjitrosomo, 1983). Tumbuhan akan mengalami pertumbuhan dari zigot menjadi embrio, dan tumbuh menjadi individu baru yang memiliki organ-organ tumbuhan berupa akar, batang dan daun (Khairuna, 2019). Pada proses pertumbuhan, tanaman akan membentuk organ vegetatif maupun organ generatif. Organ vegetatif akan tumbuh lebih awal, kemudian organ generatif (Handoko and Rizki, 2020). Selama pertumbuhan vegetatif, pola pertumbuhan tidak menentu, yang mencerminkan masukan dari program intrinsik dan faktor lingkungan, menghasilkan pucuk dan akar yang bervariasi (Ordog, 2011).

Pertumbuhan pada tumbuhan berpembuluh, meliputi pembentukan sel-sel baru, serta pembesaran dan modifikasi (*diferensiasi*) sel. Sel-sel baru akan terbentuk pada bagian-bagian tertentu pada tumbuhan yang disebut dengan meristem. Sel-sel tersebut memiliki nukleus yang relatif besar, mengandung banyak sitoplasma, dan vakuola kecil dengan jumlah yang banyak, serta dinding yang tipis. Berdasarkan letaknya, terdapat dua jenis meristem, yaitu meristem apikal dan meristem lateral (Tjitrosomo, 1983). Pengangkutan berbagai bahan kimia dari satu organ ke organ tumbuhan yang lain dipengaruhi oleh pengaturan, koordinasi metabolisme dan morfogenesis pada tumbuhan tingkat tinggi (Bhatla and Lal, 2022).

7.1.2 Pengertian Perkembangan

Perkembangan merupakan perubahan yang terjadi dalam rentang kehidupan suatu organisme, dan sebuah proses menuju ke arah yang lebih matang secara fungsi dan struktur (Khairuna, 2019). Perkembangan merupakan sebuah proses menuju kedewasaan melalui proses pertumbuhan dan proses *diferensiasi*. Terbentuknya bunga pada tumbuhan mendandakan bahwa tumbuhan tersebut telah mengalami perkembangan sebab bunga merupakan alat reproduksi (Handoko and Rizki, 2020).

Proses perkembangan tidak dapat diukur sebagaimana yang terjadi pada pertumbuhan, sehingga bersifat kualitatif. Hal inilah yang menjadi pembeada antara pertumbuhan dan perkembangan (Arimbawa, 2016). Perkembangan mengacu pada jumlah seluruh perubahan yang terjadi baik pada sel, jaringan, organ, sistem organ maupun organisme melalui siklus hidupnya. Perkembangan dapat terlihat dengan jelas bahwa terjadi perubahan dari suatu organ pada tumbuhan atau organisme dengan melihat beberapa contoh seperti peralihan bentuk dari embrio hingga pembibitan, perubahan dari daun primordial menjadi daun yang berkembang dengan sempurna, atau dari produksi organ vegetatif ke produksi struktur bunga (Hopkins and Huner, 2009). Dengan demikian, perkembangan merupakan gabungan dari proses pertumbuhan dan diferensiasi. Perubahan bentuk dari sebuah sel telur yang telah dibuahi menjadi zigot kemudian tumbuh menjadi sebuah tanaman dalam bentuk individu merupakan suatu bentuk morfogenesis (Fauziah, 2021).

Faktor internal dan faktor eksternal merupakan sebuah interaksi yang saling berkaitan pada proses pertumbuhan dan perkembangan pada tumbuhan. Sifat genetik dan hormon merupakan faktor internal yang akan mempengaruhi terjadinya pertumbuhan. Adapun lingkungan yang merupakan faktor eksternal juga turut berperan dalam pertumbuhan dan perkembangan. Faktor lingkungan yang sesuai akan meningkatkan potensi genetik akan berkembang, yang

mengakibatkan karakter atau sifat akan diekspresikan oleh tumbuhan. Hasil yang ditampilkan oleh tumbuhan tersebut merupakan gabungan dari faktor genetik dan lingkungan secara bersama (Harahap, 2012).

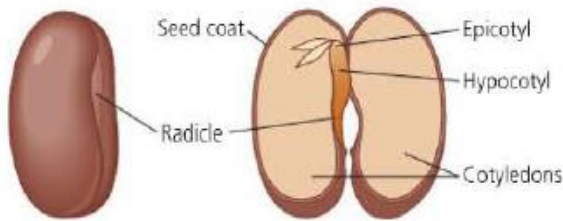


Gambar 7.1 Pertumbuhan dan Perkembangan Tumbuhan
(Sumber : <https://zonasiswa.com/pengetian-perkembangan-pada-tumbuhan.html>)

7.2 Fase Pertumbuhan dan Perkembangan

7.2.1 Perkecambahan

Perkecambahan merupakan tahap awal dari pertumbuhan dan perkembangan pada tumbuhan biji. Terdapat plumula yang tumbuh menjadi tunas tanaman kemudian menjadi batang sedangkan radikula akan tumbuh menjadi akar. Hal ini terjadi pada embrio (Khairuna, 2019). Embrio terdiri dari struktur memanjang, sumbu embrionik, melekat ke kotiledon berdaging. Dibawahnya terdapat kotiledon melekat, sumbu embrio disebut hipokotil. Hipokotil berakhir di radikula, atau akar embrio. Bagian dari sumbu embrio adalah kotiledon yang dan di bawah tempat menempelnya kotiledon pertama sepasang daun kecil yang disebut epikotil. Kotiledon menyerap nutrisi dari endosperma dan mentransfernya ke seluruh embrio ketika benih tersebut berkecambah (Campbell *et al.*, 2008).



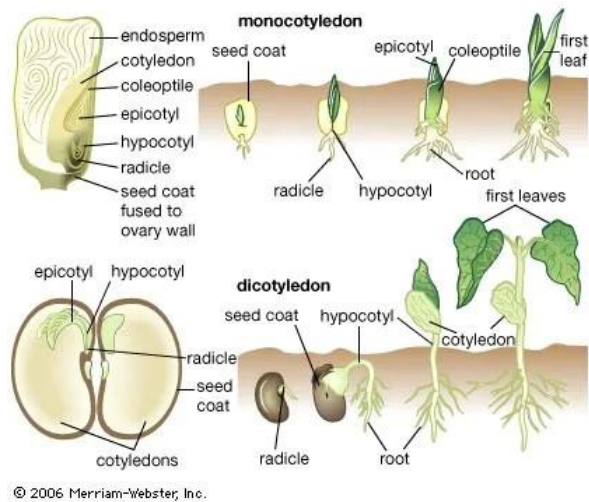
Gambar 7.2 Kotiledon Berdaging Menyimpan Makanan yang Diserap dari Endosperma Sebelum Benih Itu Berkecambah
(Sumber: (Campbell *et al.*, 2008))

Radikula merupakan organ yang pertama kali akan muncul ketika biji mulai berkecambah. Pertumbuhan radikula akan tersu berlangsung dan tumbuh menembus permukaan tanah. Cahaya akan merangsang pertumbuhan pada tumbuhan dikotil, kemudian ruas batang hipokotil akan tumbuh ke permukaan tanah yang akan mengangkat kotiledon dan epikotil. Epikotil akan memunculkan daun pertama, kemudian kotiledon akan gugur ketika cadangan makanan yang ada habis digunakan oleh embrio (Campbell *et al.*, 2000).

Endosperma menjadi sumber utama cadangan makanan dalam proses perkecambahan. Proses perubahan pati menjadi gula yang akan didistribusikan ke embrio sebagai sumber energi dalam pertumbuhannya dibantu oleh enzim dalam penguraiannya (Fauziah, 2021). Embrio belum dapat menyintesis cadangan makanannya sendiri sebab embrio belum memiliki klorofil. Kotiledon menjadi sumber energi dengan melakukan fotosintesis pada pertumbuhan embrio untuk tumbuhan dikotil, sedangkan pada tumbuhan monokotil energi diperoleh dari endosperma (Harahap, 2012).

Perkembangan embrio selama tahap awal, akan terjadi pembelahan sel disepanjang seluruh massa sel, namun pada tahap bentuk hati meristem apikal pucuk dan akar mulai berpola sebagai pusat pembelahan sel. Aliran nutrisi akan berlangsung secara terus menerus dari induk tanaman ke endosperma atau kotiledon. Namun, pada biji sereal dan secara umum pada tumbuhan monokotil endosperma akan tetap

dipertahankan sampai dewasa. Endosperma terdiri dari sel-sel yang diisi dengan pati bersama dengan protein dan sejumlah kecil lipid. Pada tumbuhan seperti gandum, endosperma dikelilingi oleh aleuron. Aleuron menjadi sumber enzim yang digunakan dalam mendistribusikan nutrisi selama proses perkecambahan berlangsung. Ketika sampai pada tahap dewasa, kotiledon tumbuh dan bentuknya tipis dan memiliki struktur seperti daun. Endosperma dan kotiledon mengandung sejumlah besar karbon yang tersimpan, karbon tersebut dalam bentuk karbohidrat, lipid, dan protein, unsur mineral, dan hormon yang menunjang pertumbuhan dan perkembangan bibit sampai tumbuhan tersebut dapat melakukan fotosintesis dengan sendiri (Hopkins and Huner, 2009).

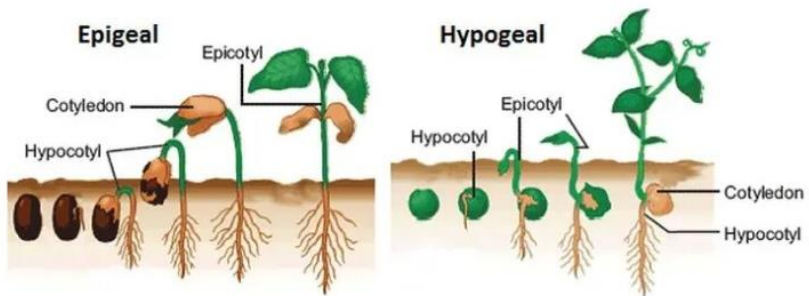


Gambar 7.3 Perkecambahan dan Perkembangan Biji

(Sumber : <https://cdn.britannica.com/44/72144-004-AE10EFC1/Monocotyledon-Nutrients-cotyledon-endosperm-radicle-epicotyl-hypocotyl.jpg>)

Proses penyerapan air ke dalam sel (imbibisi) menjadi awal dimulainya perkecambahan. Air yang masuk ke dalam biji akan menyebabkan enzim-enzim hidrolisis memecah tepung menjadi maltosa, yang dihidrolisis oleh maltase dan akan diubah menjadi glukosa. Selanjutnya, terjadi proses metabolisme, sehingga gula akan dipecah menjadi energi dalam hal ini dalam bentuk senyawa karbohidrat yang akan menyusun tubuh tumbuhan. Adapun asam amino akan disusun menjadi protein yang berfungsi untuk membentuk enzim baru serta asam lemak yang akan digunakan untuk menyusun membran sel (Harahap, 2012). Akar, batang dan daun akan terbentuk pada akhir pertumbuhan perkecambahan. Terdapat jaringan meristematis pada ujung-ujung akar dan batang yang akan selalu melakukan pembelahan (Khairuna, 2019).

Berdasarkan letak kotiledon, terdapat dua jenis perkecambahan, antara lain perkecambahan hipogeal dan perkecambahan epigeal. Tumbuhnya epikotil yang memanjang dengan plumula yang tumbuh di atas permukaan tanah dan menembus permukaan kulit biji, dengan kotiledon tetap berada di dalam tanah merupakan perkecambahan hipogeal. Adapun contoh tumbuhan yang termasuk dalam perkecambahan hipogeal adalah kacang kapri, kacang erci, rumput dan jagung. Sedangkan, ketika hipokotil tumbuh memanjang dan membuat plumula dan kotiledon terangkat ke permukaan tanah sehingga kotiledon dapat melakukan fotosintesis selama berbentuk daun maka hal ini termasuk dalam perkecambahan epigeal. Contoh tumbuhan yang termasuk epigeal adalah kedelai, bunga matahari, kacang hijau dan kacang tanah (Handoko and Rizki, 2020).



Gambar 7.4 Perbedaan Perkecambahan Epigeal dan Hipogeal
(Sumber : <https://www.quipper.com/id/blog/mapel/biologi/tipe-perkecambahan-hipogeal-epigeal/>)

Selama tahap terakhir pematangannya, benih mengalami dehidrasi hingga kadar airnya hanya sekitar 5-15% dari beratnya. Embrio, yang dikelilingi oleh persediaan makanan (kotiledon, endosperma, atau keduanya), memasuki masa dormansi. Masa dormansi merupakan fase istirahat dimana tidak akan mengalami pertumbuhan atau perkecambahan dan metabolismenya hampir berhenti. Embrio dan persediaan makanannya ditutupi oleh kulit biji yang keras dan protektif dari integumen bakal biji. Pada beberapa spesies, dormansi disebabkan oleh adanya kulit biji yang utuh dibandingkan oleh embrio itu sendiri (Campbell *et al.*, 2008).

7.2.2 Pertumbuhan Primer

Pertumbuhan primer merupakan pertumbuhan dasar yang terjadi pada tumbuhan. Pertumbuhan dengan aktivitas yang dilakukan oleh sel-sel meristem yang menyebabkan batang dan akar tumbuh memanjang (Harahap, 2012). Jaringan meristem melakukan pembelahan secara terus menerus, yang terdapat pada ujung akar dan ujung batang, sehingga mempengaruhi ukuran akar dan batang pada tumbuhan. Pertumbuhan primer akan membentuk lapisan epidermis, korteks, xilem primer, floem primer juga empulur (Campbell *et al.*, 2000). Pertumbuhan primer memungkinkan akar meluas ke

seluruh tanah dan pucuk agar meningkatkan paparan cahaya. Pada tumbuhan herba akan menghasilkan semua organ pada tumbuhan (Campbell *et al.*, 2008).

Meristem apikal akar merupakan sekelompok sel yang ditemukan pada ujung akar, berada tepat di belakang tudung akar. Setiap kali sel dalam meristem membelah menjadi dua sel anakan, salah satunya akan dipertahankan untuk melanjutkan pembelahan sel. Sedangkan, sel anakan yang kedua akan memanjang, sehingga menambah pemanjangan akar dan mendorong ujung akar menembus tanah. Struktur pertama yang muncul pada saat benih berkecambah adalah radikula. Radikula akan menambatkan benih ke dalam tanah dan memulai proses penambangan tanah untuk mendapatkan air dan unsur hara (Ordog, 2011).

Ujung akar ditutupi oleh tudung akar, yang membantu akar dalam menembus tanah selama pertumbuhan dan membantu penembusan akar ke dalam tanah (Setjo *et al.*, 2004). Pada saat akar primer memanjang, maka akan tumbuh akar cabang (akar lateral). Akar lateral berasal dari perisikelyang mengelilingi stele dari akar pusat. Akar lateral yang sedang tumbuh akan menembus korteks di sekitarnya. Akar lateral tersebut mengeluarkan enzim yang akan mencerna dinding sel. Primordia akar lateral muncul di dekat jaringan xilem yang baru mengalami diferensiasi, yang memungkinkan elemen pembuluh berkembang di belakang ujung akar lateral yang tumbuh untuk mempertahankan hubungan dengan xilem dan floem akar primer (Ordog, 2011).

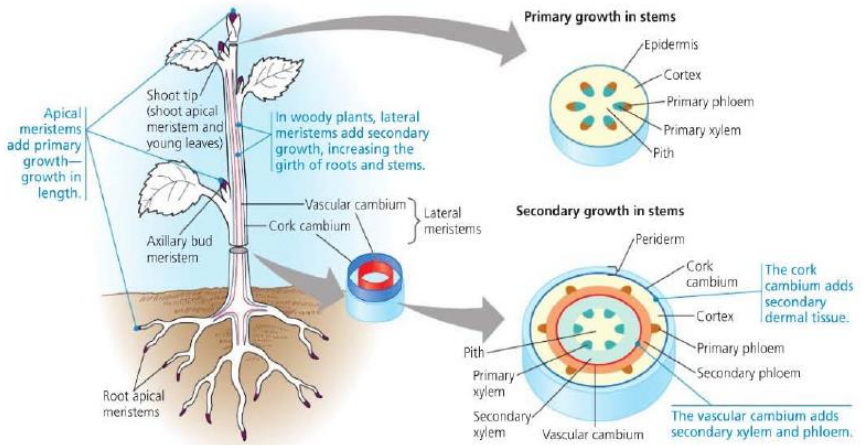
Terdapat tiga daerah pertumbuhan yang terdapat pada ujung batang dan akar berdasarkan aktivitasnya, antara lain daerah pembelahan, daerah pemanjangan dan daerah diferensiasi. Daerah pembelahan merupakan daerah yang pada bagian ujungnya mengandung sel-sel yang aktif melakukan pembelahan dan tetap bersifat meristematik. Daerah pemanjangan sel merupakan daerah yang terletak pada bagian belakang daerah pembelahan dengan setiap sel, memiliki

aktivitas untuk membesar dan memanjang. Daerah diferensiasi merupakan daerah yang sel-selnya memiliki struktur dan fungsi khusus, dengan meristem ujung batang membentuk primordial daun, pada sudut daun dan batang terdapat sel-sel yang dipertahankan sebagai sel-sel meristematis yang akan berkembang menjadi cabang (Harahap, 2012). Meristem apikal, terletak di ujung akar dan pucuk serta pada ketiak pucuk, yang membuat tanaman untuk tumbuh semakin panjang.

7.2.3 Pertumbuhan Sekunder

Pertumbuhan sekunder terjadi karena aktivitas jaringan meristem sekunder, seperti pada jaringan kambium pada batang tumbuhan dikotil dan Gymnospermae. Batang tumbuhan dikotil akan semakin membesar seiring dengan pertambahan umur pohon. Hal tersebut terjadi karena terjadinya proses pertumbuhan sekunder. Namun, pada tumbuhan monokotil, pertumbuhan sekunder tidak terjadi. Adapun bagian yang berperan pada pertumbuhan sekunder ini adalah kambium (Handoko and Rizki, 2020). Proses pertumbuhan sekunder dimulai dari pembelahan kambium vaskuler ke arah dalam dengan membentuk xilem dan ke arah luar membentuk floem Kambium intervaskuler dibentuk oleh parenkim batang atau akar, dengan feloderm dibentuk oleh felogen yang membelah ke arah luar. Aktivitas kambium membentuk xilem dan floem yang lebih cepat dari pada pembentukan kulit mengakibatkan kulit pohon dalam hal ini korteks dan epidermis akan pecah. Hal ini menyebabkan felogen membentuk feloderm ke arah dalam dan felem ke arah luar. Feloderm merupakan sel hidup, sedangkan sel felem merupakan sel mati (Harahap, 2012). Kambium akan terus berkembang membentuk xilem sekunder dan floem sekunder sehingga batang menjadi semakin besar. Sehingga, diperlukan jalan untuk mengangkut makanan ke arah lateral dan dibentuklah jari-jari empulur (Handoko and Rizki, 2020).

Pertumbuhan ketebalan pada batang dan akar dikenal dengan istilah pertumbuhan sekunder yang terjadi akibat aktivitas meristem lateral yang menghasilkan kambium pembuluh dan kambium gabus. Silinder pemisah ini merupakan sel memanjang sepanjang akar dan batang. Kambium pembuluh menambahkan jaringan pembuluh yang disebut xilem sekunder dan floem sekunder. Epidermis akan digantikan oleh kambium gabus dengan periderm yang lebih tebal dan keras (Campbell *et al.*, 2008).



Gambar 7.5 Pertumbuhan Primer dan Pertumbuhan Sekunder
(Sumber : (Campbell *et al.*, 2008))

Hubungan antara pertumbuhan primer dan sekunder bisa terlihat pada ranting tumbuhan ketika musim dingin dari pohon yang meranggas. Pada ujung pucuk terdapat tunas apikal yang dorman dan ditutupi oleh sisik yang melindungi meristem apikal. Pada musim semi, tunas akan melepaskannya secara berkala dan memulai lonjakan pertumbuhan primer yang baru, dengan menghasilkan serangkaian nodus dan ruas. Pada setiap segmen pertumbuhan, ditandai dengan adanya bekas luka akibat daun yang berguguran. Kemudian, pada setiap luka tersebut terdapat tunas ketiak atau cabang yang

dibentuk oleh kuncup aksila. Setiap musim, pertumbuhan primer memperluas tunas, dan pertumbuhan sekunder menebalkan bagian-bagiannya yang terbentuk pada tahun-tahun sebelumnya (Campbell *et al.*, 2008). Pertumbuhan primer dan pertumbuhan sekunder terjadi secara bersamaan. Ketika terjadi pertumbuhan primer dengan menambah daun, dan memanjangkan batang serta akar di bagian tanaman yang lebih muda, maka pertumbuhan sekunder menebalkan batang dan akar pada daerah tua tempat dimana pertumbuhan primer terhenti. Prosesnya serupa pada tunas dan akar (Campbell *et al.*, 2008).

Kambium vaskular sering kali merupakan silinder sel meristematik yang tebalnya hanya satu sel. Lingkarannya bertambah dan menambahkan lapisan ke bagian dalam yaitu xilem sekunder dan floem sekunder ke bagian luarnya. Sehingga, setiap lapisan memiliki diameter lebih besar dari lapisan sebelumnya. Berdasarkan hal tersebut, kambium vaskuler menebalkan akar dan batang. Adapun pada batang berkayu yang khas, kambium pembuluh terdiri dari sel parenkim yang tidak mengalami diferensiasi dan terletak di luar empulur dan xilem primer, korteks dan floem primer. Kambium vaskular terbentuk di bagian luar xilem primer, floem primer dan perisikel (Campbell *et al.*, 2008).

7.3 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Pertumbuhan Dan Perkembangan

Pertumbuhan dan perkembangan sel, dipengaruhi oleh berbagai faktor internal dan eksternal seperti hormon, cahaya, suhu, gravitasi, pemangsaan serangga, penyakit, dan bahkan posisi sel terhadap sel lain (Hopkins and Huner, 2009). Tumbuhan merespons rangsangan eksternal, merasakan perubahan di lingkungannya, dan bekerja pada jam biologis dengan tepat. Banyak tumbuhan meranggas yang menggugurkan daunnya pada musim tertentu atau mengembangkan bunga dan buah pada waktu tertentu dalam setahun. Hal ini menunjukkan bahwa tumbuhan memiliki mekanisme unik dan demikianlah cara tumbuhan untuk berkomunikasi dengan

lingkungan tempat mereka tinggal. Untuk mencapai hal tersebut, tumbuhan mensintesis beberapa biomolekul dengan bahan kimia yang berbeda-beda dan alam yang memfasilitasi komunikasi sel ke sel dan mempengaruhi berbagai aspek tumbuh kembang (Bhatla and Lal, 2022).

7.3.1 Faktor Internal

1. Hormon

Harmon berpengaruh dalam proses pembelahan dan pemanjangan sel, akan tetapi terdapat pula hormon yang menghambat pertumbuhan. Hormon yang memacu pertumbuhan adalah auksin, giberelin, sitokinin, gas etilen. Sedangkan asam absisat merupakan senyawa yang akan penghambat proses pertumbuhan. Asam traumalin merupakan hormon luka yang berperan dalam menumbuhkan sel-sel jika terjadi luka (Harahap, 2012). Beberapa jenis hormon menjadi perantara terhadap respons fisiologis tumbuhan yang berjangka lebih pendek terhadap stimulus-stimulus lingkungan (Handoko and Rizki, 2020).

Beberapa hormon yang berpengaruh pada tumbuhan beserta peranannya antara lain, auksin yang berperan dalam meningkatkan proses pemanjangan sel, pembelahan dan diferensiasi sel; gibberalin berfungsi untuk membentuk biji serta perkembangan dan perkecambahan embrio; etilen berperan dalam mematangkan buah serta pengguguran daun; sitokinin berperan dalam pembelahan sel, misalnya membentuk akar dan cabang tanaman; asam absisat bermanfaat dalam penuaan dan proses perontokan daun; kaolin berperan dalam proses organogenesis tanaman; serta asam traumalin yang berperan dalam proses regenerasi sel ketika jaringan mengalami kerusakan (Fauziah, 2021).

2. Gen

Gen merupakan salah satu faktor yang berperan dalam pertumbuhan dan perkembangan yang terdapat dalam sel. Sel merupakan kesatuan hereditas karena di dalamnya terdapat gen yang bertanggung jawab dalam pewarisan sifat, misalnya untuk membentuk protein, enzim dan hormon yang mempengaruhi berbagai reaksi metabolisme untuk mengatur dan mengendalikan pertumbuhan (Harahap, 2012). Gen mempengaruhi ciri dan sifat makhluk hidup, dengan mempengaruhi bentuk tubuh, warna bunga, dan rasa buah (Fauziah, 2021). Genetik juga menentukan kemampuan metabolisme makhluk hidup, sehingga mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangannya (Handoko and Rizki, 2020).

Peranan gen sangat penting dalam pertumbuhan tumbuhan, namun genetika bukanlah satu-satunya faktor yang berperan dalam menentukan pola pertumbuhan dan perkembangan, sebab terdapat faktor lingkungan juga turut andil dalam proses tersebut. Sebagai contoh ketika tanaman memiliki sifat yang unggul dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman yang mempunyai sifat unggul, namun hanya akan tumbuh dengan baik, berbuah manis dan lebat ketika ditanam pada tempat yang sesuai, misalnya pada lahan yang subur. Namun, ketika ditumbuhkan pada tempat kurang subur dan lingkungan yang tidak sesuai, maka pertumbuhan dan perkembangannya akan terhambat dan tidak sesuai dengan apa yang diharapkan (Arimbawa, 2016).

3. Enzim

Enzim merupakan suatu makromelekul yang dapat mempercepat reaksi kimia dalam tubuh makhluk hidup (Handoko and Rizki, 2020). Suatu rangkaian reaksi dalam tubuh makhluk hidup tidak dapat berlangsung hanya dengan melibatkan satu jenis enzim. Sehingga, adanya perbedaan jenis enzim dapat menyebabkan terjadinya perbedaan respon pertumbuhan terhadap kondisi lingkungan yang sama (Arimbawa, 2016).

7.3.2 Faktor Eksternal

1. Suhu

Suhu merupakan salah faktor yang mempengaruhi produksi tanaman, baik secara fisik maupun fisiologis. Suhu merupakan salah satu penghambat dalam proses fisiologi tanaman (Fauziah, 2021). Suhu mempengaruhi kecepatan pertumbuhan serta sifat dan struktur tanaman. Suhu optimum dapat membuat tumbuhan dapat tumbuh dengan baik. Suhu optimum untuk daerah tropis berkisar 22-37°C. Suhu minimum, optimum, dan maksimum sangat dipengaruhi oleh jenis dan fase pertumbuhan tanaman (Arimbawa, 2016).

2. Cahaya

Kunci penentu proses metabolisme dan fotosintesis pada tumbuhan adalah cahaya. Cahaya berperan penting dalam setiap proses pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan, mulai dari proses perkecambahan sampai tumbuh menjadi tumbuhan dewasa. Setiap tumbuhan memiliki respon yang berbeda terhadap cahaya, ada yang mampu tumbuh dalam kondisi cahaya yang terbatas (tumbuhan toleran), namun adapula tumbuhan yang tidak mampu tumbuh dengan keadaan cahaya yang kurang atau terbatas (tumbuhan intoleran). Tumbuhan yang

bersifat toleran memiliki ciri morfologi dengan daun lebar dan tipis, sedangkan tumbuhan yang intoleran memiliki ciri daun kecil dan tebal. Hal ini, bisa menjadi faktor yang menghambat pertumbuhan tanaman ketika kondisi tidak sesuai dengan jenis tumbuhan. Dengan kata lain, ketika tanaman toleran ditanam di daerah yang cukup cahaya, maka tanaman tersebut akan mengalami pertumbuhan yang kurang baik, begitupun sebaliknya untuk tanaman intoleran. Cahaya penting dalam proses fotosintesis, namun keberadaan cahaya juga dapat merusak hormon auksin yang terdapat pada ujung batang (Fauziah, 2021)

3. Hara dan Air

Air memegang peranan penting dalam kehidupan tumbuhan dan merupakan unsur paling melimpah di sebagian besar organisme. Air biasanya menyumbang lebih dari 70 persen berat bagian tanaman non-kayu. Penyerapan air oleh sel menghasilkan tekanan yang disebut turgor. Fotosintesis mengharuskan tanaman menarik karbon dioksida dari atmosfer, dan pada saat yang sama membuat mereka kehilangan air, sehingga untuk mencegah kekeringan daun, air harus diserap oleh akar, dan diangkut ke seluruh tubuh tanaman. Menyeimbangkan penyerapan, transportasi, dan hilangnya air merupakan tantangan penting bagi tanaman darat (Ordog, 2011).

Unsur hara yang dibutuhkan tanaman dapat dibagi atas dua jenis yaitu hara makro yang dibutuhkan dalam jumlah yang besar dan mikro dibutuhkan dalam jumlah kecil. Nutrisi yang tergolong ke dalam hara makro adalah Karbon, Hidrogen, Oksigen, Nitrogen, Sulfur, Fosfor, Kalium, Kalsium, dan Ferrum, sedangkan unsur hara mikro adalah Boron, Mangan, Molibdenum, Zinkum (seng) Cuprum (tembaga) dan Klor. Ketika tanaman kekurangan dari salah satu dari unsur hara tersebut maka tanaman akan mengalami gejala

defisiensi yang mengakibatkan terhambatnya pertumbuhan tanaman (Arimbawa, 2016). Zat hara tidak berperan secara langsung pada proses fotosintesis, namun sangat dibutuhkan agar tumbuhan dapat tumbuh dan berkembang dengan baik (Fauziah, 2021).

4. Tanah

Keadaan tanah sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Ketika tingkat kesuburan tanah relatif rendah, maka akan mengakibatkan terhambatnya pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Hal ini bisa diketahui dari keadaan fisik tanah dengan melihat struktur dan tekstur tanah, keadaan kimia yang ditentukan oleh zat hara yang terkandung di dalam tanah serta keadaan biologis tanah yang ditentukan dari kandungan flora dan fauna yang terkandung di dalam tanah sebagai dekomposisi (Arimbawa, 2016).

5. Faktor Biotik

Faktor biotik yang dimaksud adalah suatu kondisi yang diatur dan menguntungkan bagi kehidupan tanaman, baik secara langsung maupun secara tidak langsung. Kondisi menguntungkan secara langsung dilakukan oleh manusia dengan memanipulasi lingkungan yang dilakukan oleh manusia maupun secara tidak langsung

DAFTAR PUSTAKA

- Arimbawa, I.W.P. (2016) *Dasar-Dasar Agronomi*. Denpasar: Universitas Udayana.
- Bhatla, S.C. and Lal, M.A. (2022) *Plant Physiology, Development and Metabolism*. Singapore: Springer Nature.
- Campbell, N.A. *et al.* (2000) *Biology*. Jakarta: Erlang.
- Campbell, N.A. *et al.* (2008) *Biology Eight Edition*. San Fransisco: Pearson Benjamin Cummings.
- Fauziah, A. (2021) *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*. Tulungagung: Biru Atmajaya.
- Handoko, A. and Rizki, A.M. (2020) *Buku Ajar Fisiologi Tumbuhan*. Lampung: Prodi Pendidikan Biologi, Fakultas Tarbiyah dan Keguruan, UIN Raden Intan Lampung.
- Harahap, F. (2012) *Fisiologi Tumbuhan*. Medan: Perdana Mulya Sarana.
- Hopkins, W.G. and Huner, N.P.A. (2009) *Plant Physiology*. Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Khairuna (2019) *Diktat Fisiologi Tumbuhan*. Medan: Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Ilmu Tarbiyah dan Keguruan, Universitas Islam Negeri Sumaterta Utara.
- Ordog, V. (2011) *Plant Physiology*. Hongaria: XMLmind XSL-FO Converter.
- Setjo, S. *et al.* (2004) *Anatomi Tumbuhan*. Malang: Jurusan Biologi, FMIPA Universitas Negeri Malang.
- Tjitrosomo, S.S. (1983) *Botani Umum 1*. Bandung: Angkasa.

BAB 8

BAHAN ORGANIK PRIMER DAN SEKUNDER

Oleh Irfan Martiansyah

8.1 Pendahuluan

Bahan organik merupakan konsep dasar dalam bidang biologi, kimia, ekologi, dan ilmu lingkungan. Hal ini mengacu pada beragam senyawa berbasis karbon yang berasal dari organisme hidup atau proses metabolismenya. Dalam fisiologi tumbuhan, bahan organik mengacu pada senyawa kompleks berbasis karbon yang penting untuk proses biologis dan aktivitas metabolisme tumbuhan. Senyawa ini dicirikan oleh adanya atom karbon yang terikat pada hidrogen (C-H) dan terutama berasal dari organisme hidup atau produk sampingannya. Bahan organik membentuk dasar berbagai komponen penting dalam sel tumbuhan, termasuk karbohidrat, protein, lipid, asam nukleat, dan fitokimia. Senyawa yang mengandung karbon yang merupakan bahan organik dalam fisiologi tumbuhan sangat diperlukan untuk pertumbuhan, struktur, dan fungsi tumbuhan. Senyawa ini terlibat dalam penyimpanan dan transfer energi, integritas struktural, dan proses pengaturan dalam sel dan jaringan tanaman.

Memahami konsep bahan organik dan signifikansinya memberikan wawasan berharga mengenai fungsi senyawa organik dalam konteks fisiologi tumbuhan. Dalam bab ini, kita akan memaparkan pentingnya bahan organik dalam fisiologi tanaman dan menerapkan praktik berkelanjutan dalam pengelolaannya merupakan langkah penting untuk menjamin ketahanan pangan,

kelestarian lingkungan, dan keberlangsungan kehidupan di planet kita.

8.2 Bahan Organik

8.2.1 Pengertian Bahan Organik

Bahan organik mengacu pada zat yang ada di dalam tanah atau di permukaannya, yang berasal dari pembusukan atau penguraian sisa-sisa tumbuhan, hewan, dan manusia yang sedang berlangsung. Dekomposisi adalah fenomena biologis yang ditandai dengan penguraian fisik dan transformasi biokimia molekul organik rumit yang berasal dari zat tak hidup menjadi senyawa organik dan anorganik yang lebih sederhana melalui proses biotik dan abiotik (Baldock and Skjemstad, 2000). Bahan organik yang berada di dalam tanah berasal dari makhluk hidup dan kemudian terurai kembali ke dalam bumi. Lingkungan selalu merupakan kumpulan berbagai hal, mulai dari tanaman hidup dan bagian tubuh hewan utuh hingga kombinasi komponen-komponen yang sebagian besar terdegradasi seperti humus (Bot dan Benites, 2005).

Proses dekomposisi memungkinkan bahan organik melepaskan nutrisi dalam keadaan tersedia secara hayati untuk diserap tanaman. Untuk mempertahankan sistem siklus unsur hara, sangat penting untuk memastikan bahwa laju masukan bahan organik dari sisa tanaman, pupuk kandang, dan sumber lainnya selaras dengan laju dekomposisi, sekaligus juga mempertimbangkan laju serapan unsur hara oleh tanaman dan kehilangan yang diakibatkannya. dari pencucian dan erosi (Bünemann et al., 2018). Apabila laju masuknya bahan organik ke dalam tanah lebih rendah dibandingkan laju dekomposisi, maka terjadi penurunan bahan organik tanah. Sebaliknya, jika laju penambahan melebihi laju dekomposisi, terjadi peningkatan bahan organik tanah (Bulgarelli et al., 2020).

Adanya bahan organik (karbon organik yang melimpah) merupakan ukuran kualitas tanah yang subur. Bahan organik ini disebut juga komponen dasar bahan organik tanah, yang terdiri dari bahan-bahan organik dalam berbagai tahap penguraian. Bahan organik menyusun sebagian kecil tanah, biasanya antara 1% dan 5% dari total massa tanah (Brady & Weil 2016). Meskipun jumlahnya relatif kecil, bahan organik tanah mempunyai peran penting dalam menjaga kesehatan tanah dan berfungsinya ekosistem. Pemanfaatan bahan organik berpotensi meningkatkan beberapa sifat tanah, seperti porositas, retensi dan ketersediaan air, aerasi, suhu tanah, dan aktivitas biologis. Hal ini dicapai melalui proses pengikatan partikel-partikel tanah primer untuk menghasilkan agregat yang stabil, seperti yang ditunjukkan oleh Zhang dan Wang (2019) dan Wei dan Yang (2020). Kesuburan tanah meningkat antara lain karena bahan organik meningkatkan kualitas fisik, kimia, dan biologi tanah (Lal, 2015; Singh & Singh, 2017).

Pengertian bahan organik mengacu pada zat apa pun yang mengandung senyawa berbasis karbon, biasanya berasal dari organisme hidup atau produk sampingnya. Bahan organik dicirikan oleh hubungannya dengan proses kehidupan dan mengandung ikatan karbon-hidrogen (C-H), yang merupakan ciri khas kimia organik (Brady & Weil 2016; Vollhardt & Schore, 2017). Bahan organik merupakan landasan fisiologi tanaman, penting untuk pertumbuhan, perkembangan, dan kesehatan tanaman secara keseluruhan. Beragam fungsinya, termasuk penyimpanan unsur hara, perbaikan struktur tanah, retensi dan efisiensi penggunaan air, dan dukungan mikroba, menjadikannya sangat diperlukan baik dalam ekosistem alami maupun sistem pertanian (Keshavarzpour et al. 2019; Zhang & Wang, 2019; Wei & Yang, 2020).

8.2.2 Klasifikasi Bahan Organik

Bahan organik dapat dikategorikan menjadi bahan organik primer dan sekunder menurut asal sumbernya. Keduanya memainkan peran penting dalam mendukung kesuburan tanah yang erat kaitannya dengan kesehatan tanaman dari aspek fisiologi.

a. Bahan Organik Primer

Bahan organik primer adalah bahan organik yang masuk ke dalam tanah dalam bentuk bahan organik utuh yang belum terurai signifikan seperti serasah daun, jerami, dan bahan organik lain yang baru jatuh ke tanah (Freschet et al., 2013). Bahan organik primer mengandung karbon, nitrogen, dan nutrisi lain yang merupakan sumber nutrisi untuk menghidupi mikroba tanah yang mendukung aktivitas biologis yang terjadi di dalam tanah (Schmidt et al., 2011). Hao et al. (2021) memaparkan peran bahan organik primer dalam menyediakan substrat bagi mikroorganisme tanah dan mempengaruhi siklus karbon dan nitrogen dalam tanah. Bahan organik primer memiliki kandungan karbon yang relatif tinggi dan kandungan nitrogen yang rendah sehingga cenderung mengandung senyawa organik yang lebih mudah terurai (Conant et al., 2011).

Bahan organik primer adalah sumber utama nutrisi esensial seperti karbon, nitrogen, dan fosfor dalam tanah yang dapat digunakan oleh tanaman (Singh & Timsina, 2020). Untuk tumbuhan, bahan organik primer dibutuhkan oleh tanaman untuk pertumbuhan vegetatif (Kladivko & Nelson 2017). Dengan adanya bahan organik primer memungkinkan setiap akar yang tumbuh dapat lebih efektif menyebar dalam tanah untuk mencapai air dan nutrisi lebih dalam (Ostonen et al, 2007). Selain itu, bahan organik primer dapat mempengaruhi komunitas mikroba tanah yang berperan dalam mendukung fisiologi

tanaman melalui efek simbiotik dan patogenik (Bulgarelli et al., 2020; Singh & Singh, 2017).

Peningkatan respon fisiologi tanaman akibat terdapatnya (bahan organik primer mencakup berbagai aspek seperti peningkatan ketersediaan nutrisi, toleransi terhadap stres, dan peningkatan kualitas tanaman (Wani et al., 2016; Shukla et al., 2006). Tanaman yang tumbuh dalam tanah yang mengandung bahan organik primer cenderung lebih tahan terhadap stres lingkungan seperti kekeringan (Shukla et al., 2006; Ahmed & Aslam, 2017). Bahan organik primer juga diketahui dapat mempengaruhi produksi hormon tanaman seperti auksin yang mendukung perakaran dan sitokinin yang mengatur pertumbuhan tanaman (Stevenson, 2019).

b. Bahan Organik Sekunder

Bahan organik sekunder merupakan bahan organik yang sudah mencapai tahap penguraian lebih lanjut dan mengalami perubahan kimia dan fisik seperti humus, asam humat, dan asam fulvik yang stabil (Lehmann & Kleber 2015). Bahan organik sekunder memiliki tingkat dekomposisi yang lebih rendah daripada bahan organik primer dan dapat memberikan manfaat jangka panjang dalam meningkatkan kapasitas penyimpanan air tanah dan retensi nutrisi (Naveed et al., 2018). Hal ini diketahui dari beberapa penelitian yang menjelaskan bagaimana bahan organik sekunder, terutama humus, mempengaruhi sifat dan struktur tanah dan kualitas tanah, termasuk kemampuan untuk meningkatkan retensi air dan kesuburan tanah atau kapasitas penyimpanan nutrisi (Wang et al., 2017; Lehmann et al., 2020).

Kedua jenis bahan organik ini saling terkait dalam menyediakan sumber daya bagi mikroorganisme tanah, mempengaruhi siklus nutrisi, dan mempengaruhi kesehatan tanah secara keseluruhan (Zhang et al. 2019). Pengelolaan yang baik dari kedua jenis bahan organik ini penting untuk mengoptimalkan penggunaan bahan organik tanah sehingga dapat digunakan secara berkelanjutan (Gomiero et al., 2011).

8.2.3 Sumber Bahan Organik

Bahan organik berasal dari berbagai sumber, yang masing-masing berkontribusi terhadap keberlanjutan ekosistem. Bahan organik tanah berasal dari sumber primer, khususnya jaringan tumbuhan, yang meliputi berbagai komponen seperti akar, ranting, batang, daun dan buah. 2) Sumber sekunder jaringan fauna organik mencakup berbagai bentuk seperti kotoran hewan dan mikrofauna. 3) Sumber tambahan pupuk organik meliputi pemanfaatan pupuk kandang, pupuk kompos, pupuk hijau, pupuk bokashi maupun pupuk hayati (Dlamini & Titshall, 2018; Jiao et al., 2019; Singh & Timsina, 2020).

Sisa-sisa tumbuhan, hewan, dan manusia yang membusuk atau membusuk sebagian merupakan contoh senyawa organik yang dapat ditemukan di permukaan atau dalam tanah. Segala sesuatu yang dibuat oleh makhluk hidup yang mengandung karbon dianggap organik (Voet et al., 2016; Xiao et al., 2021). Adapun sumber bahan organik dipaparkan dengan rinci di bawah ini.

1. Serasah Daun (*Leaf Litter*)

Serasah daun termasuk sumber penyusun bahan organik utama dari permukaan hingga ke dalam tanah. Serasah tumbuhan yang terurai di permukaan tanah adalah sumber utama bahan organik primer yang mendukung siklus nutrisi dan aktivitas mikroorganisme tanah (Gao et al., 2020). Serasah juga mengandung

senyawa organik (karbon) yang dapat menjadi sumber energi bagi mikroorganisme. Aktivitas mikroorganisme ini, termasuk fungi mikoriza arbuskular (AMF) yang hidup dalam simbiosis dengan akar tanaman, dapat meningkatkan penyerapan nutrisi oleh tanaman dan mengaktifkan sistem pertahanan tanaman melalui interaksi hormonal (Smith & Smith, 2012; Vos et al., 2015). Saat mengalami dekomposisi oleh mikroorganisme tanah, serasah daun melepaskan nutrisi seperti nitrogen dan fosfor yang diambil oleh akar tanaman untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangan setiap tanaman. Freschet et al. (2019) memaparkan peran serasah daun dalam mempengaruhi siklus nutrisi dan struktur komunitas mikroorganisme tanah.

2. Akumulasi Serasah (Humus)

Humus, bentuk stabil senyawa organik dalam tanah yang diketahui berperan dalam meningkatkan proses kesuburan tanah dan retensi air (Lehmann & Kleber, 2015). Asam humat dan asam fulvik adalah senyawa organik yang membentuk bagian penting dari humus dalam tanah. Keduanya diketahui dapat meningkatkan kualitas tanah dan ketersediaan nutrisi (Huguenin-Elie & Revault, 2014; Nardi et al., 2017). Hal ini mendukung ketersediaan air bagi tanaman dan meningkatkan kapasitas tanah untuk menyimpan nutrisi yang berpengaruh pada fisiologi tanaman (Six et al., 2019). Humus juga berperan dalam mengurangi stres oksidatif pada tanaman, meningkatkan ketersediaan nutrisi mikro-esensial, dan memodulasi aktivitas enzim yang terlibat dalam fisiologi tanaman (Nardi & Morari, 2004; Canellas & Olivares, 2014).

3. Pupuk Organik

Kompos dan pupuk kandang merupakan dua contoh pupuk organik yang mengandung bahan organik yang berpotensi meningkatkan aktivitas mikroba tanah dan ketersediaan unsur hara (Song et al., 2018). Hal ini berdampak positif pada fisiologi tanaman dengan meningkatkan serapan nutrisi dan efisiensi penggunaan nutrisi sehingga meningkatkan kesehatan tanaman (Malavolta et al., 2020). Penggunaan pupuk organik dapat meningkatkan aktivitas mikroba tanah, menyediakan nutrisi dalam bentuk yang lebih tersedia, dan memodulasi interaksi tanaman-mikroba yang mempengaruhi fisiologi tanaman, seperti peningkatan penyerapan unsur hara dan toleransi terhadap stres biotik (Mäder et al., 2002; Zhang et al., 2018).

4. Kompos dan Limbah Organik

Kompos dari limbah organik dapat membantu kesuburan tanah dan ketahanan tanaman terhadap penyakit dengan cara meningkatkan ketersediaan nutrisi, struktur tanah, dan kapasitas penyimpanan air (Abou-Hadid & Osman, 2019; Dhar et al., 2021). Menurut Sharma et al. (2020), keberadaan kompos dapat memberikan pengaruh terhadap kerja hormon tanaman, termasuk auksin dan sitokinin, yang berperan penting dalam mengatur beberapa aspek pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Selain itu, Bertin et al. (2019) mengungkapkan peran kompos dalam memodulasi interaksi tanaman-mikroba dan meningkatkan pertumbuhan tanaman.

Bahan organik tanah terdiri dari dua komponen utama: fraksi organik aktif, yang mencakup mikroorganisme dan berjumlah <40 persen dari total, dan bahan organik persisten atau stabil, yang umumnya dikenal sebagai humus, yang jumlahnya 40-60 persen (Six et al., 2002; Lehmann & Kleber, 2015; Kuzyakov & Blagodatskaya, 2015). Bahan tanaman mempunyai peranan penting dalam menambah bahan organik tanah. Sumber utama bahan organik tanah berasal dari jaringan tanaman. Menurut Lal (2015) dan Omonode & Jokisch (2021), limbah tanaman biasanya memiliki kadar air berkisar antara 60 hingga 90 persen. Bahan padat sisa terdiri dari karbon (C), oksigen (O), hidrogen (H), serta sejumlah kecil sulfur (S), nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg). Meski keberadaannya sedikit, unsur hara ini berperan penting dalam menjaga kesuburan tanah. Oleh karena itu, bahan organik yang terakumulasi merupakan gudang nutrisi tanaman (Bai et al., 2008; Lal, 2015; Lehmann & Kleber, 2015)).

8.2.4 Pengaruh Berbagai Faktor Terhadap Kadar Bahan Organik Tanah

Jumlah bahan organik dalam tanah diatur oleh banyak proses yang rumit. Menurut Lal (2020), peningkatan jumlah bahan organik di dalam tanah sering kali menjadi indikator kesuburan tanah dan kesehatan tanah secara keseluruhan. Kadar bahan organik dalam tanah adalah indikator penting dari kesehatan tanah dan produktivitas pertanian. Upaya untuk menjaga atau meningkatkan kadar bahan organik dalam tanah melalui praktik-praktik pertanian yang berkelanjutan dan konservasi tanah sangat penting untuk mendukung pertanian yang berkelanjutan dan menjaga keberlanjutan lingkungan (Blanco-Canqui, 2017). Berikut adalah beberapa faktor utama yang berpengaruh terhadap jumlah bahan organik dalam tanah:

1. Jenis Tanaman dan Vegetasi

Jenis tanaman yang tumbuh di suatu area dapat mempengaruhi jumlah bahan organik yang masuk ke dalam tanah (Luo et al., 2010; Bender et al., 2016). Ketika tanaman tumbuh subur maka dipastikan akan memiliki banyak daun, ranting, dan akar sehingga cenderung memberikan lebih banyak serasah organik ke dalam tanah saat mereka gugur.

2. Kondisi Iklim

Iklim regional memiliki dampak besar pada kadar bahan organik dalam tanah. Di daerah dengan iklim lembab dan hangat, dekomposisi serasah organik biasanya lebih cepat, yang dapat mengurangi kadar bahan organik dalam tanah. Sebaliknya, di iklim yang dingin dan atau kering, serasah organik cenderung terdekomposisi lebih lambat, sehingga bahan organik lebih banyak terakumulasi (Davidson & Janssens, 2006; Conant et al., 2011).

3. Tipe Tanah

Peranan jenis tanah juga sama pentingnya. Secara umum, tanah liat mempunyai kemampuan menahan bahan organik yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah berpasir. Alasan fenomena ini mungkin disebabkan oleh struktur unggul dan peningkatan porositas tanah liat, yang memfasilitasi pemerangkapan dan retensi bahan organik (Six et al., 1998; Rasmussen & Thomsen, 2010).

4. Aktivitas Mikroorganisme

Organisme mikroskopis dalam tanah seperti bakteri dan fungi berperan dalam menguraikan bahan organik dan membantu tanaman dalam menyerap nutrisi (Philippot et al., 2013; Hartmann et al., 2015). Aktivitas mikroorganisme seperti bakteri dan fungi yang berperan dalam dekomposisi bahan organik sangat mempengaruhi

kadar bahan organik dalam tanah. Interaksi antara mikroorganisme tanah dan akar tanaman mempengaruhi fisiologi tanaman. Lingkungan yang kaya mikroba dekomposer cenderung memiliki dekomposisi yang lebih cepat dan mengurangi kadar bahan organik dalam tanah (Allison & Martiny, 2008; Smith & Read, 2010). Bulgarelli et al. (2020) membahas hubungan kompleks antara mikroorganisme tanah dan akar tanaman dalam mengatur pertumbuhan dan kesehatan tanaman. Interaksi yang lebih dalam antara mikroorganisme tanah dan akar tanaman, termasuk peran bakteri pemfiksasi nitrogen dalam meningkatkan ketersediaan nitrogen bagi tanaman (Reed et al., 2011).

5. Praktek Pertanian

Praktek pertanian seperti pemberian pupuk kimia, penggunaan herbisida, dan pengolahan tanah yang intensif dapat mempengaruhi kadar bahan organik dalam tanah. Beberapa praktik pertanian konvensional dapat mengurangi kadar bahan organik karena mereka mempercepat dekomposisi dan mengganggu siklus organik di tanah (Zhang et al., 2012).

8.2.5. Peran Bahan Organik

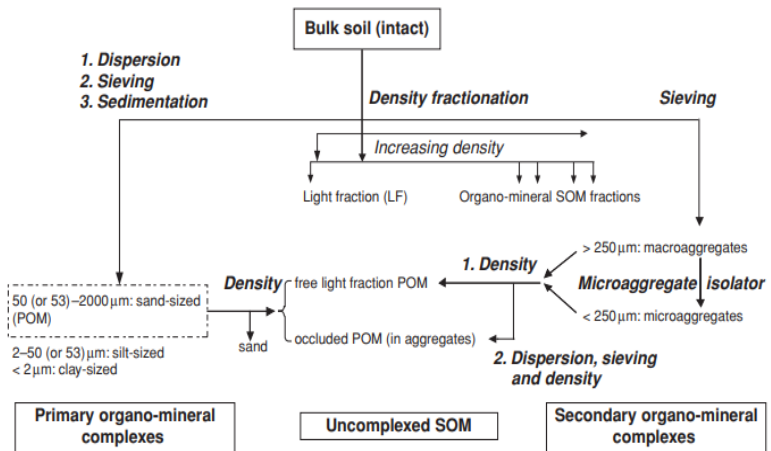
1. Peran Bahan Organik dalam Kesuburan Fisik Tanah

Salah satu peran utama bahan organik adalah kontribusinya terhadap kesehatan dan kesuburan tanah. Ketika bahan organik, seperti daun, akar, dan mikroorganisme yang membusuk, dimasukkan ke dalam tanah, hal ini memperkaya tanah dengan unsur hara penting dan memperbaiki strukturnya. Struktur tanah yang ditingkatkan ini memfasilitasi retensi air, aerasi, dan pertumbuhan akar, yang pada akhirnya meningkatkan produktivitas pertanian dan kesehatan tanaman (Angers & Caron, 1998; Canarini & Dijkstra, 2015; Lal, 2015).

Bahan organik tanah merupakan zat yang memfasilitasi produksi agregat tanah dengan bertindak sebagai perekat antar partikel tanah, sehingga mendorong kohesi partikel-partikel tersebut menjadi struktur yang lebih besar. Oleh karena itu, keberadaan bahan organik sangat penting bagi perkembangan struktur tanah (Six et al., 1998; Roldán et al., 2005). Penggabungan bahan organik ke dalam tanah berpotensi mempengaruhi struktur tanah dan berkaitan erat dengan tekstur tanah. Sebagai gambaran, tanah lempung yang bercirikan komposisi granular yang kasar dan kuat mengalami transformasi menjadi susunan yang lebih halus dan tidak terlalu kasar sehingga memudahkan dalam pengolahannya. Kehadiran bahan organik dalam jumlah yang cukup di dalam tanah dapat meningkatkan kondisi tanah, memastikan bahwa tanah memiliki kemiringan yang optimal, tidak terlalu berat atau terlalu ringan (Lal, 2015; Piotrowska-Długosz et al., 2017; Dziedzic et al., 2019).

Salah satu konsekuensi lebih lanjut dari keberadaan bahan organik di dalam tanah adalah peningkatan permeabilitas tanah. Konsep porositas tanah mengacu pada rasio ruang kosong, atau ruang kosong, di dalam volume tanah tertentu yang memiliki kapasitas menahan air dan udara. Pengaruh bahan organik terhadap peningkatan porositas tanah tidak semata-mata berkaitan dengan aerasi tanah, tetapi juga dengan tingkat kelembaban di dalam tanah. Penggabungan bahan organik ke dalam tanah terbukti meningkatkan kapasitas retensi air, sehingga meningkatkan kemampuannya dalam memasok air untuk mendukung pertumbuhan tanaman (Lal, 2004; Brady & Weil, 2008).

Salah satu metode fraksinasi fisik yang paling umum digunakan untuk mengisolasi bahan organik berdasarkan ukuran atau kepadatan yang terikat mineral dalam fraksi ukuran partikel dan agregat primer adalah metode fraksinasi berdasarkan ukuran partikel. Metode ini memungkinkan pemisahan bahan organik dari mineral berdasarkan ukuran partikelnya. Penggunaan metode fraksinasi ini dapat membantu dalam pemisahan bahan organik dari mineral dalam berbagai ukuran partikel dan agregat primer. Hasil fraksinasi ini dapat digunakan untuk menganalisis komposisi bahan organik dalam tanah serta memahami perannya dalam berbagai proses tanah dan ekologi tanah maupun kaitannya dengan fisiologi tanaman.



Gambar 8.1 Diagram Metode Fraksinasi fisik yang Paling Umum Digunakan untuk Mengisolasi Bahan Organik Berdasarkan Ukuran atau Kepadatan yang Terikat Mineral dalam Fraksi Ukuran Partikel dan Agregat Primer (Denef et al., 2010).

2. Peran Bahan Organik dalam Kesuburan Kimia Tanah

Dampak bahan organik terhadap kesuburan kimia tanah mencakup berbagai faktor, seperti kapasitas tukar kation, kapasitas tukar anion, pH tanah, kapasitas penyangga tanah, dan unsur hara tanah. Penambahan bahan organik akan menambah muatan negatif sehingga mengakibatkan peningkatan Kapasitas Tukar Kation (KTK). Kapasitas Tukar Kation (KTK) adalah ukuran kapasitas tanah untuk menahan dan menukar kation, termasuk kation yang penting untuk nutrisi tanaman. Pentingnya kapasitas tukar kation dalam kaitannya dengan kesuburan tanah telah ditekankan oleh Garaber et al. (2017). Kehadiran humus di dalam tanah, yang dihasilkan dari penguraian bahan organik, berkontribusi terhadap pembentukan muatan negatif tanah. Oleh karena itu, humus dianggap memiliki struktur koloid yang mirip dengan tanah liat. Namun, penting untuk dicatat bahwa humus kurang stabil dibandingkan dengan koloid tanah liat, karena humus merupakan komponen dinamis yang mudah diganggu dan dibentuk kembali (Brady & Weil, 2008; Schlesinger & Bernhardt, 2013).

3. Peran Bahan Organik dalam Kesuburan Biologi Tanah

Bahan organik berfungsi sebagai sumber energi penting bagi mikroorganisme dan organisme yang lebih besar dalam ekosistem tanah. Selain itu, bahan organik menyediakan habitat dan makanan bagi beragam mikroorganisme. Mikroorganisme, seperti bakteri dan jamur, terlibat dalam proses dekomposisi, dimana mereka memecah molekul organik menjadi senyawa yang sederhana. Proses penguraian ini tidak hanya mendaur ulang unsur hara kembali ke ekosistem tetapi juga meningkatkan kesehatan tanah dan keanekaragaman mikroba (Philippot et al., 2013; Lehmann & Kleber 2015).

Masuknya bahan organik ke dalam tanah terbukti merangsang proliferasi dan aktivitas metabolisme mikroba, khususnya mikroba yang terlibat dalam penguraian dan konversi bahan organik (Schimel & Schaeffer, 2012; Liao & Guo, 2018). Berbagai mikroorganisme, seperti bakteri, jamur, dan actinomycetes, terlibat dalam proses pembusukan. Selain itu, perlu diketahui bahwa protozoa, nematoda, dan cacing tanah juga merupakan kontributor signifikan dalam proses dekomposisi, sebagaimana dibahas dalam penelitian yang dilakukan oleh Geisen dan Bonkowski (2018), Zhao et al. (2018), dan Liu et al (2019). Interaksi antara mikroorganisme tanah dan organisme kecil difasilitasi oleh ketergantungan mereka pada bahan organik, karena bahan organik berfungsi sebagai energi vital dan sumber karbon untuk pertumbuhan dan aktivitas metabolisme mereka.

8.2.6 Manfaat Bahan Organik Untuk Mendukung Fisiologi Tumbuhan

Senyawa organik sangat penting dalam memfasilitasi fisiologi tanaman dan meningkatkan kesejahteraan tanaman secara keseluruhan. Penerapan zat ini memberikan nutrisi penting, memperbaiki komposisi tanah, menambah kapasitas retensi air, dan mendorong perkembangbiakan organisme mikroba yang bermanfaat dan berkontribusi pada kesehatan dan pertumbuhan tanaman (Pan et al., 2019; Zhang et al., 2020). Berikut beberapa cara bahan organik mendukung fisiologi tanaman:

1. Pasokan Nutrisi

Bahan organik berfungsi sebagai penyimpan unsur hara esensial yang penting, meliputi nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), dan unsur hara mikro. Saat bahan organik terurai, unsur hara ini dilepaskan secara bertahap ke dalam larutan tanah, sehingga tersedia untuk diserap oleh

tanaman (Bell et al., 2013). Pasokan nutrisi yang lambat dan stabil ini membantu memastikan tanaman menerima sumber elemen penting yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perkembangan secara konsisten (Hartmann et al., 2015).

2. Struktur Tanah

Kehadiran bahan organik dalam tanah berkontribusi terhadap perbaikan struktur tanah melalui proses pengikatan partikel-partikel tanah menjadi satu, sehingga membentuk agregat yang tahan lama (Tisdall & Oades, 1982). Struktur yang ditingkatkan ini meningkatkan porositas tanah, memungkinkan aerasi dan penetrasi akar yang lebih baik. Struktur tanah yang lebih baik juga mengurangi pemadatan dan meningkatkan lingkungan akar yang lebih sehat, sehingga memfasilitasi penyerapan unsur hara dan air oleh tanaman (Hinsinger et al., 2009; Zeng et al., 2023).

3. Retensi Air

Bahan organik memiliki kapasitas menahan air yang tinggi. Hal ini dapat menyerap dan mempertahankan kelembapan, membuat air lebih mudah diakses oleh akar tanaman selama musim kemarau. Fitur ini sangat bermanfaat di daerah dengan curah hujan yang tidak menentu atau terbatas, karena membantu tanaman mempertahankan hidrasi yang cukup (Williams et al., 2016; Komendova et al., 2019).

4. Penyangga pH

Bahan organik dapat menyangga pH tanah, membantu menjaga kisaran pH yang stabil dan sesuai untuk pertumbuhan tanaman. Di tanah masam, bahan organik dapat meningkatkan pH sehingga lebih menguntungkan bagi banyak tanaman. Sebaliknya, pada

tanah yang bersifat basa, hal ini dapat membantu menurunkan pH, sehingga menciptakan lingkungan yang lebih cocok untuk tanaman yang menyukai asam (McCauley, 2009; Srinivasarao et al., 2018).

5. Aktivitas Mikroba

Bahan organik berfungsi sebagai substrat yang memberi nutrisi dan lingkungan yang kondusif bagi mikroorganisme tanah yang menguntungkan, termasuk bakteri dan jamur. Mikroorganisme sangat penting dalam siklus nutrisi karena mereka memfasilitasi penguraian molekul organik yang rumit menjadi bentuk yang lebih mudah diasimilasikan oleh tanaman. Selain itu, beberapa mikroba tanah membentuk hubungan simbiosis dengan tanaman, meningkatkan penyerapan unsur hara melalui asosiasi mikoriza (Smith & Read, 2010; Philippot et al., 2013; Marschner & Crowley, 2017).

6. Perlindungan Tanaman terhadap Penyakit

Kompos dan mulsa organik adalah dua contoh pengolahan bahan organik yang dapat membantu mencegah penyebaran penyakit tanaman (Saha & Chakraborty, 2014). Bahan-bahan ini mengeluarkan zat dan memelihara mikroba yang menghambat pertumbuhan patogen, sehingga berkontribusi terhadap kesehatan tanaman secara keseluruhan (Stutz & Défago, 2013; van Bruggen et al., 2016; Ranjan et al., 2017).

7. Penyerapan Karbon

Kehadiran bahan organik di dalam tanah berperan penting dalam proses penyerapan karbon. Proses stabilisasi bahan organik sebagai humus menghasilkan penyimpanan karbon jangka panjang, sehingga memfasilitasi pembuangan karbon dioksida, gas rumah kaca, dari atmosfer. Pentingnya penyerapan karbon dalam konteks mitigasi perubahan iklim telah ditekankan dalam

penelitian-penelitian sebelumnya (Lian et al., 2017; Gruver & Clapp, 2018).

8. Peningkatan Hasil Tanaman

Interaksi antara peningkatan ketersediaan unsur hara, perbaikan struktur tanah, dan peningkatan retensi air yang disebabkan oleh bahan organik sering kali menyebabkan peningkatan produktivitas tanaman. Penerapan teknik pertanian organik yang mengutamakan pemanfaatan bahan tambahan kaya bahan organik telah terbukti menghasilkan hasil pertanian yang berkelanjutan dan produktif, sebagaimana dibuktikan oleh penelitian yang dilakukan oleh Mäder et al., (2002) dan Seufert et al., (2012).

9. Mengurangi Dampak Lingkungan

Tanah yang kaya bahan organik tidak terlalu rentan terhadap limpasan unsur hara dan erosi tanah, sehingga mengurangi dampak lingkungan dari pertanian. Dengan meningkatkan fisiologi tanaman dan kesehatan tanah, bahan organik berkontribusi pada praktik pengelolaan lahan yang lebih berkelanjutan (Smith et al., 2015).

8.2.7. Model Siklus Karbon Organik yang Terlibat dengan Pertumbuhan Tanaman

Bahan organik juga memainkan peran penting dalam siklus karbon. Karbon merupakan unsur penting dalam bahan organik, dan pertukarannya di atmosfer, tanaman, dan tanah membawa implikasi besar terhadap fenomena perubahan iklim (Lal, 2004; Connant et al., 2011; Lorenz et al., 2019). Tumbuhan terlibat dalam proses fotosintesis, dimana mereka mengasimilasi karbon dioksida dari atmosfer sekitarnya dan kemudian mengubahnya menjadi zat organik. Ketika bahan organik ini terurai, karbon dikembalikan ke atmosfer sebagai karbondioksida yang merupakan efek gas rumah kaca. Namun, beberapa bahan organik dapat tersimpan di dalam tanah dalam

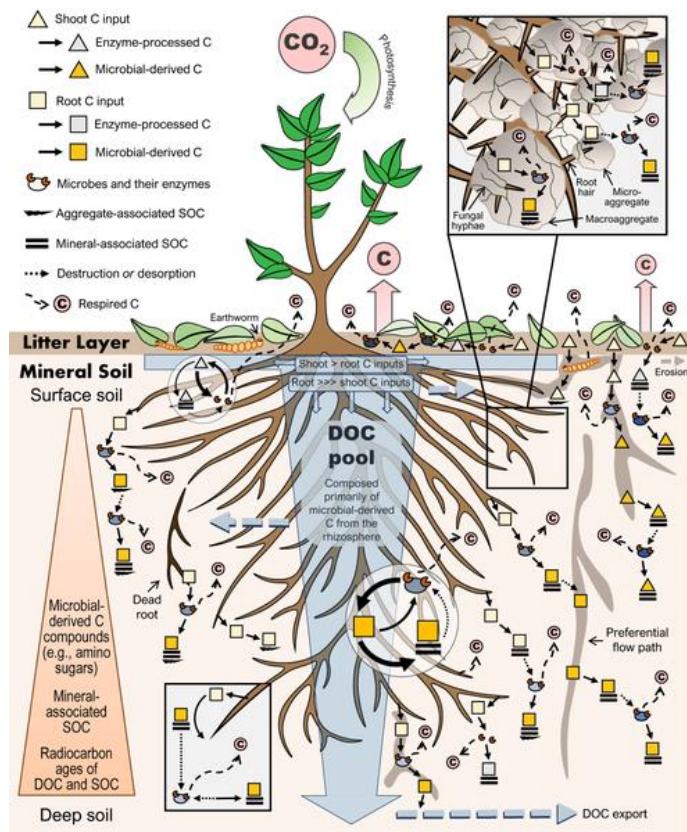
jangka waktu lama, sehingga membantu mitigasi perubahan iklim dengan mengurangi tingkat karbon dioksida di atmosfer (Minasny et al, 2017).

Kehadiran bahan organik di dalam tanah memainkan peranan penting dalam proses rumit siklus karbon organik tanah, yang merupakan komponen penting dari siklus karbon global yang lebih besar. Beberapa kerangka teoritis telah dikemukakan untuk menjelaskan dan memahami dinamika rumit siklus karbon organik tanah. Dalam model ini, bahan organik menempati posisi penting, berperan sebagai komponen kunci dalam keseluruhan fungsi dan proses yang terkait dengan siklus karbon tanah.

Siklus karbon organik tanah dapat dijelaskan dengan pemanfaatan model dekomposisi bahan organik tanah. Model ini menjelaskan proses dimana mikroorganisme, yaitu bakteri dan jamur, memfasilitasi penguraian bahan organik di dalam tanah, sehingga menghasilkan pembentukan molekul karbon yang kurang kompleks, khususnya karbon dioksida (CO_2). Proses dekomposisi dipengaruhi oleh berbagai elemen, seperti suhu tanah, kelembapan, tingkat pH, dan kualitas bahan organik yang dimasukkan ke dalam tanah.

Adapun model yang diusulkan oleh Gross & Harrison, (2019) memperlihatkan siklus karbon organik tanah (SOC) yang diawali dengan masuknya karbon akar (C) sebagai sumber utama SOC dan C organik terlarut (DOC) di sebagian besar ekosistem. C yang berasal dari akar diperlihatkan menjalani beberapa tahap pemrosesan mikroba, perlindungan, dan pelepasan ke dalam kumpulan DOC saat diangkut secara vertikal ke bawah profil tanah. Tidak seperti masukan tunas C—yang sering termineralisasi dalam lapisan serasah atau mengalami oksidasi parsial melalui enzim ekstraseluler mikroba—sebagian besar masukan C akar akan menjalani asimilasi mikroba, biosintesis, dan pergantian sebelum penggabungan SOC. Pengolahan mikroba meningkatkan kelarutan dan potensi perlindungan senyawa C organik, yang

dilindungi terutama melalui mekanisme abiotik yang melibatkan perlindungan fisik dalam agregat mikro dan makro tanah (inset kanan atas) dan penyerapan mineral senyawa DOC. Aktivitas mikroba, dan dekomposisi SOC, dapat dirangsang melalui berbagai mekanisme, dan perlindungan SOC dapat dilawan dengan mekanisme fisik atau biokimia, seperti eksudat akar tertentu yang mendorong pelepasan senyawa C organik dari asosiasi mineral pelindung (sisipan kiri bawah). Fauna tanah (misalnya detritivora) diwakili oleh cacing tanah, yang berkontribusi terhadap bioturbasi. C yang terhirup ditunjukkan untuk seluruh tanah (dalam jumlah relatif), serta untuk proses individual. Perbedaan komunitas mikroba antara lapisan serasah, rizosfer (yaitu, bagian tanah di sekitar akar), tanah curah, dan kedalaman ditunjukkan oleh warna. Dalam lingkaran yang menggambarkan perputaran DOC, garis yang lebih tebal menunjukkan laju yang lebih cepat. Ukuran ujung irisan menunjukkan peningkatan atau penurunan relatif. Kontrol pada proses yang ditampilkan meliputi suhu, kelembaban, keberadaan flora dan fauna, serta ekosistem dan sifat tanah lainnya (misalnya bahan induk, tekstur, mineralogi, dan pH) (Gambar 8.2).



Gambar 8.2 Model Siklus Bahan Organik Karbon
(Gross & Harrison, 2019)

Singkatnya, bahan organik memiliki berbagai fungsi dalam memfasilitasi fisiologi tanaman. Pentingnya kontribusinya terhadap ketersediaan unsur hara, struktur tanah, retensi air, dan aktivitas mikroba sangat penting dalam memfasilitasi pertumbuhan tanaman yang sehat dan produktif. Integrasi bahan organik ke dalam metode pertanian, seperti pengomposan, penanaman penutup tanah, dan pertanian organik, berkontribusi terhadap peningkatan fisiologi tanaman, sehingga mendorong sistem pertanian yang berketahanan dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abou-Hadid, A. F., & Osman, M. E. (2019). Effects of organic and mineral fertilization on soil properties, plant nutrients, and onion yield in a newly reclaimed sandy soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(10), 1229-1241.
- Ahmed, M., & Aslam, M. (2017). Organic matter application improves soil physical properties, nutrient availability and corn yield in degraded soils. *Soil and Environment*, 36(2), 147-155.
- Allison, S. D., & Martiny, J. B. (2008). Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(Supplement 1), 11512-11519.
- Angers, D. A., & Caron, J. (1998). Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry*, 42(1-2), 55-72.
- Bai, X., Li, W., Li, S., & Yang, T. (2019). Carbon mineralization and microbial community composition in soil amended with different types of organic materials. *Journal of Environmental Management*, 232, 592-600.
- Bai, Z. G., Dent, D. L., Olsson, L., & Schaepman, M. E. (2008). Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management*, 24(3), 223-234.
- Baldock, J. A., & Smith, P. (2020). Soils and climate change: Potential impacts on carbon stocks and greenhouse gas emissions, and future research for Australian agriculture. *Soil Research*, 58(8), 697-720.
- Bell, C. W., Fricks, B. E., Rocca, J. D., & Steinweg, J. M. (2013). Rhizosphere stoichiometry: are C: N: P ratios of plants, soils, and enzymes conserved at the plant species-level? *New Phytologist*, 201(2), 505-517.
- Bender, S. F., Wagg, C., van der Heijden, M. G., & Cook, R. (2016). Effects of plant diversity on the diversity and abundance of soil organisms. In *Advances in ecological research* (Vol. 55, pp. 1-49). Academic Press.

- Blanco-Canqui, H. (2017). Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 36(4), 208-224.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The Nature and Properties of Soils*. Pearson.
- Bulgarelli, D., Schlaeppi, K., Spaepen, S., Van Themaat, E. V. L., & Schulze-Lefert, P. (2020). Structure and functions of the bacterial microbiota of plants. *Annual Review of Plant Biology*, 68, 547-578.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., & Creamer, R. E. (2018). Soil quality—A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125.
- Canarini, A., & Dijkstra, F. A. (2015). Dry-rewetting cycles regulate wheat carbon rhizodeposition, stabilization and nitrogen cycling. *Soil Biology and Biochemistry*, 81, 195-203.
- Canellas, L. P., & Olivares, F. L. (2014). Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 1(1), 3.
- Conant, R. T., Ryan, M. G., Ågren, G. I., Birge, H. E., Davidson, E. A., Eliasson, P. E., ... & Zhang, W. (2011). Temperature and soil organic matter decomposition rates—synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biology*, 17(11), 3392-3404.
- Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440(7081), 165-173.
- Denef, K., Plante, A., & Six, J. (2010). Characterization of soil organic matter. In W. Kutsch, M. Bahn, & A. Heinemeyer (Eds.), *Soil Carbon Dynamics: An Integrated Methodology* (pp. 91-126). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511711794.007.
- Dhar, S., Kumar, A., Kumar, A., Kumar, P., & Pandey, D. (2021). Evaluation of nutrient supply and productivity potential of organic carbon-rich compost on maize yield and soil health. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(13), 1852-1867.

- Dlamini, P., & Titshall, L. W. (2018). The importance of dung beetles (Scarabaeinae) in maintaining ecosystem services in a changing world. *Ecological Entomology*, 43(3), 259-272.
- Dziedzic, J., Bieganski, A., & Rózański, S. (2019). Impact of organic amendments on the physical properties of arable soil. *Sustainability*, 11(21), 5993.
- Freschet, G. T., Cornwell, W. K., Wardle, D. A., Elumeeva, T. G., Liu, W., Jackson, B. G., ... & Enquist, B. J. (2013). Linking litter decomposition of above-and below-ground organs to plant-soil feedbacks worldwide. *Journal of Ecology*, 101(4), 943-952.
- Gao, Q., Yang, Z., Cao, X., & Luo, P. (2020). Decomposition of fine root litters with different lignin content in two forests along an elevation gradient in subtropical China. *Soil Biology and Biochemistry*, 144, 107766.
- Geisen, S., & Bonkowski, M. (2018). Methodological advances to study the diversity of soil protists and their functioning in soil food webs. *Soil Biology and Biochemistry*, 127, 649-660.
- Gomiero, T., Pimentel, D., & Paoletti, M. G. (2011). Environmental impact of different agricultural management practices: Conventional vs. organic agriculture. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30(1-2), 95-124.
- Graber, E. R., Singh, B., Hanley, K., & Lehmann, J. (2017). Determination of cation exchange capacity in biochar. *Biochar: A guide to analytical methods*, 74-84.
- Gross, C. D., & Harrison, R. B. (2019). The case for digging deeper: soil organic carbon storage, dynamics, and controls in our changing world. *Soil Systems*, 3(2), 28.
- Gruver, J. B., & Clapp, C. E. (2018). Soil organic matter storage and plant nutrient supply in response to reversion of cropland to grassland. *Journal of Environmental Quality*, 47(5), 1036-1043.
- Hao, Z., Wu, X., & Liang, W. (2021). Priming effects of exogenous organic matter addition on soil carbon and nitrogen dynamics: A review. *Soil and Tillage Research*, 208, 104940.

- Hartmann, M., Frey, B., Mayer, J., Mäder, P., & Widmer, F. (2015). Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *The ISME Journal*, 9(5), 1177-1194.
- Hinsinger, P., Bengough, A. G., Vetterlein, D., & Young, I. M. (2009). Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant and Soil*, 321(1-2), 117-152.
- Huguenin-Elie, O., & Revault, M. (2014). Humic substances: Microbial interactions and transformation processes. In *The Future of Soil Carbon* (pp. 101-122). Elsevier.
- Jiao, N., Xie, S., Wu, W., & Zhou, J. (2019). Effects of litter addition on carbon and nitrogen mineralization and soil microbial community structure during subtropical forest degradation. *Journal of Environmental Management*, 246, 319-328.
- Keshavarzpour, F., Sharifi, R. S., & Jalali, M. (2019). Integrated effect of water saving superabsorbent polymer and organic mulch on water use efficiency of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) under deficit irrigation. *Industrial Crops and Products*, 141, 111785.
- Kladivko, E. J., & Nelson, W. W. (2017). Role of cover crops in improving soil and water quality in sustainable agroecosystems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 72(2), 239-254.
- Komendova, R., Žídek, J., Berka, M., Jemelkova, M., Řezáčová, V., Conte, P., & Kučerík, J. (2019). Small-sized platinum nanoparticles in soil organic matter: Influence on water holding capacity, evaporation and structural rigidity. *Science of The Total Environment*, 694, 133822.
- Kuzyakov, Y., & Blagodatskaya, E. (2015). Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review. *Soil Biology and Biochemistry*, 83, 184-199.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1-2), 1-22.
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875-5895.

- Lal, R. (2020). Soil organic matter and its role in crop production and environmental sustainability: Implications for crop resilience. In *Advances in agronomy* (Vol. 163, pp. 1-42). Academic Press.
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60-68.
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2020). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 587(7834), 26-28.
- Lian, J., Quaik, S., & Russell, M. (2017). Organic carbon, dissolved organic carbon, and soil respiration in a long-term agroecosystem. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 248, 83-93.
- Liu, Y. R., Delgado-Baquerizo, M., Bi, Y., Zhu, J., He, J. Z., & Wang, H. (2019). Complementary contributions of bacterial and fungal decomposers to carbon and nitrogen cycling in furthering fine root decomposition along an elevation gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, 139, 107624.
- Lorenz, K., Lal, R., Kellner, E., Bai, Z., & Lin, Z. S. (2019). Soil organic carbon sequestration and fractions in subsoils under agricultural management—A global meta-analysis. *Geoderma*, 333, 119-128.
- Luo, Y., Zhou, X., & Gao, C. (2010). Carbon dynamics in the forest soils of tropical, temperate, and boreal ecosystems. *Journal of Plant Ecology*, 3(1), 3-9.
- Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., & Niggli, U. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 296(5573), 1694-1697.
- Malavolta, E., Pauletti, V., Dotto, A. C., Bellini, M. L., Guimarães, M. F., & Guimarães, S. M. (2020). Soil organic matter composition: Influence on the quality and yield of sugarcane. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44, e0190499.
- Marschner, P., & Crowley, D. (2017). Phosphorus in microbial habitats: The impact of microorganisms on phosphorus availability in soils. In *Phosphorus in Action* (pp. 205-226). Springer.

- McCauley, A., Jones, C., & Jacobsen, J. (2009). Soil pH and organic matter. Nutrient management module, 8(2), 1-12.
- Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A., ... & Winowicki, L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59-86.
- Nardi, S., & Morari, F. (2004). Short-term effects of liquid pig manure on soil properties and maize yield. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 167(4), 401-407.
- Nardi, S., Carletti, P., & Pizzeghello, D. (2017). Plant biostimulants: Physiological responses induced by protein hydrolyzed-based products and humic substances in plant metabolism. *Scientia Horticulturae*, 226, 116-125.
- Naveed, M., Khalid, M., Shahid, M., & Hashmi, M. Z. (2018). Soil organic matter-microbial biomass relationships and nutrient availability in cropping systems of different tillage practices. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(5), 4361-4372.
- Omonode, R. A., & Jokisch, B. D. (2021). Sustainable agriculture practices influence soil organic carbon and crop productivity: A review. *Journal of Soil and Water Conservation*, 76(1), 1-13.
- Ostonen, I., Püttsepp, Ü., Biel, C., Alberton, O., Bakker, M. R., Löhmus, K., ... & Polle, A. (2007). Specific root length as an indicator of environmental change. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 141(3), 426-442.
- Pan, F., Li, Y., Chapman, S. J., Khan, S., Yao, H., Zhang, J., ... & Bolan, N. S. (2019). Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal(loid)-contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 373, 258-270.
- Philippot, L., Raaijmakers, J. M., Lemanceau, P., & van der Putten, W. H. (2013). Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nature Reviews Microbiology*, 11(11), 789-799.
- Piotrowska-Długosz, A., & Wilk, R. (2017). The influence of organic and inorganic fertilization on the physical properties of soil. *Journal of Elementology*, 22(1), 231-244.

- Ranjan, P., Patle, G. T., Prem, M., & Solanke, K. R. (2017). Organic Mulching-A Water Saving Technique to Increase the Production of Fruits and Vegetables. *Current Agriculture research journal*, 5(3).
- Rasmussen, C., & Thomsen, I. K. (2010). The effect of clay dispersion and microaggregates on the stabilization of organic matter in different soil horizons. *European Journal of Soil Science*, 61(5), 558-570.
- Reed, S. C., Cleveland, C. C., & Townsend, A. R. (2011). Functional ecology of free-living nitrogen fixation: a contemporary perspective. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42, 489-512.
- Roldán, A., Salinas-García, J. R., & Alguacil, M. M. (2005). Deep soil horizons: Contribution of earthworms and roots to carbon mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(11), 2117-2124.
- Saha, P., & Chakraborty, B. (2014). Disease suppression and crop improvement in the groundnut-rice-sorghum cropping system with management of plant-parasitic nematodes and soilborne pathogens with organic mulch. *Biological Control*, 72, 57-66.
- Schimel, J., & Schaeffer, S. M. (2012). Microbial control over carbon cycling in soil. *Frontiers in Microbiology*, 3, 348.
- Schlesinger, W. H., & Bernhardt, E. S. (2013). *Biogeochemistry: An analysis of global change*. Academic Press.
- Schmidt, M. W., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., ... & Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478(7367), 49-56.
- Seufert, V., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2012). Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*, 485(7397), 229-232.
- Sharma, A. K., Singh, M., Soni, P., & Bhatt, R. (2020). Effect of vermicompost and PSB on growth, yield, and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Arka Abha. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(4), 2200-2203.

- Shukla, M. K., Lal, R., & Ebinger, M. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research*, 87(2), 194-204.
- Singh, J. S., & Singh, D. P. (2017). Microbial degradation of organic matter in soils: Implications for stability and biodiversity. *Current Science*, 113(3), 439-448.
- Singh, Y., & Timsina, J. (2020). Organic amendments for sustainable agriculture: A review. *Sustainable Agriculture Reviews*, 41-84.
- Six, J., Callewaert, P., Lenders, S., De Gryze, S., Morris, S. J., Gregorich, E. G., & Paul, E. A. (2002). Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1981-1987.
- Six, J., Elliott, E. T., & Paustian, K. (1998). Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 62(6), 1721-1730.
- Six, J., Elliott, E. T., Paustian, K., & Doran, J. W. (1998). Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 62(5), 1367-1377.
- Smith, D. R., Owens, P. R., Leytem, A. B., & Warnemuende, E. A. (2015). Nutrient losses from manure and fertilizer applications as impacted by time to first runoff event. *Journal of Environmental Quality*, 44(1), 92-100.
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2010). *Mycorrhizal symbiosis*. Academic Press.
- Smith, S. E., & Smith, F. A. (2012). Fresh perspectives on the roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant nutrition and growth. *Mycologia*, 104(1), 1-13.
- Song, Z., Zhang, J., Xue, G., Li, Y., Xie, Y., Yao, M., ... & Pan, F. (2018). Effects of composted manure and chemical fertilizer on soil microbial community structure and diversity in the open-air vegetable farming environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(1), 409-418.

- Srinivasarao, C., Venkateswarlu, B., & Lal, R. (2018). Soil pH and Organic Carbon Fractions in Agroecosystems: Implications on Soil Health. *Advances in Agronomy*, 149, 109-154.
- Stevenson, F. J. (2019). Biologically active substances in soils. In *The Nature and Properties of Soils* (pp. 621-653). Pearson.
- Stutz, E. W., & Défago, G. (2013). Kernara-associated antagonists of soilborne plant pathogens. In *Principles of Plant-Microbe Interactions* (Vol. 9, pp. 369-376). Springer.
- Tisdall, J. M., & Oades, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33(2), 141-163.
- van Bruggen, A. H., Gamliel, A., & Finckh, M. R. (2016). Plant disease management in organic farming systems. *Pest Management Science*, 72(1), 30-44.
- Voet, D., Voet, J. G., & Pratt, C. W. (2016). *Fundamentals of Biochemistry: Life at the Molecular Level*. Wiley.
- Vollhardt, K. P. C., & Schore, N. E. (2017). *Organic Chemistry: Structure and Function*. W. H. Freeman.
- Vos, I. A., Moritz, L., Pieterse, C. M., & Van Wees, S. C. (2015). Impact of hormonal crosstalk on plant resistance and fitness under multi-attacker conditions. *Frontiers in Plant Science*, 6, 639.
- Wang, X., Song, G., & Liu, Y. (2017). Effects of soil organic matter fractions on soil erosion in subtropical China. *Soil and Tillage Research*, 165, 98-104.
- Wani, S. H., Kumar, V., Shriram, V., & Sah, S. K. (2016). Phytohormones and their metabolic engineering for abiotic stress tolerance in crop plants. *The Crop Journal*, 4(3), 162-176.
- Wei, T., & Yang, Y. (2020). Effects of organic materials on soil aggregation and aggregate-associated organic carbon in apple orchards. *Soil and Tillage Research*, 198, 104514.
- Williams, A., Hunter, M. C., Kammerer, M., Kane, D. A., Jordan, N. R., Mortensen, D. A., ... & Davis, A. S. (2016). Soil water holding capacity mitigates downside risk and volatility in US rainfed maize: time to invest in soil organic matter?. *PloS one*, 11(8), e0160974.

- Xiao, L., Wei, X., Chen, H., Li, Y., & Li, J. (2021). Effects of different fertilization modes on soil enzyme activity, microbial community composition and diversity in apple orchards. *Soil and Tillage Research*, 205, 104782.
- Zeng, J., Ma, S., Liu, J., Qin, S., Liu, X., Li, T., ... & Zhang, J. (2023). Organic Materials and AMF Addition Promote Growth of *Taxodium 'zhongshanshan'* by Improving Soil Structure. *Forests*, 14(4), 731.
- Zhang, B., Li, S., Zhang, Z., Shen, J., & Yu, X. (2018). Effects of different organic fertilizers on the abundance and structure of soil microbial communities. *Sustainability*, 10(9), 3165.
- Zhang, B., Li, Z., & Wang, B. (2019). Effects of organic materials on soil microbial biomass carbon and nitrogen in a vegetable field. *Journal of Soils and Sediments*, 19(3), 1354-1364.
- Zhang, C., Wang, L., Liu, Z., Zhang, X., & Yu, Z. (2019). Effects of organic and inorganic fertilization on soil microbial community and the implications for soil health: A review. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(2), 450-461.
- Zhang, X., Xu, M., Wang, G., & Zhang, L. (2016). Soil organic carbon and total nitrogen as affected by land use in the loess hilly region of China. *CATENA*, 137, 274-282.
- Zhang, Y., Wang, J., Shi, Y., Yang, X., & Duan, C. (2020). Organic materials as nutrient sources for sustainable agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(11), 3321-3333.
- Zhao, F., Neher, D. A., Weicht, T. R., & Salamanca, E. F. (2018). The Role of Soil Nematodes in Nitrogen Mineralization under Different Soil Management and Moisture Conditions. *Applied and Environmental Microbiology*, 84(4), e02133-17.

BAB 9

GERAK PADA TUMBUHAN

Oleh Aulia Rahmawati

9.1 Pendahuluan

Tumbuhan melakukan gerak yang tidak bisa disamakan dengan manusia dan hewan karena gerak yang dilakukan oleh tumbuhan tidak bisa berpindah tempat. Gerakan pada tumbuhan ini dapat dikarenakan adanya rangsangan sehingga pertumbuhan tanaman dapat menuju atau menjauhi arah rangsang. Bahkan tanpa adanya rangsangan, tanaman juga melakukan gerak, misalnya perakaran yang terus bergerak menembus tanah tanpa adanya titik tertentu yang menjadi arah gerakan. Kepekaan tumbuhan terhadap adanya rangsangan disebut iritabilitas (Eriawati, 2016). Rangsangan ini diterima oleh tumbuhan melalui plasmodesmata. Oleh karena itu, plasmodesmata sebagai reseptor atau penerima rangsang. Rangsangan yang diterima kemudian ditransduksi menjadi bentuk lain yang kemudian menimbulkan adanya suatu respon tumbuhan. Respon inilah yang menyebabkan terjadinya gerakan pada tumbuhan. Gerak pada tumbuhan dibedakan berdasarkan sumber rangsangannya, ada dua macam, yaitu gerak esionom dan juga gerak endonom. Sumber rangsangan yang dimaksud yaitu rangsangan bersumber dari dalam (endonom) maupun dari luar (esionom) tubuh tumbuhan. Nama lain gerak endonom yaitu gerak spontan atau gerak otonom. Sedangkan nama lain gerak esionom yaitu gerak etionom.

9.2 Gerak Esionom/Etionom

Gerak esionom yaitu gerak yang terjadi pada tumbuhan diakibatkan oleh adanya rangsangan yang berasal dari luar tubuh tumbuhan. Macam-macam gerak esionom menurut asal rangsangannya, antara lain gerak tropisme, gerak nasti, dan gerak taksis (Ni et al., 2014).

9.2.1 Gerak Tropisme

Gerak tropisme terjadi ketika gerakan hanya terjadi pada bagian tumbuhan saja sesuai dengan arah rangsangan. Bagian tumbuhan yang dimaksud yaitu organ tertentu pada tumbuhan, seperti sulur, cabang, daun, maupun organ lainnya. Gerak tropisme dapat dibedakan macamnya berdasarkan arah dari sumber rangsangan dan juga dari macam sumber rangsangannya.

Macam-macam gerak tropisme pada tumbuhan berdasarkan arah dari sumber rangsangan, yaitu tropisme positif dan tropisme negatif.

1. Gerak tropisme positif

Gerak tropisme pada tumbuhan dikatakan positif apabila arahnya menuju ke sumber rangsangan

2. Gerak tropisme negatif

Gerak tropisme pada tumbuhan dikatakan negatif apabila arahnya menjauhi dari sumber rangsangan

Macam-macam gerak tropisme pada tumbuhan berdasarkan macam sumber rangsangannya, yaitu geotropisme, fototropisme, kemotropisme, tigmotropisme, dan hidrotropisme.

1. Geotropisme

Geotropisme merupakan gerak pada tumbuhan yang terjadi karena adanya rangsangan gravitasi bumi. Geotropisme dibedakan berdasarkan arah gerak dari gravitasi bumi menjadi 2 macam, yaitu geotropisme positif dan geotropisme negatif. Geotropisme positif merupakan gerak geotropisme yang menuju sumber rangsangan, atau dapat dikatakan perakaran yang bergerak ke gravitasi bumi (semakin menuju ke tanah). Sedangkan geotropisme negatif merupakan gerak geotropisme yang menjauhi sumber rangsangan, atau dapat dikatakan pergerakannya semakin ke atas menjauhi gravitasi bumi. Contoh dari geotropisme negatif misalnya gerakan pertumbuhan batang tumbuhan yang menjauhi gravitasi bumi (air dan tanah).

2. Fototropisme

Fototropisme merupakan gerak pada tumbuhan yang terjadi karena adanya rangsangan berupa cahaya (Purwendri, 2013). Contoh gerak fototropisme yaitu ujung batang tumbuhan yang bergerak menuju arah rangsangan ketika mendapatkan cahaya matahari. Pergerakan ini dapat digunakan untuk memodifikasi bentuk tanaman dengan perlakuan pemberian arah cahaya dan pengamatannya pun mudah di bawah kondisi alam, seperti pada percobaan pengamatan pertumbuhan tanaman di tempat terang dan di tempat gelap, maka pertumbuhan tanaman di tempat gelap akan berbelok mengikuti arah datangnya sumber cahaya. Respon tanaman dengan adanya rangsangan cahaya terjadi pada organ batang, daun, hipokotil, maupun petiolus. Organ-organ tersebut merespon dengan bergerak ke arah sumber cahaya atau perubahan posisi organ menghadap ke arah sumber cahaya.

Proses fotosintesis memerlukan cahaya agar tanaman dapat menghasilkan energi kimia. Fototropisme paling kuat pada panjang gelombang cahaya biru atau violet sehingga pergerakan tanaman menjadi lebih efektif. Tanaman memodifikasi bentuk untuk mendapatkan cahaya dalam jumlah yang maksimal pada proses fotosintesis agar kondisi tanaman optimum (Asbur, 2017). Fototropisme melibatkan rangsangan cahaya yang dapat mengubah arah pertumbuhan dengan merubah sifat membran plasma melalui transduksi sinyal. Sinyal rangsangan ditangkap oleh fotoreseptor berupa kriptokrom, fototropin, dan fitokrom. Kriptokrom dan fototropin merupakan fotoreseptor panjang gelombang cahaya biru, sedangkan fitokrom merupakan reseptor dari cahaya merah.

3. Kemotropisme

Kemotropisme merupakan gerak pada tumbuhan yang terjadi karena adanya zat kimia yang merangsang. Kemotropisme ada 2 macam, yaitu kemotropisme positif dan kemotropisme negatif. Kemotropisme positif yaitu apabila pergerakan tanaman mendekati sumber zat kimia. Contohnya yaitu ketika tanaman diberi pupuk maka akar akan bergerak menuju pupuk untuk menyerap unsur hara yang terkandung. Kemotropisme negatif yaitu apabila pergerakan tanaman menjauhi sumber zat kimia. Contohnya yaitu pergerakan akar tanaman yang menjauhi posisi racun bagi tanaman (Hardiyanto et al., 2014).

4. Tigmotropisme

Tigmotropisme merupakan gerak pada tumbuhan yang terjadi karena adanya sentuhan atau singgungan yang merangsang tumbuhan untuk bergerak. Contohnya gerak sulur tanaman mentimun, semangka, atau anggur yang melilit pada ajir yang berada di samping tanaman. Lilitan ini terjadi karena sulur menyentuh ajir sehingga kontak tersebut menyebabkan pergerakan sulur tanaman melilit ajir.

5. Hidrotropisme

Hidrotropisme merupakan gerak pada tumbuhan yang terjadi karena adanya air yang merangsang tumbuhan untuk bergerak. Hidrotropisme ada 2 macam, yaitu hidrotropisme positif dan hidrotropisme negatif. Hidrotropisme positif yaitu apabila pergerakan tanaman mendekati sumber yang banyak airnya. Contohnya yaitu pergerakan akar menuju sumber air untuk diserap dalam memenuhi kebutuhannya. Hidrotropisme negatif yaitu apabila pergerakan tanaman menjauhi sumber air di tanah. Contohnya yaitu pertumbuhan pucuk batang tanaman yang bergerak ke atas air.

9.2.2 Gerak Nasti

Gerak nasti merupakan gerak pada tanaman yang pergerakannya tidak dipengaruhi dari arah datangnya rangsangan (Novita, 2022). Gerak nasti dipengaruhi oleh rangsangan yang pergerakannya ditentukan tanaman itu sendiri. Macam-macam gerak nasti berdasar sumber rangsangannya, antara lain:

1. Seismonasti

Istilah lain seismonasti yaitu tigmonasti. Seismonasti yaitu gerak pada tanaman yang dipengaruhi oleh adanya rangsangan berupa sentuhan. Contohnya yaitu daun putri malu (*Mimosa pudica*) yang menutup setelah 1-2 detik daun tersebut disentuh, kemudian akan membuka lagi setelah kurang lebih 10 menit.

2. Niktinasti

Niktinasti yaitu gerak pada tanaman yang dipengaruhi oleh kondisi gelap atau malam hari. Kondisi gelap ini dapat dikatakan bahwa tanaman mengalami gerak "tidur". Penyebab pergerakan tanaman selain kondisi malam pada niktinasti, juga

didukung oleh adanya perubahan tekanan turgor yang terjadi di persendian daun tanaman. Contohnya pada daun tanaman legum yang menutup pada malam dan membuka pada pagi hari.

3. Fotonasti

Fotonasti yaitu gerak pada tanaman yang dipengaruhi oleh adanya rangsangan berupa cahaya matahari. Contohnya yaitu mekarnya bunga pukul empat di sore hari dan kuncup keesokan paginya. Selain itu ada mekarnya bunga pukul sembilan pada pukul sembilan.

4. Termonasti

Termonasti yaitu gerak pada tanaman yang dipengaruhi oleh rangsangan suhu. Contohnya yaitu menutupnya daun karena dipengaruhi suhu tinggi pada lingkungan. Termonasti berguna dalam mengurangi transpirasi pada permukaan daun (Hariyadi & Anindito, 2017). Contoh lain yaitu bunga tulip yang mekar ketika terjadi kenaikan temperatur kemudian saat temperatur menurun bunga tulip akan menguncup.

5. Haptonasti

Haptonasti yaitu gerak pada tanaman yang dipengaruhi oleh adanya rangsangan sentuhan serangga. Tanaman yang mengalami gerak haptonasti yaitu tanaman insektivora. Tanaman insektivora yaitu tanaman yang memakan serangga sebagai sumber nutrisi yang dicerna secara enzimatik oleh tanaman tersebut (Polii et al., 2016). Contohnya yaitu ketika tanaman kantong semar akan menutup apabila ada serangga yang menempel di permukaan daun kantong semar, sehingga serangga akan terperangkap di daun yang menutup tersebut.

6. Nasti kompleks

Nasti kompleks yaitu gerak pada tanaman yang terjadi akibat beberapa faktor sekaligus, misalnya faktor cahaya matahari, zat kimia, suhu, pH. Contohnya yaitu gerakan stomata membuka dan menutup akibat berbagai faktor rangsangan (Salami et al., 2016).

9.2.3 Gerak Taksis

Gerak taksis terjadi ketika gerakan terjadi pada seluruh bagian tumbuhan sesuai dengan arah rangsangan. Gerak taksis ada 2 macam, yaitu gerak taksis positif apabila pergerakan mendekati arah rangsangan dan gerak taksis negatif apabila pergerakan menjauhi arah rangsangan. Macam-macam gerak taksis dibedakan berdasarkan sumber rangsangannya, antara lain:

1. Fototaksis

Fototaksis yaitu gerak pada tanaman yang mendekati atau menjauhi arah rangsangan berupa cahaya. Klorofil pada tanaman yang ternaungi memiliki jumlah yang lebih banyak sehingga tetap maksimal dalam menyerap cahaya yang kurang dan klorofil ini tersusun dalam keadaan fototaksis (Purwoko et al., 2017). Contohnya yaitu gerak pada tanaman kacang hijau yang mengikuti arah cahaya.

2. Kemotaksis

Kemotaksis yaitu gerak pada tanaman yang mendekati atau menjauhi zat kimia (Achmad & Hilal, 2020). Contohnya yaitu pergerakan spermatozoa mendekati sel telur saat proses pembuahan tumbuhan lumut. Ovum atau sel telur mengeluarkan zat kimia berupa protein dan gula yang memberi rangsangan pada spermatozoa lumut untuk dapat bergerak mendekati sumber rangsangan zat kimia tersebut.

9.3 Gerak Endonom

Gerak endonom yaitu gerak yang terjadi pada tumbuhan diakibatkan oleh adanya rangsangan yang berasal dari dalam tubuh tumbuhan. Jadi, rangsangan dari luar tidak sebagai penyebab gerak ini. Gerak endonom disebut juga dengan gerak otonom maupun gerak spontan. Gerak endonom ada 2 macam, yaitu gerak higroskopis dan gerak nutasi.

9.2.1 Gerak Higroskopis

Gerak higroskopis yaitu gerak pada bagian tanaman yang disebabkan oleh adanya perubahan kadar air di dalam sel sehingga tidak meratanya kerutan pada tanaman (Widestra et al., 2018). Kondisi pengerutan ini karena bagian organ tanaman kurang air lalu menjadi kering secara terus-menerus. Kemudian terjadi keretakan dan biji terpelantak keluar. Biji yang terpelantak dapat menjadi alat perkembangbiakan yang lebih luas. Contoh gerak higroskopis yaitu kulit buah polong-polongan yang pecah.

9.2.2 Gerak Nutasi

Gerak nutasi yaitu gerak yang terjadi berupa gerakan spontan dan tidak ada faktor penyebab rangsangan dari luar. Contohnya yaitu gerak pertumbuhan ujung batang. Contoh lain yaitu gerakan yang terjadi pada *Hydrilla verticillata* (tanaman air) dimana aliran sitoplasma bergerak (Hadi, 2015).

DAFTAR PUSTAKA

- Achmad, S. A., & Hilal, F. (2020). Uji Akurasi Arah Kiblat Memanfaatkan Korelasi Antara Azimuth Matahari dengan Azimuth Gerak Vigna Radiata. *Jurnal Hisabuna*, 1(2), 78–112.
- Asbur, Y. (2017). Peran Fotoreseptor Pada Tropisme Tanaman Sebagai Respon Terhadap Cahaya. *Agriland: Jurnal Ilmu Pertanian*, 6(2), 91–100.
- Eriawati. (2016). Perbandingan Hasil Belajar Antara Siswa Yang Diajarkan Dengan Media Audio Visual Dan Media Kartu Gambar Pada Materi Gerak Pada Tumbuhan Di Smp 18 Banda Aceh. *Jurnal Pendidikan Pionir*, 05(2), 1–12.
- Hadi, M. S. (2015). Upaya Meningkatkan Aktivitas Dan Hasil Belajar Biologi Dengan Metode Group Investigation Materi Gerak Pada Tumbuhan Siswa Kelas VIII M.Ts Miftahul Ulum. *Skripsi*, 100.
- Hardiyanto, S., Thaib, D., Saidah, C., & Sucitra, A. (2014). *Model Pembelajaran Inkuiri Berbasis Fenomena Surat Pernyataan Reviewer-1*. 1–111.
- Hariyadi, & Anindito, A. S. (2017). Pengaruh Jenis Bahan Tanam dan Konsentrasi Rootone-F terhadap Keberhasilan Pertumbuhan *Mucuna bracteata* D.C. *Buletin Agrohorti*, 5(2), 226–233.
- Ni, D., Adriani, P., Si, M., Made, I., Defiani, R., & Hons, M. S. (2014). *Fisiologi tumbuhan*. *Bio 4301*, 3.
- Novita, A. (2022). *Penuntun Praktikum Fisiologi Tumbuhan*. Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
- Polii, I., Saroyo, Wahyudi, L., & Kolondam, B. J. (2016). Estimasi Densitas Tangkasi (*Tarsius tarsier*) di Luar Kawasan Hutan Hujan Tropis Dataran Rendah Sulawesi Utara Berdasarkan Sampling Duet Call. *Jurnal MIPA UNSRAT*, 5(1), 1–5. <https://doi.org/10.35799/jm.5.1.2016.11190>

- Purwendri, R. (2013). Penggunaan Media Pembelajaran Dengan Program Berbasis Lectora Untuk Meningkatkan Minat dan Hasil Belajar IPA Konsep Gerak Tropisme Pada Siswa SMP Kelas VIII. *Jurnal Ilmiah Guru*, 17(02), 12–18. <https://journal.uny.ac.id/index.php/cope/article/download/3001/2495>
- Purwoko, B. ., Suherman, C., & Maxiselly, Y. (2017). Pengaruh Zat Pengatur Tumbuh Triakontanol dan Jarak Tanam terhadap Pertumbuhan Tanaman Tembakau (*Nicotiana tabacum* L.) Kultivar Nani. *Jurnal Agroekotek*, 9(1), 39–47.
- Salami, D., Hardigaluh, B., & Yokhebed. (2016). Pengaruh Metode Question Student Have Berbantuan Media Animasi Terhadap Hasil Belajar Kelas VIII SMP. *Jurnal Pendidikan Dan Pembelajaran Khatulistiwa*, 5(12), 1–13.
- Widestra, R. A., Djamas, D., & Asrizal, A. (2018). Pengaruh Model Pembelajaran Kontekstual Adaptif Pada Tema Gerak Dalam Kehidupan Terhadap Kompetensi Ipa Siswa Kelas Viii Smpn 13 Padang. *Pillar of Physics Education*, 11(1), 49–56. <http://ejournal.unp.ac.id/students/index.php/pfis/article/view/2679>

BAB 10

STRESS FISILOGIS

Oleh Hida Arliani N.A

10.1 Pendahuluan

Energi merupakan hal yang mutlak diperlukan dalam hal pengelolaan struktural organisasi suatu kehidupan organisme. Pemeliharaan dalam tatanan yang kompleks ini akan membutuhkan energi yang konstan. Hasilnya adalah aliran energi konstan melalui semua organisme biologis yang peranannya terkait proses penting seperti biosintesis seluler dan metabolisme organisme. Proses pemeliharaan terkait dengan biosintesis dan metabolisme dalam organisme menghasilkan keadaan yang stabil dikenal dengan istilah homeostasis (Shabala, 2012). Homeostasis dapat mengalami perubahan akibat adanya perubahan pada lingkungan sekitar. Modulasi homeostasis lingkungan yang terjadi pada organisme didefinisikan sebagai cekaman atau stress biologi. Cekaman pada tanaman menyiratkan beberapa efek buruk pada fisiologi tanaman sebagai hasil perubahan secara tiba-tiba dari kondisi lingkungan yang optimal. Pada awalnya kondisi homeostasis akan dipertahankan untuk kondisi suboptimal yang mengganggu kondisi keseimbangan tersebut. Dengan demikian, stres tanaman merupakan istilah relatif terkait dengan dampak dari cekaman yang melibatkan pengukuran fenomena fisiologis pada berbagai jenis spesies tanaman di bawah kondisi suboptimal dibandingkan dengan pengukuran fenomena fisiologis tanaman dalam kondisi optimal.

10.2 Faktor Stress pada Tanaman

Tanaman merespon stress dengan beberapa cara berbeda tergantung pada jenis cekaman yang dialami oleh tanaman tersebut. Stress abiotik terkait dengan faktor fisik atau kimia meliputi kekeringan, banjir, salinitas, alkalinitas, suhu tinggi, suhu rendah, toksisitas zat kimia, dan stress oksidatif. Stress biotik terkait dengan keberadaan makhluk hidup yang dapat menimbulkan perubahan kondisi homeostasis, seperti hama dan penyakit selama tanaman tersebut hidup (Sopandie, 2013). Cekaman yang terjadi pada tanaman merupakan ancaman serius bagi pertanian dan lingkungan. Hal ini terkait dengan adanya penyimpangan dalam proses fisiologi, perkembangan, dan fungsi pada tanaman dapat menimbulkan kerusakan. Jika stress terjadi dalam waktu yang singkat dengan tingkat sedang, kerusakan yang ditimbulkan berefek temporer sehingga tanaman dapat pulih kembali ketika cekaman tersebut hilang. Apabila stress terjadi dalam tingkat yang cukup parah, akan berpengaruh terhadap proses pembungaan, pembentukan biji dan menginduksi senesens yang pada akhirnya menimbulkan kematian tanaman (Shabala, 2012). Hal tersebut terjadi karena stress dalam tingkat yang parah sifatnya irreversible atau tidak dapat kembali pada sistem tanaman meski perbaikan dapat diupayakan melalui perbaikan adaptasi terhadap cekaman.

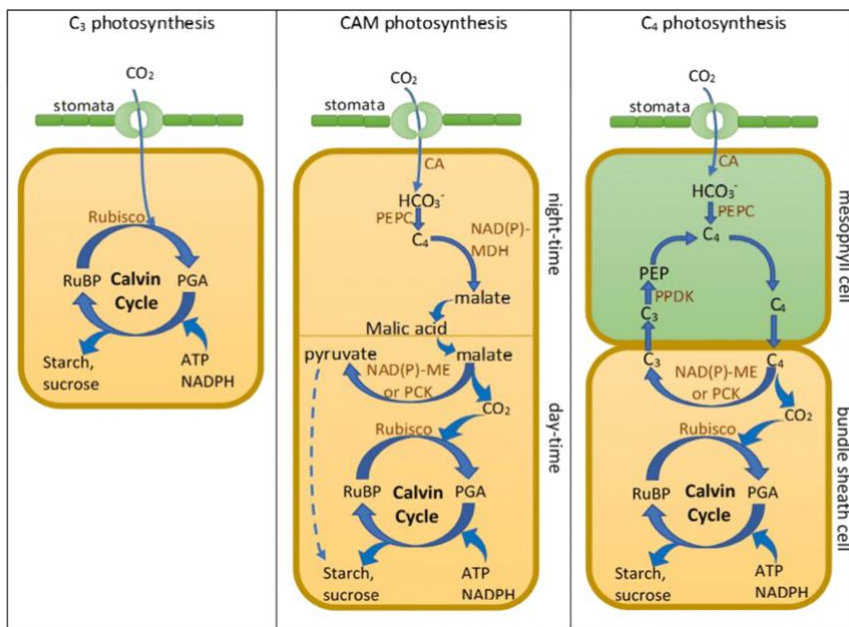
Pada banyak kasus, stress abiotik tidak terjadi secara independen dan biasanya akan melibatkan proses yang cukup kompleks terkait dengan interaksi berbagai faktor stress. Sebagai contoh, stress asam sering berasosiasi dengan toksisitas aluminium. Aluminium berlimpah pada beberapa jenis tanaman, dan pada konsisi asam ($\text{pH} < 5,5$) spesies fitotoksik, Al^{3+} mudah terlarut hingga dapat menghambat pertumbuhan tanaman. Cekaman lain seperti salinitas dan suhu rendah (freezing) keduanya dapat menginduksi defisit air (Wiraatmaja, 2017).

10.3 Adaptasi Tanaman Terhadap Stress Fisiologis

Tanaman menghadapi berbagai stress fisiologis melalui pengurangan efek merusak dengan berbagai mekanisme tergantung pada sifat dari cekaman dan proses fisiologis yang terpengaruh oleh stress tersebut. Respon yang dihasilkan memungkinkan tanaman untuk mempertahankan stabilitas fisiologis tanaman tersebut, dan jika tanaman tersebut mampu bertahan di bawah kondisi stress maka tanaman tersebut memiliki tingkat resistensi terhadap cekaman.

10.3.1 Adaptasi Konstitutif

Banyak tanaman menunjukkan ciri-ciri yang diekspresikan secara konstitutif terkait resistensi dan toleransi terkait stress lingkungan yang merujuk pada proses adaptasi. Contoh adaptasi morfologis terhadap suhu, cahaya, kekurangan air terkait dengan struktur daun yang berlilin atau trikoma pada daun sehingga mempengaruhi penyerapan cahaya sehingga terjadi proses keseimbangan panas. Proses fotosintesis pada berbagai tanaman pun berbeda sebagai contoh adaptasi konstitutif pada tanaman terhadap lingkungan (Gambar 10.1). Fotosintesis tanaman C4 merupakan contoh kombinasi adaptasi terhadap cekaman melalui adaptasi anatomi dan metabolit. Melalui tipe fotosintesis ini terjadi reduksi fotorespirasi, menghasilkan suhu optimum yang lebih tinggi untuk fotosintesis dan efisiensi pengurangan air yang lebih tinggi dibandingkan dengan fotosintesis C3. Fotosintesis C4 memerlukan pemisahan spasial dari fungsi metabolisme yang berbeda antara mesofil dan seludang pembuluh. Metabolisme tanaman CAM atau metabolisme asam crassulacean memungkinkan adanya fiksasi karbondioksida nokturnal menjadi malat, dan fotoproteksi sebagai hasil dari konsentrasi karbondioksida intraseluler yang tinggi, dihasilkan oleh dekarboksilasi malat pada siang hari ketika stomata ditutup.



Gambar 10.1 Diagram Fotosintesis C₃,C₄,dan CAM (Dehigaspitiya *et al.*, 2019)

10.3.2 Adaptasi Fakultatif/ Terinduksi

Banyak spesies tanaman ketika terpapar pada cekaman subletal (contohnya *heat shock*, terpapar kekurangan air, atau *chilling period*) memperoleh toleransi dan/atau ketahanan terhadap cekaman berikutnya yang akan mematikan atau sangat merusak jika tidak ditangani sebelumnya. Hal tersebut biasa dikenal dengan aklimatisasi. Respon aklimatisasi pada umumnya dibedakan oleh induksi stress dari mekanisme toleransi atau resistensi atau adaptasi. Aklimatisasi morfologis terhadap cekaman anaerob yang ditunjukkan oleh spesies tanaman tertentu adalah produksi saluran gas intraseluler (aerenkim) yang meningkatkan aerasi akar. Pembentukan aerenkim mempercepat transfer oksigen dari jaringan udara ke

jaringan yang kekurangan oksigen di pangkal batang dan akar, namun pada beberapa spesies yang tahan banjir pembentukan aerenkim bersifat konstitutif, terbentuk tanpa adanya kekurangan oksigen. Contoh lain adaptasi metabolit fakultatif terhadap stress anaerob adalah induksi enzim glikolitik, enzim laktat, fermentasi etanol terkait produksi energi selama anoksia atau hipoksia.

10.4 Respon Fisiologi Terhadap Stress

Mekanisme tanaman sebagai bentuk respon terhadap stres fisiologis dipengaruhi oleh jenis cekaman dan varietas tanaman. Cara tanaman untuk beradaptasi terhadap cekaman fisiologis pada tanah masam akan berbeda dengan cekaman lainnya. Meskipun seringkali akan terdapat keterkaitan antara cekaman satu dengan cekaman lain. Berikut merupakan mekanisme adaptasi tanaman terhadap berbagai cekaman.

10.4.1 Respon Fisiologi terhadap Stress Kekeringan dan Genangan

Kurangnya suplai air di daerah perakaran dan adanya permintaan air di daun secara berlebihan dalam kondisi laju evapotranspirasi melebihi laju absorpsi air di akar mengakibatkan terjadinya cekaman kekeringan. Kekurangan air akan menghambat pertumbuhan tanaman melalui gangguan aktivitas fisiologis maupun morfologis (Taiz dan Zeiger, 1998). Apabila defisiensi air ini terus menerus terjadi maka akan menyebabkan perubahan yang sifatnya irreversible hingga mengakibatkan kematian tanaman. Respon tanaman pun bergantung pada tingkat stres dan fase pertumbuhan saat mengalami cekaman. Respon tersebut meliputi perubahan di tingkat seluler dan molekuler yang dicirikan pada penampakan tumbuhan seperti pertumbuhan tanaman, penurunan volume sel, luas daun, serta laju fotosintesis, peningkatan rasio tajuk akar, dan adanya perubahan metabolisme seperti karbon,

nitrogen, produksi aktivitas enzim dan hormon (Wiraatmaja, 2017).

Respon tanaman terhadap kondisi kekeringan yakni dengan melakukan pengontrolan laju transpirasi sehingga tanaman mampu mengefisiensikan penggunaan air. Ketika kekeringan terjadi maka stomata akan menutup sebagai akibat sel-sel penjaga kehilangan turgornya. Defisit air pun akan menstimulasi peningkatan sintesis dan pembebasan hormon asam absisat dari mesofil daun untuk membantu mempertahankan stomata tetap tertutup. Mekanisme lain adalah dengan melakukan penggulungan daun seperti pada beberapa jenis tanaman sehingga menurunkan transpirasi dengan cara memaparkan sedikit permukaan daun. Akar pun beradaptasi terhadap tanah yang mengering dengan cara melakukan pertumbuhan hanya pada akar dalam yang dikelilingi oleh tanah yang masih lembab. Melalui cara inilah sistem akar memaksimalkan pemaparan terhadap air tanah.

Selain cekaman kekeringan, tanaman pun menghadapi kondisi cekaman genangan. Genangan ini mengakibatkan terjadinya penyerapan air sehingga akan menyebabkan defisit air internal pada tanaman. Respon awal yang dilakukan tanaman terhadap kondisi genangan yakni menurunkan konduktansi stomata sehingga kemampuan pertukaran gas dan fotosintesis pun menurun. Pada tanaman yang tidak toleran terhadap genangan menyebabkan penurunan laju fotosintesis yang sangat cepat. Akibatnya pertumbuhan dan perkembangan tanaman pun akan terpengaruhi hingga menyebabkan disfungsi fisiologi seperti penghambatan transportasi hormon dan keseimbangan hormon terganggu. Langkah yang dilakukan untuk mempertahankan aktivitas metabolisme nya yakni dengan menggunakan cadangan karbohidrat, peningkatan .

10.4.2 Respon Fisiologi terhadap Stress Salinitas

Stress alkalinitas atau stress garam merupakan stress bahan kimia meliputi garam, ion-ion, serta gas. Konsentrasi garam-garam terlarut pada tanah atau media tanam yang berlebih memicu salinitas tinggi yang dapat berakibat pada kematian tanaman. Garam-garam seperti NaCl, NaSO₄, CaCl₂, MgSO₄, MgCl₂ yang terlarut dalam air dapat menimbulkan stress pada tanaman (Sipayung, 2003). Sebagian besar spesies tanaman tidak memberikan efek spesifik terhadap jenis garam, akan tetapi lebih bergantung pada konsentrasi total garam. Toleransi tanaman terhadap salinitas pun cukup beragam dengan spektrum yang luas mulai dari tanaman yang peka terhadap konsentrasi garam hingga tanaman yang memiliki cukup toleransi.

Penurunan kualitas dan kuantitas drainase menjadi faktor utama lahan menjadi salin yang dicirikan dengan daya hantar listrik atau *electric conductivity* nya lebih dari 4 ds/m setara dengan 40 mM NaCl dalam larutan tanah. Tanah dengan salinitas tinggi termasuk dalam cekaman abiotik yang menyebabkan gangguan pertumbuhan dan perkembangan pada tanaman Gambar 10.2. Hal tersebut disebabkan karena adanya penurunan potensial osmotik larutan tanah sehingga tanaman mengalami kekurangan air dan terjadinya peningkatan konsentrasi ion yang bersifat toksik bagi tanaman atau memacu ketidakseimbangan dalam metabolisme nutrisi serta perubahan struktur fisik dan kimia tanah. Saat tanaman mengalami kondisi salin maka tanaman akan mempertahankan gradien potensial air antara sel tanaman dan larutan tanah melalui penyesuaian osmotik. Tanaman pun melakukan penyesuaian fisiologi dalam tanaman melibatkan proses fotosintesis, produksi hormon, pembukaan stomata, respirasi, dan sintesis osmotik.



Gambar 10.2 Visual Tanaman Barley pada Berbagai Konsentrasi NaCl (Sopandie, 2013)

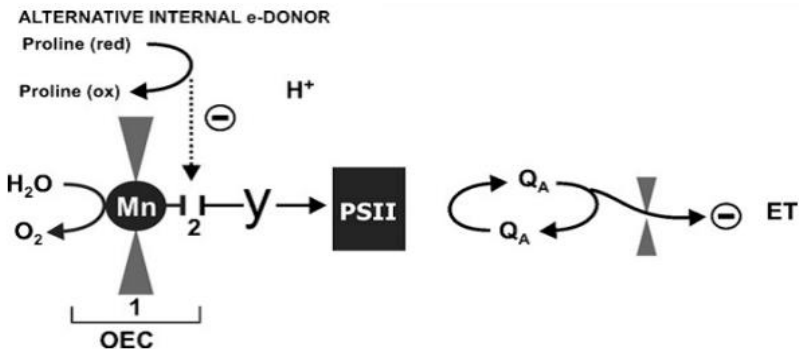
Mekanisme toleransi terhadap salinitas meliputi mekanisme eksklusi dan inklusi. Mekanisme eksklusi mencegah terjadinya defisit air secara internal dengan cara sintesis solut organik dan sukulensi ditingkatkan, sedangkan mekanisme inklusi mencegah toksisitas ion-ion melalui jaringan yang mempunyai toleransi tinggi terhadap peningkatan konsentrasi garam dengan cara kompartementasi garam, sintesis solut kompatibel dan pertukaran ion K^+ , Na^+ serta penghindaran dari ion berkonsentrasi tinggi dengan cara retranslokasi garam melalui floem, ekskresi garam, dan pengguguran daun tua. Peranan transpor ion merupakan hal krusial dalam adaptasi tanaman tanpa memperhatikan mekanisme toleransi yang dimiliki oleh tanaman (Sopandie, 2013).

10.4.3 Respon Fisiologi terhadap Stress Suhu Tinggi

Kenaikan suhu sebesar $0,2^{\circ}C$ setiap dekade telah diproyeksikan oleh IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Hal tersebut diprediksi akan berdampak cukup signifikan pada tanaman karena suhu di atas optimal suhu kardinal akan menyebabkan aktivitas fisiologi menurun. Terjadinya kenaikan suhu di luar batas selama jangka waktu yang cukup lama sehingga menyebabkan terjadinya kerusakan

pertumbuhan dan perkembangan pada tanaman dikenal dengan stress cekaman suhu tinggi. Respon fisiologi terkait cekaman suhu tinggi pada tanaman adalah mengenai status air tanaman yang merupakan variabel penting dalam perubahan suhu ambien lingkungan. Suhu tinggi ini dapat menyebabkan tanaman kehilangan air terutama di siang hari. Mekanisme adaptasi tanaman terkait kondisi suhu tinggi yakni akumulasi senyawa organik tertentu yang memiliki berat molekul rendah (*compatible osmolytes*). Prolin dan glisinbetain merupakan molekul yang disintesis oleh banyak jenis tanaman terkait dengan cekaman abiotik salah satunya stress suhu tinggi.

Perubahan fotosintesis pada kondisi stress suhu tinggi pun merupakan indikator yang baik untuk termotoleran yang menunjukkan adanya korelasi dengan pertumbuhan tanaman. Fotosistem II diketahui sangat labil terhadap perubahan suhu karena pada kondisi suhu tinggi aktivitasnya sangat menurun yang disebabkan oleh kerusakan pada membran tilakoid. Cekaman suhu tinggi ini memungkinkan terjadinya disosiasi OEC atau *oxygen evolving complex* sehingga terjadi ketidakseimbangan arus elektron dari OEC menuju akseptor PSII dalam arah PSI *reaction center* (Gambar 10.3). Respon lain pada tanaman terkait dengan stress suhu tinggi yakni terjadinya partisi asimilat, stabilitas termal membran sel, dan perubahan hormonal (Sopandie, 2013)



Gambar 10.3 Suhu Tinggi Menginduksi Terjadinya Penghambatan Evolusi Oksigen dan Aktivitas PSII (De Ronde et al., 2004)

10.4.4 Respon Fisiologi Stress Cahaya Intoleran

Cahaya merupakan kunci penentu yang sangat dibutuhkan oleh tanaman dalam proses metabolisme dan fotosintesis sehingga tanaman dapat menjalani proses perkecambahan biji hingga tumbuh dewasa. Setiap jenis tanaman akan memiliki respon yang berbeda terhadap cahaya sehingga dikenal tipe tanaman yang tahan atau mampu tumbuh dalam kondisi cahaya terbatas (tanaman toleran) dan ada tanaman yang tidak mampu tumbuh (tanaman intoleran). Terkait dengan intensitas cahaya maka tumbuhan memberikan respon yang berbeda baik secara morfologis maupun anatomis. Tanaman toleran memiliki morfologis daun lebar dan tipis serta laju fotosintesis rendah pada intensitas cahaya tinggi berkebalikan dengan tanaman intoleran (Kalita, 2022).

Respon fisiologis tanaman terhadap cahaya intoleran dihubungkan dengan enzim Rubisco dan fotosintesis. Intensitas cahaya rendah seperti naungan akan mempengaruhi aktivitas Rubisco menjadi lebih rendah sehingga menyebabkan penurunan karbohidrat. Korelasi antara cekaman intensitas cahaya rendah dengan penurunan karbohidrat terkait pula dengan resistensi stomata dan sel-sel mesofil terhadap pertukaran gas CO_2 . Ketika kondisi cahaya rendah maka aktivitas karboksilase dan RuBP menurun. Enzim ADP glukosa pyrofosforilase mengatur aliran karbon, di mana enzim ini diatur secara alosterik oleh produk siklus PCR. Intensitas cahaya yang rendah menghambat pembentukan 3-PGA, yang menghambat reaksi pembentukan pati akibat kerja enzim ADP-glukosa pyrofosfatase sebagai hasil dari adanya Pi berinteraksi dengan 3-PGA (Sopandie, 2013).

10.4.5 Respon Fisiologi terhadap Stress Masam

Tanah masam ini memiliki keterkaitan dengan kandungan unsur aluminium yang tinggi dan memiliki pH tanah rata-rata kurang dari 4. Tanaman yang tumbuh pada tanah masam biasanya terbatas karena toksisitas atau defisiensi unsur hara tertentu. Tingginya kadar Al berkorelasi dengan tingginya Mn atau defisiensi unsur P, Ca, dan Mg. Respon toleransi tanaman terkait tingginya Al dilakukan dalam tiga mekanisme diantaranya menghindari penyerapan, inaktivasi akar, akumulasi pucuk. Jenis tanaman yang toleran dengan tanah masam contohnya teh, ketela rambat, ketela pohon, kacang tanah sedangkan jagung, kacang merah, dan kedelai merupakan tanaman yang peka terhadap tanah masam. Ketahanan terhadap Al yang tinggi adalah ciri khas varietas tanaman yang toleran terhadap tanah masam. Dua jenis utama mekanisme toleran cekaman Al saat ini diantaranya penghindaran dan detoksifikasi internal. Tanaman menghindari Al melalui tiga cara utama. Pertama, pH rizosfer akar berubah; kedua, akar mengeluarkan asam organik; dan ketiga, infeksi mikoriza dan pertumbuhan akar. Toleransi Al spesies tanaman dapat didasarkan pada penahanan Al oleh sistem perakaran (*excluded plants*) atau toleransi terhadap konsentrasi Al tinggi pada tajuk (*included plants*) selain dari tiga pendekatan tersebut (Wiraatmaja, 2017).

DAFTAR PUSTAKA

- Dehigaspitiya, P. *et al.* (2019) 'Exploring natural variation of photosynthesis in a site-specific manner: evolution, progress, and prospects', *Planta*, 250(4), pp. 1033–1050. doi: 10.1007/s00425-019-03223-1.
- Kalita, C. K. (2022) 'Plant Stress Physiology-A comprehensive account', *E-Zine of Biological Sciences*, (22).
- Shabala, S. (2012) 'Plant stress physiology', *Plant Stress Physiology*, pp. 1–318. doi: 10.5860/choice.50-2652.
- Sipayung, R. (2003) 'Stres Garam Dan Mekanisme Tanaman', *USU digital library*, pp. 1–7. Available at: <http://www.academia.edu/download/43085124/bdp-rosita2.pdf>.
- Sopandie, D. (2013) *Fisiologi Adaptasi Tanaman (terhadap Cekaman Abiotik pada Agroekosistem Tropika)*.
- Wiraatmaja, I. W. (2017) 'Bahan ajar: cara tanaman beradaptasi terhadap cekaman fisiologis', *Jurnal Agroekoteknologi Universitas Udayana*, pp. 1–44. Available at: https://simdos.unud.ac.id/uploads/file_pendidikan_1_dir/5c7a12ffe7e8fc3157980624112d0d50.pdf.
- De Ronde JA, Cress WA, Krüger GH, Strasser RJ, Van Staden J. Photosynthetic response of transgenic soybean plants, containing an Arabidopsis P5CR gene, during heat and drought stress. *J Plant Physiol.* 2004 Nov;161(11):1211-24. doi: 10.1016/j.jplph.2004.01.014. PMID: 15602813.

BIODATA PENULIS



Rizki Nisfi Ramdhini, M.Si

Dosen Program Studi D3 Farmasi
Akademi Farmasi Cendikia Farma Husada

Lahir di Lampung Timur, 02 Mei 1988, penulis telah menyelesaikan gelar S1 Jurusan Biologi FMIPA di Universitas Sebelas Maret (UNS) Surakarta pada tahun 2010, dan gelar S2 Jurusan Biosain di Universitas Sebelas Maret (UNS) Surakarta pada tahun 2014. Email: rizkinisfi2020@gmail.com

BIODATA PENULIS



Muliana GH, S.Pd., M.Pd.

Dosen Program Studi Pendidikan Biologi
FMIPA UNM

Muliana GH S. Pd., M. Pd, lahir di Ujung Pandang, 6 Oktober 1991. Pernah belajar di Jurusan Biologi program studi pendidikan biologi di UNM, lulus tahun 2013. Setahun kemudian melanjutkan studi magister pendidikan biologi di universitas yang sama dan lulus tahun 2016. Sehari-hari aktif bekerja sebagai dosen tetap di UNM, sebagai ibu rumah tangga, juga aktif menulis. Tulisan penulis berupa buku yang telah terbit tahun 2022 yaitu buku "Tentang Kaktus", "Tentang Aglaonema", BC "Kewirausahaan Biologi" juga BC "Anatomi Tumbuhan". Tulisan penulis berupa buku yang telah terbit pada tahun 2023 yakni BC "Teknologi Perlindungan Hama dan Penyakit Tanaman Umbi-Umbian Lokal", "Tentang Calathea" dan BC "Ekologi Tumbuhan".

Email penulis : mulianagunawanhamid@gmail.com

Instagram : @muliana_gh_

BIODATA PENULIS



Latifa Nuraini, MSc., PhD.

Latifa Nuraini, MSc., PhD. berasal dari Yogyakarta. Ia mendapatkan gelar S1 di bidang *Plant Breeding*, Fakultas Pertanian Universitas Gadjah Mada. Untuk gelar S2 di bidang Agronomy, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Sedangkan untuk gelar S3 Double degree di bidang Bioscience, Floriculture Laboratory, UGSAS Gifu University dan Shizuoka University. Saat ini, ia bergabung di Pusat Riset Konservasi Tumbuhan Kebun Raya dan Kehutanan, Organisasi Riset Hayati dan Lingkungan, Badan Riset dan Inovasi Nasional.
Email: lati008@brin.go.id.

BIODATA PENULIS



Danang Budi Setyawan, M.Si.

Dosen Program Studi Pendidikan Biologi
Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan
Universitas Terbuka

Penulis lahir di Jakarta tanggal 22 Desember 1988. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Terbuka. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Biologi ITB dan melanjutkan S2 pada Program Studi Pascasarjana Biologi UI. Penulis menekuni bidang Biologi terutama terkait masalah lingkungan seperti pemanfaatan sampah organik dan kompos. Saat ini penulis juga sedang menekuni bidang menulis buku dan artikel.

BIODATA PENULIS



Ria Megasari, S.P., M.P.

Dosen Program Studi Agroteknologi

Fakultas Pertanian dan Ilmu Perikanan Universitas Pohuwato

Penulis lahir di Soppeng tanggal 4 Juni 1988. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian dan Ilmu Perikanan, Universitas Pohuwato. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Agronomi Unhas (2010) dan melanjutkan S2 pada Jurusan Sistem – sistem Pertanian, Unhas (2014). Penulis selain mengajar juga aktif melakukan penelitian sejak tahun 2019. Penelitian yang telah dilakukan memiliki judul sebagai berikut: Inventarisasi Hama dan Penyakit Tanaman Jagung (*Zea mays* L.) dan Pengendaliannya di Kec. Taluditi Kab. Pohuwato (2019); Uji Beberapa Jenis Sistem Tanam Terhadap Produktivitas Padi Ponelo Lokal Gorontalo (2020). Pemanfaatan lahan Sempit Melalui Sistem Tanam Hidroponik dalam Menunjang Kebutuhan Sayuran Di Era Covid-19 (2021); Peran Mikoriza Terhadap Pertumbuhan dan Produksi tanaman Jagung Pulut Manis (*Zea mays* L. Saccharta) (2022); Perbaikan Karakter Umur Padi Lokal "Siam Kuning" melalui Pemuliaan Mutasi Sinar Gamma (2023). Buku yang telah diterbitkan Sistem Pertanian Terpadu: Pertanian Masa Depan (2022); Budidaya tanaman Semusim dan Tahunan (2022); Teknologi dan Produksi Benih (2023).

BIODATA PENULIS



Muhammad Rifqi Hariri, S.Si., M.Si.

Peneliti Pusat Riset Biosistematika dan Evolusi
Badan Riset dan Inovasi Nasional

Muhammad Rifqi Hariri merupakan staf peneliti di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Beberapa penelitian yang dilakukannya bersama kolega telah diterbitkan di beberapa jurnal nasional dan internasional yang berkaitan dengan konservasi tumbuhan, *alien flora*, identifikasi dan verifikasi jenis tumbuhan berbasis DNA barcoding, dan analisis keragaman genetik tumbuhan langka. Sebelum bekerja, penulis menyelesaikan studi sarjana di Jurusan Biologi Universitas Negeri Malang dan melanjutkan ke jenjang Magister bidang Biologi Tumbuhan di Departemen Biologi Institut Pertanian Bogor. Selain bekerja sebagai peneliti, juga aktif mengajar sebagai dosen praktisi di Universitas melalui skema team teaching maupun Praktisi Mengajar KEMDIKBUDRISTEK.

BIODATA PENULIS



Irfan Martiansyah, M.Si

Periset di Pusat Riset Konservasi Tumbuhan, Kebun Raya dan Kehutanan - Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Irfan Martiansyah, M.Si. dilahirkan di Bogor pada tanggal 3 Maret 1985. Pendidikan sarjana dan pascasarjana ditempuh pada Program Studi Biologi dan Program Studi Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman, IPB University pada tahun 2008 dan tahun 2018. Penulis pernah bekerja sebagai peneliti di Pusat Penelitian Bioteknologi dan Bioindustri Indonesia (PPBBI), PT. Riset Perkebunan Nusantara dari tahun 2009-2018. Pada tahun 2016, penulis dianugerahi beasiswa oleh Kementerian Luar Negeri India untuk melanjutkan pelatihan dan mengikuti kursus dua bulan yang berfokus pada manajemen agribisnis pertanian. Penulis juga pernah menjadi narasumber pada kuliah umum yang diselenggarakan di Universitas Islam Indonesia Yogyakarta. Saat ini penulis bekerja sebagai peneliti di Pusat Riset Konservasi Tumbuhan, Kebun Raya dan Kehutanan (PRKTKRK), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Penulis juga menjabat sebagai sekretaris Komunitas Genetik dan Keanekaragaman Hayati Indonesia (IGBC), sebuah organisasi ilmiah yang mengkhususkan diri pada konservasi genetik dan molekuler. Selain itu, penulis aktif berkontribusi pada jurnal nasional dan internasional, dengan fokus pada topik seperti konservasi tanaman dan genetika konservasi dll. Buku-buku yang pernah penulis terbitkan antara lain, *Dasar-Dasar Konservasi, Pendidikan Lingkungan Hidup, Botani* dll.

BIODATA PENULIS



Magfirah Rasyid, S.Pd., M.Pd.

Dosen Program Studi Pendidikan Biologi
Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Khairun

Magfirah Rasyid, S.Pd., M.Pd., lahir di Sungguminasa (Gowa), 25 April 1991. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Khairun. Penulis menempuh pendidikan S1 dengan mengambil Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Makassar (2009). Kemudian melanjutkan pendidikan S2 pada tahun 2014 dengan jurusan yang linear dengan pendidikan S1. Penulis mengambil pendidikan magister di Universitas Negeri Malang. Penulis menekuni bidang biologi dan sangat tertarik dengan pengembangan media pembelajaran.

Email: magfirah.rasyid91@gmail.com

BIODATA PENULIS



Aulia Rahmawati, M.P., C.Ed

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian dan Peternakan
Universitas Ma'arif Nahdlatul Ulama Kebumen

Penulis lahir di Kota Surakarta, Provinsi Jawa Tengah tanggal 01 Agustus 1996. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian dan Peternakan, Universitas Ma'arif Nahdlatul Ulama Kebumen. Selain itu, penulis juga memiliki jabatan fungsional Asisten Ahli dan menjabat sebagai ketua Unit MBKM di universitas tersebut. Sebelum menjadi dosen, penulis sudah bekerja sebagai asisten salah satu Profesor Fakultas Pertanian di Universitas Sebelas Maret Surakarta selama 2 tahun. Penulis pernah menjadi tim ahli dalam suatu proyek kajian penanganan pasca panen padi oleh Badan Perencanaan Pembangunan Daerah (BAPPEDA) Kabupaten Kebumen. Penulis merupakan editor in chief di 3 jurnal nasional, dan reviewer jurnal sinta 2. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Agroteknologi lulus tahun 2017 dan melanjutkan S2 pada Program Studi Agronomi lulus tahun 2020 di Universitas Sebelas Maret Surakarta. Saat ini penulis sedang melanjutkan studi S3 Ilmu Pertanian di Universitas Sebelas Maret Surakarta. Konsentrasi bidang penulis yaitu pemuliaan tanaman atau budidaya tanaman pangan khususnya tanaman pangan.

Penulis menekuni bidang menulis oleh karena itu penulis saat ini menjadi editor buku bersertifikat dengan gelar di belakang nama yaitu C.Ed. Beberapa karya yang sudah diterbitkan oleh penulis baru berupa artikel ilmiah, baik itu penelitian ilmiah maupun pengabdian masyarakat. Buku pertama yang ditulis oleh penulis berjudul “Agrotechnopreneurship”, buku kedua penulis berjudul “Ilmu Gulma” dan ini merupakan buku ketiga yang penulis susun. Jika ada yang ingin didiskusikan terkait isi pada bab ini silahkan menghubungi penulis di email awliarahmawati@gmail.com atau menghubungi di WA 083865705410.

BIODATA PENULIS



Hida Arliani Nur Anisa, M.Si.

Dosen Program Studi Biologi
Jurusan Sains Institut Teknologi Sumatera

Hida Arliani Nur Anisa yang akrab disapa Hida, lahir di Bandung pada 25 Desember 1987. Penulis menyelesaikan profram Sarjana dan Magister di Institut Teknologi Bandung dan saat ini sedang merampungkan program Doktor Biologi di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta. Saat ini beraktivitas sebagai salah satu dosen Jurusan Sains di Institut Teknologi Sumatera (ITERA) Lampung. Bidang keilmuan yang ditekuni diantaranya bioteknologi tanaman, fisiologi tumbuhan, genetika molekuler, metabolit sekunder tanaman, dan teknologi mikroenkapsulasi ekstrak tanaman.