

# **ANATOMI FISILOGI TUMBUHAN**

**Irfan Martiansyah  
Magfirah Rasyid  
Muhammad Rifqi Hariri  
Ite Morina Yostianti Tnunay  
Ashari Bagus Setiawan  
Saraswati Prabawardani  
Arinal Haq Izzawati Nurrahma  
Hendri Satria Kamal Uyun  
Fitri Fatma Wardani**



**GET PRESS INDONESIA**

# ANATOMI FISILOGI TUMBUHAN

## **Penulis :**

Irfan Martiansyah  
Magfirah Rasyid  
Muhammad Rifqi Hariri  
Ite Morina Yostianti Tnunay  
Ashari Bagus Setiawan  
Saraswati Prabawardani  
Arinal Haq Izzawati Nurrahma  
Hendri Satria Kamal Uyun  
Fitri Fatma Wardani

## **ISBN :**

**Editor :** Mila Sari., S.St., M.Si

**Penyunting :** Tri Putri Wahyuni, S. Pd.

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

**Penerbit :** GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

## **Redaksi :**

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah  
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat

Website : [www.getpress.co.id](http://www.getpress.co.id)

Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Juli 2024

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

## **KATA PENGANTAR**

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Anatomi Fisiologi Tumbuhan ini.

Buku Ini Membahas Bentuk-bentuk Kehidupan Serta Pertumbuhan Dan Perkembangan Sel, Jaringan Dan Sistem Jaringan Pada Tumbuhan, Jaringan Meristem (jaringan Dasar), Jaringan Penguat, Jaringan Pelindung, Jaringan Pengangkut (tipe Berkas Pengangkut, Konsep Stele), Struktur Morfologi Akar, Perkembangan Struktur Anatomi Primer Akar Monokotil & Dikotil, Mekanisme Membuka Dan Menutupnya Stomata, Mekanisme Penyerapan Zat Hara, Proses Fotosintesis Yang Terjadi Pada Tanaman, Proses Fisiologi Biji Pada Tumbuhan.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, Juli 2024

Penulis

## DAFTAR ISI

|                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>KATA PENGANTAR .....</b>                                                          | <b>i</b>   |
| <b>DAFTAR ISI .....</b>                                                              | <b>ii</b>  |
| <b>DAFTAR TABEL .....</b>                                                            | <b>vi</b>  |
| <b>DAFTAR GAMBAR .....</b>                                                           | <b>vii</b> |
| <b>BAB 1 BENTUK-BENTUK KEHIDUPAN SERTA<br/>PERTUMBUHAN DAN PERKEMBANGAN SEL.....</b> |            |
| 1.1 Pendahuluan.....                                                                 | 1          |
| 1.2 Bentuk-bentuk Kehidupan .....                                                    | 2          |
| 1.2.1 Prokariotik .....                                                              | 3          |
| 1.2.2 Eukariotik .....                                                               | 8          |
| 1.3 Pertumbuhan dan Perkembangan Sel.....                                            | 20         |
| 1.3.1 Pertumbuhan Sel .....                                                          | 20         |
| 1.3.2 Perkembangan Sel .....                                                         | 21         |
| 1.3.3 Regulasi Seluler dalam Pertumbuhan dan<br>Perkembangan.....                    | 22         |
| 1.3.4 Regulasi Genetik dalam Pertumbuhan dan<br>Perkembangan.....                    | 23         |
| 1.3.5 Faktor Eksternal dalam Pertumbuhan dan<br>Perkembangan.....                    | 24         |
| 1.4 Pertumbuhan dan Perkembangan Sel Tumbuhan .....                                  | 24         |
| 1.4.1 Pertumbuhan Primer .....                                                       | 24         |
| 1.4.2 Pertumbuhan Sekunder.....                                                      | 26         |
| 1.5 Kesimpulan .....                                                                 | 27         |
| DAFTAR PUSTAKA.....                                                                  | 29         |
| <b>BAB 2 JARINGAN DAN SISTEM JARINGAN<br/>PADA TUMBUHAN .....</b>                    |            |
| 2.1 Pendahuluan.....                                                                 | 55         |
| 2.2 Jaringan Meristematik (Muda) .....                                               | 55         |
| 2.2.1 Jaringan Meristem Berdasarkan Asal<br>Pembentukannya .....                     | 55         |
| 2.2.2 Jenis Meristem Berdasarkan Letaknya.....                                       | 58         |
| 2.2.3 Jaringan Meristem Berdasarkan Fungsi.....                                      | 60         |
| 2.3 Jaringan Permanen (Dewasa) .....                                                 | 60         |
| 2.3.1 Jaringan Permanen Sederhana.....                                               | 60         |
| 2.3.2 Jaringan Permanen Majemuk.....                                                 | 72         |

|                                                                                                    |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| DAFTAR PUSTAKA .....                                                                               | 76         |
| <b>BAB 3 JARINGAN PADA TUMBUHAN .....</b>                                                          | <b>33</b>  |
| 3.1 Pendahuluan .....                                                                              | 33         |
| 3.2 Jaringan Meristem .....                                                                        | 34         |
| 3.3 Jaringan Parenkim.....                                                                         | 37         |
| 3.4 Jaringan Penguat.....                                                                          | 40         |
| 3.5 Jaringan Epidermis .....                                                                       | 43         |
| 3.6 Jaringan Pengangkut.....                                                                       | 48         |
| DAFTAR PUSTAKA .....                                                                               | 52         |
| <b>BAB 4 STRUKTUR MORFOLOGI AKAR .....</b>                                                         | <b>79</b>  |
| 4.1 Pendahuluan .....                                                                              | 79         |
| 4.2 Karakteristik Akar .....                                                                       | 79         |
| 4.3 Peranan Akar .....                                                                             | 80         |
| 4.4 Bagian-bagian Akar .....                                                                       | 80         |
| 4.5 Sistem Perakaran dan Modifikasinya .....                                                       | 82         |
| DAFTAR PUSTAKA .....                                                                               | 88         |
| <b>BAB 5 PERKEMBANGAN STRUKTUR ANATOMI</b>                                                         |            |
| <b>PRIMER AKAR MONOKOTIL &amp; DIKOTIL .....</b>                                                   | <b>89</b>  |
| 5.1 Pendahuluan .....                                                                              | 89         |
| 5.2 Perkembangan dan Diferensiasi Akar Primer pada<br>Monokotil dan Dikotil.....                   | 90         |
| 5.3 Teori yang Berhubungan dengan Pembagian Sel-sel<br>pada Ujung Akar .....                       | 94         |
| 5.4 Struktur Anatomi Akar Primer disertai dengan<br>Asal Pembentukan dan Peran Fisiologisnya ..... | 95         |
| 5.4.1 Epidermis.....                                                                               | 96         |
| 5.4.2 Korteks.....                                                                                 | 99         |
| 5.4.3 Endodermis .....                                                                             | 100        |
| 5.4.4 Perisikel dan berkas pengangkut.....                                                         | 102        |
| 5.4.5 Akar lateral dan akar adventif.....                                                          | 104        |
| 5.5 Regulasi Hormon selama Pembentukan Akar Primer<br>Monokotil dan Dikotil .....                  | 105        |
| DAFTAR PUSTAKA .....                                                                               | 109        |
| <b>BAB 6 MEKANISME MEMBUKA DAN MENUTUPNYA</b>                                                      |            |
| <b>STOMATA .....</b>                                                                               | <b>113</b> |
| 6.1 Pendahuluan .....                                                                              | 113        |
| 6.2 Fungsi Stomata.....                                                                            | 115        |

|                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.3 Distribusi dan Frekwensi Stomata .....                             | 116        |
| 6.4 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Aktifitas Stomata ....             | 119        |
| 6.5 Mekanisme membuka dan menutupnya stomata .....                     | 120        |
| 6.5 Penutup .....                                                      | 121        |
| DAFTAR PUSTAKA.....                                                    | 122        |
| <b>BAB 7 MEKANISME PENYERAPAN ZAT HARA .....</b>                       | <b>125</b> |
| 7.1 Pendahuluan.....                                                   | 125        |
| 7.2 Struktur Akar dan Pergerakan Ion di Akar .....                     | 126        |
| 7.3 Mekanisme Penyerapan Zat Hara.....                                 | 127        |
| 7.4 Transpor Pasif.....                                                | 129        |
| 7.4.1 Pergerakan ion dalam tanah .....                                 | 129        |
| 7.4.2 Pergerakan ion antara larutan tanah dan sel<br>akar tanaman..... | 131        |
| 7.4.3 Protein transpor.....                                            | 133        |
| 7.5 Transpor Aktif.....                                                | 135        |
| 7.5.1 Konsep carrier.....                                              | 136        |
| 7.5.2 Pompa (pump).....                                                | 137        |
| 7.6 Perbedaan Potensial Antar Membran .....                            | 140        |
| 7.7 Ion Antagonisme .....                                              | 141        |
| 7.9 Kesimpulan .....                                                   | 141        |
| DAFTAR PUSTAKA.....                                                    | 143        |
| <b>BAB 8 FOTOSINTESIS.....</b>                                         | <b>145</b> |
| 8.1 Sejarah Fotosintesis.....                                          | 145        |
| 8.2 Pendahulun .....                                                   | 147        |
| 8.3 Kloroplas struktur dan pigmen .....                                | 147        |
| 8.3.1 Reaksi Terang.....                                               | 148        |
| 8.3.2 (Siklus Calvin) Reaksi gelap .....                               | 150        |
| 8.5 Faktor-faktor yang mempengaruhi fotosintesis .....                 | 154        |
| DAFTAR PUSTAKA.....                                                    | 156        |
| <b>BAB 9 PROSES FISILOGI BIJI PADA TUMBUHAN.....</b>                   | <b>157</b> |
| 9.1 Pendahuluan.....                                                   | 157        |
| 9.2 Pembentukan, Perkembangan dan Pemasakan Biji .....                 | 158        |
| 9.2.1 Pembentukan Biji .....                                           | 158        |
| 9.2.2 Perkembangan Biji.....                                           | 161        |
| 9.2.3 Pemasakan Biji.....                                              | 162        |
| 9.2.4 Faktor Lingkungan yang Mempengaruhi<br>Perkembangan Biji .....   | 164        |

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 9.3 Dormansi dan Perkecambahan Biji ..... | 165 |
| 9.3.1 Dormansi.....                       | 168 |
| 9.3.2 Perkecambahan.....                  | 171 |
| 9.4 Umur Simpan Biji dan Deteriosasi..... | 172 |
| 9.4.1 Faktor Internal.....                | 173 |
| 9.4.2 Faktor Eksternal.....               | 176 |
| DAFTAR PUSTAKA .....                      | 178 |
| <b>BIODATA PENULIS</b>                    |     |

## DAFTAR TABEL

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabel 7.1. Perbandingan transpor zat hara secara pasif dan aktif .....                                                    | 132 |
| Tabel 7.2. Perbandingan pompa, proton ( $H^+$ )-ATPase, $Ca^{2+}$ pumping ATPase, $H^+$ -PPase, dan ABS transporter ..... | 143 |
| Tabel 8.1. Perbedaan Proses Fotosintesis pada tanaman C3, C4 dan CAM .....                                                | 158 |



## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 1.1. Ilustrasi pohon filogenetik bentuk kehidupan di bumi .....             | 3  |
| Gambar 1.2. Ilustrasi struktur anatomi bakteri .....                               | 4  |
| Gambar 1.3. Ilustrasi kerajaan protista .....                                      | 10 |
| Gambar 1.4. Ilustrasi kingdom fungi.....                                           | 11 |
| Gambar 1.5. Ilustrasi kingdom plantae.....                                         | 15 |
| Gambar 1.6. Ilustrasi kingdom animalia .....                                       | 18 |
| Gambar 1.7. Ilustrasi siklus sel dalam pertumbuhan .....                           | 21 |
| Gambar 1.8. Ilustrasi zona pertumbuhan akar.....                                   | 26 |
| Gambar 2. 1. Contoh Jaringan Pada Tumbuhan.....                                    | 34 |
| Gambar 2. 2. Macam-macam Jaringan Parenkim Tumbuhan.....                           | 37 |
| Gambar 2. 3. Macam-macam Bentuk Trikona pada Tumbuhan .....                        | 45 |
| Gambar 2. 4. Duri Tempel pada Tumbuhan Mawar .....                                 | 46 |
| Gambar 2. 5. Sel kipas/bulliform pada Tumbuhan .....                               | 47 |
| Gambar 2. 6. Lapisan Kutikula pada Tumbuhan.....                                   | 47 |
| Gambar 2. 7. Hidatoda pada Tumbuhan .....                                          | 48 |
| Gambar 2. 8. Xilem dan Floem pada Tumbuhan.....                                    | 49 |
| Gambar 3. 1. Daerah Pembelahan Primer Akar Tumbuhan .....                          | 56 |
| Gambar 3. 2. Pertumbuhan meristem sekunder pada Batang.....                        | 57 |
| Gambar 3. 3. Meristem apikal dan lateral pada Ujung Akar dan Batang Tumbuhann..... | 59 |
| Gambar 3. 4. Stomata pada <i>Ficus exasperata</i> .....                            | 62 |
| Gambar 3. 5. Trikona non-glanduler <i>Ficus racemosa</i> L.....                    | 64 |
| Gambar 3. 6. Jaringan Perenkim.....                                                | 66 |
| Gambar 3. 7. Jaringan Parenkim dengan amilum dan aerenkim .....                    | 67 |

|                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gambar 3. 8. (A) kolenkim anguler., (B) kolenkim tangensial, (C) kolenkim annular, (D) kolenkim lacunar. ....                                                                                                            | 70  |
| Gambar 4.1. Bagian-bagian akar .....                                                                                                                                                                                     | 85  |
| Gambar 4.2. Rambut akar pada biji yang baru berkecambah .....                                                                                                                                                            | 85  |
| Gambar 4.3. Penampang membujur akar.....                                                                                                                                                                                 | 86  |
| Gambar 4.4. Sistem perakaran. a. tunggang; b. serabut.....                                                                                                                                                               | 87  |
| Gambar 4.5. Contoh sistem perakaran tunggang .....                                                                                                                                                                       | 88  |
| Gambar 4.6. Keragaman akar serabut. a. akar padi, b. akar kelapa; c. akar pandan.....                                                                                                                                    | 89  |
| Gambar 4.7. Modifikasi akar sesuai tempat tumbuh dan fungsinya. a. akar udara; b. akar gantung; c. akar penggerek; d. akar pelekat; e. akar pembelit; f. akar napas; g. akar tunjang; h. akar lutut, i. akar banir ..... | 91  |
| Gambar 5.1. Asal diferensiasi sel-sel akar .....                                                                                                                                                                         | 95  |
| Gambar 5.2. Ilustrasi pembelahan sel secara antiklinal dan periklinal. ....                                                                                                                                              | 96  |
| Gambar 5.3. Daerah pembentukan sel-sel pada meristem apikal akar <i>Arabidopsis</i> .....                                                                                                                                | 97  |
| Gambar 5.4. Perbandingan teori perkembangan ujung akar. A. Hanstein; B. Körper-Kappe; C. Daerah pusat diam ( <i>Quiescent Centre</i> ). ....                                                                             | 99  |
| Gambar 5.5. Epidermis. Bagian kiri merupakan anatomi dari akar <i>Iris</i> yang menunjukkan epidermis berganda (ditunjukkan dengan tanda anak panah hitam dan putih). ....                                               | 101 |
| Gambar 5.6. Sayatan melintang akar <i>Arabidopsis</i> (A) yang menunjukkan sel epidermis kontak dengan dua lapis sel kortikal di sebelahnya dalam pembentukan rambut akar. ....                                          | 102 |
| Gambar 5.7. A. Perkembangan rambut akar yang terbagi ke dalam tiga tipe. B. Tipe I dicirikan dengan beberapa sel epidermis dapat membentuk rambut akar; .....                                                            | 103 |

|                                                                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gambar 5.8. Endodermis.....                                                                                                                                          | 105 |
| Gambar 5.9. Variasi tipe berkas pengangkut pada<br>dikotil .....                                                                                                     | 107 |
| Gambar 5.10. Tahap pembentukan akar lateral pada<br>morfogenesis primordium akar lateral<br>dan inisiasinya.....                                                     | 108 |
| Gambar 5.11. Interaksi kerja hormon etilen dan hormon<br>lain dalam pertumbuhan akar primer<br>pada <i>Arabidopsis</i> dan padi (tanaman<br>model).....              | 111 |
| Gambar 6.1. Anatomi daun dan kondisi stomata .....                                                                                                                   | 119 |
| Gambar 7.1. Struktur akar tanaman.....                                                                                                                               | 131 |
| Gambar 7.2. Pertukaran ion antara akar tanaman<br>dan partikel tanah: (a) teori pertukaran<br>kontak dan (b) teori pertukaran asam<br>karbonat .....                 | 134 |
| Gambar 7.3. Dua konsep dasar pertukaran ion dan<br>solut melewati membran – transpor<br>pasif (difusi sederhana dan difusi<br>terfasilitasi) dan transpor aktif..... | 139 |
| Gambar 7.4. Gerbang protein channel (pada kondisi<br>terbuka). Ion-ion $K^+$ berdifusi melewati<br>membran plasma.....                                               | 139 |
| Gambar 7.5. Proses aktivasi protein carrier,<br>pembentukan kompleks carrier-ion,<br>dan pelepasan ion-ion .....                                                     | 141 |
| Gambar 8.1. Ilustrasi percobaan Joseph Priestley .....                                                                                                               | 149 |
| Gambar 8.2. Ilustrasi percobaan Jan Ingenhousz.....                                                                                                                  | 150 |
| Gambar 8.3. Ilustrasi Percobaan Sachs.....                                                                                                                           | 151 |
| Gambar 8.4. Struktur Kloroplast .....                                                                                                                                | 152 |
| Gambar 8.5. Gambar Ilustrasi reaksi terang (Non Siklik) .....                                                                                                        | 153 |
| Gambar 8.6. Gambar Ilustrasi reaksi terang ( Siklik) .....                                                                                                           | 154 |
| Gambar 8.7. Gambar Ilustrasi reaksi Gelap .....                                                                                                                      | 155 |
| Gambar 8.8. Gambar Lintasan asam karboksilat C4.....                                                                                                                 | 156 |
| Gambar 8.9. Gambar Lintasan CAM1 .....                                                                                                                               | 57  |
| Gambar 9.1. Tahap pembentukan, perkembangan, dan<br>pemasakan biji .....                                                                                             | 162 |

|                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gambar 9.2. Bagian-bagian bunga.....                                                                                                                      | 163 |
| Gambar 9.3. Proses fertilisasi ganda pada ovul<br>angiosperma.....                                                                                        | 164 |
| Gambar 9.4. Hubungan komponen utama dalam<br>mekanisme yang mengendalikan<br>dormansi dan perkecambahan biji<br>dengan hormon dan sinyal lingkungan ..... | 171 |
| Gambar 9.5. Tiga karakteristik fase imbibisi biji dan<br>proses biologis yang terjadi .....                                                               | 176 |
| Gambar 9.6. Interaksi faktor internal dan eksternal<br>yang mempengaruhi umur simpan biji<br>dan deteriosasi.....                                         | 177 |

# **BAB 1**

## **BENTUK-BENTUK KEHIDUPAN SERTA PERTUMBUHAN DAN PERKEMBANGAN SEL**

*Oleh Irfan Martiansyah*

### **1.1 Pendahuluan**

Kehidupan di Bumi menunjukkan keragaman yang luar biasa, mencakup berbagai organisme dari yang paling sederhana hingga yang sangat kompleks. Bentuk-bentuk kehidupan ini dapat dikelompokkan ke dalam tiga domain utama: Bacteria, Archaea, dan Eukarya, yang masing-masing memiliki karakteristik unik. Domain Bacteria dan Archaea terdiri dari organisme prokariotik yang tidak memiliki inti sel yang tertutup membran. Meskipun sederhana, organisme dalam dua domain ini memainkan peran penting dalam ekosistem dan kehidupan manusia. Bakteri misalnya ditemukan hampir di mana-mana, termasuk dalam tubuh manusia sebagai bagian dari mikrobioma yang membantu pencernaan.

Domain Eukarya merupakan organisme eukariotik mencakup kelompok besar yang terdiri dari protista, fungi, plantae, dan animalia, masing-masing dengan peran dan karakteristik unik dalam ekosistem global. Protista, seperti alga dan protozoa, memainkan peran penting sebagai produsen primer dan konsumen dalam rantai makanan akuatik, serta berperan sebagai penyumbang oksigen melalui fotosintesis. Fungi, yang mencakup jamur seperti jamur mikroskopis dan miselium besar, berfungsi sebagai pengurai dalam siklus nutrisi, membentuk simbiosis dengan tumbuhan, dan bahkan sebagai penyedia bahan obat-obatan. Plantae, dengan kemampuan fotosintesisnya yang menggunakan klorofil dalam kloroplas, tidak hanya menyediakan oksigen tetapi juga memainkan peran penting dalam menyediakan makanan dan habitat bagi kehidupan lainnya di Bumi. Sementara itu, animalia, dengan

keragaman dari mamalia hingga serangga, berkontribusi sebagai predator, mangsa, serta penyebar polen, dan berperan krusial dalam menjaga keseimbangan ekosistem

Lebih kompleks lagi mengenai domain Eukarya yang mencakup organisme eukariotik yang memiliki sel dengan inti tertutup membran dan berbagai organel lainnya seperti mitokondria dan retikulum endoplasma. Organel-organel ini menjadi penyusun dalam suatu kehidupan yang disebut dengan sel.

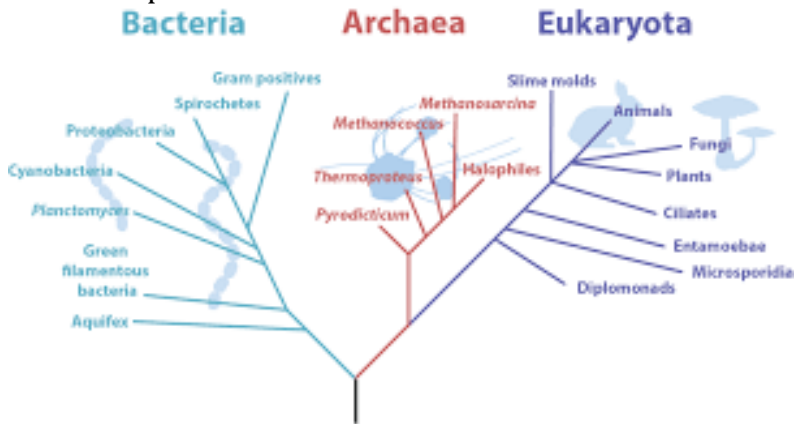
Sel adalah unit dasar kehidupan, dan semua organisme hidup terdiri dari satu atau lebih sel yang menjalankan semua fungsi vital yang diperlukan untuk hidup. Pertumbuhan dan perkembangan sel adalah proses penting yang memungkinkan organisme untuk tumbuh, berkembang biak, dan merespons lingkungannya. Perkembangan sel, di sisi lain, melibatkan diferensiasi di mana sel-sel yang awalnya serupa menjadi lebih spesifik dalam fungsi dan strukturnya. Diferensiasi ini memungkinkan pembentukan berbagai jenis jaringan dan organ dalam organisme multiseluler.

Pembahasan tentang bentuk-bentuk kehidupan serta pertumbuhan dan perkembangan sel ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang mendalam tentang dasar-dasar biologi dan evolusi. Dengan memahami karakteristik dasar berbagai bentuk kehidupan, kita dapat mengklasifikasikan dan mempelajari organisme secara lebih sistematis, memahami proses biologis yang kompleks, dan mendorong penelitian yang dapat menghasilkan inovasi di bidang kedokteran, bioteknologi, dan konservasi. Selain itu, dengan mempelajari keragaman bentuk kehidupan, kita dapat lebih menghargai keragaman hayati yang ada di Bumi dan mengambil langkah-langkah untuk melindungi spesies dan ekosistem yang terancam oleh aktivitas manusia dan perubahan lingkungan.

## **1.2 Bentuk-bentuk Kehidupan**

Kehidupan di Bumi adalah hasil dari miliaran tahun evolusi yang kompleks, menghasilkan keragaman organisme yang luar biasa dari yang paling sederhana hingga yang sangat kompleks. Organisme hidup diklasifikasikan ke dalam tiga domain utama:

Bacteria, Archaea, dan Eukarya. Klasifikasi ini didasarkan pada analisis genetik dan karakteristik struktural yang berbeda dari masing-masing domain, yang membantu ilmuwan memahami hubungan evolusioner dan fungsi biologis yang mendasari berbagai bentuk kehidupan.



**Gambar 1.1.** Ilustrasi pohon filogenetik bentuk kehidupan di bumi

### 1.2.1 Prokariotik

Prokariotik adalah kelompok organisme yang tidak memiliki inti sel yang tertutup membran dan organel yang kompleks. Prokariotik terdiri dari dua domain utama: Bacteria dan Archaea. Meskipun keduanya berbagi beberapa karakteristik umum, mereka juga memiliki perbedaan penting yang membuat mereka unik.

#### 1. Bakteri

Bakteri adalah salah satu kelompok organisme paling beragam dan tersebar luas di Bumi. Mereka dapat ditemukan di hampir semua habitat, termasuk tanah, air, udara, dan bahkan di dalam tubuh organisme lain. Bakteri memiliki struktur sel yang relatif sederhana tetapi sangat efisien.

##### a. Struktur Sel Bakteri

##### 1) Dinding Sel

Kebanyakan bakteri memiliki dinding sel yang terbuat dari peptidoglikan, yang memberikan kekuatan struktural dan melindungi sel dari tekanan osmotik.

2) Membran Sel

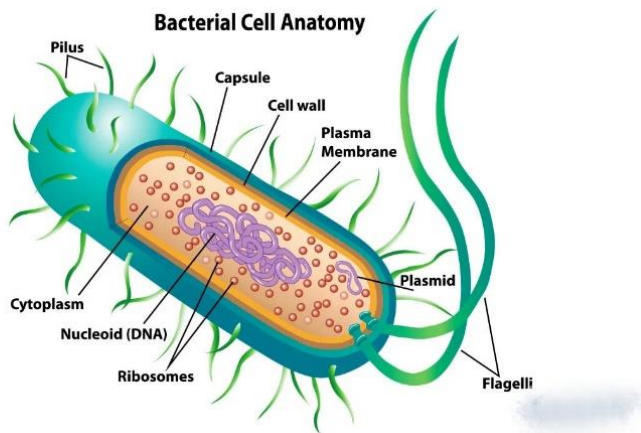
Bakteri memiliki membran sel yang mengatur masuk dan keluarnya zat-zat ke dan dari sel.

3) Sitoplasma

Di dalam sitoplasma terdapat ribosom untuk sintesis protein dan bahan genetik (DNA) yang biasanya berbentuk sirkuler.

4) Flagela

Banyak bakteri memiliki flagela, struktur seperti cambuk yang digunakan untuk bergerak.



**Gambar 1.2.** Ilustrasi struktur anatomi bakteri

*b. Peran Ekologis Bakteri*

Bakteri memainkan peran ekologis yang sangat penting dalam berbagai aspek lingkungan dan kehidupan manusia. Berikut adalah beberapa peran ekologis utama dan manfaat penting dari bakteri:

1) Daur Ulang Nutrien

Bakteri adalah pengurai utama bahan organik mati dalam ekosistem. Mereka menguraikan materi organik kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana, menghasilkan nutrisi seperti nitrogen, fosfor, dan karbon yang dapat digunakan kembali oleh organisme lain dan tumbuhan. Proses ini mendukung kesuburan tanah dan produktivitas ekosistem.



2) Penambat Nitrogen

Beberapa bakteri memiliki kemampuan untuk mengubah nitrogen di udara menjadi amonia atau senyawa nitrogen lain yang dapat digunakan oleh tumbuhan. Contohnya adalah bakteri *Rhizobium* yang hidup dalam akar tumbuhan legum, membentuk hubungan simbiotik yang memungkinkan tumbuhan untuk mengakses nitrogen yang penting untuk pertumbuhan mereka.

3) Siklus Biogeokimia

Bakteri berperan dalam siklus biogeokimia seperti siklus karbon, nitrogen, dan sulfur. Mereka mengubah bentuk-bentuk kimia dari elemen-elemen ini di dalam ekosistem, mempertahankan keseimbangan yang diperlukan untuk kehidupan di Bumi.

4) Pembersih Lingkungan

Bakteri adalah agen pengurai yang efektif dalam menghilangkan polutan dari lingkungan, seperti minyak di laut atau senyawa kimia berbahaya di tanah. Proses ini, dikenal sebagai bioremediasi, menggunakan aktivitas bakteri untuk memperbaiki kerusakan lingkungan dan memulihkan kualitas lingkungan yang tercemar.

c. *Manfaat Penting dari Bakteri*

Bakteri memiliki manfaat penting yang meluas dalam berbagai aspek kehidupan, baik dalam ekologi, industri, pertanian, maupun kesehatan manusia.

1) Pembuatan Makanan

Sejumlah bakteri digunakan dalam produksi makanan dan minuman, seperti *Lactobacillus* dalam fermentasi yogurt, *Saccharomyces cerevisiae* dalam pembuatan roti dan bir, serta berbagai bakteri dalam proses fermentasi yang menghasilkan makanan seperti tempe dan kecap.

2) Industri

Bakteri memiliki berbagai aplikasi dalam industri bioteknologi dan farmasi. Mereka digunakan untuk

produksi antibiotik, enzim industri, dan bahan kimia seperti asam amino dan vitamin.

3) Pencernaan

Bakteri yang hidup di dalam saluran pencernaan hewan herbivora membantu dalam pencernaan serat dan nutrisi yang kompleks, membantu dalam pencernaan makanan yang tidak dapat dicerna sendiri oleh hewan tersebut.

4) Kesehatan Manusia

Bakteri dalam tubuh manusia, terutama dalam saluran pencernaan, membantu menjaga kesehatan dengan memainkan peran dalam sistem kekebalan tubuh, sintesis vitamin, dan menjaga keseimbangan mikrobiota yang sehat. Banyak bakteri hidup dalam hubungan simbiotik dengan organisme lain. Contohnya, bakteri usus seperti *Escherichia coli* membantu pencernaan pada manusia dan hewan.

5) Patogenisitas

Beberapa bakteri adalah patogen yang dapat menyebabkan penyakit pada manusia, hewan, dan tumbuhan. Contohnya, *Streptococcus* yang dapat menyebabkan infeksi tenggorokan dan *Mycobacterium tuberculosis* yang menyebabkan tuberkulosis.

## 2. Archaea

Archaea adalah kelompok prokariotik yang sering ditemukan di lingkungan ekstrem, seperti sumber air panas, lingkungan dengan salinitas tinggi, dan habitat anaerobik. Meskipun secara morfologis mirip dengan bakteri, archaea memiliki banyak perbedaan biokimia dan genetik yang membuat mereka unik.

### a. Struktur Sel Archaea

1) Dinding Sel

Dinding sel archaea tidak mengandung peptidoglikan seperti pada bakteri, melainkan pseudopeptidoglikan atau bahan lain yang unik.

## 2) Membran Sel

Membran sel archaea terdiri dari lipid dengan ikatan eter yang lebih stabil dalam kondisi ekstrem dibandingkan dengan ikatan ester yang ditemukan pada bakteri.

## 3) DNA dan Ribosom

Archaea memiliki DNA dan ribosom yang lebih mirip dengan eukariota dibandingkan dengan bakteri, menunjukkan hubungan evolusi yang berbeda.

### *b. Peran Ekologis dan Adaptasi*

#### 1) Ekstremofili

Banyak archaea adalah ekstremofili, yang berarti mereka dapat bertahan hidup dalam kondisi ekstrem seperti suhu tinggi, salinitas tinggi, atau lingkungan anaerobik. Contohnya adalah *Halobacterium* yang hidup di lingkungan dengan kadar garam tinggi dan *Methanopyrus* yang hidup di lingkungan dengan suhu tinggi.

Adapun enzim ekstremofil dihasilkan oleh archaea ekstrem seringkali stabil dan aktif pada kondisi yang tidak menguntungkan bagi organisme lain, menjadikannya berharga dalam berbagai aplikasi industri, seperti produksi biofuel dan pengolahan limbah.

#### 2) Metanogenesis

Beberapa archaea, yang disebut metanogen, menghasilkan metana sebagai produk sampingan dari metabolisme mereka. Mereka memainkan peran penting dalam siklus karbon, terutama di lingkungan anaerobik seperti rawa dan usus hewan ruminansia.

Bakteri dan archaea adalah dua domain utama dari organisme prokariotik yang menunjukkan keberagaman luar biasa dalam struktur, fungsi, dan ekologi. Meskipun memiliki struktur sel yang sederhana dibandingkan dengan eukariotik, keduanya memainkan peran penting dalam ekosistem global dan berbagai proses biologis.

### **1.2.2 Eukariotik**

Eukariotik adalah jenis organisme yang memiliki sel-sel kompleks dengan inti sel yang terpisah dari sitoplasma oleh membran inti. Kata "eukariotik" berasal dari bahasa Yunani "eu" yang berarti "benar" atau "sejati", dan "karyon" yang berarti "inti". Ciri utama dari sel eukariotik adalah keberadaan inti sel yang mengandung materi genetik (DNA) organisme tersebut, yang dikelilingi oleh membran inti.

#### **1. Ciri-ciri Organisme Eukariotik**

Organisme eukariotik memiliki beberapa ciri-ciri utama yang membedakannya dari organisme prokariotik (seperti bakteri dan archaea). Berikut adalah beberapa ciri-ciri organisme eukariotik secara umum:

##### **a. Inti Sel**

Inti sel eukariotik berfungsi sebagai tempat penyimpanan dan pengaturan materi genetik. Membran inti yang menyelubungi inti sel membantu melindungi DNA dari kerusakan dan mengatur transkripsi (pembacaan) dan translasi (terjemahan) gen-gen menjadi protein.

##### **b. Organel Sel**

Sel eukariotik memiliki berbagai organel yang kompleks, seperti mitokondria, retikulum endoplasma, aparatus Golgi, lisosom, dan berbagai vesikel. Masing-masing organel memiliki fungsi khusus dalam metabolisme, transportasi, dan pemeliharaan sel.

##### **c. Struktur Sel Tambahan**

Sel eukariotik dapat memiliki struktur tambahan seperti silia dan flagela yang digunakan untuk gerakan dan pergerakan sel. Selain itu, mereka juga memiliki membran sel yang terdiri dari lipid ganda yang berfungsi sebagai pengatur transportasi zat-zat ke dan dari sel.

#### **2. Kerajaan Utama Organisme Eukariotik**

Organisme eukariotik dikelompokkan dalam empat kerajaan utama berdasarkan karakteristik dan perilaku biologis:

a. *Protista*

Protista merupakan salah satu dari empat kerajaan utama dalam klasifikasi biologis organisme eukariotik. Kerajaan Protista mencakup berbagai organisme yang sangat beragam dalam hal struktur, siklus hidup, dan ekologi. Dulu, Protista digunakan sebagai tempat untuk mengklasifikasikan organisme eukariotik yang tidak termasuk dalam kerajaan tumbuhan, hewan, atau fungi yang lebih khas.

Organisme dalam kerajaan Protista umumnya adalah uniseluler, meskipun ada beberapa yang multiseluler. Mereka dapat ditemukan di berbagai habitat, terutama lingkungan air seperti air tawar, laut, dan tanah lembab.

Protista memiliki sejumlah karakteristik unik yang membedakannya dari kerajaan eukariotik lainnya:

1) Uniseluler dan Multiseluler

Sebagian besar protista adalah organisme uniseluler yang terdiri dari satu sel saja, seperti *Amoeba* dan *Paramecium*. Namun, ada beberapa protista yang multiseluler, seperti ganggang merah yang membentuk filamen panjang atau kumpulan sel-sel yang bersama-sama.

2) Struktur Sel yang Beragam

Sel protista memiliki beragam struktur dan organ, tergantung pada jenisnya. Beberapa protista memiliki struktur bergerak seperti silia atau flagela, sementara yang lain mengandalkan perubahan bentuk tubuh atau gerakan sitoplasma untuk bergerak.

3) Peranan Ekologis yang Penting

Protista memainkan peran penting dalam ekosistem sebagai produsen primer (melalui proses fotosintesis), konsumen (yang mengonsumsi bakteri dan organisme lain), dan dekomposer. Mereka merupakan bagian integral dari rantai makanan di banyak lingkungan.

4) Keragaman Metabolisme

Metabolisme protista sangat bervariasi. Beberapa protista adalah fotosintetik dan menggunakan

kloroplas untuk menghasilkan energi dari sinar matahari, mirip dengan tumbuhan. Di sisi lain, banyak protista lainnya adalah heterotrof dan mengandalkan organisme lain sebagai sumber nutrisi mereka.

#### 5) Reproduksi

Protista dapat melakukan reproduksi secara seksual atau aseksual. Reproduksi aseksual biasanya terjadi melalui pembelahan sel atau pembentukan spora, sementara reproduksi seksual melibatkan proses seperti konjugasi atau pembentukan gamet.

Contoh-contoh protista meliputi *Amoeba*, yang bergerak dengan pseudopodia (pergerakan melalui perubahan bentuk tubuh), *Paramecium*, yang memiliki silia untuk pergerakan dan memakan, serta alga uniseluler seperti *Chlamydomonas*, yang melakukan fotosintesis menggunakan kloroplas dalam selnya.



**Gambar 1.3.** Ilustrasi kerajaan protista

#### b. *Fungi*

Fungi, salah satu dari empat kerajaan utama dalam klasifikasi biologis organisme eukariotik, merupakan kelompok yang luas dan beragam yang mencakup lebih dari 144.000 spesies yang telah diidentifikasi. Organisme dalam kerajaan Fungi secara umum heterotrof, yang berarti mereka memperoleh nutrisi dengan menyerap bahan organik dari lingkungan mereka. Dengan cara ini, mereka berbeda dari tumbuhan yang melakukan fotosintesis untuk mendapatkan energi.

Adapun ciri atau karakteristik dari Fungi antara lain:

1) Struktur Seluler

Fungi umumnya memiliki struktur sel yang terdiri dari dinding sel yang kuat yang terbuat dari kitin, sebuah polisakarida yang juga ditemukan pada eksoskeleton serangga. Dinding sel ini memberikan dukungan struktural dan melindungi sel dari tekanan osmotik.

2) Heterotrof

Fungi mendapatkan nutrisi mereka dengan cara mengeluarkan enzim ke lingkungan mereka yang kemudian menguraikan substrat organik eksternal. Mereka kemudian menyerap produk-produk yang dipecah ini untuk digunakan sebagai sumber energi.

3) Reproduksi

Fungi dapat bereproduksi secara seksual atau aseksual, tergantung pada spesies dan kondisi lingkungan. Reproduksi seksual sering melibatkan pembentukan spora atau struktur reproduktif khusus yang menggabungkan materi genetik dari dua individu yang berbeda. Reproduksi aseksual sering terjadi melalui pembelahan sel atau fragmentasi dari struktur khusus, seperti hifa.



**Gambar 1.4.** Ilustrasi kingdom fungi

Secara ekologis, fungi juga memiliki peran yang penting dalam industri, farmasi, dan teknologi. Misalnya, beberapa jenis fungi menghasilkan antibiotik seperti penicillin yang

digunakan untuk mengobati infeksi bakteri, sementara yang lain menghasilkan enzim-enzim yang digunakan dalam proses industri seperti pembuatan keju dan minuman alkohol.

Contoh fungi mencakup berbagai kelompok, mulai dari yang bersifat uniseluler seperti ragi (*Saccharomyces cerevisiae*) yang digunakan dalam pembuatan roti dan bir, hingga jamur multiseluler seperti jamur kuping (*Auricularia auricula-judae*) yang digunakan dalam kuliner. Fungi memainkan peran penting dalam penguraian materi organik dalam ekosistem. Mereka adalah dekomposer utama yang mengurai bahan-bahan seperti daun mati, kayu busuk, dan materi organik lainnya menjadi komponen-komponen yang lebih sederhana, yang kembali tersedia untuk digunakan oleh organisme lain. Selain itu, beberapa fungi membentuk simbiosis mutualistik dengan tanaman, membantu dalam penyerapan unsur hara dari tanah.

c. *Plantae (Tumbuhan)*

Kerajaan Plantae terdiri dari organisme autotrof yang melakukan fotosintesis untuk menghasilkan makanan mereka sendiri. Plantae memiliki kloroplas yang mengandung pigmen hijau yang disebut klorofil, memungkinkan mereka menangkap energi matahari untuk mengubah karbon dioksida dan air menjadi glukosa dan oksigen. Plantae mencakup berbagai kelompok tumbuhan, mulai dari lumut yang sederhana hingga tumbuhan berbunga yang kompleks.

Kingdom Plantae memiliki beberapa ciri-ciri khas yang membedakannya dari kerajaan organisme lain dalam domain eukariotik. Berikut adalah beberapa ciri-ciri utama dari kingdom Plantae:

1) Autotrof

Organisme dalam kingdom Plantae adalah autotrof, yang berarti mereka mampu membuat makanan sendiri melalui proses fotosintesis. Mereka menggunakan energi cahaya matahari untuk



mengubah karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) menjadi gula (glukosa) dan oksigen ( $\text{O}_2$ ), dengan bantuan klorofil dalam kloroplas.

## 2) Struktur Seluler

Sel-sel tumbuhan memiliki dinding sel yang kuat dan fleksibel yang terbuat dari selulosa. Dinding sel ini memberikan dukungan struktural bagi tumbuhan dan melindungi sel-sel dari tekanan osmotik yang tinggi. Selain itu, tumbuhan memiliki organel-organel khusus seperti kloroplas untuk fotosintesis dan vakuola untuk menyimpan air dan nutrisi.

## 3) Multiseluler

Sebagian besar tumbuhan adalah multiseluler, yang berarti mereka terdiri dari lebih dari satu sel dan memiliki struktur tubuh yang terdiri dari organ-organ seperti akar, batang, dan daun. Setiap organ memiliki fungsi khusus dalam kehidupan tumbuhan, seperti akar yang menyerap air dan nutrisi, batang yang mendukung tumbuhan serta mengangkut zat antara akar dan daun, dan daun yang berfungsi sebagai tempat utama fotosintesis.

## 4) Reproduksi Seksual dan Aseksual

Tumbuhan dapat bereproduksi secara seksual melalui pembuahan, yang melibatkan penggabungan sel kelamin jantan dan betina. Selain itu, mereka juga dapat bereproduksi secara aseksual melalui pembelahan sel atau pembentukan struktur reproduktif khusus seperti tunas atau spora.

### a) *Klasifikasi Umum Plantae*

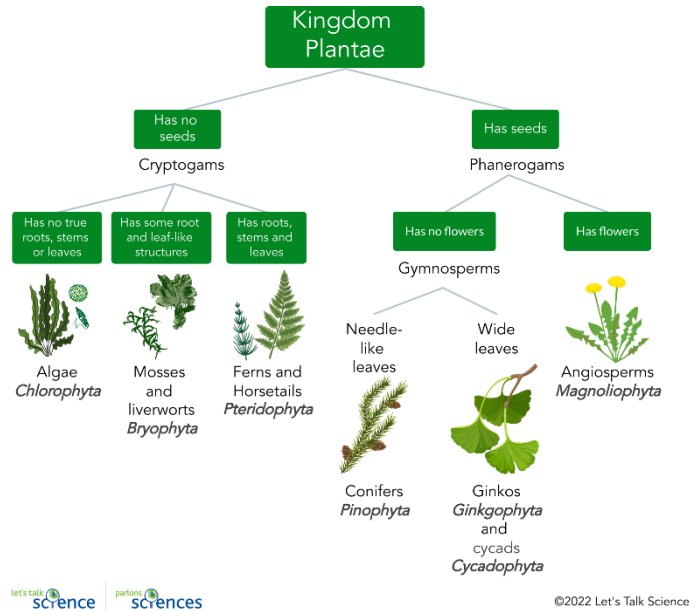
Klasifikasi dalam kingdom tumbuhan dibagi berdasarkan beberapa karakteristik utama, termasuk struktur tubuh, siklus hidup, dan perkembangbiakan. Berikut adalah klasifikasi umum dalam kingdom tumbuhan:

#### ○ Tumbuhan Lumut (Bryophyta)

Tumbuhan lumut adalah tumbuhan non-vaskular yang pertumbuhannya terbatas oleh

ukuran mereka yang kecil dan ketergantungan pada air untuk reproduksi. Mereka tidak memiliki akar, batang, atau daun yang sejati. Contoh: lumut hati (*Marchantia* spp.), lumut kerak (*Funaria* spp.).

- Tumbuhan Paku (Pteridophyta)  
Tumbuhan paku merupakan tumbuhan vaskular yang lebih kompleks dibandingkan dengan lumut. Mereka memiliki akar, batang, dan daun yang sejati. Reproduksi pada tumbuhan paku melibatkan pembentukan spora yang tersebar melalui udara. Contoh: paku kawat (*Equisetum* spp.), paku rane (*Polypodium* spp.).
- Tumbuhan Berbiji Telanjang (Gymnospermae)  
Tumbuhan gymnospermae adalah tumbuhan vaskular yang memiliki biji telanjang, artinya biji-bijinya tidak terlindungi oleh buah. Mereka memiliki struktur berbentuk cangkang yang disebut konyifer (misalnya pinus) atau struktur yang menyerupai sisik (misalnya pohon araucaria). Contoh: pinus (*Pinus* spp.), pohon cemara (*Araucaria* spp.).
- Tumbuhan Berbunga (Angiospermae)  
Tumbuhan berbunga adalah kelompok tumbuhan vaskular yang paling maju dan paling banyak. Mereka memiliki biji yang terlindungi oleh buah, yang merupakan struktur ovarium yang berkembang setelah pembuahan. Tumbuhan berbunga dikelompokkan lebih lanjut berdasarkan struktur bunga, siklus hidup, dan morfologi. Contoh: bunga matahari (*Helianthus annuus*), padi (*Oryza sativa*), mawar (*Rosa* spp.).



**Gambar 1.5.** Ilustrasi kingdom plantae

*b) Pentingnya Anatomi dan Fisiologi Tumbuhan*

Anatomi dan fisiologi tumbuhan memainkan peran krusial dalam memahami bagaimana tumbuhan berfungsi, beradaptasi, dan berinteraksi dengan lingkungannya. Anatomi tumbuhan mempelajari struktur internal dan eksternal tumbuhan, termasuk organ-organ seperti akar, batang, daun, dan bunga. Ini mencakup studi tentang bagaimana sel-sel tumbuhan tersusun, bagaimana mereka berinteraksi satu sama lain, dan bagaimana struktur ini memengaruhi fungsi tumbuhan.

Adapun fisiologi tumbuhan mempelajari fungsi atau proses biokimia yang terjadi di dalam tumbuhan. Ini termasuk studi tentang bagaimana tumbuhan mengambil air dan nutrisi dari tanah, bagaimana mereka menggunakan energi cahaya untuk fotosintesis, serta bagaimana mereka beradaptasi terhadap kondisi lingkungan seperti kekeringan atau suhu ekstrem.

Berikut adalah beberapa alasan mengapa anatomi dan fisiologi tumbuhan sangat penting:

1) Adaptasi Terhadap Lingkungan

Tumbuhan memiliki struktur anatomi yang khusus disesuaikan dengan lingkungannya. Misalnya, daun tumbuhan memiliki berbagai adaptasi untuk menangkap cahaya matahari yang diperlukan untuk fotosintesis, seperti bentuk, ukuran, dan struktur permukaan daun yang berbeda-beda. Anatomi juga mempengaruhi kemampuan tumbuhan dalam menahan tekanan osmotik dan mengatur keseimbangan air di dalam sel-selnya, yang penting dalam menghadapi perubahan cuaca dan kondisi tanah.

2) Proses Fotosintesis

Fotosintesis adalah proses biokimia yang melibatkan konversi energi cahaya menjadi energi kimia dalam bentuk gula (glukosa). Anatomi tumbuhan, seperti kloroplas di dalam sel daun, mendukung proses ini dengan menampung klorofil, pigmen hijau yang memungkinkan tumbuhan menangkap energi dari cahaya matahari. Struktur daun yang kompleks dengan pembuluh pengangkut air dan nutrisi (xilem dan floem) juga membantu dalam mengangkut bahan-bahan yang diperlukan untuk fotosintesis ke sel-sel tumbuhan.

3) Transportasi Air dan Nutrisi

Anatomi tumbuhan, khususnya sistem vaskularnya, memungkinkan untuk transportasi efisien air dan nutrisi dari akar hingga ke seluruh bagian tumbuhan. Xilem mengangkut air dan mineral dari akar ke daun, sementara floem mengangkut hasil fotosintesis seperti glukosa ke bagian-bagian lain dari tumbuhan. Ini penting untuk pertumbuhan, metabolisme, dan pembentukan struktur tumbuhan yang kuat.

4) Reproduksi dan Perkembangan

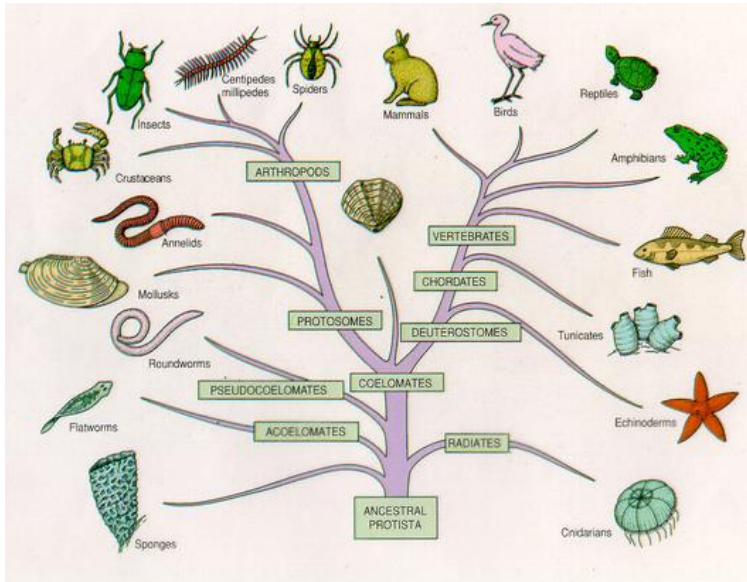
Anatomi tumbuhan juga memainkan peran penting dalam proses reproduksi dan perkembangan. Misalnya, bunga memiliki struktur yang kompleks yang berperan dalam menarik penyerbuk dan menghasilkan biji setelah pembuahan. Sel-sel meristem di ujung akar dan batang bertanggung jawab atas pertumbuhan primer dan sekunder tumbuhan, serta pembentukan jaringan baru yang mendukung pertumbuhan dan perkembangan.

5) Interaksi Simbiosis dan Perlindungan

Beberapa struktur anatomi tumbuhan, seperti akar dan rambut akar, memfasilitasi hubungan simbiosis dengan mikroorganisme tanah seperti bakteri dan jamur mikoriza. Simbiosis ini membantu tumbuhan mendapatkan nutrisi tambahan atau perlindungan dari patogen tanah. Selain itu, beberapa tumbuhan juga mengembangkan struktur anatomi khusus, seperti trikhoma dan sel-sel epidermis dengan dinding tebal, untuk melindungi diri dari serangan hama dan penyakit.

d. *Animalia*

Kerajaan Animalia terdiri dari organisme heterotrof yang memperoleh energi dengan mengonsumsi bahan organik dari organisme lain. Kelompok organisme ini sangat beragam dan kompleks dalam keragaman bentuk, struktur, dan perilaku, mulai dari hewan bersel tunggal seperti protozoa hingga hewan multiseluler yang sangat kompleks seperti manusia dan mamalia lainnya. Selain itu, organisme ini memiliki kemampuan untuk bergerak aktif untuk mencari makanan, bereproduksi, dan beradaptasi dengan lingkungan mereka.



**Gambar 1.6.** Ilustrasi kingdom animalia

Adapun ciri-ciri organisme yang termasuk ke dalam kerajaan Animalia antara lain:

1) Struktur Multiseluler

Hewan-hewan terdiri dari banyak sel yang telah mengalami spesialisasi untuk membentuk jaringan-jaringan yang berbeda dan organ-organ kompleks. Misalnya, jaringan otot untuk gerakan, sistem saraf untuk koordinasi, dan jaringan pencernaan untuk pemrosesan makanan.

2) Heterotrof

Hewan-hewan adalah organisme heterotrof, yang berarti mereka memperoleh nutrisi dari materi organik lainnya. Mereka dapat menjadi karnivora (pemakan daging), herbivora (pemakan tumbuhan), omnivora (pemakan segala), atau detritivora (pemakan materi organik mati).

3) Reproduksi Seksual

Umumnya, hewan-hewan bereproduksi secara seksual, di mana gamet jantan dan betina bergabung untuk membentuk zigot yang kemudian berkembang

menjadi embrio. Namun, ada juga hewan-hewan yang bereproduksi secara aseksual.

4) Gerakan Aktif

Sebagian besar hewan memiliki kemampuan untuk bergerak secara aktif untuk mencari makanan, menghindari pemangsa, atau menemukan pasangan untuk berkembang biak.

5) Sistem Pencernaan

Hewan-hewan memiliki sistem pencernaan yang berkembang dengan baik, yang terdiri dari mulut, lambung, usus, dan anus. Sistem ini mengizinkan pencernaan makanan untuk mendapatkan energi dan nutrisi yang diperlukan.

6) Sistem Saraf

Hewan-hewan memiliki sistem saraf yang kompleks yang terdiri dari otak, sumsum tulang belakang, dan saraf-saraf perifer. Sistem saraf ini memungkinkan hewan untuk merasakan rangsangan dari lingkungan mereka, bergerak, dan merespons dengan cara yang sesuai.

Kingdom Animalia mencakup lebih dari 1,5 juta spesies yang sudah diidentifikasi, termasuk berbagai kelompok seperti mamalia, burung, reptil, amfibi, ikan, serangga, dan banyak lagi. Contoh hewan-hewan yang mewakili keragaman kingdom Animalia antara lain:

Mamalia: Manusia (*Homo sapiens*), singa (*Panthera leo*), gajah (*Elephas maximus*).

Burung: Elang (*Aquila chrysaetos*), burung hantu (*Bubo bubo*), kolibri (Trochilidae).

Reptil: Ular piton (*Python reticulatus*), kura-kura belimbing (*Chelonia mydas*), buaya nil (*Crocodylus niloticus*).

Amfibi: Katak pohon (*Hyla cinerea*), salamander (Salamandridae).

Ikan: Lele (*Clarias gariepinus*), ikan koi (*Cyprinus carpio*), hiu putih besar (*Carcharodon carcharias*).

Serangga: Semut (Formicidae), ngengat (Lepidoptera), capung (Odonata).

### **1.3 Pertumbuhan dan Perkembangan Sel**

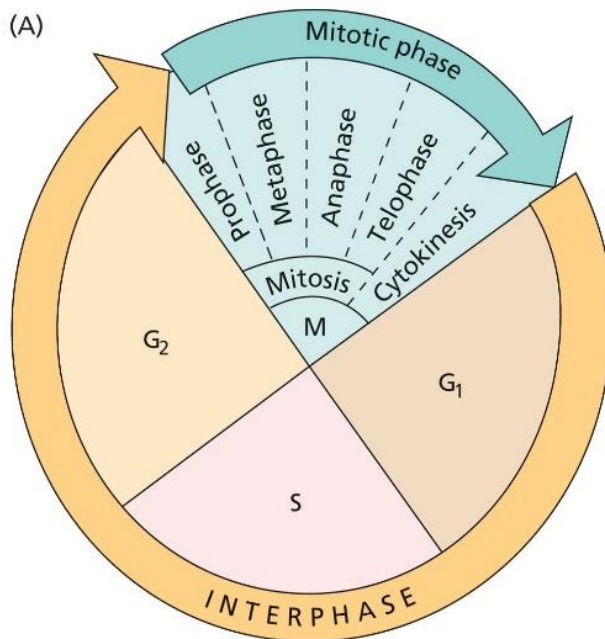
Pertumbuhan dan perkembangan sel adalah proses fundamental dalam biologi yang mengatur bagaimana sel-sel individu berkembang biak dan berfungsi dalam organisme multiselular. Dari perspektif biologis, pemahaman mendalam tentang bagaimana sel tumbuh, berkembang, dan berdiferensiasi menjadi berbagai jenis sel yang spesifik adalah kunci dalam memahami struktur dan fungsi organisme secara keseluruhan.

#### **1.3.1 Pertumbuhan Sel**

Pertumbuhan sel mengacu pada peningkatan ukuran dan jumlah sel individu. Proses ini terjadi melalui serangkaian tahapan yang terkoordinasi dengan presisi. Pada tingkat seluler, pertumbuhan terdiri dari beberapa fase utama:

1. Fase G1 (Gap 1): Sel mengalami pertumbuhan aktif dan mempersiapkan diri untuk replikasi DNA.
2. Fase S (Synthesis): Sel-sel menggandakan DNA mereka secara tepat.
3. Fase G2 (Gap 2): Persiapan terakhir sebelum mitosis, termasuk sintesis protein dan pembelahan organel.
4. Fase M (Mitosis): Pembelahan sel yang melibatkan pembagian inti sel dan pembagian sitoplasma (sitokinesis), menghasilkan dua sel anak identik.





**Gambar 1.7.** Ilustrasi siklus sel dalam pertumbuhan

Proses ini diatur oleh sejumlah besar protein dan molekul sinyal yang memastikan bahwa setiap tahap terjadi pada waktu yang tepat dan dengan tingkat presisi yang tinggi. Dalam konteks pertumbuhan sel, regulasi siklus sel adalah kunci, dengan mekanisme pengawasan yang ketat untuk mencegah pembelahan sel tidak terkendali.

### 1.3.2 Perkembangan Sel

Perkembangan sel melibatkan diferensiasi sel, di mana sel-sel yang berasal dari nenek moyang yang sama dapat mengadopsi identitas dan fungsi yang berbeda. Proses ini dimulai dari sel telur yang dibuahi dan embrio yang berkembang, di mana sel-sel awal secara bertahap mengalami diferensiasi menjadi berbagai jenis sel yang spesifik untuk membentuk berbagai jaringan dan organ dalam tubuh.

Adapun yang termasuk dalam proses perkembangan sel antara lain:

1. Diferensiasi Sel

Proses di mana sel-sel mengadopsi jalur perkembangan tertentu dan mengekspresikan gen-gen tertentu untuk menghasilkan produk gen yang spesifik.

2. Organogenesis

Pembentukan organ dari berbagai jenis sel yang berbeda, melalui interaksi yang rumit antara sel-sel dan lingkungan mereka.

3. Morfogenesis

Proses di mana sel-sel mengadopsi bentuk dan struktur tertentu untuk membentuk organ dan struktur tubuh yang lebih besar.

Dalam perkembangan embrio, sinyal-sinyal molekuler, seperti faktor pertumbuhan, morfogen, dan molekul adhesi seluler, memainkan peran penting dalam mengatur diferensiasi dan perkembangan sel. Regulasi genetik yang ketat memastikan bahwa sel-sel mengikuti jalur perkembangan yang benar dan berkontribusi pada pembentukan organisme yang sehat.

### **1.3.3 Regulasi Seluler dalam Pertumbuhan dan Perkembangan**

Regulasi pertumbuhan dan perkembangan sel melibatkan sejumlah proses yang kompleks dan terkoordinasi:

1. Sinyal Seluler

Molekul sinyal, seperti faktor pertumbuhan, hormon, dan sinyal intraseluler, mengatur proses-proses seluler seperti proliferasi, diferensiasi, dan apoptosis.

2. Transduksi Sinyal

Mekanisme di mana sinyal eksternal diubah menjadi respon seluler melalui serangkaian langkah intermediat, seperti kaskade protein kinase.

3. Ekspresi Genetik

Pengaturan ekspresi gen secara tepat melalui berbagai mekanisme, termasuk pengaturan transkripsi dan translasi.

#### 4. Siklus Sel

Pengawasan ketat pada siklus sel untuk memastikan bahwa sel hanya membelah saat diperlukan dan dalam kondisi yang sesuai.

Perkembangan embrio adalah salah satu contoh paling menonjol dari regulasi kompleks pertumbuhan dan perkembangan sel. Proses ini melibatkan berbagai tahapan yang teratur, termasuk pembentukan lapisan blastosit awal, diferensiasi sel-sel dalam tiga lapisan germinal utama (ektoderm, mesoderm, endoderm), dan pembentukan struktur tubuh yang lebih kompleks seperti jaringan, organ, dan sistem.

1. Pola Pembelahan: Pembelahan sel-sel embrio yang berbeda menghasilkan lapisan-lapisan dan struktur-struktur tertentu sesuai dengan program genetik yang telah ditetapkan.
2. Induksi: Proses di mana satu kelompok sel mempengaruhi perkembangan kelompok sel lain, misalnya, pembentukan sistem saraf melalui induksi dari ektoderm oleh mesoderm.
3. Pola Morfogenetik: Molekul-molekul seperti morfogen membentuk pola yang kompleks dalam perkembangan embrio, mengatur jalur-jalur perkembangan yang berbeda.

#### **1.3.4 Regulasi Genetik dalam Pertumbuhan dan Perkembangan**

Regulasi genetik adalah kunci dalam mengatur pertumbuhan dan perkembangan sel. Berbagai mekanisme mengontrol ekspresi gen, termasuk:

1. Faktor Transkripsi  
Protein-protein yang mengatur transkripsi gen, seperti faktor transkripsi spesifik dan kompleks pengaturan transkripsi.
2. Modifikasi Kromatin  
Perubahan struktur kromatin yang mempengaruhi ketersediaan akses gen untuk transkripsi.
3. Interaksi Protein-Protein  
Interaksi kompleks antara berbagai protein dalam jalur-jalur regulasi yang mengatur aktivitas genetik.

#### 4. Epigenetika

Modifikasi epigenetik, seperti metilasi DNA dan modifikasi histon, yang mempengaruhi stabilitas dan aksesibilitas gen.

### **1.3.5 Faktor Eksternal dalam Pertumbuhan dan Perkembangan**

Faktor-faktor eksternal juga memainkan peran penting dalam mengatur pertumbuhan dan perkembangan sel. Adapun faktor-faktor tersebut antara lain:

1. Nutrisi: Ketersediaan nutrisi seperti glukosa, asam amino, dan vitamin yang diperlukan untuk sintesis protein dan pembelahan sel.
2. Sinyal Molekuler: Sinyal eksternal seperti faktor pertumbuhan, hormon, dan molekul sinyal lainnya yang mengatur respons seluler.
3. Matriks Ekstraseluler: Struktur dan komposisi matriks ekstraseluler yang memberikan dukungan fisik dan mengatur interaksi sel-sel.

## **1.4 Pertumbuhan dan Perkembangan Sel Tumbuhan**

Pertumbuhan dan perkembangan sel tumbuhan adalah proses yang kompleks dan sangat teratur, yang memungkinkan tumbuhan untuk tumbuh, berkembang, dan beradaptasi dengan lingkungan mereka. Proses ini melibatkan berbagai mekanisme biologi yang diatur oleh sinyal genetik, hormonal, dan lingkungan. Dalam artikel ini, kita akan membahas pertumbuhan dan perkembangan sel tumbuhan, termasuk regulasi hormonal, diferensiasi sel, serta beberapa contoh spesifik dari anatomi dan fisiologi tumbuhan.

Pertumbuhan sel tumbuhan mencakup dua aspek utama: pertumbuhan primer dan pertumbuhan sekunder.

### **1.4.1 Pertumbuhan Primer**

Pertumbuhan primer tumbuhan adalah proses di mana tumbuhan mengalami pemanjangan, baik pada akar maupun batangnya, yang memungkinkan mereka untuk menjelajahi

lingkungan mereka dan meningkatkan penyerapan air serta nutrisi. Pertumbuhan ini terjadi di daerah meristem apikal, yaitu pada ujung akar dan tunas. Meristem apikal adalah jaringan yang terdiri dari sel-sel yang aktif membelah, yang menghasilkan pertumbuhan panjang atau vertikal pada tumbuhan.

1. Terjadi di meristem apikal (ujung akar dan tunas).
2. Menghasilkan pemanjangan akar dan batang.
3. Melibatkan pembelahan sel di meristem apikal dan pemanjangan sel-sel baru yang dihasilkan.
4. Membentuk jaringan dasar seperti epidermis, korteks, dan jaringan vaskular.

#### Contoh : Zona Pertumbuhan di Akar

Pada akar, pertumbuhan primer dapat dibagi menjadi beberapa zona utama, masing-masing dengan fungsi dan aktivitas spesifik:

1. Zona Pembelahan Sel
  - a. Terletak di ujung akar, di mana meristem apikal berada.
  - b. Sel-sel di zona ini aktif membelah secara mitosis.
2. Zona Pemanjangan
  - a. Terletak di belakang zona pembelahan.
  - b. Sel-sel di zona ini mengalami pemanjangan yang cepat.
3. Zona Diferensiasi (Zona Maturasi):
  - a. Terletak di belakang zona pemanjangan.
  - b. Sel-sel di zona ini berdiferensiasi menjadi berbagai jenis sel fungsional.
  - c. Di sini, sel-sel epidermis membentuk rambut akar yang membantu penyerapan air dan nutrisi.

Pertumbuhan primer pada tumbuhan diketahui merupakan proses penting dan kompleks, melibatkan pembelahan sel, pemanjangan sel, dan diferensiasi sel di meristem apikal. Hormon tumbuhan seperti auksin, giberelin, sitokinin, dan etilen memainkan peran kunci dalam mengatur proses ini. Pemahaman tentang mekanisme pertumbuhan primer sangat penting untuk aplikasi praktis dalam pertanian dan hortikultura, memungkinkan

pengelolaan yang lebih baik terhadap tanaman dan peningkatan produktivitas.

#### **1.4.2 Pertumbuhan Sekunder**

Pertumbuhan sekunder pada tumbuhan adalah proses di mana batang dan akar tumbuhan mengalami penambahan ketebalan atau diameter. Proses ini sangat penting bagi tumbuhan berkayu, seperti pohon dan semak, yang memerlukan struktur kuat untuk menopang tubuh mereka yang besar dan untuk mendukung transportasi air dan nutrisi. Pertumbuhan sekunder terutama terjadi di jaringan meristem lateral, yaitu kambium vaskular dan kambium gabus.

Pertumbuhan sekunder melibatkan dua jenis meristem lateral:

1. Kambium Vaskular
  - a. Bertanggung jawab atas pembentukan jaringan vaskular sekunder.
  - b. Menghasilkan xilem sekunder (ke arah dalam) dan floem sekunder (ke arah luar).
  - c. Xilem sekunder membentuk kayu, sementara floem sekunder membentuk bagian dari kulit kayu.
2. Kambium Gabus (Felogen):
  - a. Bertanggung jawab atas pembentukan lapisan pelindung sekunder yang disebut periderm.
  - b. Menghasilkan sel-sel gabus (ke arah luar) yang menggantikan epidermis yang rusak atau terkelupas.
  - c. Membentuk bagian dari kulit kayu yang lebih luar dan membantu melindungi tumbuhan dari kehilangan air dan serangan patogen.

#### *Contoh Pertumbuhan Sekunder pada Tumbuhan Berkayu*

Pohon: Pada pohon, pertumbuhan sekunder menghasilkan lingkaran tahun pada batang, yang dapat digunakan untuk menentukan umur pohon. Setiap lingkaran tahun terdiri dari xilem sekunder yang diproduksi selama musim pertumbuhan (*springwood*) dan xilem sekunder yang diproduksi selama musim dorman (*summerwood*).

Semak: Pada semak, pertumbuhan sekunder membantu memperkuat batang yang lebih besar dan mendukung struktur tanaman yang lebih kompleks. Semak juga membentuk periderm yang melindungi dari kondisi lingkungan yang keras.

Pertumbuhan sekunder pada tumbuhan adalah proses penting yang melibatkan penambahan ketebalan pada batang dan akar, yang terjadi di jaringan meristem lateral seperti kambium vaskular dan kambium gabus. Proses ini menghasilkan xilem sekunder (kayu) dan floem sekunder (bagian dari kulit kayu), serta periderm yang melindungi tumbuhan. Regulasi hormonal memainkan peran penting dalam mengatur aktivitas meristem lateral dan pertumbuhan sekunder.

## **1.5 Kesimpulan**

Bentuk-bentuk kehidupan di Bumi sangat beragam, mencakup segala sesuatu mulai dari organisme uniseluler sederhana seperti bakteri dan archaea hingga organisme multiseluler kompleks seperti tumbuhan, hewan, dan manusia. Setiap organisme memiliki struktur dan fungsi yang unik yang memungkinkan mereka untuk beradaptasi dan bertahan hidup di lingkungan mereka masing-masing. Keanekaragaman ini tidak hanya mencerminkan berbagai strategi evolusi tetapi juga memperlihatkan kemampuan luar biasa dari sel sebagai unit dasar kehidupan untuk berorganisasi dan berspesialisasi menjadi berbagai bentuk dan fungsi yang beragam.

Pertumbuhan dan perkembangan sel adalah proses yang sangat teratur dan kompleks yang memungkinkan organisme untuk tumbuh, berkembang, dan beradaptasi. Pada tumbuhan, pertumbuhan primer melibatkan pemanjangan akar dan batang melalui aktivitas meristem apikal, sedangkan pertumbuhan sekunder melibatkan penambahan ketebalan batang dan akar melalui aktivitas kambium vaskular dan kambium gabus. Hormon tumbuhan seperti auksin, giberelin, sitokinin, dan etilen memainkan peran kunci dalam mengatur proses ini, memastikan bahwa sel-sel baru dibentuk, memanjang, dan berdiferensiasi sesuai kebutuhan tumbuhan.

Pemahaman mendalam tentang pertumbuhan dan perkembangan sel tidak hanya penting untuk ilmu biologi tetapi juga memiliki implikasi praktis yang signifikan dalam bidang pertanian, hortikultura, dan kehutanan. Melalui pemahaman ini, kita dapat mengembangkan teknik-teknik untuk meningkatkan produktivitas tanaman, memperbaiki kualitas tanaman, dan mengelola sumber daya alam dengan lebih efektif. Dengan demikian, studi tentang bentuk-bentuk kehidupan serta pertumbuhan dan perkembangan sel memberikan wawasan yang mendalam tentang mekanisme fundamental kehidupan dan aplikasi praktis untuk mendukung kesejahteraan manusia dan kelestarian lingkungan.



## DAFTAR PUSTAKA

- Alberts, B., Bray, D., Hopkin, K., Johnson, A. D., Lewis, J., Raff, M., ... & Walter, P. (2009). *Essential Cell Biology* (3rd ed.). Garland Science.
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2014). *Molecular Biology of the Cell* (6th ed.). Garland Science.
- Bar, M., & Ori, N. (2019). *The Role of Gibberellins in Plant Development. Plant Hormones: Biosynthesis, Signal Transduction, Action!* (4th ed.). Springer.
- Berg, J. M., Tymoczko, J. L., Gatto Jr., G. J., & Stryer, L. (2015). *Biochemistry* (8th ed.). W.H. Freeman and Company.
- Bruce, A. L. (2018). *Cell and Molecular Biology: Concepts and Experiments* (8th ed.). Wiley.
- Buchanan, B. B., Gruissem, W., & Jones, R. L. (2015). *Biochemistry and Molecular Biology of Plants* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Burki, F., et al. (2020). "The new tree of eukaryotes." *Trends in Ecology & Evolution*, 35(1), 43-55. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.08.008>
- Campbell, N. A., & Reece, J. B. (2005). *Biology* (7th ed.). Benjamin Cummings.
- Campbell, N.A., Reece, J.B., Urry, L.A., Cain, M.L., Wasserman, S.A., Minorsky, P.V., and Jackson, R.B. (2014). *Biology*. Pearson.
- Cavicchioli, R., et al. (2019). "Challenges and opportunities for the study of extremophiles." *Nature Reviews Microbiology*, 17(11), 530-541.
- Christenhusz, M. J. M., & Byng, J. W. (2016). "The number of known plant species in the world and its annual increase." *Phytotaxa*, 261(3), 201-217. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.261.3.1>.
- Davies, P. J. (2010). *Plant Hormones: Biosynthesis, Signal Transduction, Action!* (3rd ed.). Springer.
- Fox, D. T., & Duronio, R. J. (2020). *The Cell Cycle: Principles of Control* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Franklin-Tong, V. E. (2019). *Self-Incompatibility in Flowering Plants: Evolution, Diversity, and Mechanisms*. Springer.

- Hartl, D. L., & Jones, E. W. (2009). *Genetics: Analysis of Genes and Genomes* (7th ed.). Jones & Bartlett Learning.
- Hawksworth, D. L., & Lücking, R. (2017). "Fungal Diversity Revisited: 2.2 to 3.8 Million Species." *Microbiology Spectrum*, 5(4). <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.FUNK-0052-2016>
- Held, L. I. (2021). *Imaginal Discs: The Genetic and Cellular Logic of Pattern Formation* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Hickman Jr., C.P., Roberts, L.S., Keen, S.L., Larson, A., l'Anson, H., and Eisenhour, D.J. (2012). *Integrated Principles of Zoology*. McGraw-Hill Education.
- Hopkin, K., Johnson, A. D., Raff, M., & Roberts, K. (2007). *Molecular Biology of the Gene* (6th ed.). Cold Spring Harbor Laboratory Press.
- Hopkins, W. G., & Hüner, N. P. A. (2008). *Introduction to Plant Physiology* (4th ed.). Wiley.
- Hug, L. A., et al. (2016). "A new view of the tree of life." *Nature Microbiology*, 1(5), 16048. <https://doi.org/10.1038/nmicrbiol.2016.48>
- Jones, R. L., Ougham, H., Thomas, H., & Waaland, S. (2012). *The Molecular Life of Plants*. Wiley-Blackwell.
- Kang, J., Mehta, S., & Federoff, H. J. (2016). *Genomics and Epigenomics of the Brain*. Springer.
- Karp, G. (2013). *Cell and Molecular Biology: Concepts and Experiments* (7th ed.). Wiley.
- Larcher, W. (2003). *Physiological Plant Ecology* (4th ed.). Springer.
- Lewin, B. (2008). *Genes IX*. Jones & Bartlett Learning.
- Li, C., & Liu, Z. (2020). *Plant Developmental Biology*. Springer.
- Lodish, H., Berk, A., Kaiser, C. A., Krieger, M., Bretscher, A., Ploegh, H., & Matsudaira, P. (2008). *Molecular Cell Biology* (6th ed.). W.H. Freeman and Company.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Bender, K., Buckley, D., & Stahl, D. (2014). *Brock Biology of Microorganisms*. 14th Edition. Pearson.
- Mauseth, J. D. (2014). *Botany: An Introduction to Plant Biology* (5th ed.). Jones & Bartlett Learning.
- Merchant, S. S., Briggs, W. R., & Ort, D. (2020). *Annual Review of Plant Biology* (Vol. 71). Annual Reviews.

- Murphy, A., Smith, S. M., & Wilson, N. (2019). *Plant Physiology and Development* (7th ed.). Oxford University Press.
- Parks, D. H., et al. (2020). "A complete domain-to-species taxonomy for Bacteria and Archaea." *Nature Biotechnology*, 38, 1079–1086. <https://doi.org/10.1038/s41587-020-0501-8>
- Pierik, R., & Testerink, C. (2014). *Plant Development and Stress Signaling*. Springer.
- Raven, P. H., Evert, R. F., & Eichhorn, S. E. (2005). *Biology of Plants* (7th ed.). W.H. Freeman and Company.
- Roberts, K. (2021). *Handbook of Plant Science*. Wiley.
- Sadava, D., Hillis, D. M., Heller, H. C., & Berenbaum, M. R. (2014). *Life: The Science of Biology* (10th ed.). Sinauer Associates.
- Sass, J. E. (1958). *Botanical Microtechnique*. Iowa State University Press.
- Smith, A. M., Coupland, G., Dolan, L., & Harberd, N. P. (2010). *Plant Biology* (2nd ed.). Garland Science.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology* (5th ed.). Sinauer Associates.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2018). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Oxford University Press.
- Ulijasz, A. T., & Vierstra, R. D. (2020). *Light Sensing in Plants: Mechanisms and Applications*. Springer.
- Van Niftrik, L., & Jetten, M. S. M. (2012). "Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria: Unique Microorganisms with Exceptional Properties." *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 76(3), 585-596.
- Wang, Z. Y., & Wang, Z. Y. (2021). *Brassinosteroids: Plant Growth and Development*. Springer.
- West-Eberhard, M. J. (2003). *Developmental Plasticity and Evolution*. Oxford University Press.
- Woese, C. R., Kandler, O., & Wheelis, M. L. (1990). "Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87(12), 4576-4579.
- Zhang, J., & Yu, J. (2019). *Epigenetics in Plants of Agronomic Importance: Fundamentals and Applications*. Springer.



# **BAB 2**

## **KONSEP JARINGAN PADA TUMBUHAN**

*Oleh Muhammad Rifqi Hariri*

### **2.1 Pendahuluan**

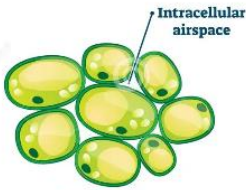
Jaringan tumbuhan merupakan komponen integral dalam struktur dan fungsi organisme tumbuhan. Terdiri dari beberapa jenis, jaringan tumbuhan utama adalah jaringan meristem dan jaringan dewasa (Gambar 2.1). Jaringan meristem merupakan area aktif pertumbuhan, terdiri dari meristem apikal (di ujung akar dan tunas), meristem lateral (di batang dan akar), dan meristem interkalari (di daun). Jaringan ini bertanggung jawab untuk pertumbuhan sekunder dan diferensiasi sel (Oguchi *et al.*, 2018). Di sisi lain, jaringan dewasa dibagi menjadi jaringan epidermis, jaringan parenkim, dan jaringan pengangkut (Machado & Oliveira, 2024). Jaringan epidermis melindungi permukaan luar tumbuhan dan membantu dalam penyerapan nutrisi serta mengatur transpirasi. Jaringan parenkim adalah jaringan penyimpanan dan pengisi yang dapat ditemukan di seluruh tumbuhan, sedangkan jaringan pengangkut, seperti xilem dan floem, bertanggung jawab atas transportasi air, nutrisi, dan zat organik ke seluruh tumbuhan. Terakhir, jaringan pelindung terdiri dari stomata dan trikoma, yang membantu dalam pertukaran gas dan menjaga kelembaban. Secara kolektif, jaringan tumbuhan memungkinkan tumbuhan untuk bertahan, tumbuh, dan bereproduksi dengan efisien dalam berbagai lingkungan.

# TYPES OF PLANT TISSUE

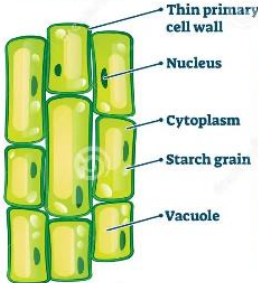
## Parenchyma tissue



Potato



Cross section



Longitudinal

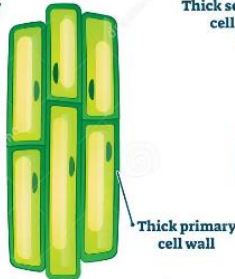
## Collenchyma tissue



Celery



Cross section

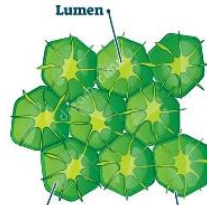


Longitudinal

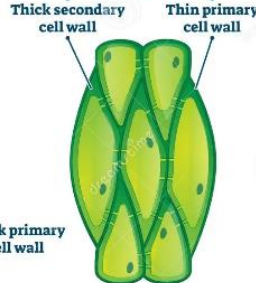
## Sclerenchyma tissue



Pear



Cross section



Longitudinal

dreamstime.com

ID 185358492 © VectorMine

Gambar 2. 1. Contoh Jaringan Pada Tumbuhan

(Sumber : VectorMine, 2020)

## 2.2 Jaringan Meristem

Jaringan meristem tumbuhan merupakan jaringan yang sangat penting karena bertanggung jawab atas pertumbuhan primer dan diferensiasi sel-sel yang membentuk organisme tumbuhan (Bradamante *et al.*, 2021). Jaringan meristem terdiri dari sel-sel yang belum diferensiasi sepenuhnya dan tetap aktif dalam melakukan pembelahan sel, sehingga memungkinkan pertumbuhan tumbuhan secara kontinyu. Ada beberapa jenis jaringan meristem yang berperan dalam pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan,

termasuk meristem apikal, meristem lateral, dan meristem interkalari.

Meristem apikal merupakan jaringan meristem yang terletak di ujung batang dan tunas tumbuhan (Oguchi *et al.*, 2018). Meristem ini bertanggung jawab atas pertumbuhan panjang tumbuhan, baik itu pertumbuhan batang ke atas (pertumbuhan ortotropik) maupun pertumbuhan tunas ke samping (pertumbuhan plagiotropik). Meristem apikal terdiri dari dua bagian utama, yaitu meristem tunas yang terletak di ujung tunas dan meristem akar yang terletak di ujung akar (Bradamante *et al.*, 2021). Pembelahan sel yang terjadi di meristem apikal akan menghasilkan sel-sel baru yang kemudian akan berdiferensiasi menjadi berbagai jenis jaringan seperti epidermis, parenkim, floem, dan xilem.

Selain meristem apikal, meristem lateral juga memainkan peran penting dalam pertumbuhan tumbuhan. Meristem lateral, juga dikenal sebagai meristem kambium, terletak di antara xilem dan floem dalam batang dan akar tumbuhan (Bradamante *et al.*, 2021). Meristem ini bertanggung jawab atas pertumbuhan sekunder tumbuhan, yang melibatkan penambahan diameter batang dan akar. Sel-sel yang terdapat di meristem lateral membelah secara radial, menghasilkan sel-sel xilem ke arah dalam dan sel-sel floem ke arah luar (Fukuda & Ohashi-Ito, 2019). Proses ini menyebabkan pembentukan cincin tahunan pada batang pohon yang terlihat dalam potongan lintang kayu.

Selain dua jenis meristem utama tersebut, ada juga meristem interkalari yang terdapat di bagian pangkal daun pada tumbuhan dikotil (Bradamante *et al.*, 2021). Meristem interkalari bertanggung jawab atas pertumbuhan panjang daun dan batang pada tumbuhan. Meristem ini memungkinkan daun untuk terus tumbuh seiring pertumbuhan tumbuhan secara keseluruhan. Meristem interkalari memainkan peran penting dalam menyesuaikan morfologi tumbuhan dengan lingkungan sekitarnya, terutama dalam merespons terhadap cahaya dan gravitasi.

Sel-sel yang terdapat di dalam jaringan meristem memiliki sifat-sifat khusus yang membedakannya dari sel-sel jaringan dewasa (Bradamante *et al.*, 2021). Salah satu sifat yang paling menonjol adalah kemampuan untuk terus melakukan pembelahan sel. Sel-sel

meristem bersifat totipoten, yang berarti bahwa setiap sel meristem memiliki kemampuan untuk berdiferensiasi menjadi berbagai jenis sel tumbuhan yang berbeda. Sel-sel ini juga memiliki nukleus yang besar dan sitoplasma yang kaya akan organel-organel yang diperlukan untuk melakukan pembelahan sel dengan cepat dan efisien (Fukuda & Ohashi-Ito, 2019).

Selain itu, sel-sel meristem juga memiliki dinding sel yang tipis dan tidak terlignifikasi secara penuh (Kitagawa & Jackson, 2019). Hal ini memungkinkan sel-sel meristem untuk melakukan pembelahan sel dengan lebih mudah dan cepat. Selain itu, sel-sel meristem juga mengandung kloroplas yang memungkinkan mereka untuk melakukan fotosintesis, yang memberikan energi yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perkembangan sel.

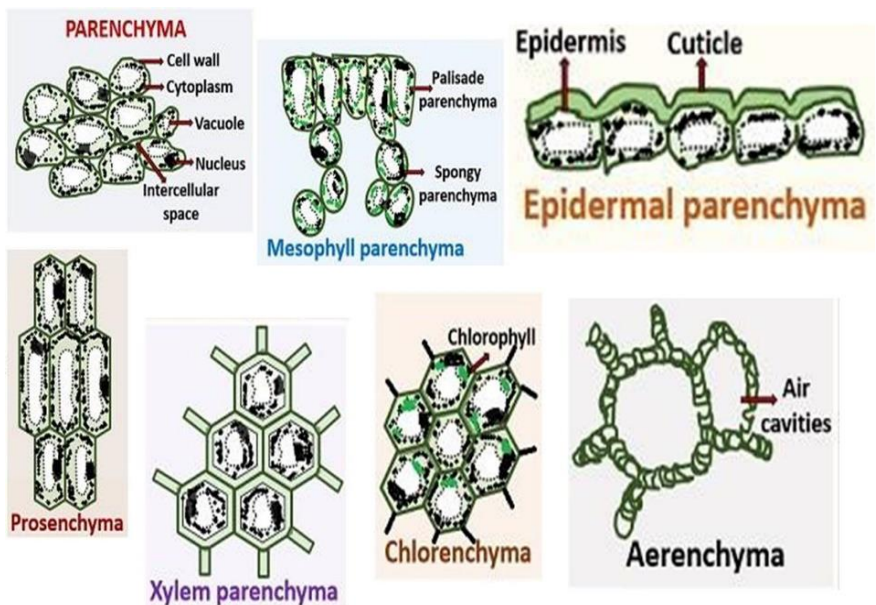
Proses pembelahan sel di dalam jaringan meristem tumbuhan dapat terjadi melalui dua mekanisme utama, yaitu pembelahan sel meristematis dan pembelahan sel determinan (Kitagawa & Jackson, 2019). Pembelahan sel meristematis terjadi di dalam sel-sel meristem yang belum terdiferensiasi sepenuhnya. Proses ini menghasilkan dua sel anak yang sama-sama tetap aktif dalam melakukan pembelahan sel dan berpotensi untuk berdiferensiasi menjadi berbagai jenis sel tumbuhan (Fukuda & Ohashi-Ito, 2019). Di sisi lain, pembelahan sel determinan terjadi di dalam sel-sel meristem yang telah mengalami diferensiasi parsial. Proses ini menghasilkan satu sel anak yang tetap aktif dalam melakukan pembelahan sel dan satu sel anak yang telah berdiferensiasi menjadi jenis sel tumbuhan tertentu.

Sel-sel yang dihasilkan melalui pembelahan sel di dalam jaringan meristem akan mengalami diferensiasi selama pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan (Kitagawa & Jackson, 2019). Proses diferensiasi ini melibatkan perubahan morfologi, struktur, dan fungsi sel-sel yang membuatnya menjadi spesifik untuk melakukan fungsi tertentu dalam organisme tumbuhan. Misalnya, sel-sel yang terdapat di dalam meristem apikal akan berdiferensiasi menjadi berbagai jenis jaringan seperti epidermis, parenkim, floem, dan xilem yang membentuk berbagai bagian tumbuhan seperti batang, daun, dan akar.



## 2.3 Jaringan Parenkim

Jaringan parenkim merupakan salah satu jenis jaringan dasar dalam tumbuhan yang memiliki peran penting dalam berbagai fungsi fisiologis dan struktural. Parenkim dikenal sebagai jaringan penyusun utama dari berbagai organ tumbuhan seperti daun, batang, akar, dan buah. Jaringan ini terdiri dari sel-sel yang relatif seragam dalam hal ukuran dan bentuk, dengan dinding sel yang tipis dan memiliki vakuola besar (Gambar 2.2). Keistimewaan dari sel parenkim adalah kemampuannya yang tinggi dalam melakukan proses metabolisme, termasuk fotosintesis, respirasi, dan penyimpanan zat cadangan.



Gambar 2. 2. Macam-macam Jaringan Parenkim Tumbuhan

(Sumber : Veectezy, 2024)

Parenkim fotosintetik, atau yang biasa dikenal dengan sebutan mesofil pada daun, adalah salah satu jenis parenkim yang berperan dalam proses fotosintesis (Oguchi *et al.*, 2018). Sel-sel mesofil biasanya memiliki banyak kloroplas yang mengandung klorofil, pigmen hijau yang bertanggung jawab dalam menangkap

cahaya matahari. Mesofil dibagi lagi menjadi dua jenis berdasarkan posisi dan strukturnya, yaitu parenkim palisade dan parenkim spons. Parenkim palisade terletak tepat di bawah epidermis bagian atas daun dan terdiri dari sel-sel yang berbentuk silindris memanjang, berperan optimal dalam penangkapan cahaya. Sementara itu, parenkim spons terletak di bawah parenkim palisade dan memiliki sel-sel yang lebih tidak teratur dan banyak ruang antar sel yang memfasilitasi pertukaran gas.

Jenis parenkim lain yang tak kalah penting adalah parenkim penyimpanan, yang berfungsi sebagai tempat menyimpan berbagai zat cadangan seperti pati, lemak, dan protein. Parenkim penyimpanan dapat ditemukan pada organ-organ seperti akar, umbi, dan biji. Contoh yang jelas adalah pada umbi kentang yang mengandung banyak amiloplas, jenis plastida yang menyimpan pati. Sel-sel pada parenkim ini biasanya memiliki vakuola yang besar untuk menyimpan cadangan makanan yang akan digunakan saat kondisi lingkungan kurang menguntungkan atau saat tumbuhan mengalami periode pertumbuhan cepat.

Parenkim juga dapat berperan dalam proses penyembuhan dan regenerasi jaringan (Fukuda & Ohashi-Ito, 2019). Parenkim meristematik adalah jenis parenkim yang memiliki kemampuan untuk membelah dan berdiferensiasi menjadi berbagai jenis sel lain. Ini sering ditemukan di daerah luka atau di bagian tumbuhan yang mengalami kerusakan, di mana sel-sel parenkim ini akan membelah secara aktif untuk menggantikan sel-sel yang rusak dan mengembalikan fungsi normal jaringan tersebut. Selain itu, parenkim meristematik juga terlibat dalam pertumbuhan sekunder pada tumbuhan berkayu, membantu dalam pembentukan kambium yang berperan dalam penebalan batang dan akar.

Selain itu, ada juga parenkim air, yang khusus ditemukan pada tumbuhan yang hidup di lingkungan yang kering atau semi-kering. Parenkim air berfungsi untuk menyimpan air dalam jumlah besar, memungkinkan tumbuhan tersebut bertahan selama periode kekeringan. Tumbuhan seperti kaktus dan sukulen memiliki parenkim air yang berkembang dengan baik di batang atau daunnya. Sel-sel ini memiliki vakuola yang sangat besar dan dinding

sel yang elastis untuk memungkinkan penyerapan dan penyimpanan air dalam jumlah besar.

Aktinenkim dan aerenkim adalah dua jenis jaringan parenkim yang memiliki peran khusus dalam tumbuhan. Aktinenkim, juga dikenal sebagai parenkim bintang, memiliki sel-sel dengan dinding sel yang memanjang dan bercabang, membentuk struktur seperti bintang. Jaringan ini sering ditemukan pada tangkai daun dan batang, membantu dalam fleksibilitas dan dukungan struktural. Aerenkim, di sisi lain, adalah jaringan parenkim dengan ruang antar sel yang besar, memungkinkan penyimpanan dan pertukaran gas yang efisien. Aerenkim sering ditemukan pada tumbuhan air atau yang hidup di lingkungan berawa, membantu dalam pengapungan dan memastikan suplai oksigen ke bagian-bagian tumbuhan yang terendam air. Kedua jenis parenkim ini menunjukkan adaptasi tumbuhan terhadap lingkungan spesifik mereka, baik dalam hal dukungan struktural maupun efisiensi pertukaran gas.

Tidak kalah penting, parenkim juga berperan dalam transportasi zat di dalam tubuh tumbuhan. Parenkim pengangkut adalah jaringan parenkim yang terhubung dengan jaringan pengangkut utama seperti xilem dan floem (Fukuda & Ohashi-Ito, 2019). Parenkim xilem membantu dalam penyimpanan dan distribusi air dan mineral dari akar ke seluruh bagian tumbuhan (Oguchi *et al.*, 2018). Sementara itu, parenkim floem terlibat dalam transportasi hasil fotosintesis, terutama gula, dari daun ke bagian-bagian tumbuhan yang memerlukan.

Setiap jenis parenkim memiliki struktur dan fungsi yang disesuaikan dengan peran spesifiknya dalam kehidupan tumbuhan (Fukuda & Ohashi-Ito, 2019). Misalnya, parenkim yang terlibat dalam fotosintesis memiliki banyak kloroplas, sementara parenkim penyimpanan memiliki banyak vakuola untuk menyimpan nutrisi. Fleksibilitas dan kemampuan sel parenkim untuk beradaptasi dengan berbagai fungsi ini menjadikannya komponen yang esensial dalam struktur dan fungsi tumbuhan.

Secara keseluruhan, jaringan parenkim memainkan peran krusial dalam memastikan kelangsungan hidup dan kesehatan tumbuhan. Melalui berbagai jenis parenkim, tumbuhan mampu

melakukan fotosintesis untuk menghasilkan energi, menyimpan cadangan makanan, menyerap dan menyimpan air, memperbaiki jaringan yang rusak, dan mengangkut nutrisi ke seluruh bagian tubuhnya. Kemampuan sel parenkim untuk berdiferensiasi dan melakukan berbagai fungsi ini menegaskan pentingnya jaringan ini dalam biologi tumbuhan. Peran multifaset ini menjadikan parenkim sebagai salah satu jaringan yang paling vital dalam organisme tumbuhan, baik dalam konteks fisiologis maupun ekologi. Jaringan parenkim tidak hanya memastikan tumbuhan dapat tumbuh dan berkembang, tetapi juga beradaptasi dengan berbagai kondisi lingkungan yang berubah-ubah.

## 2.4 Jaringan Penguat

Jaringan penguat tumbuhan merupakan salah satu komponen struktural yang penting dalam tubuh tumbuhan yang berperan dalam memberikan dukungan, melindungi, dan mempertahankan struktur tumbuhan dari berbagai tekanan eksternal. Terdiri dari beberapa jenis, jaringan penguat tumbuhan utama meliputi sklerenkim, kolenkim, dan sel-sel berligninasi (Brulé *et al.*, 2016).

Sklerenkim adalah jenis jaringan penguat yang memiliki sel-sel mati yang keras dan kaku (Brulé *et al.*, 2016). Sel-sel sklerenkim memiliki dinding sel yang kaya akan lignin, sebuah senyawa kimia yang memberikan kekuatan dan ketahanan terhadap tekanan mekanis. Terdapat dua jenis utama sklerenkim: sklerenkim serat dan sklerenkim batang (Gambar 3.4). Sklerenkim serat terdapat dalam bentuk serat-serat panjang yang tersusun berserat, memberikan kekuatan dan dukungan mekanis pada jaringan tumbuhan. Sementara itu, sklerenkim batang terdiri dari sel-sel pendek yang tersusun padat, memberikan kekuatan dan dukungan terutama pada bagian yang mengalami tekanan eksternal yang kuat.

Selain sklerenkim, kolenkim juga merupakan jenis jaringan penguat yang penting dalam tumbuhan (Brulé *et al.*, 2016). Kolenkim terdiri dari sel-sel hidup yang memiliki dinding sel yang kaku namun elastis (Gambar 3.5). Dinding sel kolenkim mengandung pektin, yang memberikan kekuatan dan elastisitas pada jaringan tersebut. Kolenkim banyak ditemukan pada bagian

tumbuhan yang masih mengalami pertumbuhan aktif, seperti tunas, ujung batang, dan pembuluh daun (Oguchi *et al.*, 2018). Fungsi utama kolenkim adalah memberikan dukungan mekanis serta melindungi jaringan tumbuhan dari kerusakan yang disebabkan oleh tekanan mekanis eksternal.

Sel-sel berligninasi adalah jenis jaringan penguat lainnya yang memiliki dinding sel yang kaya akan lignin, serupa dengan sklerenkim (Brulé *et al.*, 2016). Namun, perbedaannya terletak pada bentuk dan distribusi sel-sel tersebut dalam jaringan tumbuhan. Sel-sel berligninasi tersebar di berbagai bagian tumbuhan, seperti pembuluh xilem dan floem, jaringan pembuluh pengangkut, dan jaringan pembuluh pengisi. Fungsi utama sel-sel berligninasi adalah memberikan kekuatan dan dukungan struktural pada jaringan pembuluh tumbuhan, serta melindungi dari tekanan eksternal.

Jaringan penguat tumbuhan memiliki beberapa fungsi utama yang sangat penting bagi kelangsungan hidup dan pertumbuhan tumbuhan (Brulé *et al.*, 2016). Salah satu fungsi utama jaringan penguat adalah memberikan dukungan mekanis. Sklerenkim, kolenkim, dan sel-sel berligninasi memberikan struktur yang kuat dan kokoh pada jaringan tumbuhan, memungkinkannya untuk menahan tekanan mekanis yang dihasilkan oleh angin, air, atau berat badan tumbuhan itu sendiri. Dengan adanya jaringan penguat yang kokoh, tumbuhan dapat tumbuh tegak dan menjaga bentuknya dengan baik, sehingga dapat berfungsi dengan efisien dalam proses fotosintesis dan reproduksi.

Selain memberikan dukungan mekanis, jaringan penguat juga berperan dalam melindungi jaringan tumbuhan dari berbagai faktor lingkungan yang dapat merusak. Misalnya, kolenkim dan sklerenkim pada bagian luar batang tumbuhan berperan dalam melindungi jaringan dalam dari cedera fisik dan infeksi patogen. Sel-sel berligninasi pada pembuluh xilem dan floem juga membantu melindungi dan memperkuat struktur pembuluh tersebut, sehingga memastikan aliran air, nutrisi, dan zat organik berlangsung dengan lancar tanpa terganggu oleh tekanan eksternal (Fukuda & Ohashi-Ito, 2019).

Selain itu, jaringan penguat juga memiliki peran dalam penyimpanan dan pengangkutan zat-zat penting dalam tubuh tumbuhan (Fukuda & Ohashi-Ito, 2019). Misalnya, sel-sel berligninasi dalam pembuluh xilem bertanggung jawab untuk mengangkut air dan mineral dari akar ke bagian-bagian atas tumbuhan, sementara sel-sel berligninasi dalam pembuluh floem bertanggung jawab untuk mengangkut hasil fotosintesis dari daun ke seluruh bagian tumbuhan. Sel-sel sklerenkim dan kolenkim juga dapat berfungsi sebagai tempat penyimpanan cadangan nutrisi, seperti karbohidrat dan protein, yang dapat digunakan oleh tumbuhan saat kondisi lingkungan tidak menguntungkan.

Dalam perkembangan tumbuhan, jaringan penguat juga berperan dalam proses diferensiasi dan spesialisasi sel (Fukuda & Ohashi-Ito, 2019). Sel-sel sklerenkim dan kolenkim, misalnya, terbentuk dari sel-sel meristematis yang telah mengalami diferensiasi menjadi sel-sel mati yang memiliki dinding sel yang kaku. Proses diferensiasi ini memungkinkan tumbuhan untuk menghasilkan jaringan yang spesifik sesuai dengan kebutuhan struktural dan fungsionalnya. Dengan demikian, jaringan penguat tumbuhan berperan penting dalam menyediakan kerangka struktural yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan secara keseluruhan.

Dalam penggunaan praktis, pengetahuan tentang jaringan penguat tumbuhan memiliki banyak aplikasi dalam berbagai bidang, termasuk pertanian, kehutanan, dan rekayasa genetika. Misalnya, pemahaman tentang sifat-sifat mekanik dari berbagai jenis jaringan penguat dapat membantu dalam pemilihan varietas tumbuhan yang memiliki toleransi yang tinggi terhadap tekanan mekanis dan kerusakan fisik. Selain itu, penelitian tentang proses pembentukan dan diferensiasi sel-sel penguat dapat membantu dalam pengembangan teknik rekayasa genetika yang dapat meningkatkan produksi tumbuhan atau meningkatkan ketahanannya terhadap stres lingkungan. Dengan demikian, penelitian tentang jaringan penguat tumbuhan memiliki potensi untuk memberikan kontribusi yang signifikan

## 2.5 Jaringan Epidermis

Jaringan pelindung tumbuhan merupakan bagian penting dari struktur tumbuhan yang bertanggung jawab untuk melindungi organ-organ vital dari kerusakan, invasi patogen, serta tekanan lingkungan (Barthlott *et al.*, 2017). Jaringan ini terdiri dari beberapa jenis yang berperan dalam melindungi, mengatur pertukaran zat, dan memberikan dukungan struktural bagi tumbuhan.

Salah satu jenis jaringan pelindung utama adalah jaringan epidermis. Epidermis adalah lapisan luar tumbuhan yang terdiri dari sel-sel epidermis yang rapat dan padat (Barthlott *et al.*, 2017). Jaringan epidermis berfungsi sebagai penghalang fisik pertama yang melindungi jaringan dalam tumbuhan dari kerusakan mekanis, penguapan, serangan patogen, dan serangan hama. Sel-sel epidermis umumnya memiliki dinding sel yang tebal dan terkadang dilapisi dengan lapisan lilin atau kutikula yang membantu mengurangi penguapan air dari permukaan tumbuhan. Sel-sel epidermis juga memiliki struktur khusus seperti stomata dan trikoma yang membantu dalam pertukaran gas dan mengurangi kehilangan air.

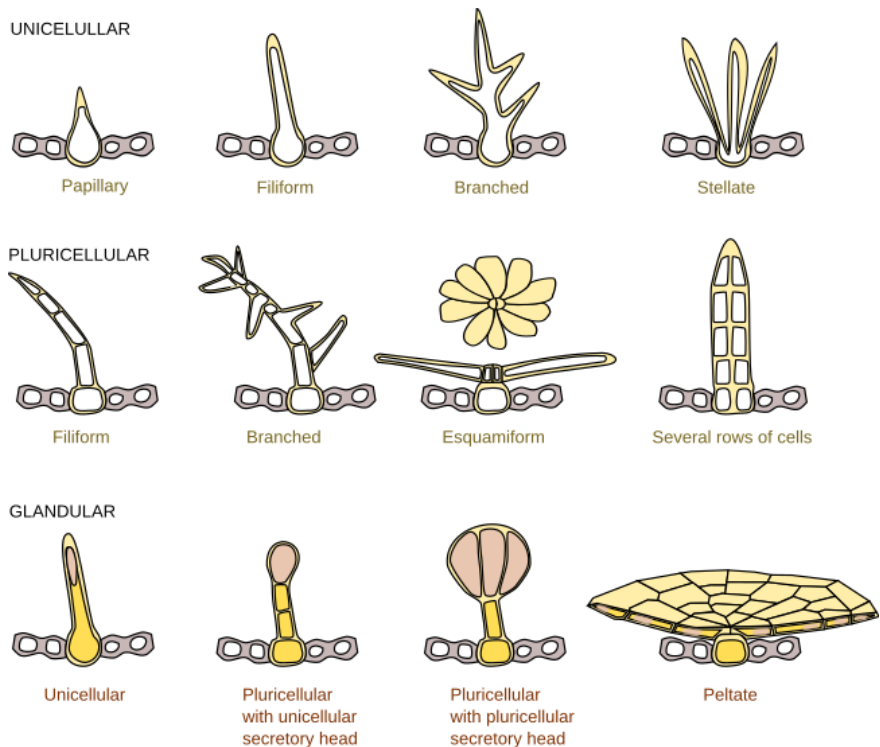
Derivat epidermis tumbuhan adalah berbagai struktur khusus yang berasal dari jaringan epidermis dan memiliki fungsi penting dalam adaptasi dan kelangsungan hidup tumbuhan (Barthlott *et al.*, 2017). Jaringan epidermis itu sendiri merupakan lapisan terluar dari sel yang melindungi semua organ tumbuhan, termasuk daun, batang, bunga, dan akar (Oguchi *et al.*, 2018). Fungsi utamanya meliputi pelindung mekanis, pengurangan kehilangan air, dan pengaturan pertukaran gas. Namun, epidermis juga dapat berdiferensiasi menjadi berbagai struktur khusus yang disebut derivat epidermis, yang meliputi stomata, trikoma, duri, papila, dan sel buliform.

Stomata adalah salah satu derivat epidermis yang paling penting, terdiri dari sepasang sel penjaga yang mengelilingi pori-pori mikroskopis (Gambar 3.7). Struktur ini berfungsi sebagai jalur utama untuk pertukaran gas antara tumbuhan dan lingkungannya (Lee & Bergmann, 2019). Melalui stomata, tumbuhan dapat menyerap karbon dioksida untuk fotosintesis dan melepaskan oksigen sebagai produk sampingan (Oguchi *et al.*, 2018). Selain itu,

stomata juga memainkan peran kunci dalam transpirasi, proses di mana air menguap dari permukaan daun, yang membantu mengatur suhu tumbuhan dan mengangkut nutrisi dari akar ke seluruh bagian tumbuhan. Sel penjaga yang mengelilingi stomata memiliki kemampuan untuk membuka dan menutup pori-pori ini sesuai dengan kondisi lingkungan, seperti kelembaban dan intensitas cahaya, untuk mengurangi kehilangan air dan mengoptimalkan fotosintesis.

Trikoma, atau rambut epidermis, adalah derivat epidermis lain yang memiliki beragam bentuk dan fungsi (Wang *et al.*, 2021). Trikoma dapat berupa struktur sederhana seperti rambut satu sel atau struktur yang lebih kompleks seperti rambut bercabang atau berbentuk kelenjar (Gambar 2.4). Fungsi trikoma bervariasi tergantung pada jenis tumbuhan dan lingkungannya (Oguchi *et al.*, 2018). Beberapa trikoma berfungsi untuk melindungi tumbuhan dari herbivora dengan memproduksi senyawa kimia yang beracun atau tidak menyenangkan. Trikoma lain membantu mengurangi kehilangan air dengan memantulkan cahaya matahari dan mengurangi suhu permukaan daun, atau dengan membentuk lapisan pelindung yang memperlambat laju transpirasi. Pada beberapa tumbuhan, trikoma juga membantu dalam penyerapan air dan nutrisi, seperti pada akar-akar tumbuhan epifit.





Gambar 2. 3. Macam-macam Bentuk Trikona pada Tumbuhan  
(Sumber : Atlas of plant and animal histology, 2022)

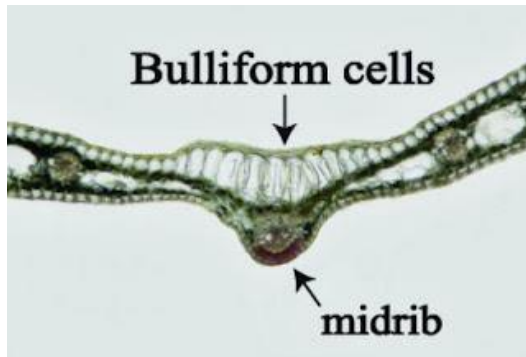
Duri adalah derivat epidermis yang mengalami modifikasi menjadi struktur keras dan tajam untuk melindungi tumbuhan dari herbivora (Gambar 2.5). Duri bisa ditemukan pada berbagai bagian tumbuhan, termasuk batang, daun, dan bahkan buah. Fungsi utama duri adalah untuk menghalangi atau melukai hewan yang mencoba memakan tumbuhan tersebut (Kariyat *et al.*, 2017). Selain itu, duri juga bisa membantu mengurangi kehilangan air dengan mengurangi area permukaan yang terkena sinar matahari langsung dan mengurangi transpirasi.



Gambar 2. 4. Duri Tempel pada Tumbuhan Mawar  
(Sumber : Asmara, 2015)

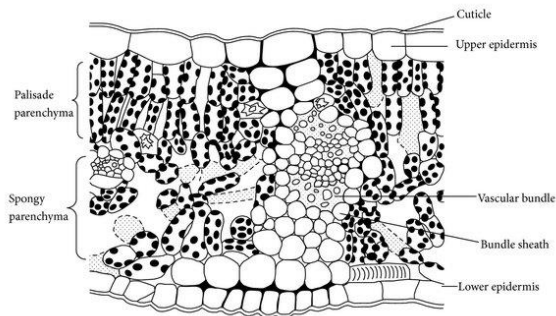
Papila adalah struktur kecil yang sering ditemukan pada permukaan kelopak bunga dan daun (Oguchi *et al.*, 2018). Modifikasi ini biasanya berupa tonjolan kecil yang memperluas area permukaan sel epidermis (Hückelhoven, 2014). Papila memiliki peran penting dalam penyerbukan dengan meningkatkan daya tarik visual bunga bagi penyerbuk dan memberikan permukaan yang lebih besar bagi penyerbuk untuk berpegang. Pada beberapa tumbuhan, papila juga membantu mengurangi kehilangan air dengan memperlambat laju transpirasi melalui mikrostruktur yang memodifikasi bagaimana air bergerak di permukaan daun.

Sel buliform adalah derivat epidermis yang biasanya ditemukan pada daun tumbuhan monokotil seperti rumput (Grigore *et al.*, 2017). Sel-sel ini besar dan memiliki dinding sel yang tipis, serta mampu menyimpan air dalam jumlah besar (Gambar 2.6). Sel buliform berperan penting dalam mekanisme penggulungan daun, yang membantu mengurangi kehilangan air selama kondisi kekeringan. Ketika air tersedia, sel buliform akan mengisi dengan air dan menyebabkan daun terbuka untuk memaksimalkan fotosintesis. Namun, selama kekeringan, sel-sel ini kehilangan air dan menyebabkan daun menggulung, sehingga mengurangi area permukaan yang terkena sinar matahari dan angin, dan dengan demikian mengurangi kehilangan air.



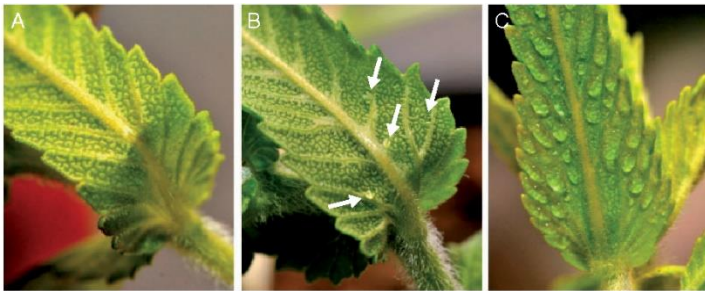
Gambar 2. 5. Sel kipas/bulliform pada Tumbuhan  
(Sumber : Unknown, 2016)

Lapisan lilin, atau kutikula, meskipun bukan struktur yang berasal dari epidermis secara langsung, merupakan hasil sekresi sel epidermis yang sangat penting dalam melindungi tumbuhan (Gambar 2.7). Kutikula terdiri dari lapisan lilin yang menutupi permukaan epidermis, membantu mencegah kehilangan air dengan membentuk penghalang yang tidak tembus air. Kutikula juga melindungi tumbuhan dari serangan patogen dan kerusakan mekanis. Pada beberapa tumbuhan, kutikula dapat mengandung senyawa yang membantu memantulkan sinar UV berlebih, melindungi jaringan di bawahnya dari kerusakan (Domínguez *et al.*, 2017).



Gambar 2. 6. Lapisan Kutikula pada Tumbuhan  
(Sumber : Diah *et al.*, 2014)

Ada juga hidatoda, derivat epidermis yang berfungsi dalam proses gutasi, yaitu pelepasan air dalam bentuk cair dari daun (Gambar 2.8). Hidatoda biasanya ditemukan di tepi daun dan berfungsi terutama ketika kondisi tanah sangat lembab dan transpirasi rendah, misalnya pada malam hari (Dewi *et al.*, 2015). Proses ini membantu mengeluarkan kelebihan air dan tekanan dari dalam tumbuhan.



Gambar 2. 7. Hidatoda pada Tumbuhan

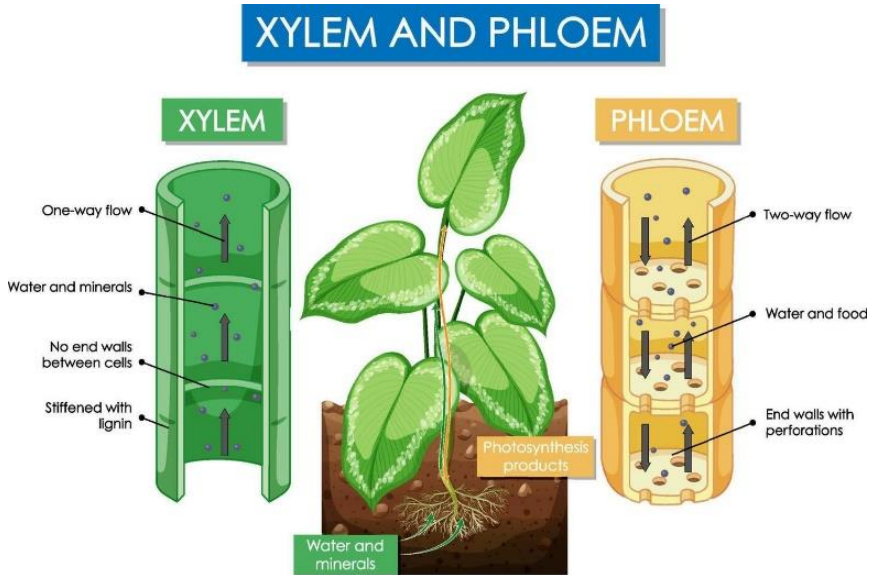
(Sumber : Světlíková *et al.*, 2016)

Secara keseluruhan, derivat epidermis memainkan peran krusial dalam adaptasi tumbuhan terhadap lingkungannya, membantu melindungi dari herbivora, mengurangi kehilangan air, mengoptimalkan fotosintesis, dan memastikan pertukaran gas yang efisien. Variasi struktur dan fungsi derivat epidermis mencerminkan kompleksitas dan keanekaragaman adaptasi tumbuhan untuk bertahan hidup dan berkembang di berbagai habitat. Melalui modifikasi khusus ini, tumbuhan mampu menghadapi tantangan lingkungan dan meningkatkan peluang keberhasilan reproduksi dan pertumbuhan. Derivat epidermis tidak hanya memberikan perlindungan fisik tetapi juga mendukung berbagai proses fisiologis yang vital bagi kesehatan dan kelangsungan hidup tumbuhan.

## 2.6 Jaringan Pengangkut

Jaringan pengangkut pada tumbuhan merupakan salah satu bagian penting dalam sistem peredaran dan transportasi nutrisi, air, dan zat-zat lainnya (White & Ding, 2023). Jaringan pengangkut ini

terdiri dari dua jenis utama, yaitu xilem dan floem (Gambar 2.9), yang masing-masing memiliki peran yang sangat penting dalam kehidupan dan pertumbuhan tumbuhan.



Gambar 2. 8. Xilem dan Floem pada Tumbuhan

(Sumber : Veectezy, 2023b)

Xilem adalah jaringan pengangkut utama yang bertanggung jawab atas transportasi air dan mineral dari akar ke bagian atas tumbuhan (White & Ding, 2023). Selain itu, xilem juga berperan dalam mendukung tumbuhan secara struktural. Komponen utama xilem adalah sel-sel trakeid dan elemen pengiring, seperti serat-serat sklerenkim (Tan *et al.*, 2018). Selain itu, pada tumbuhan berbunga, xilem juga dapat terdiri dari sel-sel trakea yang lebih spesialis, yang disebut pembuluh.

Pembuluh xilem terdiri dari dua jenis sel, yaitu sel-sel berdinding sekunder yang mati dan sel-sel hidup yang terlibat dalam proses transportasi (Gambar 2.9). Sel-sel berdinding sekunder yang mati, seperti trakeid dan pembuluh berkas, memiliki dinding yang kuat dan mampu mengangkut air secara efisien (Tan *et al.*, 2018; White & Ding, 2023). Sementara itu, sel-sel hidup, seperti

sel-sel parenkim dan sel-sel kompanion, berperan dalam menyediakan nutrisi dan membantu dalam regulasi transportasi air.

Proses transportasi air melalui xilem terjadi melalui beberapa mekanisme, termasuk transpirasi, adhesi, dan koherensi (Tan *et al.*, 2018). Transpirasi adalah proses penguapan air dari permukaan daun yang menciptakan gaya tarik, menarik air dari akar melalui xilem. Adhesi dan koherensi mengacu pada sifat-sifat air yang memungkinkannya untuk menempel pada dinding pembuluh xilem dan menarik air lainnya secara bersamaan.

Selain xilem, jaringan pengangkut lainnya pada tumbuhan adalah floem. Floem bertanggung jawab atas transportasi zat-zat organik, seperti gula, dari daun ke bagian-bagian tumbuhan yang membutuhkan energi dan nutrisi (White & Ding, 2023). Struktur utama floem adalah sel-sel penghantar, seperti sel-sel parenkim floem, sel-sel kompanion, dan elemen pengiring, seperti serat-serat sklerenkim.

Sel-sel kompanion pada floem memiliki peran penting dalam memfasilitasi transportasi zat-zat organik (Tan *et al.*, 2018; White & Ding, 2023). Mereka berhubungan secara langsung dengan sel-sel penghantar dan membantu dalam memodulasi aliran zat-zat organik serta melindungi sel-sel penghantar dari serangan patogen.

Proses transportasi zat-zat organik melalui floem disebut translokasi. Translokasi melibatkan pergerakan zat-zat organik, terutama gula, dari sumber (daun atau organ fotosintetik lainnya) ke tempat yang membutuhkan energi dan nutrisi, seperti daerah pertumbuhan, bunga, atau akar. Proses ini melibatkan gradien tekanan osmotik antara sel-sel penghantar dan sel-sel sumber, yang memungkinkan aliran zat-zat organik melalui sistem floem (Tan *et al.*, 2018).

Selain fungsi transportasi, jaringan pengangkut pada tumbuhan juga memiliki peran penting dalam dukungan struktural (Tan *et al.*, 2018). Xilem, dengan dinding sel yang kuat, memberikan dukungan mekanis yang penting untuk tumbuhan. Serat-serat sklerenkim pada xilem, misalnya, memberikan kekuatan struktural yang diperlukan untuk menopang batang dan cabang tumbuhan (White & Ding, 2023).

Floem juga memberikan dukungan struktural, meskipun tidak sekuat xilem (White & Ding, 2023). Namun, struktur floem yang fleksibel memungkinkan tumbuhan untuk tumbuh dan berkembang dengan baik. Sel-sel parenkim floem, misalnya, memberikan fleksibilitas yang diperlukan untuk menyesuaikan diri dengan perubahan dalam ukuran dan bentuk organ tumbuhan.

Selain fungsi transportasi dan dukungan struktural, jaringan pengangkut pada tumbuhan juga memiliki peran penting dalam respons terhadap lingkungan. Xilem dan floem dapat mengangkut sinyal hormonal dan metabolit yang memungkinkan tumbuhan untuk merespons perubahan lingkungan, seperti stres kekeringan atau serangan patogen (White & Ding, 2023).

Dalam situasi kekeringan, misalnya, tumbuhan dapat mengirim sinyal hormonal melalui sistem floem yang mengaktifkan mekanisme respons kekeringan, seperti penutupan stomata atau produksi molekul perlindungan (Tan *et al.*, 2018). Sel-sel penghantar xilem juga dapat mengirim sinyal tentang kekurangan air, yang memicu respons seluruh tumbuhan untuk mengurangi transpirasi dan menghemat air.

Secara keseluruhan, jaringan pengangkut pada tumbuhan, termasuk xilem dan floem, memiliki peran yang sangat penting dalam kehidupan dan pertumbuhan tumbuhan. Mereka bertanggung jawab atas transportasi air, nutrisi, dan zat-zat organik, serta memberikan dukungan struktural dan membantu dalam respons terhadap lingkungan. Dengan demikian, pemahaman yang mendalam tentang struktur dan fungsi jaringan pengangkut ini sangatlah penting dalam memahami mekanisme pertumbuhan dan adaptasi tumbuhan dalam berbagai kondisi lingkungan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Asmara, N. P. (2015). *Duri (Spina)*. <https://belajar-di-rumah.blogspot.com/2015/03/duri-spina.html>
- Atlas of plant and animal histology. (2022). *Plant tissues. Protection. TRICHOMES*. [https://mmegias.webs.uvigo.es/02-english/1-vegetal/v-imagenes-grandes/proteccion\\_tricomas.php](https://mmegias.webs.uvigo.es/02-english/1-vegetal/v-imagenes-grandes/proteccion_tricomas.php)
- Barthlott, W., Mail, M., Bhushan, B., & Koch, K. (2017). Plant surfaces: structures and functions for biomimetic innovations. *Nano-Micro Letters*, 9, 1-40.
- BiologyReader. (2024). *Collenchyma Tissue*. <https://biologyreader.com/collenchyma-tissue.html>
- Bradamante, G., Mittelsten Scheid, O., & Incarbone, M. (2021). Under siege: virus control in plant meristems and progeny. *The Plant Cell*, 33(8), 2523-2537.
- Brulé, V., Rafsanjani, A., Pasini, D., & Western, T. L. (2016). Hierarchies of plant stiffness. *Plant Science*, 250, 79-96.
- Dewi, V. P., Hindun, I., & Wahyuni, S. (2015). Studi Trikona Daun Pada Famili Solanaceae Sebagai Sumber Belajar Biologi. *JPBI (Jurnal Pendidikan Biologi Indonesia)*, 1(2).
- Diah, S. Z. M., Karman, S. B., & Gebeshuber, I. C. (2014). Nanostructural colouration in Malaysian plants: lessons for biomimetics and biomaterials. *Journal of Nanomaterials*, 2014(1), 878409.
- Domínguez, E., Heredia-Guerrero, J. A., & Heredia, A. (2017). The plant cuticle: old challenges, new perspectives. *Journal of Experimental Botany*, 68(19), 5251-5255.
- Fukuda, H., & Ohashi-Ito, K. (2019). Vascular tissue development in plants. *Current topics in developmental biology*, 131, 141-160.
- Grigore, M. N., Toma, C., Grigore, M. N., & Toma, C. (2017). Bulliform cells. *Anatomical adaptations of halophytes: a review of classic literature and recent findings*, 325-338.
- Homecare24. (2024). *Jenis-jenis Jaringan Parenkim*. <https://homecare24.id/jenis-jenis-jaringan-parenkim/>
- Hückelhoven, R. (2014). The effective papilla hypothesis. *New Phytologist*, 204(3), 438-440.



- Kariyat, R. R., Hardison, S. B., De Moraes, C. M., & Mescher, M. C. (2017). Plant spines deter herbivory by restricting caterpillar movement. *Biology letters*, 13(5), 20170176.
- Killedar, S. G., More, H. N., & Nadaf, S. J. (2014). Microscopic evaluation of leaves of *Memecylon umbellatum* Burm. *Advances in Agriculture*, 2014(1), 104849.
- Kitagawa, M., & Jackson, D. (2019). Control of meristem size. *Annual Review of Plant Biology*, 70, 269-291.
- Lee, L. R., & Bergmann, D. C. (2019). The plant stomatal lineage at a glance. *Journal of cell science*, 132(8), jcs228551.
- Machado, S. R., & Oliveira, D. M. T. (2024). Plant anatomy-history and interfaces. *Rodriguésia*, 75, e01572023.
- Oguchi, R., Onoda, Y., Terashima, I., & Tholen, D. (2018). Leaf anatomy and function. *The leaf: a platform for performing photosynthesis*, 97-139.
- ScienceFacts.net. (2024). *Sclerenchyma*.  
<https://www.sciencefacts.net/sclerenchyma.html>
- Světlíková, P., Hájek, T., & Těšitel, J. (2015). Hydathode trichomes actively secreting water from leaves play a key role in the physiology and evolution of root-parasitic rhinanthoid Orobanchaceae. *Annals of Botany*, 116(1), 61-68.
- Tan, X., Xu, H., Khan, S., Equiza, M. A., Lee, S. H., Vaziriyeganeh, M., & Zwiazek, J. J. (2018). Plant water transport and aquaporins in oxygen-deprived environments. *Journal of Plant Physiology*, 227, 20-30.
- Unknown. (2016). *STRUKTUR DAN FUNGSI JARINGAN TUMBUHAN*.  
<https://materisainssmp.blogspot.com/2016/04/struktur-dan-fungsi-jaringan-tumbuhan.html>
- VectorMine. (2020). *Plant tissue types vector illustration. Labeled educational structure scheme*.  
<https://www.dreamstime.com/plant-tissue-types-vector-illustration-labeled-educational-structure-scheme-types-plant-tissue-vector-illustration-labeled-image185358492>
- Veectzy. (2024a). *Meristematic Tissue or Meristem*.  
<https://www.vecteezy.com/vector-art/28282126-meristematic-tissue-or-meristem-is-plant-tissue->

responsible-for-growth-and-differentiation-found-at-the-tips-of-stems-and-roots

Veecteezy. (2024b). *Xylem and Phloem*.

<https://www.vecteezy.com/vector-art/6466164-diagram-showing-xylem-and-phloem-plant>

Vossen, R. (2024). *Stomata*.

<https://microscopyofnature.com/stomata>

Wang, X., Shen, C., Meng, P., Tan, G., & Lv, L. (2021). Analysis and review of trichomes in plants. *BMC plant biology*, 21, 1-11.

White, P. J., & Ding, G. (2023). Long-distance transport in the xylem and phloem. In *Marschner's Mineral Nutrition of Plants* (pp. 73-104). Academic Press.

# **BAB 3**

## **JENIS, STRUKTUR, DAN FUNGSI JARINGAN TUMBUHAN**

*Oleh Magfirah Rasyid*

### **3.1 Pendahuluan**

Menurut kemampuan sel untuk membelah (embrionik), jaringan tumbuhan dibagi menjadi jaringan meristem dan jaringan dewasa atau permanen. Sel tumbuhan membelah secara aktif sepanjang waktu dalam jaringan meristem, tetapi sel dewasa tidak melakukannya (Muttaqin, 2023). Secara keseluruhan, susunan jaringan dalam tumbuhan dan dalam organ-organ merupakan sebuah organisasi struktural dan fungsional. Kemudian akan membentuk sistem jaringan yang terbentuk atas organisasi jaringan dalam jumlah yang besar dan saling terhubung dengan unit dasar dari tubuh tumbuhan (Muhammadiyah & Karim, 2010).

Jaringan tumbuhan sederhana terdiri dari satu tipe sel, sedangkan jaringan kompleks terdiri dari lebih dari satu tipe sel (Muhammadiyah & Karim, 2010). Adapun pada jaringan permanen sederhana yang sebagian besar terdiri atas satu macam sel, diantaranya epidermis, parenkima, sklerenkima, kolenkima dan gabus. Sedangkan jaringan permanen majemuk (kompleks) diantaranya xilem dan floem (Setjo et al., 2004).

### **3.2 Jenis, Struktur, dan Fungsi Jaringan Meristematik**

#### **3.2.1 Jaringan Meristem Berdasarkan Asal Pembentukannya**

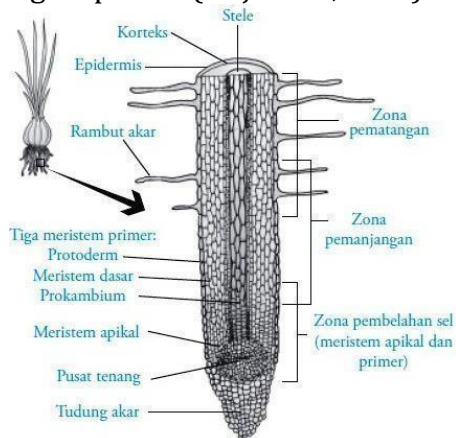
##### **1. Promeristem/Primodial**

Jaringan promeristem merupakan jaringan muda yang terletak pada ujung akar dan batang. Promeristem terbentuk pada fase embrio, yang tersusun atas sel-sel initial yang selanjutnya akan

berkembang menjadi protoderm, prokambium dan meristem dasar (Ramdhini et al., 2021). Protoderm akan mengalami diferensiasi menjadi jaringan epidermis, kemudian prokambium menjadi jaringan vaskular (pembuluh) primer, dan jaringan meristem dasar menjadi jaringan parenkim. Ketiga jaringan tersebut memiliki peranan penting dalam pertumbuhan primer (Muttaqin, 2023).

## 2. Meristem Primer

Meristem primer berasal dari pembelahan sel-sel embrionik secara langsung yang akan menyusun embrio terus menerus (Setjo et al., 2004). Terdapat beberapa tahapan diferensiasi pada meristem primer, diantaranya protoderm menghasilkan epidermis, prokambium membentuk jaringan pembuluh primer dan meristem dasar akan membentuk jaringan dasar tumbuhan seperti parenkim dan sklerenkim (Muhammadiyah & Karim, 2010). Terdapat pada titik tumbuh apikal, baik ujung batang (pucuk) maupun ujung akar. Berperan penting dalam pertumbuhan primer yang memacu pemanjangan batang dan akar secara vertikal (Campbell et al., 2000). Bagian pada tumbuhan yang berasal dari meristem primer adalah epidermis, jaringan korteks, akar, batang, mesofil daun, dan jaringan pengangkut primer (Setjo et al., 2004).

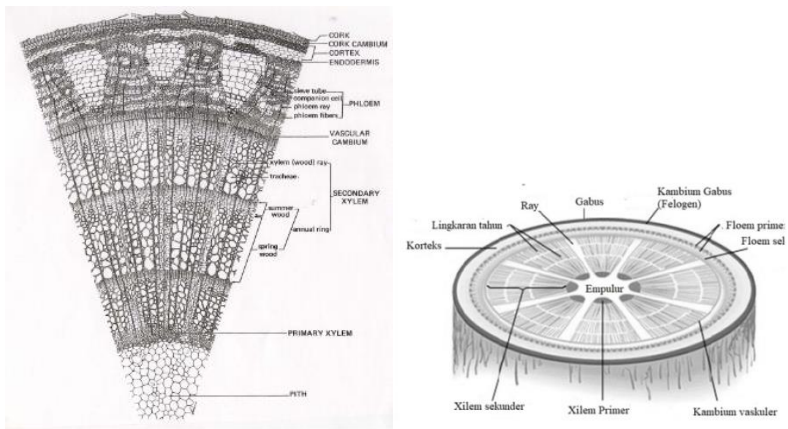


Gambar 3. 1. Daerah Pembelahan Primer Akar Tumbuhan

(Sumber: Muttaqin, 2023)

### 3. Meristem Sekunder

Meristem sekunder berkembang dari jaringan dewasa yang telah mengalami diferensiasi (Setjo et al., 2004). Meristem sekunder banyak ditemukan pada bagian batang dan akar, adanya aktivitas kembang vaskuler dan kembang gabus pada daerah tersebut menyebabkan adanya penebalan dan pelebaran pertumbuhan batang. Pertumbuhan secara lateral yang menyebabkan pembesaran diameter pada batang, pembentukan lingkaran tahun akibat pengaruh lingkungan (diameter kayu akan lebih besar pada musim hujan), berkas pengangkut sekunder dan jari-jari empulur (Ramdhini et al., 2021). Selanjutnya, kehadiran kembang vaskuler di antara xilem dan floem. Kehadiran kembang vaskuler menyebabkan terjadinya pembelahan ke arah dalam yang akan membentuk xilem sekunder dan pembelahan ke arah luar yang akan membentuk floem (Muttaqin, 2023). Contoh meristem sekunder adalah felogen yang berembang dari sel-sel parenkim atau kolenkim yang telah mengalami diferensiasi (Setjo et al., 2004).



Gambar 3. 2. Pertumbuhan meristem sekunder pada Batang  
(Sumber :Swanson, 2023; Ramdhini *et al.*, 2021)

### **3.2.2 Jenis Meristem Berdasarkan Letaknya**

#### **1. Meristem Apikal**

Sel-sel meristematik apikal berukuran kecil dan kasar berbentuk isodiametrik (Simpson, 2006). Meristem apikal merupakan jaringan yang letaknya pada pucuk sumbu batang dan akar pokok serta cabangnya (Setjo et al., 2004). Meristem apikal mengalami pertumbuhan primer, sehingga terjadi pemanjangan pada akar dan batang yang menyebabkan akar memanjang hingga menembus tanah (Ramdhini et al., 2021). Adapun pertumbuhan primer pada akar terjadi pada tiga zona, yaitu zona proliferasi (pembelahan), zona elongasi (pemanjangan) dan zona deferensiasi dan pematangan. Zona proliferasi merupakan zona yang berada di ujung akar dan ujung batang dengan sel-sel yang senantiasa melakukan pembelahan setiap 12-36 jam. Kemudian, zona elongasi terletak di bawah zona proliferasi, pada zona tersebut sel-sel meristem akan memanjang akan tidak melebar. Adapun zona pemanjangan sel berperan dalam meningkatkan daya tekan akar dan proses pemanjangan akar. Zona deferensiasi dan pematangan merupakan zona yang sel-selnya telah mengalami perubahan fungsi menjadi jaringan yang lebih kompleks (Ramdhini et al., 2021).

#### **2. Meristem Interkalar**

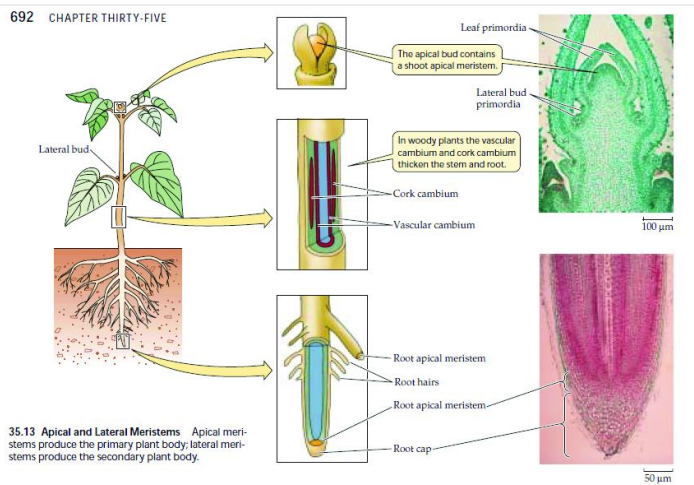
Meristem interkalar terdapat diantara jaringan dewasa seperti jaringan pada pangkal ruas rumput-rumputan (Setjo et al., 2004). Meristem interkalar ditemukann di dalam organ, seringkali dekat pangkalnya. Keberadaan meristem interkalar pada daun rumput daun dan batang memungkinkan untuk tumbuh terus menerus meskipun telah dipotong (Taiz & Zeiger, 2002).

Meristem interkalar adalah turunan dari meristem apeks yang dipisahkan oleh daerah sel yang lebih dewasa saat tumbuh dan terletak pada ruas. Daerah buku pada batang dengan meristem interkalar menjadi dewasa lebih awal dan sebagian ruas menjadi dewasa lebih cepat, sehingga ditemukan berbagai taraf perkembangan pada ruas tersebut. (Muhammadiyah & Karim,

2010). Pada tanaman suku gramineae terdapat meristem interkalar yang letaknya pada nodus batang yang menyebabkan bertambah panjangnya ruas (*internode*) batang (Dwiyani, 2015).

### 3. Meristem Lateral

Meristem lateral merupakan selubung sel yang berbentuk silinder, yang berfungsi untuk pertumbuhan yang meningkatkan lebar atau ketebalan (Simpson, 2006). Meristem lateral terletak sejajar dengan keliling organ tempat jaringan ini ditemukan, misalnya kambium vaskular felogen (Hindriana & Handayani, 2016). Kambium dan felogen merupakan meristem sekunder dan merupakan jaringan homogen yang tahap perkembangannya tidak dapat dibedakan secara morfologi (Setjo et al., 2004).



Gambar 3. 3. Meristem apikal dan lateral pada Ujung Akar dan Batang Tumbuhann

(Sumber : Purves *et al.*, 2004)

### **3.2.3 Jaringan Meristem Berdasarkan Fungsi**

#### **1. Protoderm**

Protoderm merupakan lapisan yang terletak pada lapisan terluar dari meristem primer (Muttaqin, 2023). Protoderm akan menghasilkan sistem epidermal (Muhammadiyah & Karim, 2010).

#### **2. Prokambium**

Prokambium akan menghasilkan jaringan pengangkut primer (Muhammadiyah & Karim, 2010). Prokambium merupakan lapisan pusat yang membentuk struktur stele yang terdiri atas jaringan pengangkut, yaitu xilem dan floem. Prokambium berasal dari sel-sel dasar (parenkim) selama proses pertumbuhan organ lateral. Kambium vaskular dan meristem sekunder juga dibentuk dari prokambium pada tumbuhan dikotil dan gymnospermae (Muttaqin, 2023).

#### **3. Meristem Dasar**

Meristem dasar merupakan meristem yang membentuk jaringan dasar pada tumbuhan seperti parenkim dan sklerenkim pada korteks dan empulur, serta kolenkim korteks (Muhammadiyah & Karim, 2010).

## **3.3 Struktur, Jenis, dan Fungsi Jaringan Permanen**

### **3.3.1 Jaringan Permanen Sederhana**

#### **1. Epidermis**

Epidermis termasuk jaringan permanen yang tersusun atas satu sel dan membentuk lapisan permanen daun, bagian-bagian bunga dan bagian-bagian batang serta akar yang lebih muda. Dinding luar sel epidermis sering tebal dan sering tertutup oleh lapisan kutin (Setjo et al., 2004).

Epidermis membantu dalam melindungi jaringan lunak yang berada di sebelah dalamnya dari kerusakan mekanis dan melindungi dari kehilangan air secara berlebihan. Untuk melindungi dari kehilangan air secara berlebihan, maka akan



terjadi adaptasi melalui pembentukan kutikula yang tebal, lapisan lilin, pembentukan rambut, dll (Setjo et al., 2004).

a. Struktur dan Isi Sel

Sel epidermis umumnya mengandung leukoplas dan kromoplas, adapun kloroplas hanya ditemukan pada sel penutup stomata. Cairan sel pada epidermis (*cell sap*) mengandung antosianin, yang banyak ditemukan pada bunga dan daun yang memiliki warna kemerahan atau jingga (Setjo et al., 2004).

Pada beberapa tumbuhan, epidermis ber dinding tipis, namun adapula yang ber dinding tebal dan berlignin misalnya pada biji salak, sisik dan helaian daun tertentu (Setjo et al., 2004). Bentuk sel epidermis ada yang persegi panjang, dengan sel epidermis atas (permukaan atas daun) bentuknya lebih panjang dan lebar dibandingkan sel epidermis bawah. Bentuk epidermis tersebut ditemukan pada tumbuhan *Ficus racemosa L.* (Rasyid et al., 2017).

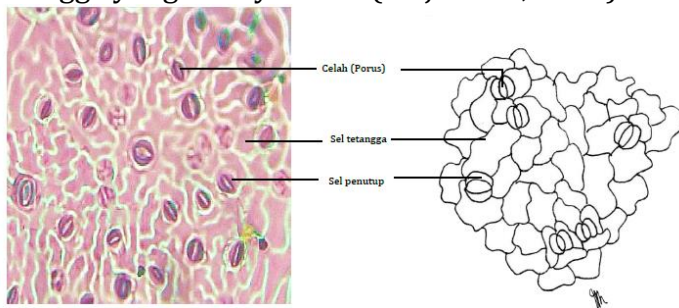
b. Epidermis dan Turunannya

1) Stomata

Stomata berperan dalam mengatur proses penting dalam kehidupan tumbuhan, yaitu fotosintesis dan transpirasi. Stomata merupakan derivat epidermis yang berasal dari pembelahan protoderm. Ketika protoderm melakukan pembelahan beberapa kali, maka salah satu sel dari hasil pembelahan tersebut akan menjadi sel induk sel penutup. Sel tersebutlah yang kemudian membelah menjadi dua sel penutup pada stomata yang menyerupai bulan sabit. Adapun celah atau porus merupakan pektin yang berbentuk lensa, sebagai akibat dari pembengkakan materi ruang antar sel sebelum adanya pemisahan dari kedua sel penutup (Setjo et al., 2004).

Sel tetangga dibentuk dari sel induk yang sama dengan sel penutup, akan tetapi dapat pula terbentuk dari sel yang ontogenik yang tidak sama

dengan sel induk sel penutup. Berdasarkan hal tersebut, stomata dibagi menjadi tiga, yaitu mesogen, perigen dan mesoperigen. Mesogen merupakan stoma yang sel tetangganya terbentuk dari sel induk yang sama dengan sel penutup; perigen memiliki sel tetangga yang berasal bukan dari sel induk yang sama dengan sel penutup, sedangkan mesoperigen merupakan stomata yang memiliki sel tetangga yang paling sedikit satu yang berasal dari sel penutup yang sama, sedangkan sel tetangga yang lainnya tidak (Setjo et al., 2004).



Gambar 3. 4. Stomata pada *Ficus exasperata*

(Sumber : Rasyid, 2017)

Menurut Setjo *et al.*, (2004), pada tumbuhan dikotil, stomata diklasifikasikan menjadi 5 jenis berdasarkan jumlah dan letak sel tetangga. Berikut ini adalah jenis-jenisnya:

a) Tipe anomositik

Stomata dikelilingi oleh sejumlah sel tertentu yang tidak berbeda dengan sel epidermis yang lain, baik dalam bentuk maupun ukurannya.

b) Tipe anisositik

Terdapat tiga sel tetangga yang mengelilingi stomata, dengan satu sel tetangga memiliki ukuran lebih kecil dari sel tetangga yang lainnya.

- c) Tipe parasitik  
Terdapat dua sel tetangga pada stomata dengan poros panjang sejajar dengan poros panjang stomata
- d) Tipe diasitik  
Stomata memiliki dua sel tetangga dengan poros panjang tegak lurus terhadap poros panjang stoma
- e) Tipe aktinositik  
Sel tetangga mengelilingi stomata dengan jumlah yang tidak tentu dan tersusun radier

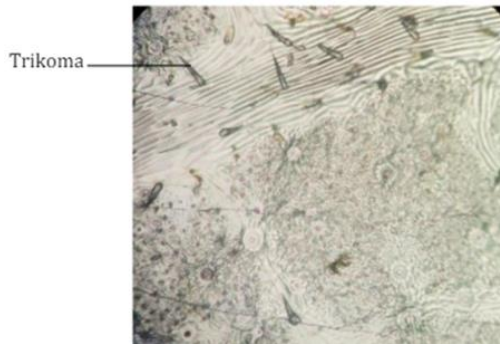
## 2) Trikoma

Trikoma berasal dari bahasa Yunani yang berarti rambut, yang halus atau pelengkap pada tanaman, ganggang, lumut, dan Protista tertentu. Trikoma memiliki struktur dan fungsi yang beragam. Contohnya adalah rambut, rambut kelenjar, sisik, dan papilla (Ramdhini et al., 2021). Fungsi utama dari trikoma adalah sebagai pelindung dari gangguan luar serta mengurangi penguapan. Misalnya pada trikoma pada rambut akar berfungsi dalam penyerapan air dan garam-garam mineral dalam tanah, sedangkan rambut pada kepala putik yang berupa rambut glandular ketika tersentuh maka akan membantu dalam proses penyerbukan (Setjo et al., 2004).

Secara umum, terdapat dua jenis trikoma, yaitu trikoma glandular dan trikoma non glandular. Trikoma glandular berbentuk gelembung yang mengandung metabolit sekunder (Juhari et al., 2014). Trikoma glanduler mensekresikan larutan gum, larutan gula. Trikoma jenis ini tersusun atas satu sel atau banyak sel. Trikoma glanduler yang tersusun atas satu sel berupa tonjolan kecil yang dikenal dengan papula atau dapat pula berupa sel yang panjang. Adapula trikoma glanduler yang

terdiri atas tangkai dan kepala yang tersusun atas satu atau banyak sel. Sel kepala yang menjadi bagian yang mensekresikan (Setjo et al., 2004). Trikoma non glandular berbentuk uniseluler atau multiseluler, bercabang maupun tidak bercabang (Juhari et al., 2014). Trikoma non glanduler merupakan trikoma yang tidak menghasilkan sekret, memiliki sel yang panjang, bercabang atau tidak bercabang (Setjo et al., 2004).

Trikoma kelenjar merupakan trikoma yang mengandung minyak atsiri, yaitu wewangian alami atau produk yang dapat digunakan oleh industri farmasi, meskipun banyak dari zat-zat ini telah berevolusi untuk memberikan perlindungan tanaman terhadap herbivora dan patogen. Kompartemen penyimpanan trikoma kelenjar biasanya terletak di ujung rambut dan merupakan bagian dari sel kelenjar, atau sel yang aktif secara metabolik (Glas et al., 2012).



Gambar 3. 5. Trikoma non-glanduler *Ficus racemosa* L.

(Sumber : Rasyid et al., 2017)

## 2. Jaringan Parenkim

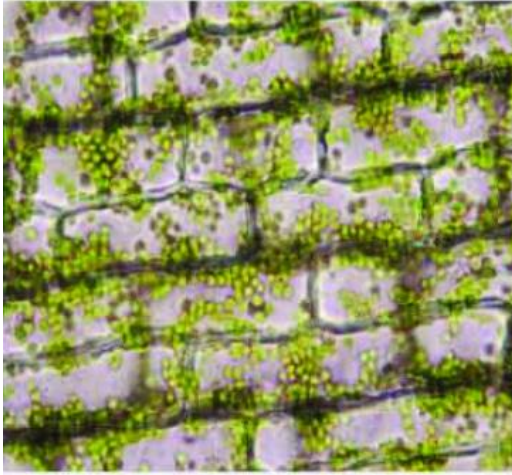
Secara struktural, sel parenkim memiliki ciri-ciri berupa isodiametrik hingga memanjang, memiliki dinding sel primer ( $1^\circ$ ) saja (jarang dengan dinding sekunder), dan (3) hidup pada saat dewasa dan berpotensi melakukan

pembelahan sel. Sel parenkim berfungsi dalam aktivitas metabolisme (misalnya, respirasi, fotosintesis, transportasi, penyimpanan) dan dalam penyembuhan luka dan regenerasi, menjadi mampu berubah menjadi meristem untuk membentuk akar baru atau tunas (Simpson, 2006).

Parenkim merupakan jaringan tumbuhan yang sangat sederhana dan belum terdiferensiasi (Sholehah & Kuswara, 2022). Parenkim sebagai sistem jaringan dasar ditemukan pada berbagai organ tumbuhan dan membentuk jaringan yang berkesinambungan (Hindriana & Handayani, 2016). Berkembang dari meristem dasar pada tubuh primer. Jaringan pembuluh, berkembang dari prokambium pada tubuh sekunder, yaitu kambium pembuluh dan kambium gabus (Muhammadiyah & Karim, 2010).

Tanaman menyediakan sebagian besar karbohidrat dan air nonstruktural dalam jaringan ini. Parenkim, yang ditemukan di tengah epidermis dan sumsum tulang, ditemukan di hampir semua bagian tumbuhan, sehingga disebut jaringan terestrial. Parenkim memiliki ciri seluler berupa sel hidup dan sangat struktural dan fungsional. Jika lingkungan memungkinkan, sel parenkim yang matang dapat menjadi meristematik (Sholehah & Kuswara, 2022).

Parenkim dalam tumbuhan terdapat pada korteks dan empelur batang, korteks akar, jaringan dasar tangkai daun, mesofil daun dan sistem jaringan kompleks dalam xylem dan floem (Hindriana & Handayani, 2016).



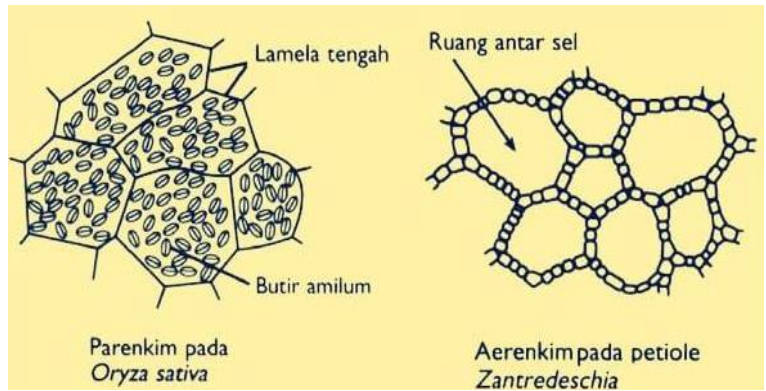
Gambar 3. 6. Jaringan Perenkim  
(Sumber : Campbell, R, 2009).

a. Struktur dan Isi Sel

Meskipun sel parenkim biasanya memiliki dinding sel yang tipis, namun pada sel endosperm kurma dan kopi memiliki dinding sel yang tebal yang mengandung hemiselulosa sebagai cadangan makanan. (Muhammadiyah & Karim, 2010). Parenkim berperan dalam proses fotosintesis yang dimana sel-selnya berisi kloroplas. Sel-sel tersebut yang dikenal dengan klorenkim, yang banyak ditemukan pada mesofil daun terutama pada jaringan palisade, selain itu juga ditemukan pada korteks batang. Protoplas juga ditemukan pada sel-sel parenkim yang berfungsi dalam sekresi (Hindriana & Handayani, 2016). Terutama banyak mengandung ribosom dan diktiosom atau juga retikulum endoplasma yang berhubungan dengan tipe sekresi yang menghasilkannya (Muhammadiyah & Karim, 2010).

Beberapa fungsi sel parenkim berdasarkan isi selnya, antara lain: sel parenkim yang menyimpan pati, mengandung amiloplas seperti pada organ-organ penyimpan yang cadangan makanannya disimpan di dalam tanah (umbi); kromoplas yang terdapat dalam sel

parenkim, berupa palstid yang mengandung katoten, xantofil yang ditemukan pada bunga dan buah; antosianin, tanin, atau bermacam-macam bentuk kristal, yang ditemukan pada berbagai organ tumbuhan; serta sel parenkim yang memiliki ruang antarsel yang berisi rongga udara yang dikenal dengan aerenkim, yang ditemukan pada tumbuhan air (Muhammadiyah & Karim, 2010).



Gambar 3. 7. Jaringan Parenkim dengan amilum dan aerenkim

(Sumber :Sholehah and Kuswara, 2022).

b. Bentuk dan susunan sel parenkim

Sel parenkim umumnya berbentuk isodiametris, adapula yang berbentuk panjang yang ditemukan sebagai sel palisade, adapula sel parenkim yang berlekuk-lekuk dan berbentuk bintang. Sel parenkim dewasa tersusun rapat seperti endosperm, namun pada batang dan akar lunak memiliki jaringan dengan ruang antar sel (Muhammadiyah & Karim, 2010).

c. Dinding Sel Parenkim

Dinding sel parenkim merupakan jaringan dasar yang belum terspesialisasi dan umumnya tipis. Beberapa sel parenkim yang bersifat penimbun

memiliki dinding sel yang tebal. Dinding sel menipis selama proses perkecambahan (Setjo et al., 2004).

d. Tipe parenkim beserta fungsinya menurut (Ramdhini et al., 2021)

- ✓ *Parenkim fotosintetik* dikenal juga sebagai klorenkim yang berperan dalam fotosintesis karena mengandung kloroplas yang ada di dalam sel. Parenkim fotosintetik biasanya ditemukan di bawah epidermis yang memiliki intensitas cahaya yang lebih banyak, ditemukan berlimpah di daun, tetapi juga di korteks pucuk hijau. Parenkim fotosintesis daun atau mesofil, yang biasanya dibagi menjadi dua jenis: jaringan palisade atau jaringan tiang dan jaringan spons.

Jaringan palisade berada pada epidermis atas daun yang mendapat cahaya lebih banyak, sedangkan jaringan spons ada di sisi bawah dan sisi daun yang lebih gelap. Sel jaringan palisade lebih rapat dan mengandung lebih banyak kloroplas, sehingga aktivitas fotosintetik lebih tinggi. Dalam mesofil spons, ada lebih banyak ruang intercelular kosong yang memfasilitasi pergerakan gas dan air.

- ✓ *Parenkim penyimpanan*, merupakan sel-sel yang mensintesis dan menyimpan sejumlah zat. Zat tersebut bisa dalam bentuk padat, seperti butiran pati dan protein yang mengkristal, namun kebanyakan ditemukan dalam larutan, seperti lipid, protein, dan lainnya. Zat-zat tersebut akan disimpan dalam vakuola, yang merupakan kompartemen khusus untuk menyimpan molekul. Molekul yang paling sering disimpan adalah pati.
- ✓ *Parenkim akuifer*, merupakan sel parenkim yang terspesialisasi untuk menyimpan sejumlah air, meskipun semua sel parenkim memiliki fungsi tersebut. Sel besar, dengan dinding sel tipis dan vakuola yang sangat besar tempat penyimpanan air.



Terdapat pada tumbuhan yang hidup di lingkungan kering yang dikenal dengan tumbuhan xerofit.

- ✓ *Parenkim aeriferous (aerenchyma)*, memiliki ruang kosong intercelular yang besar, lebih besar daripada jaringan tanaman lain. Jaringan ini berkembang dengan baik pada tumbuhan yang hidup di lingkungan basah atau perairan, Pada akar, terdapat dua cara pembentukan aerenkim, yaitu skizogeni dan lisogeni. Skizogeni adalah proses yang terjadi oleh diferensiasi sel selama perkembangan organ, sedangkan lisogeni adalah konsekuensi dari stres dan rongga antar sel diproduksi oleh kematian sel. Aerenkim lisogenik ditemukan pada gandum beras, jagung, dan barley.

### 3. Jaringan Kolenkim

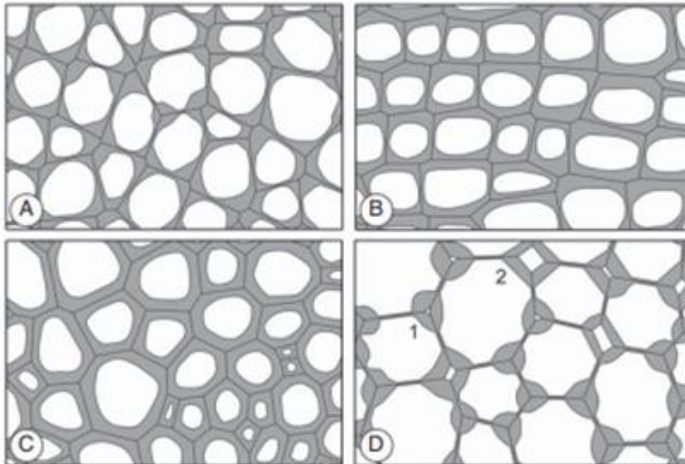
Kolenkim merupakan sel yang secara struktural memanjang, hanya memiliki dinding sel primer yang menebal tidak merata dan kaya akan , dan hidup pada saat dewasa. Sel-sel kolenkim berfungsi secara mekanik dan sering ditemukan di pinggiran batang atau daun. Mereka dapat diregangkan selama pertumbuhan pemanjangan organ (Simpson, 2006).

Kolenkim memiliki protoplas dengan jumlah yang bervariasi, dan paling banyak ditemukan pada kolenkim yang bentuknya mendekati parenkim. Sebagai penguat pada organ muda dan tua, terdapat pada daerah perifer, misalnya di sebelah dalam epidermis atau daerah korteks yang dipisahkan dari epidermis oleh beberapa lapisan parenkim (Setjo et al., 2004). Kolenkim merupakan jaringan mekanik yang berfungsi sebagai penyokong tumbuhan, yang berkembang dari stadium awal promeristem dan membentuk sejumlah sel memanjang yang menyerupai sel prokambium, memiliki dinding primer, lunak, lentur dan berlignin. Kolenkim bersifat plastis dan bisa merenggang secara permanen bersama dengan pertumbuhan organ

tempatnya berada, mengandung kloroplas dan tanin (Muhammadiyah & Karim, 2010).

Menurut Setjo et al., (2004), kolenkim dibedakan atas tiga jenis berdasarkan penebalan dinding selnya, yaitu:

- a. *Kolenkim sudut atau kolenkim angular*, dengan penebalan dinding sel yang terjadi di sepanjang sudut-sudut sel dan memanjang mengikuti sumbu sel. Contohnya ditemukan pada daun *Vitis*, *Cucurbita*, *Morus*, dll.
- b. *Kolenkim lempeng (lamellar atau tangensial)*, penebalan dinding terjadi pada bagian dinding tangensial sel, susunan sel teratur menurut deretan tangensial, dan tidak terdapat ruang antar sel. Contohnya pada kolenkim pada korteks batang *Sambucus nigra*.
- c. *Kolenkim anular*, penebalan dinding merata sehingga ruang antar sel berbentuk pipa. Contohnya, tangkai daun *Allamanda cathartica*.
- d. *Kolenkim lakuner*, penebalan dinding sel terjadi pada dinding sel yang berbatasan dengan ruang anatar sel. contohnya pada *Asclepias*, *Althea*.



Gambar 3. 8. (A) kolenkim angular., (B) kolenkim tangensial, (C) kolenkim annular, (D) kolenkim lacunar.

(Sumber : (Ramdhini et al., 2021)

#### 4. Jaringan Sklerenkim

Sklerenkim merupakan sel yang secara struktural memiliki dinding sel sekunder (2°) yang tebal dan berlignifikasi. Secara umum, terdapat dua jenis sklerenkim, yang terkadang saling bersinggungan, yaitu serat, dengan sel sempit yang panjang dengan ujung meruncing, kemudian sklereid, yang berbentuk isodiametrik hingga tidak beraturan dan sering bercabang. Serat berfungsi secara mekanis memberi dukungan di berbagai organ dan jaringan, dan terkadang membentuk sebagian besar jaringan. Sedangkan sklereid berfungsi sebagai penyokong struktural (Simpson, 2006). Sklereid terapat pada berbagai tempat pada tubuh tumbuhan, dapat ditemukan pada batang, daun, buah dan biji. Selain itu, juga ditemukan pada epidermis, jaringan dasar dan dalam jaringan pembuluh (Muhammadiyah & Karim, 2010).

##### a. Serat

Serat berbentuk sel-sel panjang yang sempit yang memiliki ujung runcing membentuk serat dengan ujung yang tajam, dan saling tumpang tindih, yang menjadi satu kesatuan yang kokoh. Serat sklerenkim dapat ditemukan di sebagian besar komponen tumbuhan (Muttaqin, 2023).

##### b. Sklereid

Sklereid memiliki dinding sekunder yang bervariasi dalam ketebalannya dan berlignin. Sklereid yang memiliki dinding tebal, akan mudah membedakannya dengan sel parenkim, sedangkan sklereid yang berdinding tipis tidak dapat dibedakan secara nyata dengan sel parenkim (Setjo et al., 2004)

Menurut Muhammadiyah & Karim (2010), sklereid dibedakan menjadi empat bagian, yaitu:

- 1) *Brakisklereid* atau disebut dengan sel batu, bentuknya hampir isodiametris atau agak memanjang, contohnya pada tempurung kelapa (*Coco nucifera*)

- 2) *Makrosklereid*, berbentuk memanjang, silindris, sering membentuk deretan tegak lurus permukaan biji, ditemukan pada kulit biji, contohnya *Phaseolus vulgaris* (Setjo et al., 2004)
- 3) *Osteosklereid*, berbentuk tulang dengan ujung-ujung yang membesar, terkadang sedikit bercabang, misalnya pada jaringan palisade *Havea*
- 4) *Asterosklereid*, memiliki bentuk menyerupai bintang dengan lekukan-lekukan atau penonjolan, misalnya pada *Trochodendron* pada bagian korteks batangnya.

### 3.3.2 Jaringan Permanen Majemuk

Jaringan pengangkut termasuk dalam jaringan permanen majemuk. Jaringan pengangkut atau berkas vaskular memiliki bentuk dan struktur jaringan yang menyerupai saluran atau pipa panjang yang meyalurkan berbagai zat, unsur, maupun senyawa pada setiap organ tumbuhan. Adapun zat yang didistribusikan oleh jaringan pengangkut berupa unsur hara dan mineral serta senyawa dan zat yang dihasilkan dari proses fotosintesis. Jaringan pengangkut sebedakan menjadi dua berdasarkan fungsinya, yaitu jaringan xilem dan jaringan floem (Muttaqin, 2023). Xilem merupakan jaringan yang mengangkut air dan garam-garam mineral dari dalam tanah ke seluruh tubuh tumbuhan, sedangkan floem mengangkut hasil fotosintesis dan diedarkan ke seluruh tubuh tumbuhan.

Xilem dan floem berkembang dari hasil diferensiasi dan prokambium. Prokambium dibentuk oleh promeristem pucuk, kemudian xilem dan floem yang dihasilkan oleh prokambium disebut xilem primer dan floem primer. Xilem primer terdiri dari protoxilem dan metaxilem. Sedangkan floem primer terdiri dari protofloem dan metafloem (Ramdhini et al., 2021).

#### 1. Xilem

Xilem merupakan sebuah jaringan kompleks yang tersusun atas beberapa jenis sel, baik sel hidup maupun sel tak hidup. Adapun komponen utama dari xilem berupa trakea, pada tanaman angiosperma dapat berupa trakea dan trakeid dan hanya trakeid pada tanaman gimnosperma. Xilem sebagai pengangkut air memiliki dinding yang cukup tebal untuk

menebal, selain itu juga berfungsi sebagai penguat dan penyangga, juga berperan dan aktivitas metabolisme. Xilem juga dapat memiliki serabut skleral sebagai penguat jaringan, dan sel parenkim di berbagai bagian (Ramdhini et al., 2021).

Proses perkembangan xylem terdiri atas dua bagian, perkembangan awal yang membentuk *protoxylem*, dan bagian yang berkembang kemudian yaitu *metaxylem*. Protoxylem dan metaxylem menunjukkan sifat yang berbeda, namun penampakan struktur keduanya dapat saling menimpa sehingga kedua xylem tersebut tidak terlihat pembatasannya. Protoxylem akan berdiferensiasi pada bagian organ tumbuhan yang belum selesai masa pertumbuhan dan diferensiasinya, misalnya pada batang yang masih muda atau pucuk. Pada daerah tersebut, protoxylem menjadi dewasa diantara jaringan yang aktif memanjang. Sedangkan metaxylem, terbentuk pada tubuh primer yang masih sedang tumbuh, dan menjadi dewasa terutama setelah pemanjangan sel di bagian organ itu sendiri. Sehingga, metaxylem tidak begitu terpengaruh oleh perluasan primer dari jaringan sekelilingnya dibandingkan dengan protoxylem (Setjo et al., 2004).

## **2. Floem**

- a. Floem juga merupakan sebuah jaringan yang kompleks yang terdiri atas beberapa jenis sel yang berbeda dan disebut sebagai elemen floem. Adapun beberapa elemen floem adalah unsur kribal/unsur tapis, sel pengiring/sel pengantar, serabut/serat floem, dan parenkim floem (Setjo et al., 2004).
- b. Sel pengiring merupakan wadah filter yang berkaitan erat dengan sel yang menyertainya, yang berupa rantai atau baris yang mirip dengan sel parenkim dan sel hidup. Sel-sel pendamping diyakini berperan dalam masuk dan keluarnya zat makanan melalui wadah penyaring (Nugroho, 2012)
- c. Serat-serat floem, pada floem primer serabut terletak di luar jaringan, awalnya bergerombol membentuk cluster,

atau menjadi homogen pada perkembangan selanjutnya, sedangkan pada floem sekunder posisi serabut mengikuti berbagai pola (Nugroho, 2012)

- d. Parenkim floem berfungsi sebagai tempat penyimpanan lemak, pati dan zat organik lainnya (Nugroho, 2012)

### **3. Tipe-Tipe Jaringan Pengangkut**

Menurut Setjo et al., (2004), terdapat beberapa tipe jaringan pengangkut, antara lain:

- a. Tipe Radial  
Xylem dan floem terletak secara bergantian dan berdampingan yang berada pada jari-jari tubuh yang berbeda, yang pada umumnya ditemukan pada akar
- b. Tipe Kolateral  
Kolateral merupakan tipe jaringan pengangkut yang letak xilem dan floemnya berdampingan, dimana floem berada di bagian luar dari xilem (Ramdhini et al., 2021). Apabila xylem dan floem berdampingan secara langsung tanpa adanya kambium sebagai pemisah, maka disebut kolateral tertutup, sedangkan ketika diantara xylem dan floem terdapat kambium, maka disebut kolateral terbuka (Setjo et al., 2004).
- c. Tipe Bikolateral  
Bikolateral merupakan tipe pengangkut dimana xylem diapit oleh floem, dengan susunan dari luar menjadi floem luar, kambium, xylem, floem dalam.
- d. Tipe Konsentris Amfikribal  
Tipe berkas pengangkut ini apabila floem mengelilingi xylem, sehingga xylem berada di tengah
- e. Tipe Amvifasal  
Tipe berkas pengangkut ini apabila xylem mengelilingi floem, sehingga floem berada di tengah kambium, maka disebut kolateral terbuka (Setjo et al., 2004).
- f. Tipe Bikolateral  
Bikolateral merupakan tipe pengangkut dimana xylem diapit oleh floem, dengan susunan dari luar menjadi floem luar, kambium, xylem, floem dalam.

- g. Tipe Konsentris Amfikribal  
Tipe berkas pengangkut ini apabila floem mengelilingi xylem, sehingga xylem berada di tengah
- h. Tipe Amvifasal  
Tipe berkas pengangkut ini apabila xylem mengelilingi floem, sehingga floem berada di tengah

## DAFTAR PUSTAKA

- Campbell, R, et all. (2009). *Biology: Eighth Edition*. Pearson Benjamin Cummings.
- Campbell, N. A., Reece, J. B., Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Jackson, R. B. (2000). *Biology*. Erlangga.
- Dwiyani, R. (2015). Kultur Jaringan Tanaman. In *Journal of Chemical Information and Modeling*. Pelawa Sari.
- Glas, J. J., Schimmel, Bernardus C J. Alba, J. M., & Rocío Escobar-Bravo Schuurink, Robert C. Kant, M. R. (2012). Plant Glandular Trichomes as Targets for Breeding or Engineering of Resistance to Herbivores. *Int. J. Mol. Sci.* 13: 17077- 17103.
- Hindriana, A. F., & Handayani. (2016). *Anatomi Tumbuhan*. Literasi Nusantara Abadi Grup.
- Juhari, M. A. A. A., Noraini, T., Amri, C. N. A. ., & Rahman, M. R. . (2014). Trichomes Morphology on Petals of some Acanthaceae Species. *A Journal on Taxonomic Botany, Lant Sociology and Ecology*, 14(1). [http://repo.iain-tulungagung.ac.id/5510/5/BAB 2.pdf](http://repo.iain-tulungagung.ac.id/5510/5/BAB%20.pdf)
- Muhammadiyah, A., & Karim, H. (2010). *Anatomi Tumbuhan* (Jurusan Bi).
- Muttaqin, A. Z. (2023). *Anatomi Tumbuhan (Sel, Jaringan dan Organ Vegetatif Tumbuhan)*. UKI Press.
- Nugroho, L. H. (2012). *Struktur dan Perkembangan Tumbuhans*. Penebar Swadaya.
- Purves, D., Sadava, G. H., Orians, & Heller., H. C. (2004). *Life The Science of Biology*. W. H. Freeman & Co.
- Ramdhini, A. N., Monau, A. I., Ruwaida, I. puji, Isrianto, P. L., & Panggabean, N. H. (2021). *Anatomi Tumbuhan*. Yayasan Kita Menulis.
- Rasyid, M. (2017). *Pengembangan Atlas Anatomi Tumbuhan Berbasis Potensi Lokal Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung sebagai Bahan Ajar di Universitas Negeri Makassar*. Universitas Negeri Malang.



- Rasyid, M., Irawati, M. H., & Saptasari, M. (2017). ANATOMI DAUN FICUS RACEMOSA L.(BIRAENG) DAN POTENSINYA DI TAMAN NASIONAL BANTIMURUNG BULUSARAUNG. *Jurnal Pendidikan: Teori, Penelitian, Dan Pengembangan*, 2(6), 861–866.
- Setjo, S., Kartini, E., Saptasari, M., & Sulisetijono. (2004). *Anatomi Tumbuhan*. Jica.
- Sholehah, N., & Kuswara, D. R. (2022). Buku Ajar Anatomi Tumbuhan. In *Repository.Uin-Suska.Ac.Id*. Alfa Press. <http://repository.uin-suska.ac.id/26740/1/Haki> Buku Genealogi Intelektual Melayu Tradisi Pemikiran Islam Abad ke 19 di Kerajaan Riau Lingga.pdf
- Simpson, M. G. (2006). *Plant Systematics*. Elsevier. [http://repo.iain-tulungagung.ac.id/5510/5/BAB 2.pdf](http://repo.iain-tulungagung.ac.id/5510/5/BAB%202.pdf)
- Swanson, B. T. (2023). *Plant Structure*.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). Plant Physiology, Third Edition. In *Science progress* (Vol. 34, Issue 136). Sinauer Associates. <https://doi.org/10.1017/9781108486392>



# BAB 4

## STRUKTUR MORFOLOGI AKAR

*Oleh Ite Morina Yostianti Tnunay*

### 4.1 Pendahuluan

Akar adalah organ vegetatif dari tumbuhan yang selalu ditemukan dalam tanah, tidak berbuku, tidak beruas, tidak berklorofil, berwarna keputihan, kekuningan, atau kecokelatan, dan selalu mengalami pertumbuhan. Akar berperan sebagai penyokong tubuh tumbuhan, organ penyerapan unsur hara dan air, serta tempat penyimpanan cadangan makanan. Akar terdiri atas beberapa bagian utama yakni leher/pangkal akar (*collum*), ujung akar (*apex radices*), batang akar (*corpus radices*), cabang-cabang akar (*radix lateralis*), rambut/bulu akar (*pilus radicalis*), dan tudung akar (*calyptra*). Sistem perakaran yang dijumpai pada tumbuhan terbagi atas dua jenis yakni akar tunggang umumnya dijumpai pada tumbuhan berkeping dua dan sistem perakaran serabut terlihat pada tumbuhan berkeping satu. Akar tunggang dan serabut mengalami modifikasi untuk menunjang fungsi akar misalnya akar tunjang, akar lutut, akar pelekat, dan sebagainya.

### 4.2 Karakteristik Akar

Akar adalah organ vegetatif yang dijumpai pada tumbuhan berkormus (Tjitrosoepomo, 2013; Sunarso & Djuita, 2022). Secara umum sifat-sifat akar sebagai berikut.

1. Berada di dalam tanah, arah tumbuhnya menuju pusat bumi (geotropisme positif) atau ke air (hidrotropisme positif) serta menjauhi cahaya (fototropisme negatif).
2. Tidak memiliki buku dan ruas, serta sel-sel penyusunnya tidak mengandung klorofil.
3. Berwarna keputihan, kekuningan, atau kecokelatan bergantung pada jenis tumbuhannya.
4. Selalu mengalami pertumbuhan karena terdapat sel meristem khususnya pada ujung akar yang selalu membelah.

### 4.3 Peranan Akar

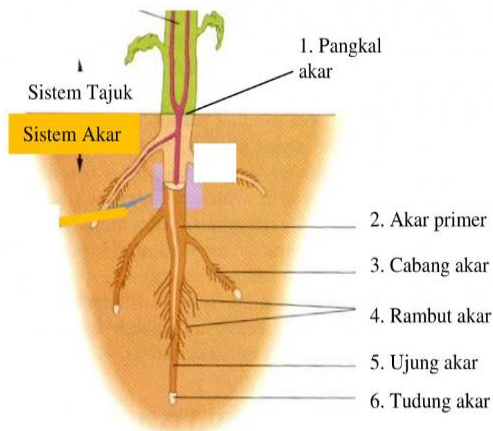
Akar memegang peranan penting dalam tubuh tumbuhan karena fungsi yang dikerjakannya (Tjitrosoepomo, 2013; Silalahi, 2022), yaitu:

1. Sebagai penyokong batang sehingga tubuh tumbuhan dapat tumbuh tegak. Akar menyebabkan batang dapat berdiri kokoh dan tidak mudah tergoyah oleh angin atau air.
2. Organ penyerapan dan pengangkut unsur hara dan air. Akar menjalankan fungsi penyerapan unsur hara dan air melalui jaringan epidermis dan modifikasinya berupa rambut akar. Unsur hara dan air yang terserap melalui rambut akar selanjutnya diangkut ke pembuluh xilem akar dan diteruskan ke pembuluh xilem batang serta xilem daun.
3. Tempat penyimpanan cadangan makanan. Fungsi ini dijalankan karena keberadaan jaringan parenkim. Fungsi akar sebagai tempat penimbunan cadangan makanan dijumpai pada tumbuhan ubi kayu, ubi jalar, wortel, bit, dan sebagainya.

### 4.4 Bagian-bagian Akar

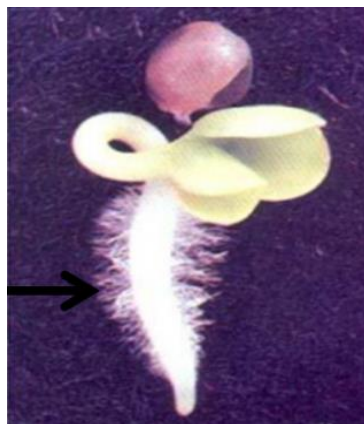
Secara umum bagian-bagian akar ditampilkan pada Gambar 1. Akar pada tumbuhan terbagi atas beberapa bagian utama yang sebagai berikut (Tjitrosoepomo, 2013; Barclay, 2015; Sunarso & Djuita, 2022; Silalahi, 2022).

1. Pangkal atau leher akar (*collum*) merupakan bagian yang langsung menyambungkan akar dan batang. Bagian pangkal inilah yang menjadi titik awal untuk mengukur panjang akar.
2. Batang akar (*corpus radicle*) atau akar primer yakni bagian di antara pangkal akar dan ujung akar. Khusus bagi tumbuhan berkeping dua (Dicotyledoneae) bagian batang akar berasal dari akar primer saat perkecambahan.



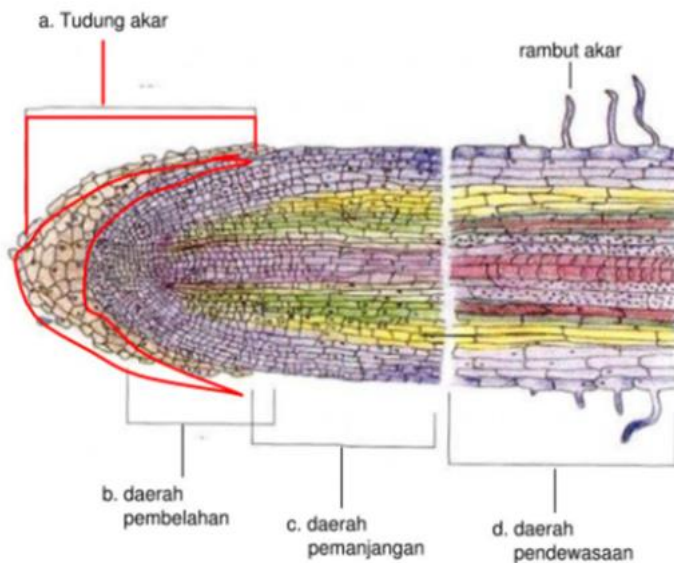
**Gambar 4.1.** Bagian-bagian akar (Sumber: Sunarso & Djuita, 2022)

3. Cabang akar (*radix lateralis*) merupakan bagian yang tumbuh dari batang akar. Cabang akar dibentuk secara akropetal yaitu letak cabang akar tua berdekatan dengan pangkal akar. Cabang akar terbentuk dari jaringan perisikel dan dapat dijumpai stele.
4. Rambut akar (*pilus radicalis*) adalah penonjolan dari sel epidermis akar yang berperan untuk menyerap unsur hara dan air. Rambut akar banyak dijumpai pada ujung akar dan pada biji yang baru berkecambah (Gambar 4.2).



**Gambar 4.2.** Rambut akar pada biji yang baru berkecambah (Sumber: Reece *et al.*, 2011)

5. Ujung akar (*apex radicle*) adalah bagian yang paling muda pada akar serta mempunyai jaringan yang masih dapat bertumbuh yaitu jaringan meristem apikal. Adanya jaringan meristem apikal menyebabkan akar dapat mengalami pertumbuhan memanjang dan menembus tanah. Struktur ujung akar beserta tudung akar terlihat pada Gambar 4.3 berikut.
6. Tudung akar (*calyptra*) berfungsi sebagai pelindung ujung akar karena letaknya yang menutupi ujung akar. Tudung akar juga dijumpai pada ujung cabang akar.

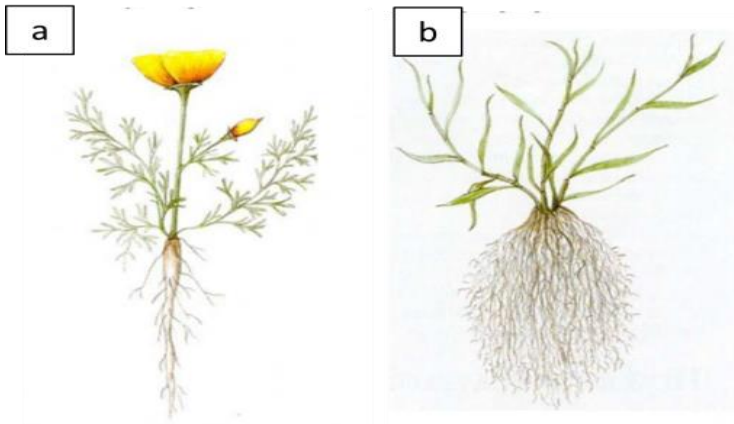


**Gambar 4.3.** Penampang membujur akar (Sumber: Rost *et al*, 1997 dalam Sunarso & Djuita, 2022)

## 4.5 Sistem Perakaran dan Modifikasinya

Akar yang terbentuk pada tumbuhan berasal dari calon akar atau disebut juga akar lembaga (*radicula*). Ujung akar lembaga menghadap ke lubang atau celah biji sehingga pada saat perkecambahan akar akan tumbuhan menembus kulit biji dan keluar melalui celah biji. Pada tahapan perkembangan selanjutnya yakni sejak perkecambahan hingga mencapai tumbuhan dewasa terjadi perkembangan yang berbeda pada akar lembaga. Hal ini mengakibatkan terbentuknya dua sistem perakaran pada

tumbuhan, yakni akar tunggang dan serabut (Gambar 4.4). Baik akar tunggang maupun akar serabut selanjutnya dapat membentuk cabang-cabang akar guna memperluas daerah penyerapan unsur hara dan air serta memperkokoh berdirinya batang tumbuhan (Tjitrosoepomo, 2013; Silalahi, 2022).



**Gambar 4.4.** Sistem perakaran. a. tunggang; b. serabut (Sumber: Stern, 2000 dalam Sunarso & Djuita, 2022)

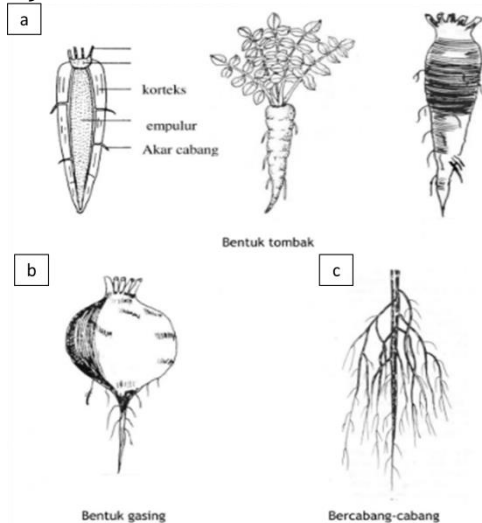
1. Akar tunggang (*radix primordia*). Terbentuknya akar tunggang terjadi apabila akar lembaga terus melakukan pertumbuhan membentuk akar utama dengan cabang-cabang akar. Sistem akar tunggang dijumpai pada tumbuhan Dicotyledoneae dan beberapa tumbuhan Gymnospermae.
2. Akar serabut (*radix adventicia*). Sistem akar serabut akan terbentuk apabila dalam perkembangannya akar lembaga mati dan diganti dengan akar-akar berukuran sama besar dan muncul di pangkal batang. Akar yang muncul berbentuk seperti serabut dan halus sehingga disebut akar serabut.

Klasifikasi akar tunggang berdasarkan keberadaan cabang dan bentuk sebagai berikut.

1. Akar tunggang tanpa cabang atau dengan sedikit cabang. Biasanya apabila terdapat cabang-cabang maka cabang akar tersebut berbentuk serabut halus. Terkadang modifikasi pada

akar tunggang disesuaikan dengan fungsinya yaitu sebagai tempat menimbun atau menyimpan cadangan makanan dan bentuknya dapat bervariasi. Modifikasi bentuk dan fungsi pada akar tunggang sebagai berikut.

- a. Akar berbentuk tombak (*fusiformis*). Akar tombak memiliki pangkal yang membesar dan ujung yang meruncing serta cabang akar berbentuk serabut. Akar tombak yang disebut juga akar pena berfungsi untuk menyimpan cadangan makanan seperti dijumpai pada lobak (*Raphanus sativus* L.) dan wortel (*Daucus carota* L.) (Gambar 4.5a).
- b. Akar berbentuk gasing (*napiformis*). Akar ini memiliki pangkal yang berukuran besar dan membulat, ujung meruncing, serta serabut sebagai cabang akar. Tumbuhan dengan akar gasing ditemukan pada bengkuang (*Pachyrrhizus erosus* Urb) dan bit (*Beta vulgaris* L.) (Gambar 5b).
- c. Akar berbentuk benang (*filiformis*). Akar dapat terlihat seperti benang apabila akar tunggangnya berukuran kecil dan panjang serta memiliki sedikit cabang akar. Akar berbentuk benang dijumpai pada tanaman kratok (*Phaseolus lunatus* L.).



**Gambar 4.5.** Contoh sistem perakaran tunggang  
(Sumber: Tjitrosoepomo, 2013)



2. Akar tunggang dengan cabang (*ramosus*). Akar tunggang dengan banyak cabang umumnya terlihat seperti kerucut memanjang, tumbuh tegak dalam tanah, dan membentuk cabang serta anak cabang akar. Akar ini memberi kekuatan kepada batang dan karena sistem perakarannya luas maka akar dapat menyerap unsur hara dan air lebih banyak. Akar dengan banyak cabang dijumpai pada tumbuhan berperawakan pohon (Gambar 4.5c).

Akar serabut juga ditemukan beberapa bentuk sebagai berikut (Gambar 4.6).

1. Akar bentuk benang. Akar ini biasanya berbentuk mirip benang dan halus contohnya akar tanaman padi (*Oryza sativa* L.).
2. Akar bersifat kaku, keras, dan besar seumpama tali tambang seperti dijumpai pada lontar (*Borassus flabelifer* L.), kelapa (*Cocos nucifera* L.).
3. Akar berukuran besar dan tidak membentuk cabang yang berfungsi untuk menopang batang. Akar ini dijumpai pada pandan (*Pandanus tectorius* Parkinson).

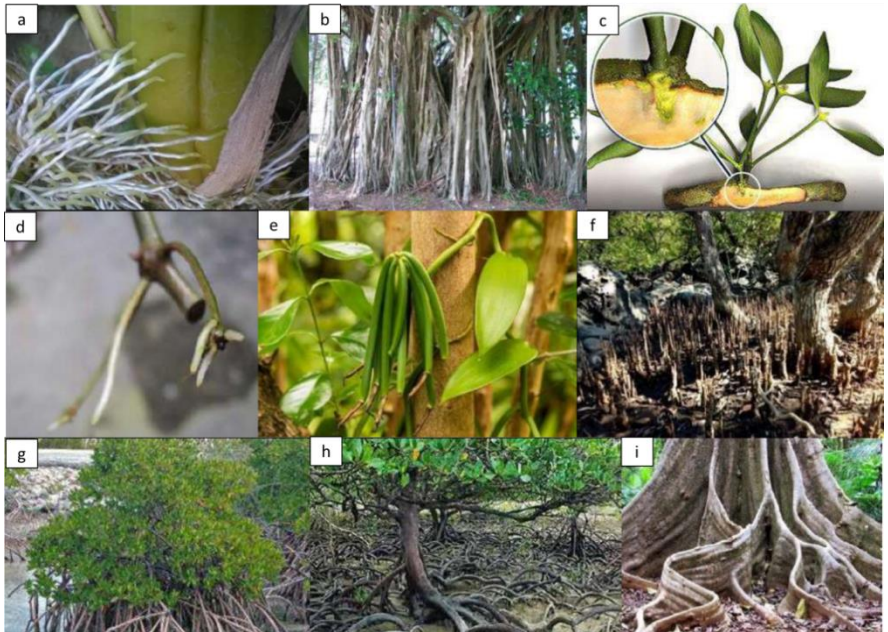


**Gambar 4.6.** Keragaman akar serabut. a. akar padi, b. akar kelapa; c. akar pandan. (Sumber: Hasnunidah & Wiono, 2019)

Akar juga melakukan modifikasi untuk menyesuaikan keadaan tumbuhnya. Akar dengan modifikasi ini mempunyai fungsi tertentu, contohnya akar udara, akar penggerek, akar pelekat, akar pembelit, akar napas, akar tunjang, akar lutut, dan akar banir (Gambar 4.7).

1. Akar udara atau akar gantung (*radix aereus*). Akar udara muncul pada organ tumbuhan yang letaknya di atas permukaan tanah, tergantung di udara, kemudian tumbuh menuju tanah. Akar gantung berfungsi sebagai penyerap air dan gas di udara. Kadang akar gantung memiliki jaringan spesifik bernama velamen yang mampu menyimpan air dan udara seperti pada anggrek kalajengking (*Arachnis flos-aeris* L.). Akar udara juga dijumpai pada tanaman beringin (*Ficus benjamina* L.).
2. Akar penggerek juga disebut akar pengisap (*haustorium*). Akar tersebut dijumpai pada tumbuhan parasit misalnya pada benalu (*Loranthus* sp.) dan berperan dalam penyerapan air serta nutrisi dari tumbuhan inangnya. Akar pengisap mampu menembus kulit batang sehingga dengan mudah menyerap nutrisi di dalam tubuh inang. Akar pengisap lainnya bisa berupa akar berukuran pendek yang dapat menempel sekaligus mengisap nutrisi dan air dari inangnya misalnya tanaman endak cacing (*Cuscuta australia* R. Br.).
3. Akar pelekat (*radix adligans*). Tipe akar pelekat dijumpai pada lada (*Piper nigrum* L.) dan sirih (*Piper betle* L.). Akar akan muncul dari buku batang dan berperan sebagai alat penempel pada penopangnya.
4. Akar pembelit (*cirrhous radicalis*). Tumbuhan dengan tipe akar pembelit menggunakan akarnya untuk membelit atau memeluk penopangnya dan hanya digunakan sebagai alat memanjat misalnya dijumpai pada tanaman vanili (*Vanilla planifolia* Andr.).
5. Akar napas (*pneumatophora*). Merupakan cabang akar yang tumbuh tegak ke atas tanah atau pada permukaan air. Akar napas berfungsi sebagai jalan masuk udara karena terdapat celah-celah (*pneumathoda*) yang mirip seperti stomata. Tumbuhan dengan akar napas banyak dijumpai pada daerah berair misalnya bogem (*Sonneratia* sp.) dan kayu api (*Avicennia* sp.).
6. Akar tunjang atau akar egrang. Tipe akar tersebut muncul di batang bagian bawah dekat pangkal akar. Akar tunjang berperan untuk menunjang batang sehingga batang tidak roboh. Akar tunjang dijumpai pada tumbuhan pandan (*Pandanus tectorius* Sol.), dan jagung (*Zea mays* L.)

7. Akar lutut terbentuk jika akar tumbuh ke permukaan tanah lalu membengkok dan kembali ke tanah. Tumbuhan dengan akar lutut banyak terlihat di kawasan mangrove berlumpur dan berperan untuk pernapasan seperti pada pohon tanjang (*Bruguiera parvifolia* W. et A.).
8. Akar banir atau akar papan yaitu akar yang muncul di permukaan tanah berbentuk pipih serupa papan yang disimpan miring. Akar tersebut berperan sebagai pengokoh berdirinya batang berukuran besar contohnya pada sukun (*Artocarpus communis* G. Forst) dan kenari (*Canarium commune* L.).



**Gambar 4.7.** Modifikasi akar sesuai tempat tumbuh dan fungsinya. a. akar udara; b. akar gantung; c. akar penggerek; d. akar pelekat; e. akar pembelit; f. akar napas; g. akar tunjang; h. akar lutut, i. akar banir (Sumber: Hasnunidah & Wiono, 2019).

## DAFTAR PUSTAKA

- Hasnunidah, N. & Wiono W. J. 2019. *Botani Tumbuhan Tinggi*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Reece, J. B., Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., Jackson, R. B., Campbell, N. A. 2011. *Biology*. San Fransisco: Pearson Education, Inc.
- Silalahi, M. 2022. *Buku Materi Pembelajaran Morfologi Tumbuhan*. Jakarta: Prodi Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Kristen Indonesia.
- Sunarso, H & Djuita, N.R. 2022. *Morfologi Tumbuhan*. Jakarta: Penerbit Universitas Terbuka.
- Tjitrosoepomo, G. 1988. *Morfologi Tumbuhan*. Yogyakarta: UGM Press.

# **BAB 5**

## **PERKEMBANGAN STRUKTUR ANATOMI PRIMER AKAR MONOKOTIL & DIKOTIL**

*Oleh Ashari Bagus Setiawan*

### **5.1 Pendahuluan**

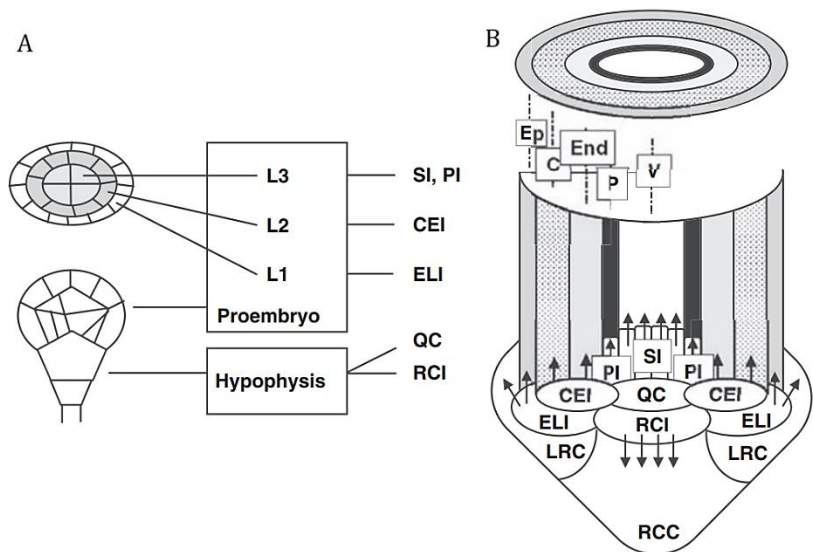
Telah dijelaskan pada bab sebelumnya bahwa akar merupakan sumbu multiseluler yang mengalami diferensiasi dan tidak terbagi ke dalam buku dan ruas seperti halnya pada batang maupun daun. Ia memiliki peran dalam menembus tanah untuk mencari air, unsur hara, serta garam mineral untuk diteruskan menuju batang hingga ke daun melalui fotosintesis; menyimpan cadangan makanan; tempat terjadinya respirasi; serta yang tak kalah penting adalah menopang sekaligus menegakkan tumbuhan. Bahkan dalam memperluas daerah penyerapan hara mineral, akar dapat bersimbiosis dengan fungi tertentu (Seago & Fernando, 2013; Rudall, 2020; Sutrisno, 2021; Hindriyana & Handayani, 2023).

Berdasarkan evolusinya, akar merupakan organ terakhir dari tipe organ utama yang mengalami evolusi. Hal ini merupakan bentuk adaptasi tumbuhan awal yang berhabitat di dekat air untuk memaksimalkan fotosintesis. Keberadaan akar primer menjadi utama dalam perkembangan dari sistem perakaran suatu tumbuhan yang berpengaruh terhadap struktur anatomi maupun panjangnya. Akar tumbuh memanjang karena adanya aktivitas meristem ujung yang dilindungi oleh tudung akar yang pada akhirnya terbagi menjadi beberapa zona dengan aktivitas yang kontras disertai dengan serangkaian diferensiasinya. Diferensiasi ini akan menghasilkan sel-sel yang tersusun dalam jaringan dan membentuk akar primer (Seago & Fernando, 2013; Rudall, 2020). Dalam bab ini, akan didiskusikan mengenai perkembangan dan diferensiasi pada akar primer, teori yang berhubungan dengan pembagian sel-sel

pada ujung akar, struktur anatomi akar primer disertai dengan asal pembentukan dan peran fisiologisnya, serta regulasi hormon dan nutrisi selama pembentukan akar primer monokotil dan dikotil.

## **5.2 Perkembangan dan Diferensiasi Akar Primer pada Monokotil dan Dikotil**

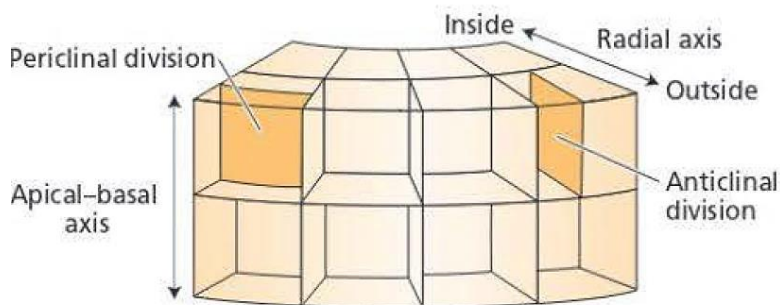
Akar berkembang secara terus-menerus melalui tahap proliferasi dan morfogenesis yang terjadi pada ujung akar yang terjadi di daerah meristematik secara melintang dan berulang (Scheiflben *et al.*, 1997). Sel-sel pada ujung akar berkembang secara seragam dan tidak menghasilkan organ tambahan seperti buku atau ruas yang dijumpai seperti pada batang meskipun perkembangannya juga berasal dari jaringan meristem yang sama, yaitu meristem apikal. Meristem apikal tersusun atas sel-sel halus yang memerlukan perlindungan. Sel-sel ini dinamakan dengan istilah histogen (Steeves & Sawhney, 2017). Adanya meristem apikal pada akar berasal dari pembelahan sel pertama pada embrio tumbuhan, yaitu saat pada fase zigot. Embrio kemudian memasuki fase elongasi dan membelah secara asimetris membentuk sel apikal kecil (memberikan pertumbuhan bagi embrio) dan sel basal besar (yang terbentuk dari bagian basal embrio dan suspensor). Sel apikal selanjutnya membentuk deretan pembelahan stereotip untuk menghasilkan embrio; sedangkan sel basal membelah beberapa kali di waktu yang sama untuk menghasilkan suspensor. Akar embrionik berasal dari tingkat sel embrio yang lebih rendah pada fase globular dari embrio dan bagian atas sel dari suspensor yang disebut dengan hipofisis. Hipofisis inilah yang selanjutnya akan membentuk meristem akar dan tudung akar (Gambar 5.1) (Thomas, 2017; Taiz *et al.*, 2018; Rudall, 2020).



**Gambar 5.1.** Asal diferensiasi sel-sel akar. A. Proembrio fase globular pada sayatan melintang dan membujur. Asal dari tiga lapis sel radial L1, L2, dan L3 ditunjukkan pada sayatan melintang. Sayatan membujur ditandai proembrio dan hipofisis. Huruf di sebelah kiri menunjukkan sel promeristem yang berasal dari struktur embrionik. Keterangan: SI=inisial stele; PI=inisial perisikel; CEI=inisial korteks/endodermis; ELI=inisial epidermis/tudung akar lateral; QC=pusat istirahat; RCI=inisial kolumela. B. Pembagian dan aktivitas meristem apikal akar. Perbedaan tipe sel pada meristem dan akar dewasa ditunjukkan pada perbedaan bagian yang diarsir dan huruf. Keterangan: Ep=epidermis; C=korteks; End=endodermis; P=perisikel; V=pembuluh vaskuler. Sel pada tudung akar ditandai sebagai berikut: LRC=tudung akar lateral; RRC=tudung akar kolumela; keduanya berasal dari sel inisial promeristem yang diidentifikasi menggunakan huruf yang sama seperti pada gambar A. (Sumber : Thomas, 2017)

Pada tumbuhan Angiospermae seperti monokotil atau dikotil, terbentuk tiga daerah inisiasi yang membelah secara antiklinal (pembelahan ortogonal menuju sumbu pertumbuhan) menghasilkan sekumpulan selapis sel atau antiklinal pertama kemudian dilanjutkan secara periklinal (paralel menuju sumbu

pertumbuhan) yang nantinya menghasilkan dua atau lebih lapis sel (Gambar 5.2). Tiga daerah inisiasi ini bertipe tertutup dan teridentifikasi sebagai: tingkat pertama adalah silinder pengangkut dan perisikel, tingkat berikutnya adalah korteks yang berasal dari pembelahan inisiasi korteks/endodermis. daerah ini berkembang dari pembelahan secara antiklinal untuk membentuk sel inisiasi dan sel anak basal.

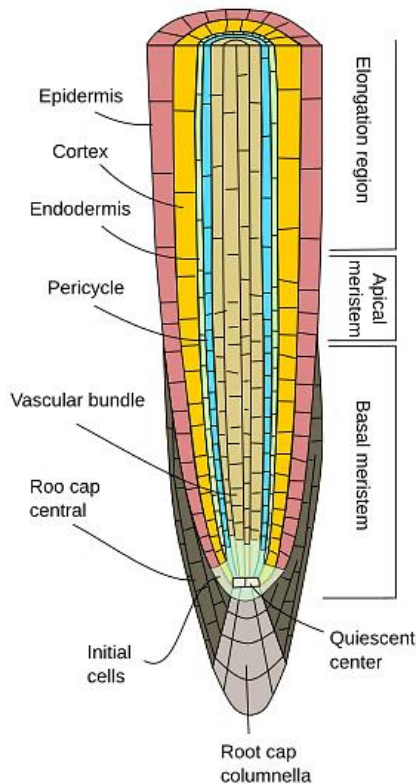


**Gambar 5.2.** Ilustrasi pembelahan sel secara antiklinal dan periklinal. Pembelahan antiklinal menghasilkan dinding sel baru yang tegak lurus dengan permukaan jaringan sehingga jumlah sel meningkat satu lapis; sedangkan pembelahan periklinal menghasilkan dinding sel baru yang sejajar permukaan jaringan yang berdampak terhadap pembentukan dari lapisan baru. (Sumber : Taiz *et al.*, 2018)

Sel anak basal selanjutnya membelah secara periklinal untuk membentuk lapisan korteks maupun endodermis. Tingkat yang terluar adalah bagian epidermis, kolumela, dan tudung akar. Kolumela berasal dari kumpulan inisiasi sel yang membelah secara antiklinal dan mengalami pemanjangan yang sangat cepat, mengandung amiloplas yang berperan dalam merasakan gravitasi dan mengarahkan pada daerah pemanjangan akar. Pada suku *Poaceae*, dijumpai kaliptrogen yang diduga merupakan lapisan keempat dan berasal dari tudung akar. Kaliptrogen tidak dijumpai pada tumbuhan dikotil. Tudung akar tersusun atas beberapa lapis sel-sel parenkim, terletak berdekatan dengan pusat istirahat, serta mengandung lendir berupa mukopolisakarida yang berperan



sebagai pelumas saat menembus partikel tanah dan mendeteksi tarikan gravitasi sehingga dapat mengontrol pertumbuhan akar menuju ke pusat bumi. Akibat peran ini, sel-sel tudung akar mudah terkikis sehingga harus dilakukan perbaikan. Pusat istirahat (*quiescent center* (QC)) menghubungkan sejumlah kecil sel pusat yang secara mitosis kurang aktif dibandingkan dengan sel di sekitarnya. Namun, pusat diam akan menjadi aktif pada kondisi tertentu, misalnya pada akar yang baru pulih saat dormansi musim dingin, kekurangan nutrisi, atau kerusakan pada daerah meristem apikal akar. Aktifnya daerah pusat diam ini merupakan respons dalam menanggapi kondisi lingkungan (Gambar 5.3).



**Gambar 5.3.** Daerah pembentukan sel-sel pada meristem apikal akar *Arabidopsis*  
(Sumber : diadaptasi dari Perèt *et al.*, 2009)

Sel-sel inisiasi ini mengalami proliferasi, tumbuh dalam ukuran dan berdiferensiasi menjadi berbagai sel fungsional yang nantinya akan membentuk jaringan akar primer. Inisiasi sel-sel ini selanjutnya akan berkembang menuju zona pemanjangan saat terhenti membelah dan memperbesar ukurannya. Setelah mencapai ukuran tertentu, sel-sel ini selanjutnya mengalami diferensiasi pada zona diferensiasi atau pematangan. Tiga zona ini saling berdegradasi satu sama lain dan tidak menampakkan adanya garis demarkasi (Gambar 5.3) (Scheres *et al.*, 2002; Beck, 2010; Rost, 2011; Evert & Eichhorn, 2013; Rudall, 2020; Hindriyana & Handayani, 2023).

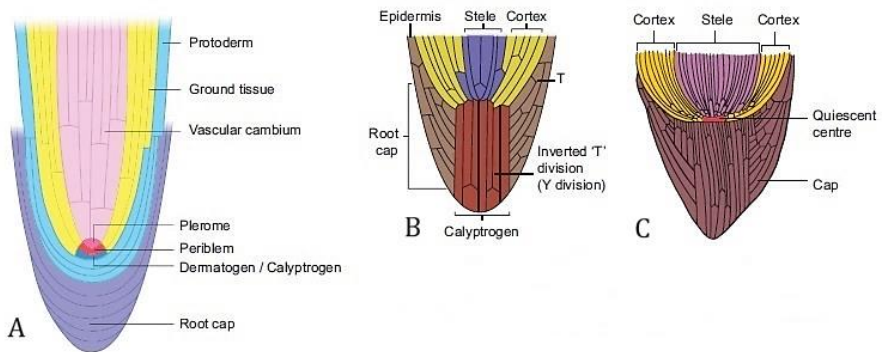
### **5.3 Teori yang Berhubungan dengan Pembagian Sel-sel pada Ujung Akar**

Ujung akar memiliki struktur yang sederhana jika dibandingkan dengan batang. Pada abad kesembilan belas seorang peneliti yang berasal dari Jerman, Hanstein, mengusulkan adanya tiga wilayah atau histogen yang berbeda. Tingkat lapisan ini diyakini berasal dari inisiasi ujung akar yang mirip dijumpai pada ujung batang, antara lain: dermatogen (meliputi lapisan epiblema atau piliferous atau rhizodermis), periblem (meliputi korteks dan endodermis), serta pleurom (meliputi berkas pengangkut dan empulur). Konsep ini dinamakan dengan teori Histogen (Beck, 2010).

Pada 1917, Schuepp mengusulkan sebuah teori yang dikenal dengan Körper-Kappe. Dia mencatat bahwa selama pertumbuhan di zona tengah pada ujung akar, sel baru yang terbentuk menyerupai huruf T terbalik; sedangkan zona luar dan tudung akar ditandai dengan huruf T normal. Zona yang huruf T menghadap ke puncak akar disebut Körper (badan) dan zona yang berupa huruf T melintang menghadap ke pangkal akar disebut Kappe (topi). Konfigurasi T terbalik ini meluas hingga ke kolumela pada beberapa takson tumbuhan tertentu. Körper tersusun atas provaskuler, meristem dasar, protoderm, serta termasuk beberapa bagian luar meristem dasar. Lain halnya dengan Kappe yang tersusun atas tudung akar dan protoderm, serta beberapa bagian luar dari

meristem dasar. Teori ini serupa dengan teori Tunika-Korpus pada batang (Beck, 2010).

Pada 1956, pengamatan Clowes pada ujung akar jagung memperlihatkan adanya struktur inaktif yang terdapat di bagian tengah dari ujung akar yang disebut daerah pusat diam yang menjadi konsep pembagian ujung akar. Daerah ini dicirikan memiliki kadar DNA, RNA, serta protein yang rendah. Beck (2010) menjelaskan bahwa daerah ini juga berasal dari inisiasi jaringan meristematik di ujung akar. Akibat adanya daerah ini, zona yang aktif membelah bergeser ke pinggirannya. Perbandingan tiga teori ini diilustrasikan pada Gambar 5.4.



**Gambar 5.4.** Perbandingan teori perkembangan ujung akar. A. Hanstein; B. Körper-Kappe; C. Daerah pusat diam (*Quiescent Centre*).

(Sumber : [https://brainkart.com/article/Meristematic-Tissue\\_33027/](https://brainkart.com/article/Meristematic-Tissue_33027/))

## 5.4 Struktur Anatomi Akar Primer disertai dengan Asal Pembentukan dan Peran Fisiologisnya

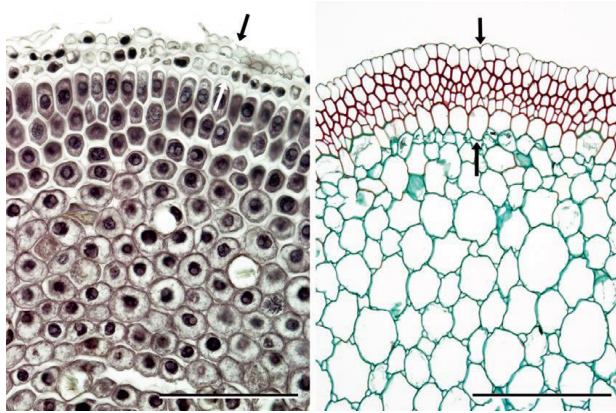
Berdasarkan sistem perakaran, tumbuhan monokotil maupun dikotil memiliki sistem perakaran yang berbeda. Sistem perakaran monokotil bertipe serabut yang berasal dari perakaran tunggang yang abortif dan memiliki akar tambahan, serta tidak mengalami pertumbuhan sekunder yang berkembang dari pangkal batang. Sistem ini lebih aktif dalam menjangkau serta memudahkan dalam penyerapan dan transportasi hara. Pada dikotil, sistem

perakaran teridentifikasi sebagai akar tunggang. Akar tunggang berkembang dari meristem di ujung bawah hipokotil embrio. Sumbu sistem perakarannya dapat meluas hingga ke dalam permukaan tanah dan berkayu, sehingga kuat dalam mempertahankan kondisi tumbuhan dari banjir maupun terpaan angin kencang (Beck, 2010).

Struktur anatomi akar berbentuk radial dan tersusun dari luar ke dalam meliputi: epidermis, korteks (selapis atau beberapa lapis), dilanjutkan oleh bagian endodermis yang tersusun melingkar membatasi daerah luar dan dalam, perisikel, hingga bagian paling penting adalah berkas pengangkut diikuti empulur (Cutler *et al.*, 2007). Satu demi satu bagian ini akan dijelaskan mulai dari ciri tiap sel, asal pembentukan, hingga peran fisiologisnya masing-masing.

#### **5.4.1 Epidermis**

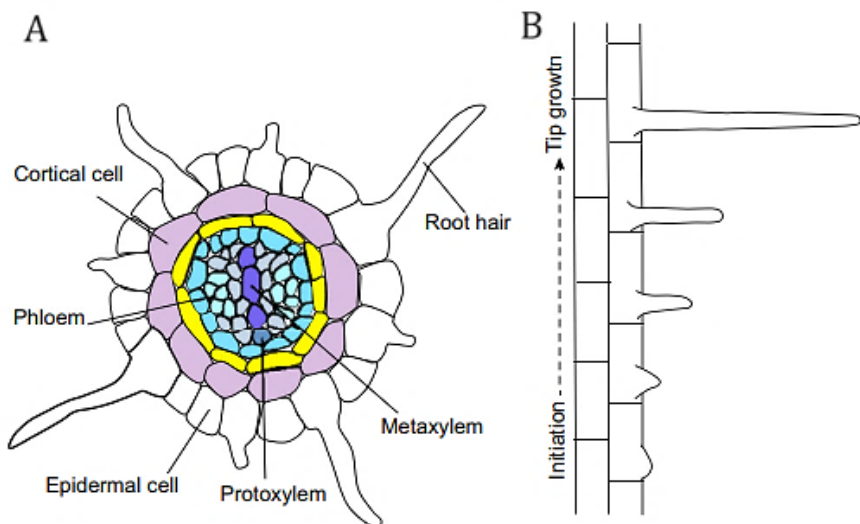
Daerah ini merupakan bagian terluar dari anatomi akar. Bahkan, epidermis ini ada yang menyebutnya rhizodermis atau epiblema. Epidermis berperan sebagai penyerapan air dan hara mineral dan menghasilkan lendir sebagai pelumas. Sel-sel epidermis umumnya seragam (biasanya isodiametris), tersusun selapis, serta tidak dijumpai stomata. Di beberapa spesies tumbuhan, akar udara pada anggrek dan tumbuhan Aroid misalnya, dijumpai epidermisnya berganda (Gambar 5.5). epidermis ini pada anggrek disebut velamen. Sel-sel velamen tidak memiliki protoplas dan mampu menahan air, sebagian dinding selnya tebal dan mengalami lignifikasi. Perkembangan epidermis berasal dari protoderm pada inisial meristem apikal akar yang selnya membelah ke arah luar secara antiklinal. Pada beberapa spesies tumbuhan, lapisan di bawah epidermis mengalami penebalan oleh suberin pada dinding selnya yang disebut eksodermis yang berfungsi mengontrol masuknya air dan hara mineral yang masuk ke dalam akar (Scott, 1978; Dolan & Costa, 2001; Glover *et al.*, 2016; Steeves & Sawhney, 2017; Crang *et al.*, 2018; Rudall, 2020).



**Gambar 5.5.** Epidermis. Bagian kiri merupakan anatomi dari akar *Iris* yang menunjukkan epidermis berganda (ditunjukkan dengan tanda anak panah hitam dan putih). Bagian kanan yang ditandai dengan tanda anak panah hitam adalah velamen pada akar anggrek. Garis skala=50 $\mu$ m pada *Iris* dan 100  $\mu$ m pada anggrek. (Sumber : Crang *et al.*, 2018)

Kemampuan akar dalam menyerap air dan hara mineral tidak lepas dari adanya rambut akar. Rambut akar muncul mulai dari tonjolan di ujung apikal sel rhizodermis yang memanjang melalui pertumbuhan ujung akar, sel-selnya uniseluler dan tidak bercabang, namun terkadang bercabang. Kurang lebih sebanyak 14 miliar rambut akar mampu menyerap sekitar 401 m<sup>2</sup> dan dapat memanjang dari satu daerah ke daerah lain sejauh 10.000 km. Rambut akar memiliki masa hidup yang relatif singkat dan diproduksi di zona pemanjangan akar. Saat akar menembus ke dalam tanah, rambut akar pun telah terbentuk sebagai wujud penyediaan dalam perluasan penyerapan air, hara mineral, dan ion anorganik (Evert & Eichhorn, 2013). Kemunculan rambut akar merupakan akibat dari proses inisiasi dan pertumbuhan ujung rambut akar terjadi melalui pembelahan sel secara asimetris dari sel epidermis yang menghasilkan sel besar tanpa rambut akar (atrikoblas) dan sel yang kecil yang membentuk rambut akar (trikoblas) melalui kontak fisik dengan dua lapis sel kortikal di bawahnya (Gambar 5.6). Munculnya rambut akar dari ujung basal

trikoblas berupa tonjolan membentuk area seperti cakram sebelum sel berhenti memanjang secara longitudinal.

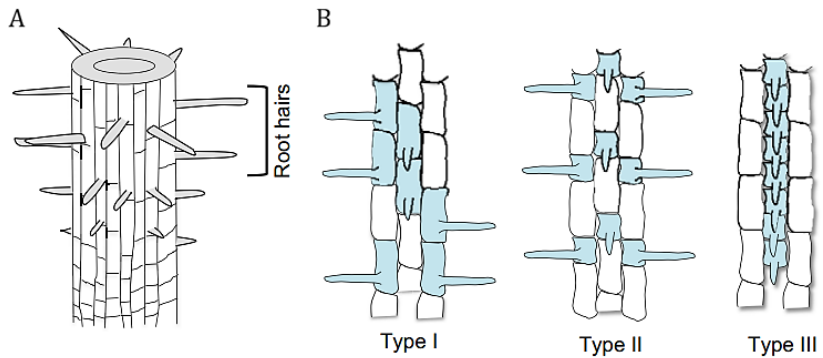


**Gambar 5.6.** Sayatan melintang akar *Arabidopsis* (A) yang menunjukkan sel epidermis kontak dengan dua lapis sel kortikal di sebelahnya dalam pembentukan rambut akar. Gambar B merupakan tahap pembentukan rambut akar yang dimulai dari inisiasi yang ditandai dengan munculnya tonjolan pada ujung basal trikoblas. Perkembangan ini berlanjut sampai pada tahap pertumbuhan ujung yang ditandai dengan tonjolan yang memanjang secara cepat (Sumber : Salazar-Henao *et al.*, 2016)

Terdapat tiga tipe rambut akar yang dijumpai pada tumbuhan antara lain (Salazar-Henao *et al.*, 2016) (Gambar 7.7):

1. **Tipe I.** Rambut akar berkembang membentuk pola secara acak. Pembentukan ini bersifat plastis dan merupakan respons terhadap lingkungan habitatnya. Tipe ini dapat dijumpai pada padi;
2. **Tipe II.** Rambut akar terbentuk melalui pembelahan sel asimetris yang menghasilkan sel besar dan sel kecil. Sel besar tidak membentuk rambut akar, sedangkan sel kecil membentuk rambut akar. Tipe ini dijumpai pada rumput (*Brachypodium*);

3. **Tipe III.** Rambut akar tersusun dalam berkas sel yang juga dikelilingi oleh sel tanpa rambut akar yang tersusun secara berseling. Tipe ini dijumpai pada *Arabidopsis* dan beberapa suku tumbuhan seperti *Capparaceae*, *Tovariaceae*, dan *Resedaceae*.



**Gambar 5.7.** A. Perkembangan rambut akar yang terbagi ke dalam tiga tipe. B. Tipe I dicirikan dengan beberapa sel epidermis dapat membentuk rambut akar; tipe II dicirikan dengan rambut akar yang berasal dari pembelahan sel asimetris dimana sel yang besar memasuki sel tanpa rambut dan sel kecil membentuk rambut akar; tipe III dicirikan rambut akar yang tersusun berseling terhadap sel rambut akar dan sel tanpa rambut akar.

(Sumber : Salazar-Henao *et al.*, 2016)

Ciri rambut akar pada setiap spesies tumbuhan bervariasi. Pada suku *Cyperaceae* misalnya, rambut akar yang panjang tidak menunjukkan asosiasi terhadap ektomikoriza. Pada padi, beberapa sel rhizodermis mampu membentuk rambut akar. Berbeda dengan lili dan teratai yang membentuk rambut akar pada sel trikoblas dengan pola yang bergantian pada tiap sel. Pada *Arabidopsis*, rambut akar hanya terbentuk pada sel aksial yang berseling (Salazar-Henao *et al.*, 2016; Rudall, 2020).

#### 5.4.2 Korteks

Jaringan ini tergolong ke dalam jaringan dasar yang letaknya diantara epidermis dan endodermis. Korteks akar masih merupakan bagian dari akar primer yang perkembangannya berasal

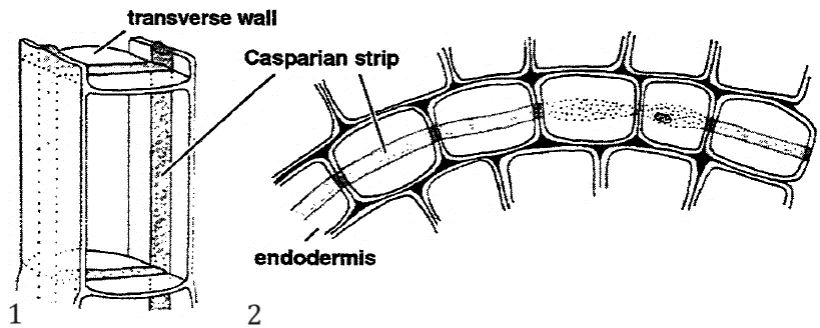
dari pembelahan meristem apikal secara transversal (pertambahan jumlah sel dalam satu kolom ke arah longitudinal), periklinal, dan antiklinal. Pembelahan sel korteks ke arah dalam secara periklinal membentuk endodermis (Lux *et al.*, 2004; Rudall, 2020; Kim *et al.*, 2022). Korteks memiliki ciri yaitu sel-selnya tersusun lebih dari satu lapis dengan tiap selnya berupa parenkim isodiametris dan tidak mengandung kloroplas. Terkadang, daerah korteks juga terdiri dari sel-sel aerenkim atau sklerenkim. Korteks berperan sebagai jaringan penyimpan dan transpor hara mineral serta oksigen (Crag *et al.*, 2018). Setiap sel korteks terdapat ruang antar sel yang terhubung dengan plasmodesmata. Hal ini memudahkan dalam transpor air dan hara mineral secara simplas (transpor melalui plasmodesmata antar sel) maupun apoplas (transpor melalui antar dinding sel). Di dalam korteks, tersimpan amilum atau zat ergastik lain dalam sebuah sel dan letaknya tersebar secara acak yang disebut idioblas. Sel idioblas memiliki bentuk, ukuran, dan isi yang berbeda dari sel tetangganya. Di dalam korteks akar, tidak hanya menyimpan amilum saja, melainkan zat ergastik lain seperti: minyak atsiri, sklereid, tanin, serat, lendir akar, kristal, dan kelenjar resin (Scott, 1978; Cutler *et al.*, 2007; Evert & Eichhorn, 2013; Steeves & Sawhney, 2017; Rudall, 2020; Mulyah & Sulistyanyingsih, 2022).

### **5.4.3 Endodermis**

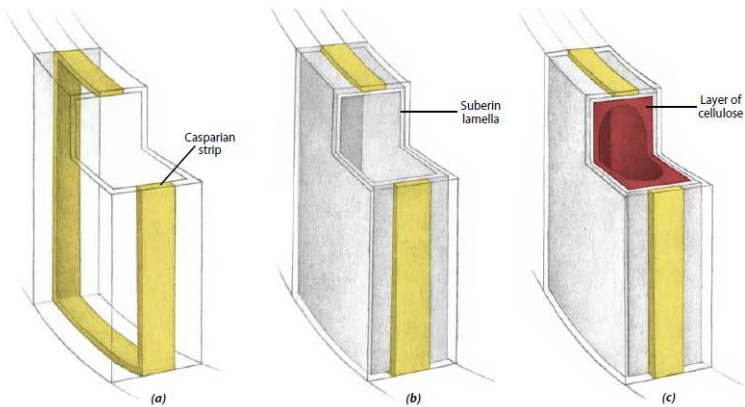
Jaringan ini berasal dari lapisan dalam korteks dan dapat dibedakan dari jaringan korteks berdasarkan ciri selnya yang selapis, berdinding tipis, berbentuk kuboid dan tersusun rapat tanpa adanya ruang antar sel, serta dikelilingi oleh stele. Di endodermis, terjadi sekresi suberin atau lignin yang mengelilingi dinding sel secara transversal dan radial yang disebut pita kaspari (Gambar 5.8A). Pita kaspari bersifat impermeabel terhadap air, sehingga air maupun hara mineral yang melalui jalur apoplas harus diubah jalurnya menjadi simplas. Pembentukan pita kaspari melalui tiga tahapan meliputi: endodermis terisi suberin pada dinding sel antiklinal, dinding sel endodermis luar terselimuti oleh suberin semua, dan terakhir masuknya suberin ke bagian dalam sel endodermis sehingga lapisannya semakin tebal (Gambar 5.8B)



(Scott, 1978; Lux *et al.*, 2004; Cutler *et al.*, 2007; Evert & Eichhorn, 2013; Steeves & Sawhney, 2017; Crang *et al.*, 2018; Rudall, 2020).



A



B

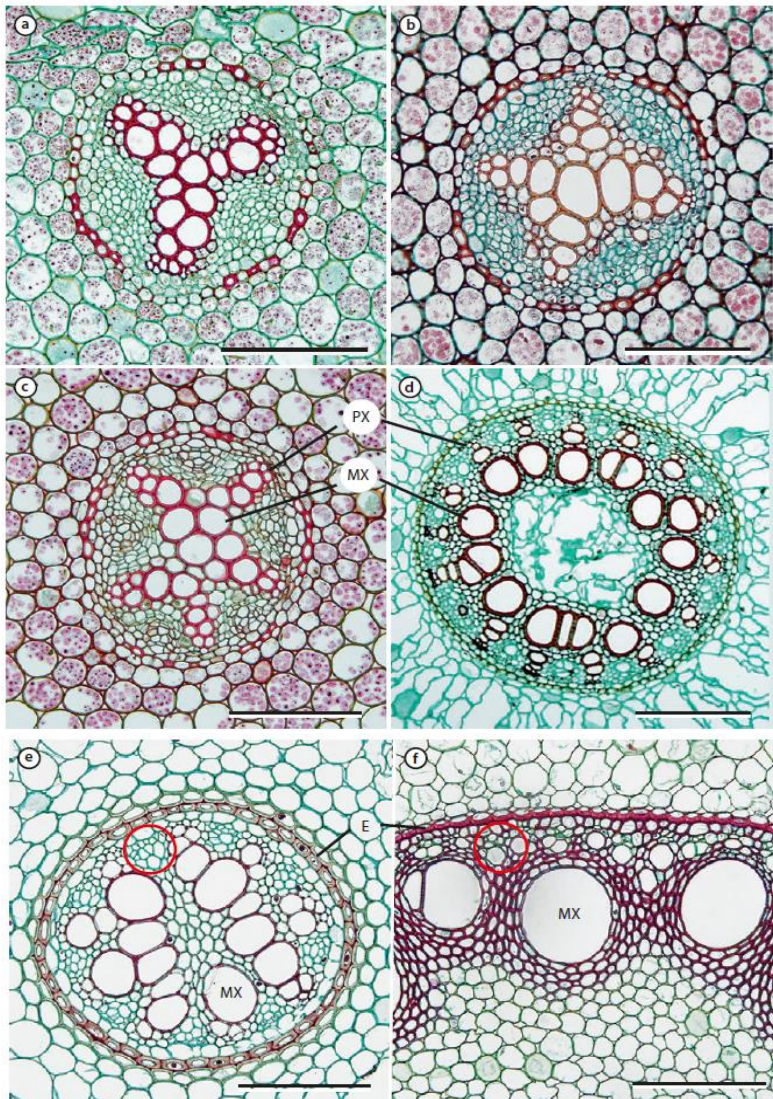
**Gambar 5.8.** Endodermis. A. Sketsa oleh P.G Mahlberg yang menunjukkan satu sel endodermis dengan pita kaspari (1); sayatan melintang akar yang menunjukkan endodermis dengan pita kaspari yang mengelilinginya secara transversal dan radial (2). B. Struktur tiga dimensi endodermis yang menunjukkan adanya pita kaspari pada dinding sel secara transversal dan radial. B. Tiga tahap terbentuknya pita kaspari pada sel endodermis: inisiasi (a), masuknya suberin di bagian luar dan dilanjutkan di bagian dalam endodermis (b-c).

(Sumber : Dickison, 2000; Steeves & Sawhney, 2017)

#### 5.4.4 Perisikel dan berkas pengangkut

Perisikel tersusun atas selapis sel parenkim yang ber dinding tipis dan letaknya di bagian dalam endodermis akar. Daerah ini berasal dari prokambium dan bersifat meristematik. Perisikel merupakan tempat munculnya akar lateral. Saat memasuki pertumbuhan sekunder, perisikel mengalami sklerifikasi sehingga berkontribusi pada pembentukan felogen dan kambium gabus (Scott, 1978; Cutler *et al.*, 2007; Evans & Eichhorn, 2013; Crang *et al.*, 2018; Rudall, 2020).

Berkas pengangkut merupakan bagian terpenting dalam sistem tumbuhan. Keseluruhan bagian dari endodermis, perisikel, berkas pengangkut serta empulur disebut dengan **stele**. Berkas pengangkut yang terdiri atas xilem dan floem letaknya berselang-seling, yang mana xilem terletak di bagian tengah dan floem di bagian terluar setelah perisikel. Berkas pembuluh pada monokotil dan dikotil bertipe protostele. Perbedaan terletak pada keberadaan empulur. Empulur tersusun atas sel parenkim bertipe isodiametris. Pada dikotil, empulur tidak dijumpai sebagai akibat dari pertumbuhan sekunder akarnya. Berbeda dengan monokotil, empulur masih dijumpai sebab pada akar monokotil tidak mengalami pertumbuhan sekunder. Xilem akar tersusun dalam pola menyerupai jeruji yang membentuk jejari. Dikotil memiliki kutub xilem yang terpisah dengan variasi meliputi: diarkh (dua jejari), triakh (tiga jejari), tetrakh (empat jejari), hingga pentarkh (lima jejari). Lain halnya pada monokotil yang memiliki satu tipe jejari xilem yaitu poliarkh (jejari banyak). Tipe seperti ini disebut aktatostele (Gambar 5.9). Ciri ini merupakan ciri utama dalam membedakan akar monokotil dan dikotil berdasarkan struktur anatomi penyusun akarnya. Baik pada akar monokotil maupun dikotil, berkas pembuluhnya bertipe eksark dengan pertumbuhannya bersifat sentripetal (protoxilem di bagian luar dan metaxilem di bagian dalam). Selama perkembangannya, protoxilem berkembang lebih dulu dan berdiameter sempit, terletak di ujung jejari xilem dekat dengan perisikel; sedangkan metaxilem berdiameter lebih luas dibandingkan protoxilem, terletak di sepanjang lengkung xilem menuju ke pusat akar. Floem primer pada

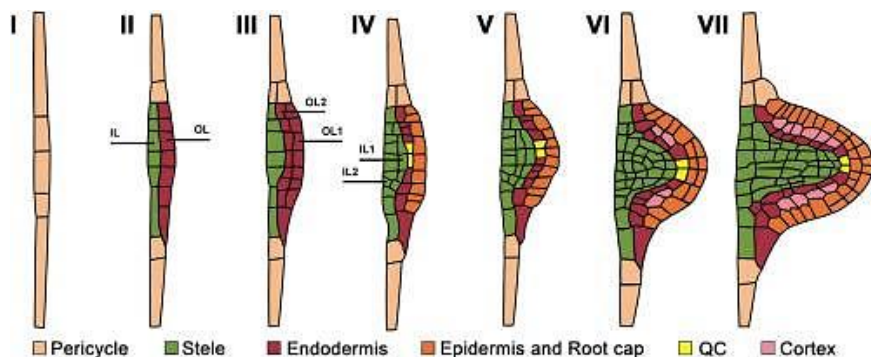


**Gambar 5.9.** Variasi tipe berkas pengangkut pada dikotil (a-c) dan monokotil (d): triakh (a); tetarkh (b); pentarkh (c); poliarkh (d). Susunan stele pada *Lilum michiganense* yang menunjukkan 9 bercak floem (lingkaran merah) yang letaknya diantara kelompok metaxilem (e); stele pada jagung yang menunjukkan letak floem diluar metaxilem (f). Keterangan: PX=protoxilem; MX=metaxilem. Garis skala=100  $\mu\text{m}$ .  
(Sumber : Crang *et al.*, 2018)

akar dikotil terletak diantara jejari xilem. Pada akar monokotil, susunan xilem dan floem tersusun menyerupai bercak hingga tersebar ke luar xilem (Gambar 5.9) (Cutler *et al.*, 2007; Crang *et al.*, 2018; Rudall, 2020).

### 5.4.5 Akar lateral dan akar adventif

Akar lateral merupakan cabang dari akar primer yang muncul setelah aktivitas periode embrionik di ujung akar. Akar lateral ini berasal dari perisikel dan endodermis yang mengalami diferensiasi sel secara periklinal. Posisi munculnya akar lateral pada monokotil dan dikotil berbeda. Pada monokotil, akar lateral muncul dari bagian kutub floem sedangkan pada dikotil muncul dari bagian xilem. Adanya aktivitas ini menyebabkan inisiasi akar lateral yang tumbuh berupa tonjolan mulai terdorong menuju endodermis, korteks, eksodermis, sampai ke rhizodermis sehingga strukturnya terlihat jelas di permukaan akar. Akibat dari mekanisme ini, jumlah baris dari akar lateral menunjukkan jumlah kutub protoxilem pada akar utama. Mekanisme pembentukan akar lateral ini terjadi secara endogen (Cutler *et al.*, 2007; Beck, 2010; Crang *et al.*, 2018; Torres-Martínez *et al.*, 2019; Xiao *et al.*, 2019; Rudall, 2020) (Gambar 5.10).



**Gambar 5.10.** Tahap pembentukan akar lateral pada morfogenesis primordium akar lateral dan inisiasinya. Angka romawi menunjukkan tahap pembentukan akar lateral yang dimulai dari pembelahan perisikel yang membentuk lapisan luar (OL) dan dalam (IL).

(Sumber : Torres-Martínez *et al.*, 2019)

Berbeda dengan akar lateral, akar adventif terbentuk dari jaringan selain akar (batang atau daun) dengan struktur yang bervariasi. Mekanisme pembentukannya sama seperti akar lateral yaitu secara endogen. Pada tumbuhan berkayu, akar adventif muncul dari nodus batang. Hal ini dapat dijadikan sebagai reproduksi vegetatif pada tumbuhan tersebut. Pada monokotil, akar adventif muncul dari nodus batang akibat pembelahan sel di zona perisiklik pada batang. Kemunculan akar adventif merupakan respons terhadap cekaman lingkungan seperti banjir, kekurangan hara, logam berat, dan perlukaan fisik. Bahkan, akar adventif juga dapat terbentuk secara normal dengan fungsi khusus antara lain: meningkatkan eksplorasi tanah demi mendapatkan lebih banyak hara (pada padi), mendukung pertumbuhan akar udara (akar gantung pada *Ficus*; akar penyangga pada jagung), meningkatkan penyerapan air di udara (akar udara pada anggrek), serta memungkinkan terjadinya perbanyakan tumbuhan secara vegetatif (stolon pada *Fragaria vesca*) (Steffens & Rasmussen, 2015; Mhimdi & Pérez-Pérez, 2020; Rudall, 2020).

## **5.5 Regulasi Hormon selama Pembentukan Akar Primer Monokotil dan Dikotil**

Di dalam proses perkembangan yang terjadi pada akar primer, tidak luput juga dari peran hormon dan nutrisi. Integrasi sinyal sistemik dan lokal ini kemudian mempengaruhi kecepatan pembelahan atau pemanjangan sel pada akar primer dan lateral, inisiasi, munculnya, atau pemanjangan akar lateral, serta pembentukan rambut akar. Beberapa hormon tumbuhan seperti etilen, auksin, asam absisat (ABA), giberelin (GA), sitokinin (CK), asam jasmonat (JA), dan brassinosteroid (BR) memiliki peran penting dalam pertumbuhan akar primer (Qin *et al.*, 2019; Jia *et al.*, 2022).

Auksin dan etilen memiliki peran sinergis dalam regulasi pemanjangan akar primer. Etilen merupakan hormon yang berpengaruh terhadap proses proliferasi dan pemanjangan sel. Etilen menginduksi pembelahan sel di daerah pusat diam secara transversal, menghambat proliferasi sel di meristem apikal dalam membatasi sel-sel epidermis, menstimulasi biosintesis dan basipetal

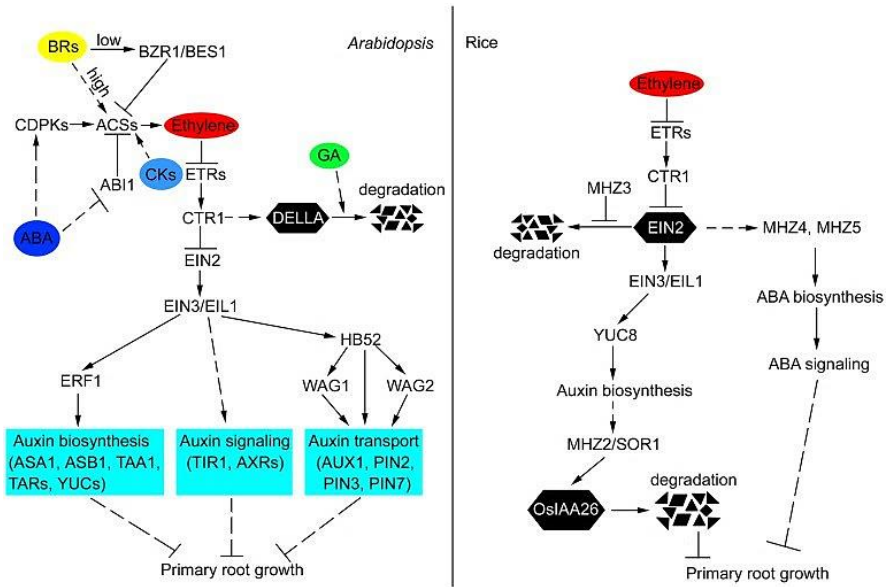
transpor auksin dalam menghambat pemanjangan sel (Ruzicka *et al.*, 2007; Ni *et al.*, 2014; Vaseva *et al.*, 2018). Selain itu, etilen juga memainkan peran penting dalam pengaturan aliran auksin. Kondisi etilen yang berlebih menyebabkan konsentrasi auksin menjadi tidak seimbang, sehingga kadar auksin di dalam sel akar menjadi lebih tinggi dan menghambat pertumbuhan akar primer dan pemanjangan sel (Qin *et al.*, 2019) (Gambar 5.11).

Asam absisat (ABA) berperan menghambat pertumbuhan akar primer di sel kortikal pada daerah pemanjangan akar melalui sinyal etilen (Dietrich *et al.*, 2017). ABA mengaktifkan dua protein kinase yang bergantung pada kalsium, yaitu CPK4 dan CPK11, yang mana fosforilasi di bagian C akhir pada ACS6 dan meningkatkan stabilitas ACS6 dalam biosintesis etilen. Kerjasama ABA dan auksin ini mengakibatkan terjadi penghambatan pertumbuhan akar primer dan ABA merespons sinyal hormon etilen (Li *et al.*, 2017) (Gambar 5.11).

Giberelin (GA) juga memiliki peran dalam pertumbuhan akar primer melalui peningkatan pembelahan sel pasca mitosis di sel endodermis pada daerah pemanjangan sel dan mengontrol pembelahan serta pemanjangan sel yang berdampak pada penambahan ukuran meristem akar (Ubeda-Tomas *et al.*, 2009). Peran etilen dan GA bersifat antagonis. GA mendorong degradasi protein DELLA, yang merupakan elemen inti dalam jalur transduksi sinyal GA. Induksi GA dari inti sel akar melalui jalur persinyalan yang bergantung pada CTR1 pada etilen. Perlakuan GA secara eksogen menyebabkan penghambatan pertumbuhan akar primer oleh etilen (Achard *et al.*, 2003; Ubeda-Tomas *et al.*, 2009) (Gambar 5.11).

Sitokinin (CK) mendorong pertumbuhan akar primer melalui interaksi dengan etilen pada proliferasi sel di meristem apikal akar sehingga produksi etilen menjadi meningkat. Kushwah *et al.* (2011) melaporkan bahwa sitokinin dapat menginduksi pemanjangan akar primer yang dimediasi oleh jalur sinyal etilen melalui reseptor ETR1 (ETHYLENE RESISTANT1) dan elemen persinyalan hilirnya EIN2. Jalur ini diperlukan sebagai respons pertumbuhan akar primer yang diinduksi oleh sitokinin (Gambar 5.11).





**Gambar 5.11.** Interaksi kerja hormon etilen dan hormon lain dalam pertumbuhan akar primer pada *Arabidopsis* dan padi (tanaman model). Pada *Arabidopsis*, etilen menghambat pertumbuhan akar primer melalui regulasi biosintesis auksin, transpor, dan sinyal/ ABA menginisiasi biosintesis etilen melalui regulasi post-transkripsional ACS. GA dan etilen bekerja secara antagonis dalam meregulasi protein DELLA, yang berperan sebagai represor pertumbuhan. CK menginduksi biosintesis etilen dalam menstabilkan ACS. Garis hitam menunjukkan interaksi secara langsung, sedangkan garis hitam putus-putus menunjukkan interaksi secara tidak langsung. Tanda anak panah menunjukkan efek stimulus, dimana simbol T menunjukkan peran penghambatan. (Sumber : Qin *et al.*, 2019)

Asam jasmonat (JA) dan etilen memiliki peran yang sinergis terhadap perkembangan rambut akar melalui interaksi dengan protein JAZ (JASMONAT ZIM-DOMAIN). Hormon brasinosteroid (BR) tergolong dalam kelompok steroid yang berperan penting dalam regulasi pertumbuhan akar primer. Perbedaan konsentrasi kadar BR di dalam akar mempengaruhi pertumbuhan akar primer;

kadar BR yang rendah berdampak pada induksi pertumbuhan akar primer, sedangkan kadar BR yang rendah menyebabkan pertumbuhan akar primer terhambat (Clouse *et al.*, 1996; Mussig *et al.*, 2003; Lv *et al.*, 2018). Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa regulasi hormon BR terhadap pertumbuhan akar primer melalui modulasi biosintesis etilen. Konsentrasi hormon BR yang rendah menghambat biosintesis etilen melalui aktivasi BZR1 dan BES1 untuk menekan ekspresi ACS (Lv *et al.*, 2018) (Gambar 5.11).



## DAFTAR PUSTAKA

- Achard, P., Gusti, A., Cheminant, S., Alioua, M., Dhondt, S., Coppens, F., *et al.* 2003. Ethylene regulates *Arabidopsis* development via the modulation of DELLA protein growth repressor function. *Plant Cell*, 15, 2816–2825. <https://doi.org/10.1105/tpc.015685>.
- Beck, C. B. 2010. *An Introduction to Plant Structure and Development: Plant Anatomy for the Twenty-First Century*. Second Edition. New York: Cambridge University Press.
- Clouse, S. D., Langford, M., McMorris, T. C. 1996. A brassinosteroid-intensitive mutant in *Arabidopsis thaliana* exhibits multiple defects in growth and development. *Plant Physiology*, 111, 671–678. <https://doi.org/10.1104/pp.111.3.671>.
- Cutler, D. F., Botha, T., Stevenson, D. Wm. 2007. *Plant Anatomy: An Applied Approach*. United Kingdom: Blackwell Publishing Ltd.
- Crang, R., Lyons-Sobaski, S., Wise, R. 2018. *Plant Anatomy: A Concept-Based Approach to the Structure of Seed Plants*. Switzerland: Springer.
- Dickison, W. C. 2000. *Integrative Plant Anatomy*. United Kingdom: Academic Press.
- Dietrich, D., Pang, L., Kobayashi, A., Fozard, J. A., Boudolf, V., Boshale, R., *et al.* 2017. Root hydrotropism controlled via a cortex-specific growth mechanism. *Nature Plants*, 3, 17057. <https://doi.org/10.1105/tpc.015685>.
- Dolan, L., Costa, S. 2001. Evolution and genetics of root hair stripes in the root epidermis. *Journal of Experimental Botany*, 52, 413–417.
- Evert, R. F., Eichhorn, S. E. 2013. *Raven Biology of Plants*. New York: W. H. Freeman and Company.
- Glover, B. J., Airoidi, C. A., Moyroud, E. 2016. Epidermis: Outer Cell Layer of the Plant. In: eLs. Chicester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Hindryana, A. F., Handayani. 2023. *Anatomi Tumbuhan*. Malang: PT. Literasi Nusantara Abadi Grup.

- Jia, Z., Giehl, R. F. H., Wirèn, N. 2022. Nutrient-hormone relations: Driving root plasticity in plants. *Molecular Plant*, 15(1), 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.12.004>.
- Kim, H., Jang, J., Seomun, S., Yoon, Y., Jang, G. 2022. Division of cortical cells is regulated by auxin in *Arabidopsis* roots. *Frontiers in Plant Science*, 13: 953225, 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.953225>.
- Kushwah, S., Jones, A. M., Laxmi, A. 2011. Cytokinin interplay with ethylene, auxin, and glucose signaling controls *Arabidopsis* seedling root directional growth. *Plant Physiology*, 156, 1851–1866. doi: 10.1104/pp.111.175794.
- Li, X., Chen, L., Forde, B. G., and Davies, W. J. 2017. The biphasic root growth response to abscisic acid in *Arabidopsis* involves interaction with ethylene and auxin signalling pathways. *Frontiers in Plant Science*, 8:1493. doi: 10.3389/fpls.2017.01493.
- Lux, A., Luxová, M., Abe, J., Morita, S. 2004. Root cortex: structural and functional variability and responses to environmental stress. *Root Research*, 13(3), 117–131.
- Lv, B., Tian, H., Zhang, F., Liu, J., Lu, S., Bai, M., *et al.* 2018. Brassinosteroids regulate root growth by controlling reactive oxygen species homeostasis and dual effect on ethylene synthesis in *Arabidopsis*. *PLoS Genetics*, 14:e1007144. doi: 10.1371/journal.pgen.1007144
- Mhimdi, M., Pérez-Pérez, J. M. 2020. Understanding of adventitious root formation: what can we learn from comparative genetics?. *Frontiers in Plant Science*, 11: 582020, 1–10.
- Muliyah, E., Sulistyaningsih, Y. C. 2022. Struktur sekretori *Aglaonema simplex* sebagai tumbuhan obat. *Simbiosis*, 11(1), 1–6. <https://dx.doi.org/10.33373/sim-bio.v11i1.3916>.
- Mussig, C., Shin, G. H., Altmann, T. 2003. Brassinosteroids promote root growth in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 133, 1261–1271. doi: 10.1104/pp.103.028662.
- Ni, J., Shen, Y., Zhang, Y., Wu, P. 2014. Definition and stabilisation of the quiescent Centre in rice roots. *Plant Biology*, 16, 1014–1019. doi: 10.1111/plb.12138.

- Perèt, B., Rybel, B. D., Casimiro, I., Benková, E., Swarup, R., Laplaze, L., Beeckman, T., Bennett, M. J. 2009. Review: *Arabidopsis* lateral root development: an emerging story. *Trends in Plant Science*, 14(7), 399–408. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.05.002>.
- Qin, H., He, L., Huang, R. 2019. The coordination of ethylene and other hormones in primary root development. *Frontiers in Plant Science*, 10(874), 1–8. <https://doi.org/doi:10.3389/fpls.2019.00874>.
- Rost, T. L. 2011. The organization of roots of dicotyledonous plants and the positions of control points. *Annals of Botany*, 107, 1213–1222. <https://doi.org/doi:10.1093/aob/mcq229>,
- Rudall, P. 2020. *Anatomy of Flowering Plants: An Introduction to Plant Structure and Development*. Fourth Edition. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Ruzicka, K., Ljung, K., Vanneste, S., Podhorska, R., Beeckman, T., Friml, J., *et al.* 2007. Ethylene regulates root growth through effects on auxin biosynthesis and transport-dependent auxin distribution. *Plant Cell*, 19, 2197–2212. doi: 10.1105/tpc.107.052126.
- Salazar-Henao JE, Vélez-Bermúdez IC, Schmidt W. 2016. The regulation and plasticity of root hair patterning and morphogenesis. *Development*, 143(11):1848-1858. doi: 10.1242/dev.132845. PMID: 27246711.
- Scheres, B., Benfety, P., Dolan, L. 2002. Root Development: The *Arabidopsis* Book. *American Society of Plant Biologists*.
- Scheifelben, J. W., Masucci, J. D., Wang, H. 1997. Building a root: the control of patterning and morphogenesis during root development. *The Plant Cell*, 9(7), 1089–1098. <https://doi.org/10.1105/tpc.9.7.1089>.
- Scott, F. M. 1987. Growth and structure of roots. In: Dommergues Yvon and Krupa S.V. (eds). *Interactions Between Non-Pathogenic Soil Microorganisms and Plants*. Amsterdam: Elsevier.
- Seago Jr, J. L., Fernando, D. D. 2013. Anatomical aspects of angiosperm root evolution. *Annals of Botany*, 112(2), 1–16. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs266>.

- Steffens, B., Rasmussen, A. 2015. The physiology of adventitious roots. *Plant Physiology*, 170, 603–617. <https://doi.org/10.1104/pp.15.01360>.
- Steeves, T. A., Sawhney, V. K. 2017. *Essentials of Developmental Plant Anatomy*. United States of America: Oxford University Press.
- Sutrisno. 2021. Anatomi Akar dan Batang Tumbuhan. Dalam: Karim, A. (ed). *Anatomi Tumbuhan*. Jakarta: Yayasan Kita Menulis.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., Murphy, A. 2018. *Plant Physiology and Development: Sixth Edition*. Amerika Serikat: Sinauer Associates, Inc.
- Thomas, B. 2017. *Genetics of Primary Root Development*. United Kingdom: Elsevier Ltd.
- Torres-Martínez, H. H., Rodríguez-Alonso, G., Shishkova, S., Dubrovsky, J. G., 2019. Lateral root primordium morphogenesis in Angiosperms. *Frontiers in Plant Science*, 10:206, 1–19. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00206>.
- Ubeda-Tomas, S., Federici, F., Casimiro, I., Beemster, G. T., Bhalerao, R., Swarup, R., *et al.* 2009. Gibberellin signaling in the endodermis controls Arabidopsis root meristem size. *Current Biology*, 19, 1194–1199. doi: 10.1016/j.cub.2009.06.023.
- Vaseva, I. I., Qudeimat, E., Potuschak, T., Du, Y., Genschik, P., Vandenbussche, F., *et al.* 2018. The plant hormone ethylene restricts Arabidopsis growth via the epidermis. *Proceeding National Academic Science USA*, 115, E4130–E4139. doi: 10.1073/pnas.1717649115.
- Xiao, T. T., van Velzen, R., Kulikova, O., Franken, C., Bisseling, T. 2019. Lateral root formation involving cell division in both pericycle, cortex and endodermis is a common and ancestral trait in seed plants. *Development*, 146(20). <https://doi.org/10.1242/dev.182592>.

# **BAB 6**

## **MEKANISME MEMBUKA DAN MENUTUPNYA STOMATA**

*Oleh Saraswati Prabawardani*

### **6.1 Pendahuluan**

Pada semua tumbuhan hijau terdapat beberapa bagian yang berperan penting dalam berbagai proses kehidupan. Stomata merupakan salah satu bagian penting dari tumbuhan yang terlibat dalam pertukaran gas. Ribuan stomata terdapat di permukaan atas daun terutama pada tumbuhan air, namun sebagian besar juga terdapat pada permukaan bawah daun.

Stomata disebut juga mulut daun, berupa struktur mikroskopis yang terdapat pada sel epidermis daun dan batang tumbuhan. Mulut daun dikelilingi oleh sepasang sel khusus yaitu sel penjaga (*guard sel*) yang dapat membuka dan menutup untuk mengontrol pertukaran gas antara tumbuhan dan lingkungannya. Stomata merupakan portal pintu masuknya gas karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) ke dalam daun untuk fotosintesis,  $\text{O}_2$  untuk respirasi, dan keluarnya uap air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) dari aliran transpirasi (Taylor et al, 2010). Sebagian besar air menguap dari dalam tubuh tumbuhan ke atmosfer melalui stomata, meskipun air dapat menguap melalui kutikula sebesar 10% dan lentisel sebesar 0,1% dari total transpirasi (Fauziah, 2021).

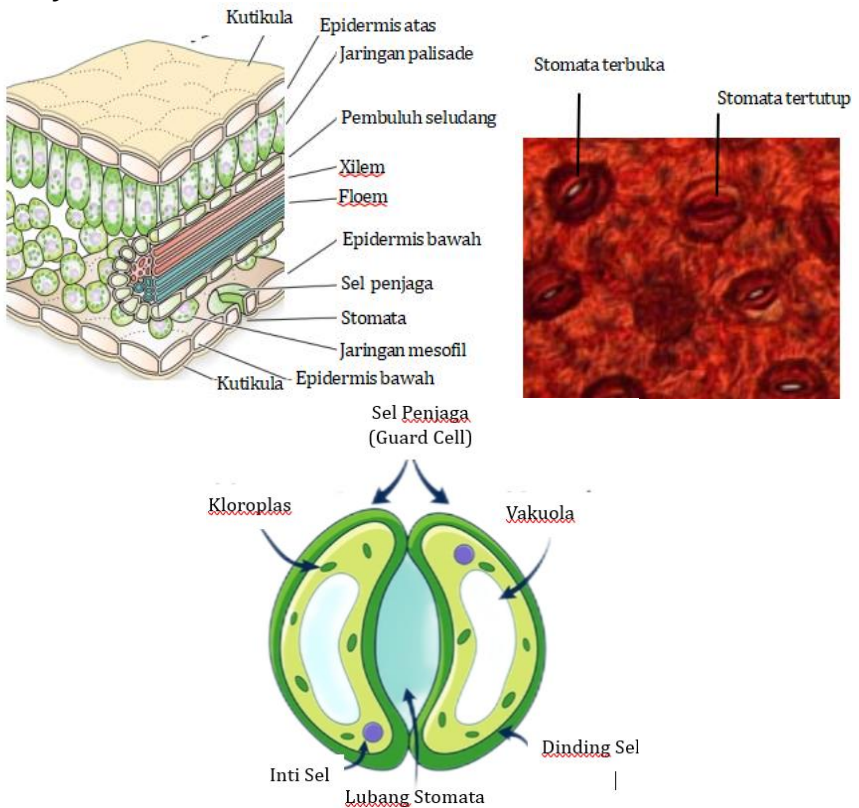
Stomata berasal dari bahasa Yunani stoma, yang artinya lubang atau pori. Awalnya istilah stoma diusulkan oleh Heinrich Link, kemudian kata stoma disempurnakan menjadi stomata atau mulut daun oleh De Candolle (Willmer dan Fricker, 1996). Stomata adalah komponen vital dalam menjaga homeostasis (kemampuan tumbuhan untuk mempertahankan kondisi internal yang stabil meskipun terdapat perubahan kondisi lingkungan eksternal) tumbuhan, dalam mendukung proses-proses vital seperti fotosintesis dan transpirasi. Stomata adalah lubang-lubang atau

pori-pori kecil berbentuk lonjong yang dikelilingi oleh dua sel epidermis khusus yang disebut sel penjaga (*guard cell*) yang mengandung kloroplas dan kaya akan suberin dan zat lilin. Sel penjaga tersebut merupakan sel epidermis yang sudah mengalami perubahan bentuk dan fungsi yang dapat mengatur besar kecilnya lubang stomata (Swatthout, 2008 *dalam* Fauziah, 2021).

Informasi tentang stomata dimulai hampir 450 juta tahun yang lalu ketika tumbuhan meninggalkan lingkungan perairan dan kemudian berevolusi setelah menginvasi lingkungan terestrial atau daratan (Wilmer dan Fricker, 1996; Berry et al., 2010). Proses evolusi dari kehidupan akuatik ke kehidupan terestrial menuntut beberapa inovasi dan adaptasi struktural, diantaranya pembentukan jaringan pendukung (kolenkim dan sklerenkim), evolusi organ untuk penambatan dan penyerapan air dan mineral (akar), dan jaringan vaskuler pengembangan sistem penghantar cairan (xilem dan floem) berupa air dan hara dari dalam tanah dan jaringan floem menghantar senyawa metabolit yang efisien dari daun ke organ-organ tumbuhan lainnya (Lendzian, 2006). Selain itu, semua bagian tumbuhan di atas permukaan tanah dihadapkan pada persaingan. Untuk dapat bertahan hidup, tumbuhan harus mampu mengembangkan karakter yang dapat mencegah kehilangan uap air yang berlebihan, namun membebaskan CO<sub>2</sub> penetrasi ke dalam tanaman atau tumbuhan untuk proses fotosintesis dan O<sub>2</sub> untuk proses respirasi. Oleh karena itu kutikula, stomata serta jaringan vaskular berkembang hampir bersamaan waktunya dan ketiga karakter tersebut merupakan kunci kehadiran dan perkembangan tumbuhan terestrial (daratan) yang besar (Chaloner, 1970).

Stomata terdiri dari beberapa tipe diantaranya *actinocytic* (sel penjaga yang membentuk pola radial seperti sinar matahari), *anisocytic* (sel penjaga memiliki ukuran yang berbeda dengan salah satu sel yang lebih besar), *anomocytic* (sel penjaga memiliki ukuran yang serupa dan mengelilingi stomata), *diacytic* (terdiri dari dua sel penjaga berdekatan yang lebih besar daripada stomata itu sendiri), *encyclocytic* (sel penjaga membentuk cincin melingkar di sekitar stomata), *paracytic* (sel penjaga memasuki stomata seperti parasit di dalam celahnya), serta bentuk lainnya, seperti *hemiparacytic*,

*laterocyticpericytic, polycytic, staurocytic, stephanocytic dan tetracytic.*



**Gambar 6.1.** Anatomi daun dan kondisi stomata  
(Sumber: Taiz & Zeiger, 2002; Prabawardani, 2007;  
[www.google.com](http://www.google.com))

## 6.2 Fungsi Stomata

Stomata berperan penting dalam beberapa proses sebagai berikut (Engineer et al., 2016; Bertolino et al., 2019; ) :

**Pertukaran Gas:** Stomata memungkinkan tumbuhan untuk menyerap  $\text{CO}_2$  dari udara, yang diperlukan untuk fotosintesis. Selama proses ini,  $\text{O}_2$  yang dihasilkan sebagai produk sampingan dilepaskan ke atmosfer. Demikian pula sebaliknya  $\text{O}_2$  untuk

respirasi masuk ke tumbuhan melalui stomata, dan produk CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dilepaskan ke atmosfer melalui stomata.

Transpirasi: Stomata juga memainkan peran penting dalam transpirasi, yaitu proses penguapan air dari permukaan daun, membantu mentransport air dan nutrisi dari akar ke seluruh bagian tanaman atau tumbuhan dan juga membantu mendinginkan atau mengatur suhu tanaman. Dengan membuka dan menutup stomata, tanaman dapat mengatur jumlah air yang hilang melalui transpirasi untuk menjaga keseimbangan air, terutama dalam kondisi lingkungan yang kering atau panas. Stomata harus memastikan keseimbangan yang tepat antara kebutuhan CO<sub>2</sub> untuk fotosintesis dan kehilangan air melalui transpirasi, agar tanaman dapat menggunakan air secara efisien, karena stomata adalah komponen kunci dalam menjaga homeostasis tanaman dan mendukung proses-proses vital seperti fotosintesis dan transpirasi. Apabila jumlah stomata semakin banyak maka transpirasi semakin meningkat, demikian pula jumlah, bentuk, letak, dan distribusi stomata mempengaruhi transpirasi (Fauziah, 2021; Prabawardani, 2007).

Pengaturan Tekanan Osmotik: Transpirasi juga membantu dalam pengaturan tekanan osmotik di dalam sel-sel tumbuhan, yang penting untuk mempertahankan struktur sel dan fungsi transportasi nutrisi.

### **6.3 Distribusi dan Frekwensi Stomata**

Stomata memiliki distribusi paling banyak pada divisi Spermatophyta (tumbuhan tingkat tinggi). Pada sebagian besar daun tumbuhan herba, stomata ditemukan di permukaan atas (adaksial) dan bawah (abaksial), tetapi biasanya terdapat lebih sedikit stomata di permukaan atas. Daun dengan stomata pada permukaan atas dan bawah disebut amfistomatosa (*amphistomatous*). Stomata yang terdapat hanya di permukaan bawah daun seperti yang ditemukan di hampir semua spesies pohon, disebut hipostomatosa (*hypostomatous*). Daun amfistomatosa relatif jarang dibandingkan dengan daun hipostomatosa (Drake et al., 2018). Amfistomatosa terjadi terutama pada tanaman tahunan herba yang tumbuh cepat, semak, dan pohon



tahunan yang tumbuh lambat. Pada tumbuhan air dengan daun yang mengapung, seperti teratai, memiliki stomata hanya di permukaan atas, dan daun seperti demikian disebut epistomatosa (atau hiperstomatosa). Selain itu, pada beberapa tumbuhan air, kemungkinan stomata tetap terbuka secara permanen. Pada pakis air, *Marsilea* (Pteridophyta akuatik yang juga dapat tumbuh di darat), stomata terbatas pada permukaan atas daun yang mengapung, sedangkan daun pada lingkungan aerial memiliki stomata pada kedua permukaan. Sebagian besar tumbuhan air yang terendam (*submerged plant*) tidak memiliki stomata dan difusi gas terjadi antara air dan jaringan tumbuhan melalui kutikula.

Makna adaptif dari stomata yang terdapat pada satu atau kedua permukaan daun tidak jelas, meskipun hipostomatosa dianggap sebagai karakter primitif evolusioner dan karena tumbuhan beradaptasi untuk tumbuh di habitat yang lebih terbuka dan terkena sinar matahari, amphistomatosa mungkin berevolusi hampir bersamaan (Mott et al., 1982). Diduga bahwa daun hipostomatosa lebih beradaptasi dengan kondisi kering daripada daun amphistomatosa. Tentu saja, sisi daun yang menghadap matahari mungkin sedikit lebih hangat daripada sisi yang berlawanan yang ternaung sehingga akan menyebabkan lebih banyak kehilangan air akibat penguapan dari sisi yang terkena sinar matahari. Namun, amphistomatosa dapat meningkatkan penyerapan CO<sub>2</sub> dengan mengurangi panjang jalur difusi CO<sub>2</sub> ke jaringan mesofil (Parkhurst, 1978) dan melalui pengaruhnya terhadap resistensi stomata dan ketahanan lapisan terluar (Mott et al., 1982).

Stomata pada bagian bawah permukaan daun (abaksial) terbuka lebih lambat pada pagi hari dan tertutup lebih lambat pada sore hari daripada stomata bagian permukaan atas daun (adaksial) (Smith, 1981). Pada beberapa tumbuhan herba berdaun lebar, saat terjadi penutupan stomata adaksial, contoh pada tumbuhan *Populus angustifolia* dan beberapa spesies *Salix*, stomata abaksialnya tetap terbuka sebagian dalam kondisi tekanan uap air terhadap udara atau atmosfer (Foster dan Smith, 1986). Hal ini kemungkinan karena daun dapat menunjukkan hipostomatosa fungsional dan mengatur pertukaran gas dengan cara yang sama seperti 'hipostomatosa morfologis'.

Tumbuhan dikotil dan monokotil memiliki tipe stomata yang berbeda-beda (Ridwan et al., 2022). Daun monokotil dengan urat daun sejajar memiliki stomata yang tersusun dalam barisan.

Frekuensi stomata atau distribusi stomata (jumlah stomata per unit area dari satu permukaan daun) dapat bervariasi dalam daun pada tumbuhan yang sama, antar tumbuhan, individu dari spesies tunggal dalam komunitas, dan dapat dimodifikasi oleh faktor lingkungan, morfologi daun dan komposisi genetik. Kerapatan stomata dipengaruhi oleh tekanan air pada daun dan dipengaruhi oleh intensitas cahaya. Tekanan air mempengaruhi ukuran epidermis dan intensitas cahaya mempengaruhi kepadatan stomata dan indeks stomata (Royer, 2014 *dalam* Ridwan, 2022). Dengan demikian pengaturan difusi gas dan uap air bergantung pada dimensi stomata dan kepadatan stomata per area atau luas daun (Driesen et al., 2020).

Frekuensi stomata bervariasi menurut ukuran sel, dan guard cell yang lebih kecil umumnya berkorelasi dengan frekuensi stomata yang lebih tinggi, sehingga Salisbury (2027) *dalam* Mishra (1997) memperkenalkan istilah indeks stomata yang mana terkait dengan jumlah stomata per unit luas daun terhadap jumlah sel epidermis ditambah dengan sel penjaga per unit luas daun dalam.

$$\text{Indeks Stomata} = \frac{A}{A + B} \times 100 \%$$

Keterangan :

A = Jumlah stomata

B = Jumlah sel epidermis

Indeks stomata pada umumnya konstant pada daun dari individu tumbuhan yang sama, namun belum dikonfirmasi pada berbagai spesies. Pada beberapa tumbuhan, intensitas dan kualitas cahaya yang diterima oleh daun suatu tanaman dapat mempengaruhi indeks stomata pada daun yang produktif, sebagai contoh *Vigna sinensis* pada radiasi sinar yang tinggi, dalam sehari di naungan telah menyebabkan menurunnya indeks stomata daun dalam kondisi kritis (Schoch et al., 1980).

## **6.4 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Aktivitas Stomata**

Faktor lingkungan yang berperan penting dalam mengatur pembukaan dan penutupan stomata pada tumbuhan sebagai berikut:

1. **Cahaya:** Pembukaan stomata dipicu oleh cahaya matahari. Stomata biasanya terbuka di siang hari ketika cahaya tersedia untuk fotosintesis dan menutup di malam hari (Costa et al., 2015).
2. **Konsentrasi Karbon Dioksida:** Tingkat rendah CO<sub>2</sub> di dalam daun akan menyebabkan stomata terbuka untuk memungkinkan lebih banyak gas masuk, sedangkan bila konsentrasi CO<sub>2</sub> tinggi akan menyebabkan stomata menutup (Xu et al., 2016).
3. **Kelembaban Udara:** Pada kelembaban tinggi, stomata cenderung terbuka karena risiko kehilangan air melalui transpirasi lebih rendah. Pada kelembaban rendah, stomata cenderung menutup untuk menghemat air (Buckley, 2019).
4. **Suhu:** Suhu tinggi dapat menyebabkan peningkatan transpirasi dan kehilangan air, sehingga stomata mungkin menutup untuk mengurangi kehilangan air (Marchin et al., 2021).
5. **Ketersediaan Air:** Ketika ketersediaan air terbatas atau tanaman mengalami stres kekeringan atau akar tidak mampu memasok cukup air ke tunas, stomata akan menutup untuk mengurangi kehilangan air. Ini merupakan upaya untuk menghalangi hilangnya air dan melindungi tanaman dari layu. Ketersediaan air yang terbatas dapat menyebabkan berkurangnya asimilasi fotosintesis pada jaringan daun, sehingga menghambat pertumbuhan tanaman karena keterbatasan stomata (Nederhooff, 2009; Salmon et al., 2020; Hernandez et al., 2021).
6. **Kondisi Tanah:** Kualitas dan ketersediaan nutrisi dalam tanah juga dapat memengaruhi pembukaan dan penutupan stomata. Contoh, Kalium (K) merupakan unsur makro bagi tanaman dan merupakan kation yang paling melimpah dalam sel tanaman. Kalium memiliki sejumlah fungsi

penting dalam tanaman, selain menyeimbangkan muatan anion seluler, aktivasi enzim, juga dalam pengendalian pembukaan/penutupan stomata (Morgan & Connolly, 2013).

Tumbuhan telah berevolusi untuk merespons faktor-faktor ini secara dinamis, membuka dan menutup stomata untuk memaksimalkan efisiensi fotosintesis sambil meminimalkan stres lingkungan.

## **6.5 Mekanisme membuka dan menutupnya stomata**

Pada saat cahaya matahari bersinar, tumbuhan melakukan proses fotosintesis, dan  $\text{CO}_2$  di sekitar tumbuhan dipergunakan untuk melakukan proses tersebut.  $\text{CO}_2$  masuk kedalam stomata menyebabkan kadar  $\text{CO}_2$  di sekitar daun menurun karena dipergunakan dalam fotosintesis. Hal ini menyebabkan pH sel penjaga meningkat dan mendorong perubahan pati menjadi gula dan meningkatkan tekanan osmotik. Dalam kondisi ini tekanan turgor sel penjaga akan meningkat dan menyebabkan stomata terbuka. Sebaliknya bila cahaya matahari terbenam,  $\text{CO}_2$  di sekitar tumbuhan meningkat karena tidak dipergunakan dalam fotosintesis (fotosintesis tidak terjadi pada malam hari). Hal ini menyebabkan turunnya pH dalam sel penjaga dan mendorong gula berubah menjadi pati, serta menurunnya tekanan osmotik dalam sel penjaga dan mengalirnya air keluar dari sel penjaga. Dalam kondisi ini tekanan turgor sel penjaga menurun, sehingga stomata menutup (Darmawan & Baharsjah, 2010).

Pembukaan dan penutupan stomata bergantung pada tekanan turgor, yang disebabkan oleh aliran osmotik air di sel penjaga. Ketika sel penjaga mengembang, sel tersebut mengembang dan mengakibatkan pembukaan stomata. Ketika sel penjaga kehilangan air, sel tersebut menjadi lembek dan mengakibatkan penutupan stomata. Stomata biasanya terbuka ketika cahaya mengenai daun dan menutup pada malam hari. Stomata akan membuka jika tekanan turgor sel penjaga tinggi dan menutup jika tekanan turgor sel penjaga rendah (Berg, 2007; Driesen et al., 2020).

Ketika air dari sel tetangga memasuki sel penjaga, sel penjaga akan memiliki tekanan turgor yang tinggi. Sementara itu, sel tetangga yang telah kehilangan air akan mengerut, menarik sel penjaga ke belakang, sehingga stomata terbuka.

1. Ketika tumbuhan memiliki cukup air, ion kalium ( $K^+$ ) secara aktif dipompa ke dalam sel penjaga.
2. Akumulasi  $K^+$  menyebabkan air mengalir ke dalam sel penjaga melalui osmosis, meningkatkan tekanan turgor.
3. Tekanan ini menyebabkan sel penjaga membengkak dan membuka stomata, memungkinkan pertukaran gas dan transpirasi.

Dalam kondisi kekeringan menyebabkan defisit air pada tumbuhan, sehingga menurunkan turgor sel dan pemanjangan sel, stomata menutup, dan mengurangi banyaknya daun produktif, mengurangi laju fotosintesis per unit luas daun, dan berpengaruh pada periode pertumbuhan vegetatif lebih pendek (Kramer, 1980; Van Loon, 1981; Bradford & Hsiao, 1982). Dengan demikian, defisit air menurunkan konduktifitas stomata (Sivan et al., 1996).

## 6.5 Penutup

Stomata adalah pori-pori kecil pada permukaan atas dan bawah daun yang berfungsi penting dalam pertukaran gas tumbuhan. Pori-pori ini dikendalikan oleh sel penjaga (*guard cell*). Stomata terdiri dari dua sel penjaga yang membentuk celah di epidermis daun. Stomata berperan penting dalam respons tanaman terhadap perubahan kondisi lingkungan dengan mengatur pertukaran gas ( $CO_2$ ,  $O_2$ ), penguapan air dari tumbuhan melalui transpirasi, dan mengatur suhu tumbuhan. Tumbuhan memiliki mekanisme membuka dan menutup stomata karena tekanan turgor pada sel penjaga untuk memediasi laju pertukaran gas antara atmosfer sekitar daun dan bagian dalam daun, namun laju pertukaran gas dan tingkat transpirasi tergantung pada dimensi stomata dan kepadatan stomata per luas daun.

## DAFTAR PUSTAKA

- Berg L. 2007. *Botany: Plant, People and Evironmental*. Second Edition. Thomson Higher Education; California.
- Berry JA, Beerling DJ, Franks PJ. 2010. *Stomata: Key Players in The Earth System, Past and Present*. Current Opinion in Plant Biology 13(3): 232-239. DOI: 10.1016/j.pbi.2010.04.013Get rights and content.
- Bertolino LT, Caine RS, Gray JE. 2019. *Impact of Stomatal Density and Morphology on Water-Use Efficiency in a Changing World*. Frontiers in Plant Science 10: 225. DOI: 10.3389/fpls.2019.00225.
- Bradford KJ, Hsiao TC .1982. *Physiological response to moderate stress*. Dalam: Encyclopaedia of plant physiology. Physiological plant ecology II. Water relations and carbon assimilation. Lange OL, Nobel PS, Osmond CB, Ziegler H (Eds.). Heidelberg Springer; New York, Berlin. 263-324 pp.
- Buckley TN. 2019. *How do stomata respond to water status?*. New Phytologist 224(1): 21-36. DOI: 10.1111/nph.15899.
- Chaloner WG. 1970. *The Rise of The First Land Plants*. Biol Res 45: 353-377.
- Costa JM, Monnet F, Jannaud D, Leonhardt N, Ksas B, Reiter IM, Pantin F, Genty B. 2015. *Open All Night Long: The Dark Side of Stomatal Control*. Plant Physiol 167(2): 289-294. DOI: 10.1104/pp.114.253369.
- Darmawan J, Baharsjah JS. 2010. *Dasar-dasar Fisiologi Tanaman*. SITC. Jakarta.
- Drake PL, de Boer HJ, Schymanski SJ, Veneklaas EJ. *Two Sides to Every Leaf: Water and CO<sub>2</sub> Transport in Hypostomatous and Amphistomatous leaves*. New Phytologist 222(3): 1179-1187. DOI: 10.1111/nph.15652.
- Driesen E, den Ende WV, De Proft M, Saeys W. 2020. *Influence of Environmental Factors Light, CO<sub>2</sub>, Temperature, and Relative Humidity on Stomatal Opening and Development: A Review*. Agronomy 10(12): 975. DOI: 10.3390/agronomy10121975.
- Engineer CB, Hashimoto-Sugimoto M, Negi J, Israelsson-Nordström M, Azoulay-Shemer T, Rappel WJ, Iba K, Schroeder JI. 2016.

- CO<sub>2</sub> Sensing and CO<sub>2</sub> Regulation of Stomatal Conductance: Advances and Open Questions*. Trends in Plant Science 21(1): 16– 30. DOI: 10.1016/j.tplants.2015.08.014.
- Fauziah A. 2021. *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*. Biru Atmajaya; Tulungagung.
- Foster JR, Smith WK .1986. *Influence of Stomatal Distribution on Transpiration in Low Wind Environments*. Plant Cell Environ 9: 751-759.
- Hernandez JO, Park BB. 2022. *The Leaf Trichome, Venation, and Mesophyll Structural Traits Play Important Roles in the Physiological Responses of Oak Seedlings to WaterDeficit Stress*. International Journal of Molecular Sciences 23(15): 8640. DOI: 10.3390/ijms23158640.
- Kramer PJ. 1980. *Drought stress and the origin of adaptation*. Dalam: Adaptation of plants to water and high temperature stress. Turner NC and Kramer PJ (Eds.). John Wiley & Sons; New York. 7-20 pp.
- Lendzian KJ. 2006. *Survival Strategies of Plants During Secondary Growth: Barrier Properties of Phellem and Lenticels Towards Water, Oxygen, and Carbon Dioxide*. Journal of Experimental Botany 57(11): 2535–2546. DOI: 10.1093/jxb/erl014.
- Marchin RM, Backes D, Ossola A, Leishman MR, MG, Ellsworth DS. 2021. *Extreme Heat Increases Stomatal Conductance and Drought-Induced Mortality Risk In Vulnerable Plant Species*. Global Change Biology 28(3): 1133-1146.
- Mishra MK. 1997. *Stomatal Characteristics at Different Ploidy Levels in Coffea L*. Annals of Botany 80: 689-692.
- Morgan JB, Connolly EL. 2013. *Plant-Soil Interactions: Nutrient Uptake*. Nature Education Knowledge 4(8): 2.
- Mott KA, Gibson AC, O'Leary JW. 1982. *The Adaptive Significance of Amphistomatous Leaves*. Plant Cell Envzron 5: 455.
- Nederhoff E. 2009. *Air Humidity, Stomata & Transpiration*. Practical Hydroponics & Greenhouses. November/December 2009.
- Parkhurst DF. 1978. *The Adaptive Significance of Stomatal Occurance on One or Both Surfaces of Leaves*. Jurnal of Ecology 66: 367-383.

- Prabawardani S. 2007. *Physiological and Growth Responses of Selected Sweet Potato (Ipomoea batatas L.) Cultivars to Water Stress*. PhD Theses. James Cook University. Australia.
- Ridwan, Hasidu LOAF, Rumakefing H. 2022. *Tipe Stomata Pada Beberapa Jenis Tumbuhan Dikotil dan Monokotil*. Jurnal Sains dan Pendidikan Biologi 1(1): 1-6.
- Salmon Y, Lintunen A, Dayet A, Chan T, Dewar R, Vesala T, Hölttä T. 2020. *Leaf Carbon and Water Status Control Stomatal and Nonstomatal Limitations of Photosynthesis in Trees*. New Phytologist 226(3): 690–703. DOI: 10.1111/nph.16436.
- Schoch PG, Zinsou C, Sibi M. 1980. *Dependence of the Stomatal Index on Environmental-factors During Stomatal Differentiation in Leaves of Vigna sinensis L. 1. Effect of Light-Intensity*. J. Exp. Bot. 31:1211–1216.
- Sivan P, Asher CJ, Blamey FPC. 1996. *Effects of Potassium on Drought Tolerance of Taro and Tannia*. Dalam: *Mineral Nutrient Disorder of Root Crops In The Pacific*. Craswell ET, Asher CJ, O'Sullivan JN (Eds). Proceedings of a workshop, Nuku'alofa, Kingdom of Tonga, 17-20 April 1995. The Australian Center for International Agricultural Research (ACIAR); Canberra, Australia. 100-104 pp.
- Taylor SH, Franks PJ, Hulme SP, Springs E, Christin PA. 2010. *Photosynthetic Pathway and Ecological Adaption Stomatal Trait Diversity Amongst Grasses*. New Phytol 193(2): 387–396.
- Taiz L, Zeiger E. 2002. *Plant Physiology*. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, Inc.
- Willmer C, Fricker M. 1996. *Stomata*. Edisi ke-2. Black M, Charlwood B. (Editor). New York: Chapman & Hall.
- Van Loon CD. 1981. *The Effect of Water Stress on Potato Growth, Development and Yield*. American Potato Journal 58: 51-69.
- Xu Z, Jiang Y, Jia B, Zhou G. 2016. *Elevated-CO<sub>2</sub> Response of Stomata and Its Dependence on Environmental Factors*. Front. Plant Sci. Sec. Plant Nutrition Volume 7. DOI: 10.3389/fpls.2016.00657.



# **BAB 7**

## **MEKANISME PENYERAPAN ZAT HARA**

*Oleh Arinal Haq Izzawati Nurrahma*

### **7.1 Pendahuluan**

Zat hara tanaman, atau yang juga dikenal sebagai nutrisi tanaman, adalah unsur kimia atau senyawa organik yang diperlukan tanaman untuk melakukan fungsi-fungsi biologisnya, termasuk pertumbuhan, perkembangan, dan reproduksinya. Nutrisi tanaman terdiri dari berbagai unsur kimia yang diperoleh oleh tanaman dari lingkungannya, terutama dari tanah tempat tanaman tumbuh.

Ada tiga kriteria yang digunakan untuk mendefinisikan zat hara esensial tanaman: pertama, sangat penting untuk siklus hidup tanaman; kedua, terlibat langsung dalam metabolisme; dan ketiga, tidak dapat digantikan (Marschner, 1983). Zat hara esensial dibagi menjadi dua jenis, yaitu makronutrien (dibutuhkan dalam jumlah besar) dan mikronutrien (dibutuhkan dalam jumlah kecil) (Alaoui et al., 2022). Makronutrien meliputi hydrogen (H), karbon (C), oksigen (O), nitrogen (N), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), fosfor (P), dan belerang (S), sedangkan mikronutrien terdiri dari klorin (Cl), boron (B), besi (Fe), mangan (Mg), seng (Zn), tembaga (Cu), nikel (Ni), dan molibdenum (Mo). Unsur-unsur ini memainkan peran penting dalam osmosis tanaman, nutrisi, fungsi enzim, dan menjaga keseimbangan ionik (Kochhar and Gujral, 2020).

Mobilitas unsur hara esensial dalam tanaman menentukan kemunculan gejala pada daun. Boron, kalsium, besi, belerang, dan tembaga adalah unsur hara yang tidak bergerak, tetap di jaringan tempatnya diserap. Gejala kekurangan unsur hara ini muncul pada daun yang lebih tua. Sebaliknya, klorin, magnesium, nitrogen, fosfor, kalium, natrium, seng, dan molibdenum adalah unsur hara yang bergerak, dapat berpindah ke jaringan yang lebih muda. Ketika tanah kekurangan unsur hara ini, tanaman mengorbankan daun

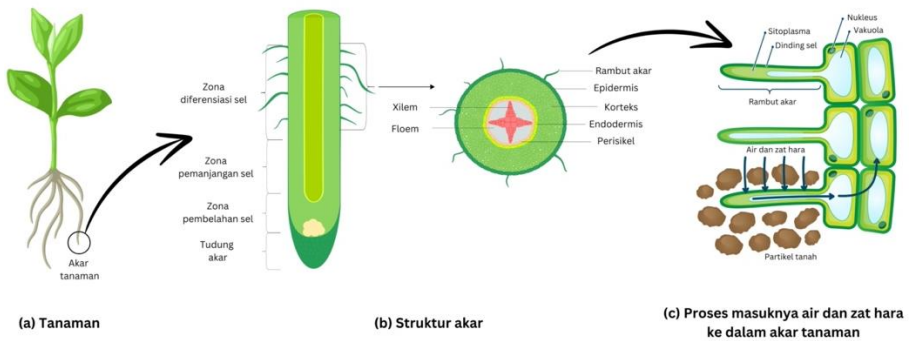
yang sudah tua untuk memulihkan dan memindahkannya ke area yang sedang tumbuh (Kochhar and Gujral, 2020).

Mengingat pentingnya fungsi zat hara, diperlukan pemahaman yang baik tentang mekanisme penyerapan zat hara untuk memaksimalkan produktivitas tanaman. Bab ini akan mengulas secara mendalam proses-proses kompleks di mana tanaman menyerap nutrisi penting dari tanah, dengan fokus pada mekanisme yang terlibat dan faktor-faktor yang memengaruhi penyerapan nutrisi.

## **7.2 Struktur Akar dan Pergerakan Ion di Akar**

Akar tanaman memiliki struktur penting untuk menyerap zat hara dengan efisien (Gambar 7.1). Secara vertikal, akar terdiri dari tudung akar dan zona pertumbuhan (pembelahan, pemanjangan dan diferensiasi sel), dilengkapi dengan rambut akar dan beberapa akar lateral yang berperan dalam proses ini. Tudung akar, atau kaliptra, berperan sebagai pelindung ujung akar saat menembus tanah, menjaga kelembaban untuk penyerapan air dan nutrisi, serta memungkinkan tanaman merasakan gravitasi dan mengarahkan pertumbuhan akarnya (Kuya and Sato, 2011). Rambut akar memperluas area akar untuk menyerap air dan zat hara, zona pertumbuhan memungkinkan pertumbuhan akar yang terus-menerus, sedangkan akar lateral membantu menjangkau nutrisi yang lebih dalam di tanah (Alaoui et al., 2022).

Secara horizontal, struktur akar terdiri dari rambut akar, korteks, endodermis, floem, dan xilem. Korteks, yang terdiri dari jaringan parenkim, menguatkan batang dan menyimpan amilum. Endodermis adalah lapisan terdalam korteks yang berbatasan dengan silinder pusat dan mendukung pertumbuhan akar (Lux et al., 2004). Floem dan xilem adalah dua jenis jaringan vaskular utama pada tumbuhan. Floem bertanggung jawab untuk mengangkut hasil fotosintesis dari daun ke seluruh bagian tanaman, sedangkan xilem bertanggung jawab untuk mengangkut air dan nutrisi dari akar ke daun dan bagian-bagian lainnya dari tanaman (Turgeon and Wolf, 2009, Růžička et al., 2015).



**Gambar 7.1** .Struktur akar tanaman (a) tanaman; (b) struktur akar; dan (c) proses masuknya air dan zat hara ke dalam akar tanaman

Akar terdiri dari tiga area utama: area terluar, tengah, dan terdalam. Di bagian terluar, terdapat epidermis akar dan sel kortikal. Bagian tengah terdiri dari endodermis dengan pita kasparian yang melindungi dari difusi ion yang tidak diinginkan.

Di bagian terdalam, terdapat jaringan pembuluh yang mengangkut air dan nutrisi.

Proses penyerapan ion dimulai dengan ion yang masuk ke dalam ruang bebas di luar sel endodermis. Ion kemudian harus melewati endodermis, yang hanya memungkinkan gerakan ion melalui jalur simplast. Jalur simplast memfasilitasi gerakan ion ke sel-sel xilem, dari mana ion dapat diangkut ke daun dan bagian lainnya dari tanaman. Ion akhirnya diangkut melawan gradien konsentrasi dalam xilem, mungkin dengan bantuan proses transportasi yang membutuhkan energi. Pita kasparian juga mencegah kehilangan ion dari jaringan pembuluh dengan menghambat terjadinya proses difusi (Kochhar and Gujral, 2020).

### 7.3 Mekanisme Penyerapan Zat Hara

Penyerapan air dan zat hara dari tanah oleh tanaman merupakan dua proses yang berbeda dan tidak saling berkaitan. Zat hara diserap oleh sistem akar sebagai ion, bukan sebagai satu kesatuan molekul. Perbedaan akumulasi anion dan kation dari zat hara yang sama di dalam cairan sel membuktikan hal ini.

Proses penyerapan garam mineral oleh akar bersifat selektif.

Akar menyerap ion-ion dari beberapa unsur tertentu seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalsium (Ca), tetapi tidak menyerap beberapa unsur lainnya seperti natrium (Na) dan silicon (Si).

Air dan zat hara diserap dari bagian yang berbeda di akar: air diserap melalui rambut akar, sementara zat hara diambil dari daerah aktif pertumbuhan (meristematik) dan zona pemanjangan sel di ujung akar. Sel-sel akar mudah dilewati oleh air, yang bergerak ke arah gradien energi kinetik yang lebih tinggi. Namun, ion tidak bisa menembus membran plasma akar melalui difusi (Kochhar and Gujral, 2020).

Penyerapan zat hara tidak terlepas dari proses pergerakan ion di dalam larutan tanah dan proses keluar masuknya ion-ion pada sel akar tanaman. Proses-proses tersebut dijelaskan pada mekanisme transpor zat hara secara pasif dan aktif (Tabel 7.1). Transpor pasif merupakan proses fisik dan spontan di mana tidak diperlukan energi. Transpor pasif melibatkan pergerakan ion sepanjang gradien konsentrasi tanpa menyebabkan akumulasi garam dalam sel, namun efisiensinya rendah karena konsentrasi mineral di dalam sel biasanya jauh lebih tinggi daripada di tanah sekitarnya. Di sisi lain, transpor aktif merupakan proses kimia dan tidak spontan yang memerlukan energi. Pergerakan ion terjadi melawan gradien konsentrasi dan menuju konstanta keseimbangan, menyebabkan akumulasi garam dalam sel. Laju penyerapan mineral tergantung pada respirasi dan selalu memerlukan molekul pembawa spesifik, tetapi proses ini cenderung lebih efisien daripada transpor pasif (Class, 2024).

**Tabel 7.1.** Perbandingan transpor zat hara secara pasif dan aktif

| Transpor Pasif                                    | Transpor Aktif                                  |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Proses fisik dan spontan                          | Proses kimia dan tidak spontan                  |
| Tidak memerlukan energi                           | Memerlukan energi                               |
| Gerakan ion terjadi sepanjang gradien konsentrasi | Gerakan ion terjadi melawan gradien konsentrasi |
| Gerakan ion mineral menuju konstanta keseimbangan | Gerakan ion mineral tidak menuju keseimbangan   |
| Tidak menyebabkan                                 | Menyebabkan 'akumulasi                          |

| <b>Transpor Pasif</b>                                      | <b>Transpor Aktif</b>                                |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 'akumulasi garam' di dalam sel                             | 'garam' di dalam sel                                 |
| Tingkat penyerapan mineral tidak tergantung pada respirasi | Tingkat penyerapan mineral tergantung pada respirasi |
| Tidak memerlukan molekul pengangkut khusus                 | Selalu memerlukan molekul pengangkut khusus          |
| Efisiensi penyerapan mineral pasif sangat rendah           | Efisiensi penyerapan mineral aktif relatif efisien   |

## 7.4 Transpor Pasif

Pergerakan ion dapat dijelaskan melalui dua rute, yaitu pergerakan ion dalam tanah dan pergerakan ion antara larutan tanah dan sel akar tanaman.

### 7.4.1 Pergerakan ion dalam tanah

Proses penyerapan nutrisi pada tanaman melibatkan interaksi antara akar, tanah, dan mikroorganisme di sekitar rizosfer. Koloid tanah, terutama misel tanah liat dan humus, mengandung ion bermuatan negatif yang menyerap ion bermuatan positif, berfungsi sebagai reservoir nutrisi bagi tanaman (Kochhar and Gujral, 2020).

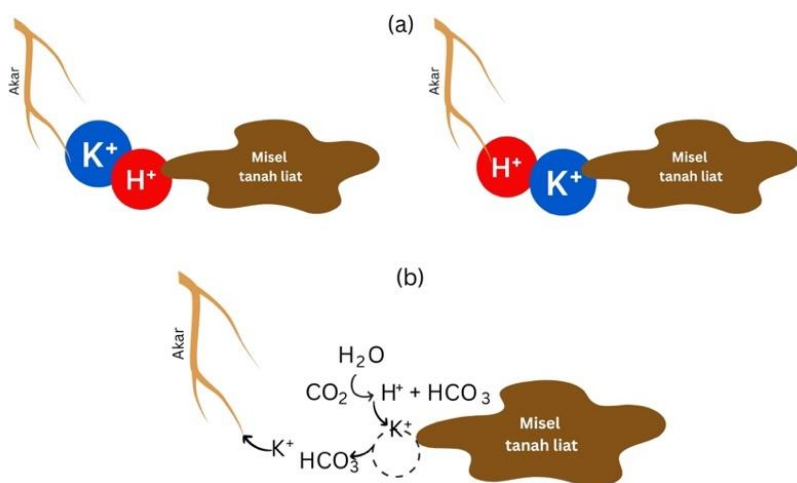
Pertukaran ion terjadi melalui dua mekanisme (Gambar 7.2):

#### 1. Teori pertukaran kontak

Pertukaran kontak adalah fenomena di mana ion-ion di permukaan partikel padat bertukar, tanpa melibatkan fase cair. Sebagai contoh, ion  $H^+$  yang terikat pada permukaan akar dapat bertukar dengan ion  $K^+$  yang terikat pada permukaan tanah liat di dalam tanah. Tanah liat dan akar tanaman sama-sama memiliki kapasitas tukar kation (KTK), di mana ion-ion diyakini terikat di tempat tertentu pada akar dan permukaan tanah koloid. Ion-ion yang terikat oleh gaya elektrostatis atau van der Waals pada kedua tempat ini cenderung bergetar dalam suatu volume tertentu. Ketika volume getaran dari dua ion tumpang tindih, pertukaran ion terjadi (Shreeja, 2024).

## 2. Teori pertukaran asam karbonat

Ion larut dalam larutan tanah, dan karbon dioksida dari respirasi akar membentuk asam karbonat ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Asam lemah ini terionisasi menjadi ion  $\text{H}^+$  dan  $\text{HCO}_3^-$ , memfasilitasi pertukaran ion  $\text{H}^+$  dengan ion  $\text{K}^+$  yang menempel pada misel tanah liat. Kation juga dapat diserap sebagai pasangan ion dengan bikarbonat (Panbo et al., 2024, Morse and Mackenzie, 1990).



**Gambar 7.2.** Pertukaran ion antara akar tanaman dan partikel tanah: (a) teori pertukaran kontak dan (b) teori pertukaran asam karbonat.

### *Teori Keseimbangan Donnan*

Dalam teori keseimbangan Donnan, terdapat ion tertentu di dalam sel yang disebut sebagai ion ‘tetap’ atau ‘tidak dapat berdifusi’, yang sangat penting untuk penyerapan unsur hara. Ion-ion ini memerlukan keseimbangan dengan ion bermuatan berlawanan. Jika anion tetap ada di dalam membran, kation tambahan diserap untuk menjaga keseimbangan, sehingga konsentrasi kation di dalam sel lebih tinggi dibandingkan di luar sel. Keseimbangan ini terjadi ketika hasil kali antara anion dan kation di dalam dan luar solusi adalah sama (Fievet, 2015, Starzak, 2003).

Keseimbangan Donnan digambarkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{[C_{in}^+]}{[C_{out}^+]} \times \frac{[A_{out}^-]}{[A_{in}^-]} = K_{Donnan}$$

Dimana:

- $[C_{in}^+]$  : konsentrasi kation di dalam sel
- $[C_{out}^+]$  : konsentrasi kation di luar sel
- $[A_{in}^-]$  : konsentrasi anion di dalam sel
- $[A_{out}^-]$  : konsentrasi anion di luar sel
- $K_{Donnan}$  : konstanta keseimbangan Donnan

Keseimbangan Donnan menjelaskan akumulasi ion melawan gradien konsentrasi tanpa pengeluaran energi metabolisme. Demikian pula, jika kation tetap ada di dalam membran, anion menumpuk di dalam sel melawan gradien konsentrasi (Kochhar and Gujral, 2020).

Dalam sel akar tanaman, terjadi keseimbangan Donnan, di mana terdapat anion tetap seperti protein atau asam organik yang tidak dapat berdifusi bebas melalui membran sel. Anion tetap ini menciptakan muatan negatif di dalam sel. Untuk menjaga keseimbangan listrik dan kesetimbangan, kation seperti kalium ( $K^+$ ) dan kalsium ( $Ca^{2+}$ ) tertarik dan terakumulasi di dalam sel, sehingga konsentrasi kation di dalam sel lebih tinggi daripada di luar sel. Akumulasi kation ini membantu mempercepat penyerapan mineral penting dari tanah ke dalam akar tanaman, memfasilitasi penyerapan nutrisi.

#### **7.4.2 Pergerakan ion antara larutan tanah dan sel akar tanaman**

Penyerapan zat hara sangat bergantung pada sel karena harus melewati membrane sel sebelum diserap ke dalam sel akar tanaman. Zat hara terlarut dapat diangkut melintasi membran sel dengan tiga cara: difusi sederhana, difusi terfasilitasi, dan transportasi aktif (Gambar 7.3 dan 7.4) (Kochhar and Gujral, 2020, Stillwell, 2016).

## 1. Difusi sederhana

Transportasi seluler melalui difusi adalah proses pasif di mana zat terlarut bergerak melintasi membran sel menuruni gradien potensial elektrokimianya tanpa memerlukan energi tambahan seperti ATP. Dalam difusi sederhana, zat terlarut dapat menembus membran sel di mana saja melalui lapisan lipid bilayer karena adanya gradien elektrokimia antara kedua sisi membrane (Stillwell, 2016).

Ketika sel tanaman berada dalam larutan dengan konsentrasi garam tinggi, penyerapan ion terjadi secara pasif. Namun, jika sel tersebut kembali ke larutan dengan konsentrasi garam yang lebih rendah, beberapa ion yang diserap akan keluar ke lingkungan eksternal. Membran sel memiliki sifat permeabel terhadap ion tertentu yang dapat melewati dengan bebas melalui difusi sederhana. Namun, membran juga bersifat selektif permeabel, yang berarti ia dapat mencegah pergerakan lebih lanjut dari ion tertentu melalui difusi. Hal ini memungkinkan membran sel untuk mengontrol konsentrasi ion di dalam sel dan menjaga keseimbangan yang diperlukan untuk fungsi sel yang optimal (Kochhar and Gujral, 2020).

Zat terlarut yang umum melalui difusi sederhana termasuk air, zat terlarut tanpa muatan, dan gas. Meskipun sederhana, proses ini penting untuk transportasi zat-zat penting seperti air, zat terlarut non-bertegangan, dan gas dalam sel, dan merupakan mekanisme dasar bagi kehidupan (Stillwell, 2016).

## 2. Difusi terfasilitasi

Difusi terfasilitasi juga dikenal sebagai difusi yang dimediasi oleh protein carrier, bergantung pada energi yang melekat dalam gradien zat terlarut, mirip dengan difusi pasif sederhana, tanpa memerlukan input energi tambahan. Mekanisme ini diperlukan untuk molekul yang terlalu besar atau polar untuk melewati membran tanpa bantuan. Perlu dicatat, difusi terfasilitasi terjadi jauh lebih cepat daripada difusi pasif sederhana (Stillwell, 2016).



Karakteristik utama difusi terfasilitasi adalah: spesifik (memerlukan protein integral membran atau carrier tertentu), pasif (tanpa energi tambahan), dan mengikuti kinetika saturasi Michaelis-Menton (dengan adanya situs aktif mirip enzim pada protein pembawa). Protein pembawa ini dapat berupa carrier atau channel dengan gerbang. Seperti enzim, pembawa difusi terfasilitasi menunjukkan kinetika saturasi, membedakan antara isomer yang mirip seperti d-glukosa dan l-glukosa (Kochhar and Gujral, 2020, Stillwell, 2016).

Difusi terfasilitasi bersifat dua arah (bidireksional), yang berarti zat terlarut dapat bergerak masuk atau keluar dari sel tergantung pada gradien konsentrasinya. Bidireksionalitas ini terjadi karena protein transport memungkinkan zat terlarut bergerak sepanjang gradien konsentrasinya sampai tercapai keseimbangan, di mana gerakan bersihnya berhenti (Kochhar and Gujral, 2020).

Dalam pergerakan molekul melintasi membran sel, terdapat beberapa contoh penting dari difusi terfasilitasi. Salah satunya adalah melalui transporter glukosa (glucose transporter – GLUT), yang memfasilitasi masuknya glukosa ke dalam sel dengan mengikatnya di permukaan luar membran. Selain itu, channel Calcium, yang merupakan protein integral membran, memiliki struktur pori khas yang memungkinkan permeabilitas kalium dan berperan dalam pembentukan potensial aksi sel. Na channel juga penting dalam pembentukan potensial aksi dan memiliki struktur selektivitas yang menarik untuk mengalirkan ion natrium. Terakhir, akuaporin, atau saluran air, memungkinkan pergerakan air secara cepat dan selektif, berperan sebagai "sistem pipa air" bagi sel (Stillwell, 2016).

#### **7.4.3 Protein transpor**

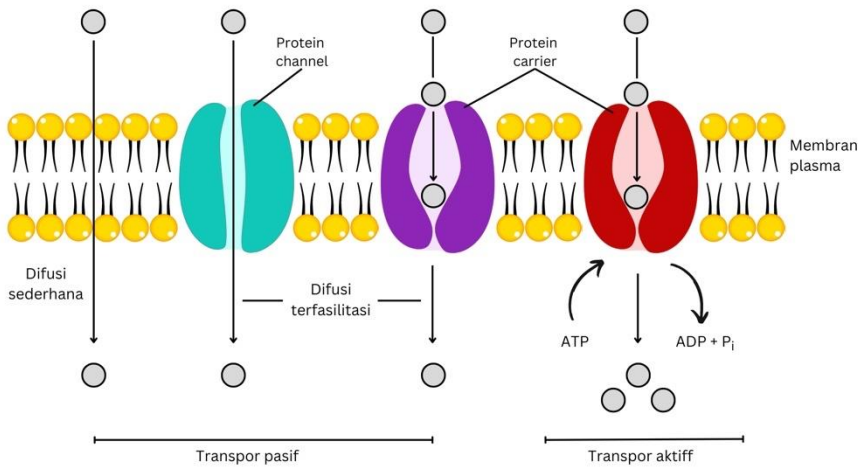
Terdapat dua jenis protein transpor yang memfasilitasi proses difusi dalam membran, yaitu protein carrier (pembawa) dan protein channel (saluran) (Gambar 7.3 dan 7.4)(Kochhar and Gujral, 2020):

### ***Protein Carrier***

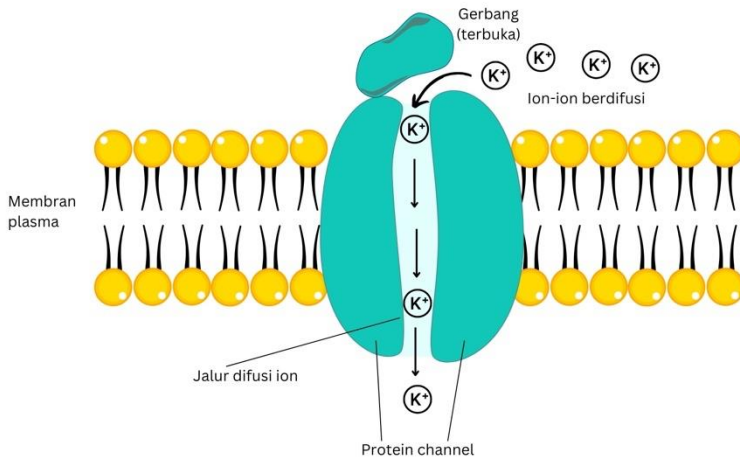
1. membawa ion dan zat terlarut tertentu (seperti gula dan asam amino) melintasi membrane
2. bisa mengangkut bolak-balik
3. membantu pergerakan dengan menempel secara fisik pada zat terlarut, mirip dengan interaksi enzim dengan substrat
4. pergerakan terjadi dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi yang lebih rendah, mirip dengan difusi sederhana, dengan protein carrier memfasilitasi proses tersebut

### ***Protein Channel***

1. Merupakan saluran berisi air dengan lapisan bermuatan (aquaporin) yang menyeberang melintasi membrane
2. Hanya ion-ion tertentu (seperti  $k^+$ ,  $ca^{2+}$ ,  $cl^-$ ) yang diizinkan melewati, berdasarkan ukuran dan muatan ion
3. Ion yang akan diangkut tidak langsung berikatan atau berinteraksi dengan protein saluran.
4. Pergerakan ion dikendalikan oleh gradien konsentrasi dan perbedaan tegangan antar membran.
5. Terdapat berbagai jenis protein channel disesuaikan dengan ion-ion tertentu seperti kalsium, kalium, atau klorida
6. Saluran bisa memiliki gerbang/pintu, baik dalam keadaan terbuka maupun tertutup
7. Gerbang bisa merespons potensial membran (dibuka secara elektrik) atau kehadiran ion atau rangsangan eksternal seperti cahaya atau hormon (dibuka oleh ligand).



**Gambar 7.3.** Dua konsep dasar pertukaran ion dan solut melewati membran – transpor pasif (difusi sederhana dan difusi terfasilitasi) dan transpor aktif



**Gambar 7.4.** Gerbang protein channel (pada kondisi terbuka). Ion-ion  $K^+$  berdifusi melewati membran plasma

## 7.5 Transpor Aktif

Protein transporter juga dapat menggerakkan zat terlarut melawan gradien elektrokimianya dengan menggunakan energi seluler, dan ini disebut 'transpor aktif'. Salah satu contoh transport

aktif adalah  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ -ATPase, enzim utama yang memompa  $\text{Na}^+$  keluar dari sel dan  $\text{K}^+$  masuk, menghasilkan gradien ion yang penting untuk fungsi seluler (Stillwell, 2016).

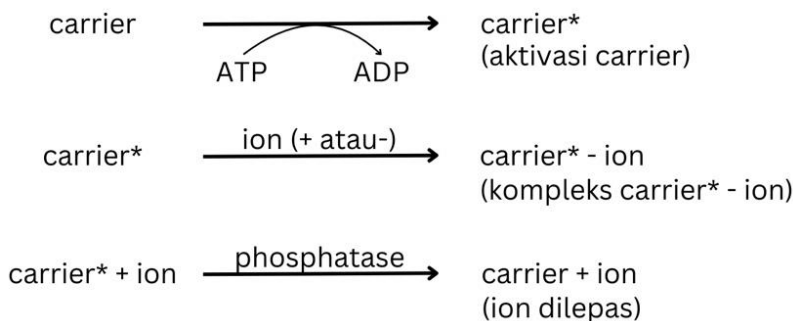
Transpor aktif dapat dibagi menjadi transpor aktif primer dan transpor aktif sekunder. Selama transportasi aktif primer, ATP atau  $\text{PP}_i$  dihidrolisis untuk menyediakan energi yang diperlukan untuk membentuk gradien ion. Transporter yang berfungsi dalam transportasi aktif primer disebut pump/pompa. Transporter aktif sekunder, yang dikenal sebagai ko-transporter, memanfaatkan gradien ion yang dibentuk oleh transportasi aktif primer untuk mendorong akumulasi zat terlarut lainnya melawan gradien elektrokimianya. Ko-transporter dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok; **simport** dan **antiport**. Simport mengangkut dua zat terlarut melintasi membran dalam arah yang sama, sementara antiport mengangkut kedua zat terlarut dalam arah yang berlawanan (Kochhar and Gujral, 2020).

### 7.5.1 Konsep carrier

Area antara ruang luar dan dalam tidak dapat dilalui ion secara bebas dan pergerakan melintasinya diyakini memerlukan protein carrier atau pembawa khusus. Protein carrier ini bergabung dengan ion di luar membrane untuk membentuk kompleks carrier-ion dan melepaskan ion-ion ini ke dalam membran di mana ion-ion tersebut berkumpul (**Gambar 14.5**). Konsep ini didukung oleh teori pertukaran isotop, efek saturasi dan spesifitas dalam penyerapan ion (Kochhar and Gujral, 2020).

Ada dua teori yang menjelaskan mekanisme penyerapan garam: teori sitokrom Lundegårdh dan hipotesis Bennet-Clark. Menurut teori Lundegårdh, penyerapan anion terjadi melalui keterlibatan sistem sitokrom, yang membantu menghasilkan energi dari oksidasi pada permukaan membran eksternal. Namun, teori ini hanya menjelaskan peran pembawa untuk anion, dan tidak menjelaskan penyerapan kation. Sementara itu, hipotesis Bennet-Clark mengusulkan bahwa lecithin bertindak sebagai pembawa yang dapat mengangkut baik kation maupun anion melintasi membran sel. Kedua teori tersebut

menunjukkan peran energi metabolisme dalam penyerapan ion, tetapi keduanya memiliki kelemahan. Teori Lundegårdh kurang menjelaskan penyerapan kation, sementara hipotesis Bennet-Clark tidak menjelaskan bagaimana penyerapan ion dapat terjadi dalam kondisi anaerob (Kochhar and Gujral, 2020).



**Gambar 7.5.** Proses aktivasi protein carrier, pembentukan kompleks carrier-ion, dan pelepasan ion-ion

### 7.5.2 Pompa (pump)

Pompa atau pump membawa zat terlarut (ion, metabolit, dan sejenisnya) melawan gradien elektrokimia. Pompa tersebut mengikat zat terlarut yang akan diangkut dan menghidrolisis ATP atau phrophosphate (PPi) sebagai sumber energi. Pompa-pompa menggerakkan zat terlarut dengan kecepatan yang jauh lebih cepat, puluhan hingga ratusan molekul per detik (Kochhar and Gujral, 2020). Perbandingan antara pompa-pompa dibawah ini dirangkum dalam **Tabel 14.2**.

1. Proton (H<sup>+</sup>)-ATPases  
 Proton (H<sup>+</sup>)-ATPase di membran sel tumbuhan (membrane plasma dan vakuola) memainkan peran kunci dalam transportasi proton, yang merupakan sumber energi utama sel. Proton (H<sup>+</sup>)-ATPase menghasilkan gradien proton melintasi membran, digunakan untuk mensintesis ATP dan berbagai aktivitas fisiologis seperti transportasi aktif sekunder, penyerapan sukrosa, dan pergerakan stomata. Pompa ini mempengaruhi potensial membran sel, dengan aktivitasnya yang sangat diatur oleh berbagai faktor.

Implikasinya mencakup transportasi ion tunggal dalam satu arah (uniport), pembentukan gradien elektrokimia, dan penggunaan energi tersimpan dalam gradien proton untuk aktivitas seluler. Pompa ATP-hidrolisis dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis berdasarkan struktur dan mekanisme aksinya, seperti F-type ATPases yang terlibat dalam sintesis ATP, P-type ATPases seperti pompa  $H^+$ -ATPase membran plasma, dan V-type ATPases yang berperan dalam menurunkan pH pada vakuola. Setiap jenis memiliki peran khusus dalam metabolisme dan fisiologi sel tumbuhan.

2.  $Ca^{2+}$  pumping ATPase:

$Ca^{2+}$  pumping ATPase ditemukan di hampir semua endomembran dan berperan dalam menjaga konsentrasi  $Ca^{2+}$  dalam sitosol tetap rendah. Pompa ini merupakan bagian dari P-type ATPase dan menghasilkan energi dengan hidrolisis ATP untuk mengangkut dua ion  $Ca^{2+}$  melintasi membran. Terdapat dua jenis  $Ca^{2+}$ -ATPase yang telah diidentifikasi pada sel tumbuhan, yang memiliki kemampuan berbeda dalam berinteraksi dengan kalmodulin, sensor  $Ca^{2+}$  seluler. Jenis  $Ca^{2+}$ -ATPase pengikat kalmodulin memiliki domain N-terminus yang berikatan dengan kalmodulin, menghambat pompa dan meningkatkan konsentrasi  $Ca^{2+}$  sitosol. Ini merupakan contoh loop umpan balik negatif yang menjaga homeostasis  $Ca^{2+}$  sitosol.

3.  $H^+$ -pyrophosphatase:

$H^+$  pumping pyrophosphatase ( $H^+$ -PPase) adalah protein yang ditemukan pada membran tonoplas serta di badan Golgi, jaringan trans-Golgi atau trans-Golgi Network (TGN), multivesicular body (MVB), dan membran plasma pada tanaman. Ada dua jenis  $H^+$ -PPases: Tipe I dan Tipe II yang memiliki perbedaan dalam respons terhadap ion  $K^+$  dan  $Ca^{2+}$ . Tipe I  $H^+$ -PPases distimulasi oleh  $K^+$  sitoplasma dan dihambat oleh ion  $Ca^{2+}$ , sementara Tipe II  $H^+$ -PPases diaktifkan oleh  $Ca^{2+}$  dan tidak sensitif terhadap  $K^+$ .  $H^+$ -PPase memiliki peran dalam memanfaatkan pirofosfat yang dihasilkan selama metabolisme karbohidrat, membantu

menjaga konsentrasi pirofosfat yang stabil, serta berperan dalam pengaturan sintesis pati dan selulosa.

#### 4. ABC transporters

Transporter ABC (ATP-binding cassette) merupakan salah satu famili protein terbesar yang ditemukan pada semua organisme hidup. Transporter ABC termasuk dalam ATPase tipe P yang menghidrolisis ATP dan bukan elektrogenik. Transporter ABC terlibat dalam berbagai aktivitas seluler, termasuk memfasilitasi transportasi solut tak bermuatan keluar dari sitosol, mentransfer lilin ke permukaan sel daun, dan mengeluarkan xenobiotik ke dalam vakuola. Transporter ABC yang ditemukan pada membran plasma dan vakuola dan terdiri dari dua elemen struktural dasar: domain-domain membran integral yang menyebar, serta lipatan pengikat nukleotida yang berorientasi sitoplasma dan membantu dalam hidrolisis ATP.

**Tabel 7.2.** Perbandingan pompa, proton (H<sup>+</sup>)-ATPase, Ca<sup>2+</sup> pumping ATPase, H<sup>+</sup>-PPase, dan ABS transporter

| Fitur                   | Pompa (pump)                                  | Proton (H <sup>+</sup> )-ATPases | Ca <sup>2+</sup> pumping ATPase             | H <sup>+</sup> -PPase   | ABS transporter                             |
|-------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|
| Peran utama             | Mengangkut solute melawan gradien konsentrasi | Menghasilkan gradien proton      | Menjaga konsentrasi Ca <sup>2+</sup> rendah | Memanfaatkan pirofosfat | Memfasilitasi transportasi berbagai molekul |
| Sumber energi           | ATP/PPi                                       | Energi dari cahaya atau kimia    | ATP                                         | Tidak memerlukan energi | ATP                                         |
| Kecepatan transport     | Sangat cepat                                  | Cepat                            | Cepat                                       | Cukup cepat             | Cepat                                       |
| Electrogenicity         | Electrogenic                                  | Electrogenic                     | Tidak electrogenic                          | Tidak electrogenic      | Tidak electrogenic                          |
| Distribusi pada membran | Membran plasma, vakuola                       | Membran plasma                   | Membrane plasma                             | Tonoplas                | Membran plasma, vakuola                     |

| Fitur                | Pompa (pump)                                    | Proton (H <sup>+</sup> )-ATPases                 | Ca <sup>2+</sup> pumping ATPase | H <sup>+</sup> -PPase | ABS transporter                     |
|----------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Pentingnya dalam sel | Mengatur komposisi ion di dalam dan di luar sel | Menyediakan energi untuk berbagai proses seluler | Menjaga homeostasis kalsium     | Mengatur pH sitosol   | Transportasi berbagai jenis molekul |

## 7.6 Perbedaan Potensial Antar Membran

Potensial membran diciptakan oleh sel untuk memfasilitasi transportasi ion, nutrisi, dan lainnya melintasi membran sel. Keberadaannya secara signifikan memengaruhi struktur membran biologis, membuatnya lebih permeabel terhadap zat-zat antara dalam dan luar sel. Perubahan dalam potensial membran dapat mengubah struktur membran dan memengaruhi perilaku serta fungsi komponen seperti protein transport dan lipid (Malinsky and Opekarová, 2016).

Perbedaan potensial (atau tegangan) antar membran disebut sebagai potensial transmembran atau potensial Nernst. Hal ini terjadi karena distribusi tak seimbang muatan anionik dan kationik di kedua sisi membran. Hubungan antara gradien potensial transmembran dan distribusi ion di sepanjang membran secara kuantitatif dapat diketahui dengan persamaan Nernst berikut ini:

$$-z\Delta E_{nj} = 59 \log \frac{C_i}{C_o}$$

Persamaan ini umum digunakan dalam fisiologi dan biologi untuk menghitung potensial transmembran ( $\Delta E_{nj}$ ) pada ion tertentu ( $n$ ) berdasarkan konsentrasi ion tersebut di dalam ( $C_i$ ) dan di luar sel ( $C_o$ ), dimana  $z$  adalah valensi ion (Kochhar and Gujral, 2020). Tanda negatif menunjukkan adanya perbedaan potensial antar membrane ( $\Delta E_{nj}$ ) adalah negatif ketika konsentrasi ion di dalam sel ( $C_i$ ) lebih besar daripada konsentrasi di luar sel ( $C_o$ ).

Persamaan Nernst ini dapat digunakan untuk mengetahui kemungkinan transportasi ion secara aktif atau pasif melintasi membran dan mengukur potensial transmembran (potensial Nernst) yang disumbang oleh ion, ketika konsentrasinya diketahui.



## 7.7 Ion Antagonisme

Ion antagonisme merupakan fenomena di mana dua atau lebih ion saling berinteraksi, menghasilkan efek yang berlawanan pada tanaman. Fenomena memiliki manfaat dalam mengoptimalkan penyerapan nutrisi dan menjaga keseimbangan nutrisi, namun kompetisi nutrisi yang tidak seimbang dapat mengganggu penyerapan nutrisi yang diperlukan oleh tanaman, bahkan berpotensi menyebabkan toksisitas jika ion-ion yang bersaing memiliki efek yang bertentangan. Sebagai contoh, ion kalium ( $K^+$ ) cenderung meningkatkan fluiditas membran, sementara ion kalsium ( $Ca^{2+}$ ) berperilaku sebaliknya. Kedua ion ini bersaing untuk tempat di membran sel tanaman, sehingga keberadaan kalsium dalam jumlah tinggi dapat menghambat penyerapan kalium oleh tanaman, mengganggu keseimbangan nutrisi dan menghambat pertumbuhan (Kochhar and Gujral, 2020).

Interaksi antara nitrogen (N) dan fosfor (P) terjadi lebih pada level metabolisme karena keduanya berperan penting dalam proses pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Ketika konsentrasi fosfor rendah, tanaman cenderung lebih cepat menyerap nitrogen untuk mengkompensasi kekurangan fosfor tersebut, mempertahankan keseimbangan nutrisi yang optimal. Namun, jika konsentrasi fosfor tinggi, tanaman dapat mengalami hambatan dalam penyerapan nitrogen, yang mengubah keseimbangan nutrisi dalam tanaman dan mengganggu pertumbuhan serta kesehatannya secara keseluruhan. Selain itu, ion dengan muatan yang sama juga dapat bersaing untuk situs pengangkut pada membran, seperti  $K^+$  dan  $Rb^+$ ,  $Cl^-$  dan  $Br^-$ ,  $Ca^{2+}$  dan  $Sr^{2+}$  (Kochhar and Gujral, 2020).

## 7.9 Kesimpulan

Zat hara tanaman, merupakan unsur kimia atau senyawa organik yang diperlukan untuk fungsi-fungsi biologis tanaman, sangat penting untuk pertumbuhan, perkembangan, dan reproduksi tanaman. Zat hara esensial dibagi menjadi makronutrien dan mikronutrien, yang masing-masing dibutuhkan dalam jumlah besar dan kecil. Mobilitas unsur hara dalam tanaman memainkan peran penting dalam menentukan kemunculan gejala kekurangan nutrisi

pada daun. Struktur akar tanaman memiliki peran krusial dalam menyerap zat hara dengan efisien dari tanah. Proses penyerapan zat hara melibatkan berbagai mekanisme seperti difusi sederhana, difusi terfasilitasi, dan transportasi aktif. Selain itu, perbedaan potensial antar membran serta fenomena ion antagonisme juga memengaruhi penyerapan zat hara oleh tanaman. Pemahaman yang mendalam tentang mekanisme penyerapan zat hara penting untuk memaksimalkan produktivitas tanaman.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alaoui, I., Ghadraoui, O., Serbouti, S., Ahmed, H., Mansouri, I., el Kamari, F., Taroq, A., Ousaaïd, D., Squalli, W. & Farah, A. 2022. *The Mechanisms of Absorption and Nutrients Transport in Plants: A Review*. 6, 8-14.
- Class, E. B. 2024. *Mechanism of Mineral Absorption in Plants (Plant Physiology Short Notes)* [Online]. Easy Biology Class. Available: <https://www.easybiologyclass.com/mechanism-of-mineral-absorption-in-plants-plant-physiology-short-notes/> [Accessed May 3 2024].
- Fievet, P. 2015. *Donnan Effect*. In: Drioli, E. & Giorno, L. (eds.) *Encyclopedia of Membranes*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kochhar, S. L. & Gujral, S. K. 2020. *Mineral Nutrition and Absorption*. Plant Physiology: Theory and Applications. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kuya, N. & Sato, S. 2011. *The relationship between profiles of plagiogravitropism and morphometry of columella cells during the development of lateral roots of Vigna angularis*. *Advances in Space Research*, 47, 553-562.
- Lux, A., Luxová, M., Abe, J. & Morita, S. 2004. *Root cortex: Structural and functional variability and responses to environmental stress*. *Root Research*, 13, 117-131.
- Malinsky, J. & Opekarová, M. 2016. *Chapter Four - New Insight Into the Roles of Membrane Microdomains in Physiological Activities of Fungal Cells*. In: Jeon, K. W. (ed.) *International Review of Cell and Molecular Biology*. Academic Press.
- Marschner, H. 1983. *General Introduction to the Mineral Nutrition of Plants*. In: Läuchli, A. & Bielecki, R. L. (eds.) *Inorganic Plant Nutrition*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Morse, J. W. & Mackenzie, F. T. 1990. *Chapter 1 The CO<sub>2</sub>-Carbonic Acid System and Solution Chemistry*. In: Morse, J. W. & Mackenzie, F. T. (eds.) *Developments in Sedimentology*. Elsevier.

- Panbo, P., Payaka, A., Salaeh, R. & Daengngern, R. 2024. *Proton exchange of carbonic acid and methylamine complex accelerated by a single-water molecule via intermolecular hydrogen bonding: A theoretical investigation*. Chemical Physics Impact, 8, 100451.
- Růžička, K., Ursache, R., Hejátko, J. & Helariutta, Y. 2015. *Xylem development – from the cradle to the grave*. New Phytologist, 207, 519-535.
- Shreeja, D. 2024. *Contact Exchange and Its Importance in the Nutrition of Plants* [Online]. India: Soil Management India. Available:  
<https://www.soilmanagementindia.com/nutrient-elements-in-soil/contact-exchange-and-its-importance-in-the-nutrition-of-plants/2800> [Accessed May, 3 2024].
- Starzak, M. E. 2003. *Membranes, Synthetic (Chemistry)*. In: Meyers, R. A. (ed.) *Encyclopedia of Physical Science and Technology* (Third Edition). New York: Academic Press.
- Stillwell, W. 2016. *Membrane Transport*. An Introduction to Biological Membranes, 423–451.
- Turgeon, R. & Wolf, S. 2009. *Phloem Transport: Cellular Pathways and Molecular Trafficking*. Annual Review of Plant Biology, 60, 207-221.
- Wiszniewska, A., Hanus-Fajerska, E., Muszyńska, E. & Ciarkowska, K. 2016. *Natural Organic Amendments for Improved Phytoremediation of Polluted Soils: A Review of Recent Progress*. Pedosphere, 26, 1-12.

# BAB 8

## FOTOSINTESIS

*Oleh Hendri Satria Kamal Uyun*

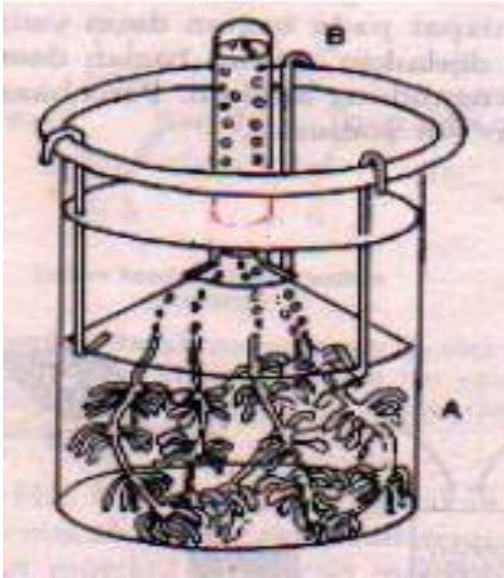
### 8.1 Sejarah Fotosintesis

Pada tahun 1771, ahli kimia Inggris Joseph Priestley melakukan sebuah percobaan di mana ia menutup lilin yang menyala dengan wadah terbalik sehingga menyebabkan wadah menjadi kedap udara dan selanjutnya ia menemukan bahwa nyala lilin padam. Kemudian ia menyadari bahwa jika ia meletakkan tikus dan lilin, tikus tersebut akan mati lemas dan nyala lilin kembali padam. Priestley kemudian menambahkan tanaman ke dalam wadah kedap udara ternyata lilin tetap menyala dan tikus tersebut bertahan hidup. Dari percobaan tersebut, Priestley menyimpulkan bahwa nyala lilin “merusak” udara yang ada dalam toples dan menyebabkan tikus mati. Dia kemudian menunjukkan bahwa tanaman dapat meregenerasi udara yang rusak akibat lilin. Ia juga menyimpulkan bahwa tikus dapat bertahan hidup di wadah kedap udara asalkan ada tanaman di dalamnya (Frank B Salisbury, 1995).



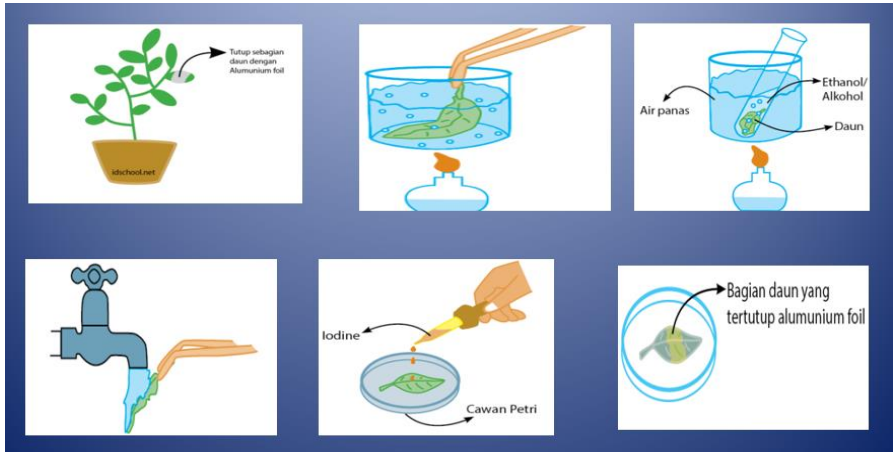
**Gambar 8.1.** Ilustrasi percobaan Joseph Priestley

Ahli fisiologi Jerman Jan Ingenhousz (1779) melakukan eksperimen dengan tumbuhan air (*Hydrila verticillata*). Dari eksperimen ini dapat ditarik sebuah kesimpulan 1) gas yang dikeluarkan tumbuhan adalah  $O_2$ , (2) proses ini memerlukan sinar matahari, (3) hanya bagian hijau daun saja yang mengeluarkan  $O_2$  (Frank B Salisbury, 1995).



**Gambar 8.2.** Ilustrasi percobaan Jan Ingenhousz

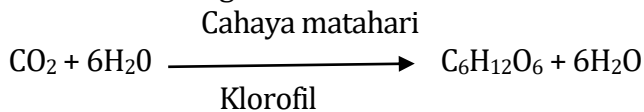
Sachs (1860) Sachs melakukan percobaan dengan cara menutup sebagian permukaan daun. kemudian daun direbus dengan air, setelah itu daun di panaskan dalam alkohol 70%, Kemudian memberikan larutan lugol pada daun. Daun yang permukaan tidak ditutupi memiliki warna yang lebih terang di bandingkan permukaan daun yang tertutupi. menunjukkan bahwa fotosintesis terjadi pada bagian daun yang terkena cahaya matahari menghasilkan zat gula atau karbohidrat yang disebut amilum (Frank B Salisbury, 1995).



**Gambar 8.3.** Ilustrasi Percobaan Sachs

## 8.2 Pendahulun

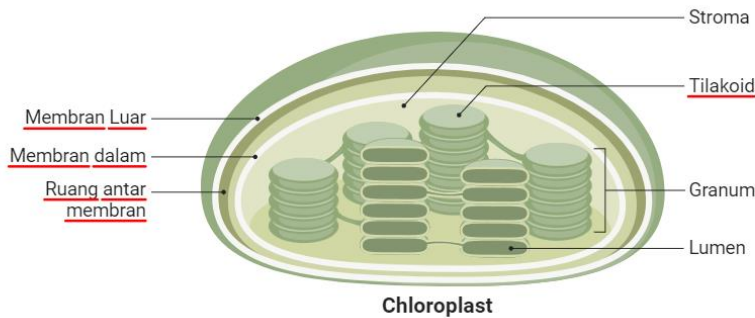
Fotosintesis termasuk kedalam reaksi anabolisme yaitu reaksi pembentukan senyawa kompleks berupa karbohidrat yang berasal dari senyawa sederhana yaitu karbondioksida dan air dengan bantuan klorofil dan cahaya matahari. Reaksi umum dari fotosintesis adalah sebagai berikut.



(Januar Darmawan, 2010).

## 8.3 Kloroplas struktur dan pigmen

Fotosintesis terjadi di kloroplas. Didalam kloroplast cairan dan kaya akan enzim yang disebut stroma. Didalam stroma terdapat tilakoid. Tumpukan Tilakoid disebut juga dengan Granum. Di tilakoid inilah terjadi reaksi terang dimana energi matahari di tangkap dan digunakan untuk mengoksidasi air dan membentuk ATP dan NADPH yang kaya energi untuk diperlukan oleh stroma pada reaksi gelap untuk mengubah  $\text{CO}_2$  menjadi karbohidrat (Glukosa) (Salisbury, 1995)



**Gambar 8.4.** Struktur Kloroplast

### 8.3.1 Reaksi Terang

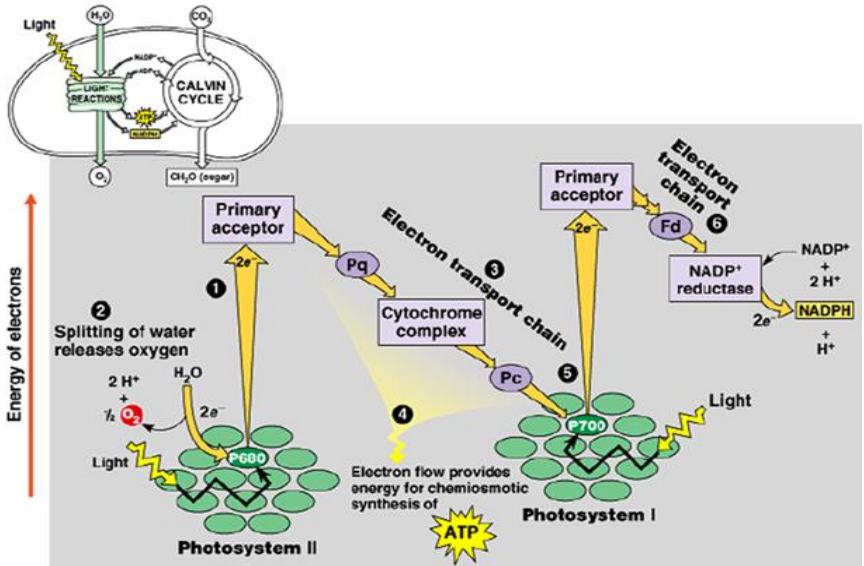
Menurut Albert Enstein Cahaya memiliki sifat gelombang dan sifat partikel. Cahaya merupakan energi matahari dengan panjang gelombang 390 nm sampai 760 nm yang tergolong cahaya tampak (Visible) (Suharti, 2015).

Sifat partikel cahaya dapat dijelaskan dengan pernyataan bahwa cahaya menyerpa sebagai foton. Yaitu paket energi energi yang tepotong potong dimana masing- masing mempunyai panjang gelombang tertentu. Semakin besar energi maka semakin pendek gelombang sehingga dapat disimpulkan panjang gelombang bebanding terbalik dengan energi (Suharti, 2015).

Peristiwa Penyerapan cahaya terjadi dimana setiap satu molekul hanya dapat menyerap satu foton pada waktu tertentu dan foton ini membuat terjadinya eksitasi elektron dalam satu molekul, Molekul-molekul pigmen yang digunakan untuk fotosintesis. Reaksi Terang terbagi 2. Fosforilasi non siklik dan Fosforilasi siklik (Suharti, 2015)



## 1. Reaksi Terang (Non Siklik)



**Gambar 8.5.** Gambar Ilustrasi reaksi terang (Non Siklik)

Energi cahaya diterima oleh fotosistem II (P680) menyebabkan lompatan elektron atau eksitasi elektron. Elektron yang lepas menyebabkan terjadinya fotolisis pada fotosistem II. Fotolisis adalah pemecahan air (H<sub>2</sub>O) menjadi Oksigen O<sub>2</sub> (Suharti, 2015).



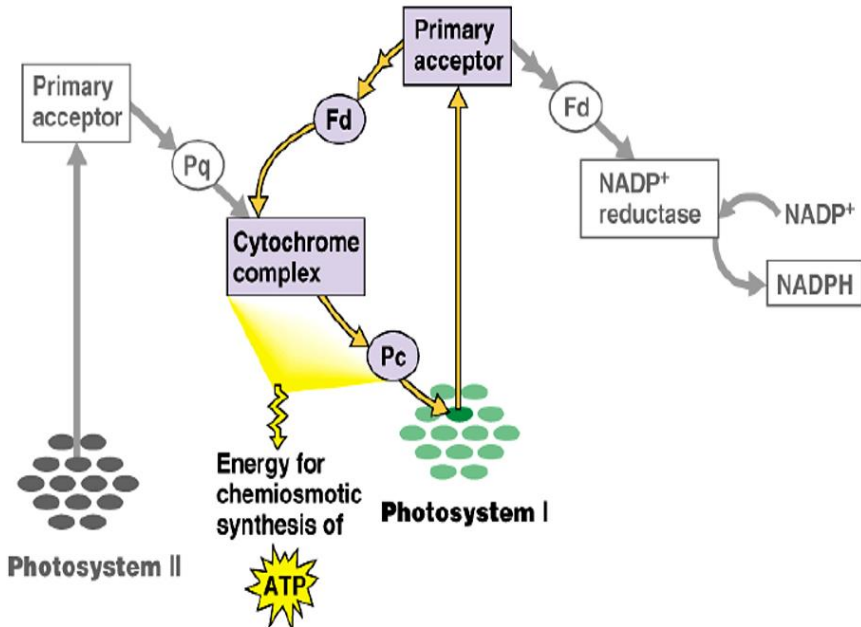
Oksigen yang terbentuk dikeluarkan ke lingkungan atau digunakan untuk respirasi aerob. Elektron 2e<sup>-</sup> digunakan untuk menetralkan fotosistem II. Aseptor primer menangkap elektron yang tereksitasi dari fotosistem II kemudian elektron tersebut akan menuju Plastoquinon (Pq) kemudian elektron tersebut akan melewati sitokrom kompleks dan terjadi pembentukan ATP, elektron dari sitokrom kompleks akan dibawa menuju plastosianin(Pq). Elektron dari plastosianin akan menuju fotosistem I untuk mengisi kekosongan elektron akibat dari terjadi eksitasi Fotosistem I yang menerima energi cahaya. Elektron yang tereksitasi pada fotosistem 1 akan di tangkap oleh aseptor primer pada fotosistem 1. Elektron akan menuju

feridoksin (Fd) dan menuju NADP<sup>+</sup> Reduktase sehingga terbentuk NADPH (Salisbury, 1995)

## 2. Fosforilasi Siklik

Energi cahaya diterima oleh fotosistem I menyebabkan terjadinya eksitasi elektron, elektron yang tereksitasi akan ditangkap oleh aseptor primer pada fotosistem I. Elektron dari fotosistem I akan menuju feredoksin, kemudian akan menuju sitokrom kompleks dan akan menghasilkan ATP, elektron akan ke menuju plastosianin dan akan kembali ke fotosistem I.

Gambar 16.4 Gambar Ilustrasi reaksi terang (Non Siklik)

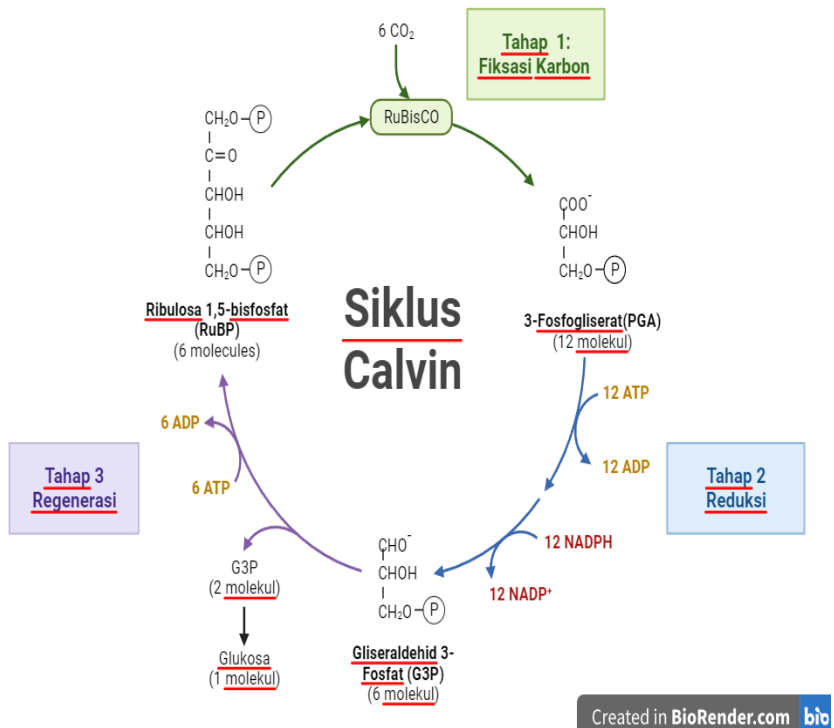


Gambar 8.6. Gambar Ilustrasi reaksi terang (Siklik)

### 8.3.2 (Siklus Calvin) Reaksi gelap

Siklus Calvin berlangsung di stroma yang terdiri dari tiga tahap yaitu Fiksasi karbon, reduksi dan regenerasi. Fiksasi karbon mencakup proses penambahan 6 molekul CO<sub>2</sub> pada Ribulosa 1,5 bifosfat (RuBP) dengan bantuan enzim Rubisco untuk membentuk 12 molekul 3 PGA (3 fosfo gliserat). Setiap molekul 3 PGA menerima gugus fosfat dari ATP membentuk 1,3 Fosfogliserat. Elektron dari

NADPH mereduksi 1,3 Fosfogliserat sehingga membentuk senyawa gliseraldehid 3 fosfat (G3P), karena ada 12 molekul 1,3 fosfogliserat maka akan terbentuk 12 molekul gliseraldehid 3 fosfat. 2 molekul gliseraldehid 3 fosfat akan membentuk 1 molekul glukosa. 10 molekul gliseraldehid 3 fosfat (G3P) akan masuk ke tahap regenerasi kembali membentuk RuBP.

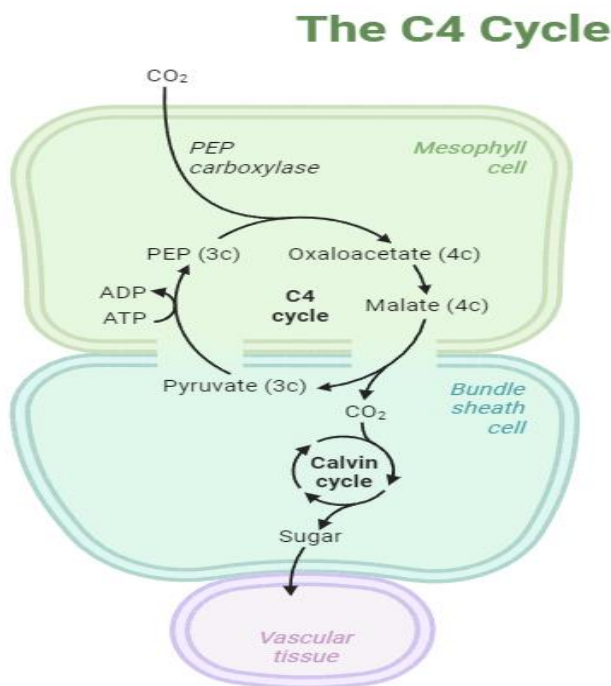


**Gambar 8.7.** Gambar Ilustrasi reaksi Gelap

### Lintasan asam dikaboksilat C4

Setelah siklus calvin ditemukan, pada mulanya diduga bahwa masalah reaksi gelap pada fotosintesis berlaku sama terhadap semua tumbuhan. Akan tetapi para ahli menemukan beberapa jenis tumbuhan memfiksasi CO<sub>2</sub> pertama-tama untuk membentuk senyawa dengan 4 atom C. Yaitu asam malat oleh karena itu tumbuhan ini disebut tanaman C4. Tumbuhan tergolong tumbuhan C4 tidak membuka stomata secara penuh pada siang hari. Fiksasi PEP dan CO<sub>2</sub> yang di katalis oleh enzim PEP karboksilase

menghasilkan asam oksaloasetat terjadi di mesofil. Kemudian dengan bantuan enzim malat dehidrogenase asam oksaloasetat membentuk asam malat berkarbon 4 (C-4). Asam malat masuk kedalam seludang pembuluh dan akan terkarboksilasi menjadi asam piruvat berkarbon 3 (C-3) dan  $\text{CO}_2$ . Asam piruvat akan menjadi PEP sedang  $\text{CO}_2$  akan mengalami siklus calvin pada seludang pembuluh dengan melibatkan enzim Rubisco (RuBP) dan menghasilkan Karbohidrat. Contoh tumbuhan yang termasuk kedalam tumbuhan dengan C-4 adalah jagung, tebu dan rumput-rumputan (Family Poaceae).



Created in BioRender.com bio

**Gambar 8.8.** Gambar Lintasan asam karboksilat C4

## Lintasan CAM

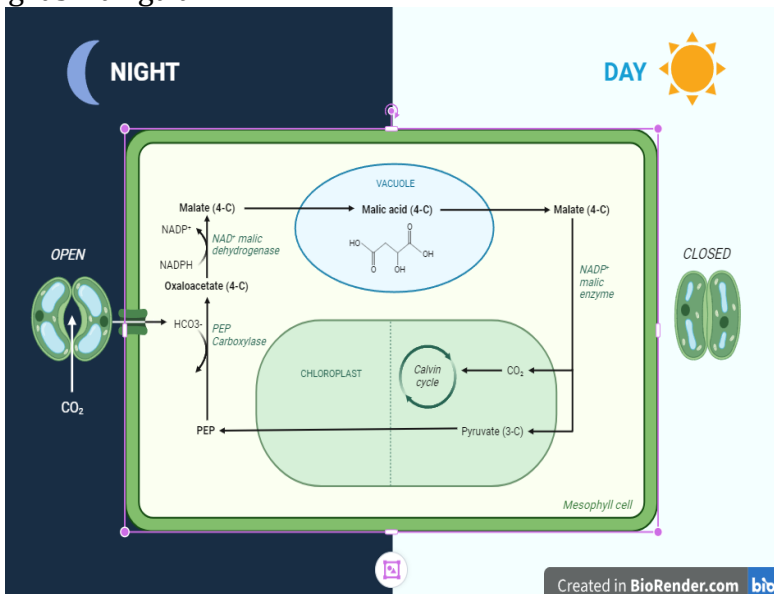
Beberapa spesies tumbuhan memiliki sifat yang berbeda dengan kebanyakan spesies tumbuhan lainnya. Spesies Tanaman CAM menutup stomata pada siang hari dan membuka stomata pada malam hari. Kelompok tumbuhan ini termasuk kedalam famili

*Crassulaceae* maka dari itu metabolisme ini dinamakan *Crassulacean acid metabolism* (CAM), biasanya tanaman ini hidup di daerah kering. Tanaman ini stomata tertutup pada siang hari bertujuan untuk mengurangi laju transpirasi, sehingga dapat beradaptasi dengan lingkungan kering.

Keunikan pada tanaman Tumbuhan CAM akan mempegaruhi metabolisme tanaman ini, karena penyerapan  $\text{CO}_2$  akan terjadi pada malam hari.

Model Fiksasi  $\text{CO}_2$  pada tanaman CAM terjadi pada malam hari. Pati diurai melalui reaksi glikolisis sampai terbentuk *Phospoenol piruvat* (PEP) yang selanjutnya bereaksi dengan  $\text{CO}_2$  dari lingkungan me bentuk asam oksaloasetat dengan bantuan enzim PEP Karbosilase. Asam oksaloasetat selajutnya mengalami reaksi reduksi dengan adanya enzim malat dehidrogenase menjadi asam malat

Pada siang hari asam malat dibawa keluar dari vakuola melalui mekanisme difusi pasif. Asam malat dalam kloroplast akan mengalami dekaboksilasi untuk membentuk  $\text{CO}_2$  dan Phopoenol piruvat (PEP).  $\text{CO}_2$  yang terbentuk akan mengalami siklus calvin dan menghasilkan gula.



**Gambar 8.9.** Gambar Lintasan CAM

**Tabel 8.1.** Perbedaan Proses Fotosintesis pada tanaman C3, C4 dan CAM

| Perbedaan                              | Tumbuhan C3                | Tumbuhan C4                   | Tumbuhan CAM                 |
|----------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Produk pertama fiksasi CO <sub>2</sub> | 3 Fosfoglisarat (3 atom C) | Asam Oksaloasetat (4 atom C)  | Asam Oksaloasetat (4 atom C) |
| Enzim saat fiksasi CO <sub>2</sub>     | Rubisco                    | PEP Karboksilase              | PEP Karboksilase             |
| Waktu fiksasi CO <sub>2</sub>          | Siang                      | Siang                         | Malam                        |
| Struktur daun yang terlibat            | Mesofil                    | Mesofil dan seludang pembuluh | Mesofil                      |
| Tempat berlangsung Siklus Calvin       | Mesofil                    | Seludang Pembuluh             | Mesofil                      |

## 8.5 Faktor-faktor yang mempengaruhi fotosintesis

1. Intensitas cahaya  
Laju fotosintesis terjadi secara optimal bila terdapat banyak cahaya
2. Konsentrasi CO<sub>2</sub>  
Semakin banyak karboksilat di udara, semakin banyak pula bahan yang digunakan tumbuhan untuk fotosintesis
3. Suhu  
Enzim yang bekerja pada proses fotosintesis hanya dapat bekerja pada suhu optimal.
4. Kadar air  
Kekurangan air dapat menyebabkan tanaman menutup stomatanya. Ketika stomata menutup, penyerapan karbon dioksida berkurang.

5. Tahap pertumbuhan

Fotosintesis lebih banyak terjadi pada tanaman berkecambah dibandingkan pada tanaman dewasa. Hal ini dikarenakan tanaman yang berkecambah membutuhkan banyak energi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Frank B Salisbury, C.W.R. (1995) *Fisiologi Tumbuhan*. Empat. Bandung: Penerbit ITB.
- Januar Darmawan, J.B. (2010) *Dasar Dasar Ilmu Fisiologi Tumbuhan*. Jakarta: SITC.
- Salisbury, F.B. and cicon w R. (1995) *Plant Physiology*. Third Edit.
- Suharti, N. (2015) *Buku Ajar Botani Farmasi*. Edited by A.H. Pamungkas. padang: ADTUIL.



# **BAB 9**

## **PROSES FISILOGI BIJI PADA TUMBUHAN**

*Oleh Fitri Fatma Wardani*

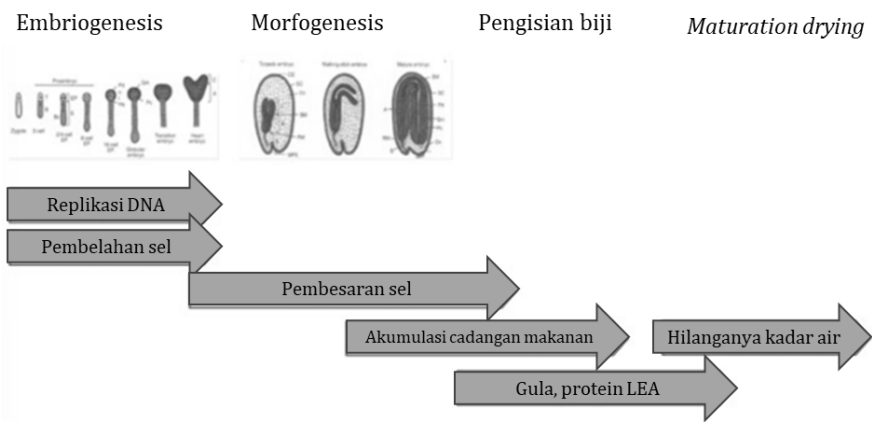
### **9.1 Pendahuluan**

Biji adalah unit tumbuhan terkecil yang berfungsi untuk memperbanyak dan memiliki peranan yang penting dalam bidang pertanian dan pengelolaan keragaman tumbuhan. Biji merupakan penghubung antara masa lalu dan masa depan. Biji menyimpan sifat genetik dari tetuanya di masa lalu yang dapat dimanfaatkan di masa yang akan datang (Bareke, 2018). Biji dalam koleksi plasma nutfah dapat menyimpan informasi genetik dan melindunginya dengan baik dalam jangka waktu yang panjang. Oleh karena itu, mengetahui proses fisiologi biji akan menjadi hal yang penting untuk menghadapi tantangan di masa yang akan datang.

Fisiologi tumbuhan pada umumnya adalah ilmu yang mempelajari proses metabolisme yang berlangsung dalam tumbuhan dan fisiologi biji adalah ilmu yang mempelajari tentang biji yang mencakup tahapan terbentuknya biji hingga proses berkecambahnya biji dan hal-hal yang mempengaruhinya (Pujiwati, 2019). Ruang lingkup fisiologi biji dimulai dari proses pembentukan dan pemasakan biji, proses dormansi biji, proses perkecambahan biji, serta umur simpan dan deteriorasi biji. Semua proses tersebut meliputi berbagai proses sintesis kimiawi yang saling berintegrasi. Faktor lingkungan juga berperan penting dalam proses fisiologi biji, seperti air, suhu, dan cahaya. Oleh karena itu, pada bagian ini akan dijelaskan bagaimana proses fisiologi biji berlangsung sehingga pemanfaatan biji di masa yang akan datang dapat dilakukan secara maksimal.

## 9.2 Pembentukan, Perkembangan dan Pemasakan Biji

Bareke (2018) membagi proses pembentukan, perkembangan dan pemasakan biji menjadi empat fase. Fase I dan II adalah fase pembelahan dan ekspansi sel. Pembentukan biji diawali dengan polinasi dan fertilisasi yang kemudian diikuti periode pembentukan struktur biji sebagai hasil dari proses pembelahan sel, ekspansi, dan diferensiasi (histodiferensiasi). Pada fase ini bagian yang akan menjadi embrio tervisualisasi. Fase III adalah fase meningkatnya bobot kering biji, karena sel embrionik menerima asimilat dari tumbuhan induk. Hal tersebut diikuti terjadinya peningkatan ukuran biji. Pada fase III, kadar air biji konstan dan tinggi. Fase IV merupakan fase berkurangnya kadar air biji. Hal ini terjadi karena adanya perubahan organisasi struktur membran sel akibat meningkatnya sintesis enzim untuk persiapan berkecambah. Secara umum, tahapan pembentukan, perkembangan, dan pemasakan biji disajikan pada Gambar 9.1.



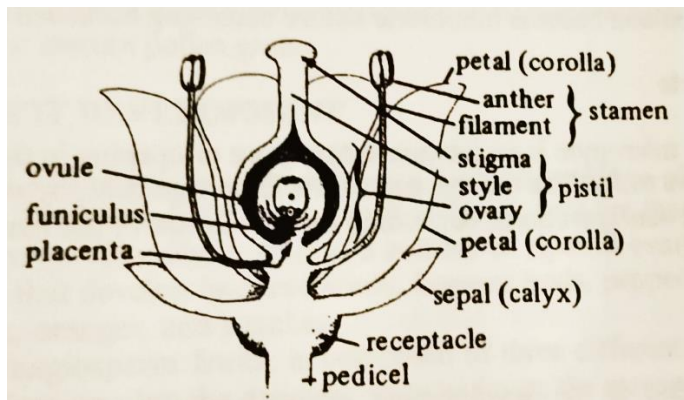
**Gambar 9.1.** Tahap pembentukan, perkembangan, dan pemasakan biji

(Sumber : Sripathy and Groot, 2023)

### 9.2.1 Pembentukan Biji

Pada tumbuhan, pembentukan biji dimulai dengan inisiasi pembungaan yang diikuti dengan pembentukan struktur bunga dan polinasi (Sripathy and Groot, 2023). Inisiasi pembungaan terjadi

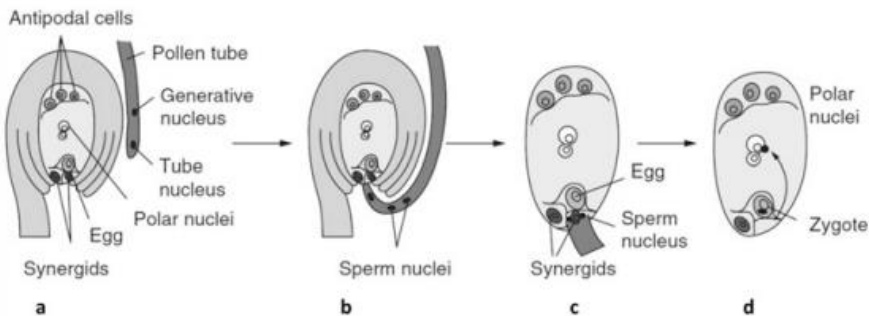
akibat adanya induksi pembungaan oleh faktor eksternal seperti suhu, panjang hari siang, bahan kimia, dan status nutrisi dari suatu tumbuhan (Copeland and McDonald, 2001). Pada tumbuhan monokotil, inisiasi pembungaan terjadi pada jaringan meristem yang disebut dermatogen, sedangkan pada tumbuhan dikotil terjadi pada tunas lateral, terminal, maupun aksilar. Secara umum, meristem reproduktif tersebut kemudian berkembang dan membentuk struktur bunga seperti petal, sepal, stamen, dan pistil (Gambar 9.2). Petal merupakan bagian bunga yang paling mencolok dan dalam bentuk jamak disebut korola. Sepal merupakan bagian buah yang tidak terlalu mencolok dan dalam bentuk jamak disebut kaliks. Stamen merupakan organ jantan bunga yang membawa polen dan terdiri dari anther dan filamen. Pistil merupakan organ betina bunga dan terdiri dari stigma, stylus, dan ovari (bakal buah). Hormon giberelin mempunyai peranan penting pada proses pembentukan struktur bunga, terutama dalam produksi polen yang fertil.



**Gambar 9.2.** Bagian-bagian bunga  
(Sumber : Copeland and McDonald, 2001)

Polinasi merupakan proses mendaratnya polen di stigma. Polen memiliki dua sel, yaitu inti vegetatif dan inti generatif. Sel generatif membelah secara mitosis menghasilkan dua inti sperma. Pada saat pistil sudah siap untuk polinasi, stigma mensekresikan larutan gula untuk memicu perkecambahan polen. Kesiapan pistil untuk polinasi ditandai dengan berkembangnya ovul di dalam ovari

yang merupakan lokasi perkembangan struktur betina pada tumbuhan. Di dalam ovul akan berkembang delapan inti haploid (kandung embrio/*embryo sac*). Delapan inti haploid ini terbagi menjadi tiga kelompok, yaitu kelompok I terdiri atas 1 inti sel telur dan 2 inti sinergid yang terletak di bagian ujung dekat mikrofil. Kelompok II terdiri 2 inti polar yang terletak di bagian tengah kandung embrio. Kelompok III terdiri dari 3 inti antipodal yang terletak di bagian ujung lain kandung embrio. Polen yang berkecambah pada stigma, menyebabkan inti vegetatif memproduksi *pollen tube* di dalam style menuju ovarium. Inti vegetatif kemudian mati (lisis) dan inti generatif yang membawa dua inti sperma masuk ke dalam *embryo sac*. Satu inti sperma ( $n$ ) berfusi dengan dua inti polar ( $2n$ ) membentuk inti endosperma ( $3n$ ) dan inti sperma yang lain ( $n$ ) berfusi dengan inti sel telur ( $n$ ) membentuk zigot ( $2n$ ) (Gambar 9.3. Pada angiosperma, kedua proses fertilisasi tersebut dikenal dengan istilah fertilisasi ganda.



**Gambar 9.3.** Proses fertilisasi ganda pada ovul angiosperma, a.

Susunan sel pada megaspora dan *pollen tube* yang mengawali fertilisasi, b. *Pollen tube* tumbuh hingga ke stylus dan inti generatif membelah menjadi dua inti sperma di dalam *pollen tube*, c. Inti sperma masuk ke dalam *embryo sac*, d. Satu inti sperma berfusi dengan sel telur membentuk zigot ( $2n$ ) dan inti sperma lainnya berfusi dengan sel inti polar membentuk inti endosperma ( $3n$ ) (Sumber : Sliwinska and Bewley, 2014)

### 9.2.2 Perkembangan Biji

Setelah terjadi fertilisasi, ovul kemudian berkembang menjadi biji, sedangkan jaringan ovarium membentuk buah atau perikarpa. Pada satu buah biasanya terdapat satu atau lebih biji. Testa (kulit biji) berkembang dari outer dan inner integumen yang merupakan jaringan ovarium. Zigot berkembang menjadi embrio dan inti endosperma menjadi endosperma. Hasil pembentukan biji ini memperlihatkan bahwa embrio dan sperma merupakan kombinasi sifat genetik dari tetua jantan dan betina, sedangkan testa dan perikarpa berasal dari tetua betina saja (Sripathy and Groot, 2023).

Hormon yang berperan penting dalam proses perkembangan biji adalah auksin, giberelin, dan sitokinin. Auksin memiliki peranan yang penting dalam proses embriogenesis dengan mengatur pola formasi polaritas apikal-basal (transisi bentuk embrio dari globular menjadi hati dan kotiledon) dan perkembangan jaringan vaskular. Giberelin memiliki peranan yang penting dalam perkembangan embrio. Sitokinin memiliki peranan yang penting dalam perkembangan endosperma dan perkembangan biji seluruhnya melalui pemicuan pembelahan sel.

Perkembangan biji secara morfologi terjadi apabila terjadi perubahan sitologi, kimia, dan bobot biji (Copeland and McDonald, 2001). Biji yang sedang berkembang akan mengalami kenaikan bobot setelah fertilisasi akibat dari penyerapan nutrisi dan air yang berasosiasi juga dengan cepatnya pembelahan dan pemanjangan sel. Pada monokotil, penambahan bobot biji karena perkembangan endosperma lebih tinggi dibandingkan perkembangan testa dan perikarpa, sedangkan perkembangan embrio tidak berpengaruh pada bobot biji.

Perubahan kimiawi terjadi setelah fertilisasi pada perkembangan biji. Pada saat perkembangan biji dimulai, biji menjadi resipien utama (penampung) asimilat pada tumbuhan. Pada biji monokotil, karbohidrat utama di endosperma dan seluruh biji adalah pati. Kandungan karbohidrat meningkat secara cepat pada saat endosperma berkembang sedangkan pada jaringan testa dan perikarpa menurun. Pada awalnya, kandungan sukrosa dan jenis gula lainnya juga tinggi di dalam endosperma muda, tetapi menurun secara cepat saat kandungan pati meningkat. Pada testa dan

perikarpa kandungan sukrosa dan gula lainnya meningkat pada awal perkembangan biji dan kemudian menurun seiring kemasakan biji.

Pada endosperma juga terkandung nitrogen dalam bentuk protein sebesar 50% setelah fertilisasi. Pada proses perkembangan, nitrogen-protein meningkat hingga 20 hari dan kemudian konstan. Hal yang sama pula pada nitrogen bentuk amida yang meningkat cepat di awal perkembangan biji dan kemudian konstan. Pada testa dan perikarpa juga mengalami pola yang sama meskipun dengan kecepatan peningkatan yang lambat. Selain itu, ditemukan juga nitrogen dalam bentuk asam amino dan protein yang berikatan dengan fosfor pada biji yang sedang berkembang. Pada endosperma, kandungan asam amino meningkat secara cepat pada dua atau tiga minggu perkembangan biji. Kandungan RNA pada endosperma juga tinggi pada periode ini akibat dari sintesis asam amino secara langsung. Kandungan DNA dan RNA meningkat pada masa pembelahan sel di awal pertumbuhan embrio dan endosperma dan menurun pada masa ekspansi sel.

### 9.2.3 Pemasakan Biji

Fase pemasakan biji terbagi menjadi dua, yaitu pemasakan awal (*early maturation/reverse accumulation*) dan pemasakan akhir (*late maturation/maturation drying*). Proses pemasakan biji ini dapat dilihat pada. Hormon yang paling penting dalam proses pemasakan biji adalah asam absisat (ABA). ABA berperan penting dalam proses di awal dan pertengahan pemasakan. Pemasakan biji ditandai dengan meningkatnya ABA dalam biji. ABA menginduksi ekspresi gen *cyclin-dependent kinase inhibitor* (ICK1) yang menyebabkan berhentinya siklus sel. Parameter yang dapat digunakan untuk mengevaluasi status kemasakan biji adalah kadar air biji, ukuran biji, perkecambahan, akumulasi bahan kering, dan vigor biji (Sripathy and Groot, 2023).

Kadar air biji pada saat fertilisasi adalah sekitar 80% baik pada tumbuhan monokotil maupun dikotil (Bareke, 2018). Kadar air biji ini kemudian menurun selama periode pemasakan meskipun cukup tinggi, mengingat air merupakan media yang digunakan untuk mentransfer nutrisi dari tumbuhan induk ke biji. Pada

pemasakan awal (*early maturation/reverse accumulation*), penurunan kadar air terjadi secara perlahan hingga biji meraih bobot kering maksimum yaitu sekitar 35 – 55%. Penurunan kadar air tersebut terjadi pada biji ortodoks pada tumbuhan monokotil dan dikotil yang memiliki buah kering. Penurunan kadar air kemudian berlanjut hingga mencapai equilibrium higroskopis dan bervariasi tergantung pada kelembaban relatif (*late maturation/maturation drying*). Penurunan kadar air membuat biji ortodoks bersifat toleran terhadap desikasi. Desikasi toleran adalah kemampuan biji yang mampu bertahan dan terhidrasi kembali tanpa mengalami kerusakan setelah terjadi penurunan kadar air ekstrem (5 – 10%) (Sripathy and Groot, 2023). Toleransi terhadap desikasi didapatkan biji melalui akumulasi molekul dan protein yang dapat mempertahankan integritas struktural organel sel, membran, dan protein sehingga dapat bertahan pada saat dikeringkan dan aktif kembali saat terhidrasi. Molekul dan protein tersebut adalah antioksidan (askorbat, glutathion, polyol, tocoferol, quinon, flavonoid, dan fenolik), oligosakarida (rafinosa dan stachyosa), protein *late embryogenesis abundant* (LEA), dan *heat shock protein* (HSP). Hal yang berbeda terjadi pada biji rekalsitran. Biji rekalsitran tidak mengalami proses penurunan kadar air ekstrim atau proses *maturation drying* sehingga kadar airnya tetap tinggi pada saat akhir pemasakan yaitu sekitar 60% (Bareke, 2018). Oleh karena itu, biji rekalsitran sensitif terhadap desikasi dan desikasi menyebabkan kerusakan biji dan hilangnya viabilitas biji.

Ukuran biji yang semakin membesar merupakan hasil akhir dari proses pembelahan dan ekspansi sel. Ukuran biji akan menjadi maksimal di akhir fase awal pemasakan (*reverse accumulation*). Hal ini selaras juga dengan kenaikan bobot biji akibat akumulasi penyerapan nutrisi dan air. Pada awalnya pengisian biji berjalan dengan perlahan karena bersamaan dengan proses pembelahan dan ekspansi sel. Setelah proses pembelahan dan ekspansi sel selesai, proses pengisian biji berjalan dengan cepat hingga biji mencapai bobot kering maksimum.

Biji pada beberapa jenis tumbuhan dapat berkecambah beberapa hari setelah fertilisasi. Perkecambahan pada tahap ini hanya merupakan munculnya radikula yang tidak disertai dengan

pembentukan kecambah normal karena diferensiasi jaringan dan akumulasi cadangan makanan masih berlangsung pada tahap ini. Oleh karena itu, pada perkecambahan ini, tidak akan didapatkan kecambah yang memiliki daya vigor yang baik. Perkecambahan dan vigor yang tinggi atau mencapai maksimum didapatkan pada saat biji telah hampir atau mencapai bobot kering maksimum.

Berdasarkan semua parameter di atas, dapat disimpulkan adanya dua terminologi pemasakan biji, yaitu masak fisiologis (*physiological maturity*) dan masak panen (*harvest maturity*) (Sripathy and Groot, 2023). Masak fisiologis adalah tahap perkembangan biji di akhir masa pengisian biji sehingga didapatkan bobot kering biji maksimum (Ellis, 2019). Biji yang telah masak fisiologis merupakan biji dengan kualitas terbaik sehingga memiliki viabilitas dan vigor yang tinggi. Masak panen yaitu tahap pemasakan biji saat biji siap untuk dipanen. *Maturation drying* merupakan fase akhir dari masak panen. Kadar air biji pada masak panen lebih rendah dari pada biji yang telah masak fisiologis. Masak panen biasanya digunakan untuk memanen tumbuhan budidaya yang memiliki biji ortodoks.

#### 9.2.4 Faktor Lingkungan yang Mempengaruhi Perkembangan Biji

Faktor lingkungan yang berpengaruh terhadap perkembangan biji adalah kesuburan tanah, air, suhu, cahaya, dan posisi biji pada tumbuhan (Bareke, 2018).

**Kesuburan tanah.** Kesuburan tanah berpengaruh pada ukuran benih terutama pada fase pengisian biji yang berhubungan dengan peningkatan kebutuhan nutrisi di dalam tanah. Unsur hara yang paling berpengaruh pada ukuran biji adalah nitrogen. Selain berpengaruh terhadap ukuran biji, nitrogen juga berpengaruh terhadap perkecambahan dan vigoritas biji (Copeland and McDonald, 2001).

**Air.** Air memiliki efek yang besar terhadap metabolisme dan perkembangan biji. Kekurangan air akan menyebabkan berkurangnya luas daun, kecepatan fotosintesis, dan efek lainnya yang menyebabkan rontoknya bunga dan efek negatif yang berpengaruh pada produksi dan translokasi asimilat ke biji yang



sedang berkembang. Biji akan menjadi kecil jika kekurangan air terjadi saat fase pengisian biji. Pengurangan jumlah biji akan terjadi jika kekurangan terjadi saat fase pembungaan.

**Suhu.** Suhu yang tepat juga dibutuhkan pada tahap perkembangan biji. Suhu yang tinggi menyebabkan biji berukuran kecil dan dapat menyebabkan terjadinya *forced maturation* pada beberapa tumbuhan. *Forced maturation* dapat menyebabkan biji berwarna hijau yang merupakan kondisi abnormal. Biji hijau memiliki viabilitas dan vigor yang rendah. Suhu yang rendah akan menyebabkan pertumbuhan biji terhambat. Suhu rendah juga berpengaruh buruk terhadap perkecambahan dan vigor biji.

**Cahaya.** Penyinaran cahaya yang terdistribusi secara musiman merupakan faktor yang utama dalam perkembangan tumbuhan. Secara umum, pengurangan cahaya pada tumbuhan induk menyebabkan terbentuk biji yang lebih kecil.

**Posisi biji.** Posisi biji pada tumbuhan berpengaruh pada proses perkembangan biji. Contoh, bulir padi yang berada di bagian distal memiliki pertumbuhan yang lebih lambat dan periode pengisian yang lebih pendek dibandingkan bulir padi yang berada di proksimal. Biji jagung yang berada di ujung tongkol lebih kecil dibandingkan dengan biji yang di bawahnya. Hal tersebut disebabkan adanya transfer asimilat yang tidak merata.

### 9.3 Dormansi dan Perkecambahan Biji

Perkecambahan dan dormansi adalah tahapan fisiologi biji penting yang menentukan keberhasilan tumbuhnya suatu tumbuhan (Nautiyal *et al.*, 2023). Kedua proses tersebut memiliki regulasi yang bertolak belakang, baik berdasarkan sifat genetiknya maupun berdasarkan faktor lingkungan yang mempengaruhinya. Dormansi menghalangi biji untuk berkecambah dengan menghasilkan mekanisme yang stabil agar tumbuhan mampu bertahan saat berhadapan dengan lingkungan yang kurang baik. Pada saat lingkungan sesuai dengan kondisi yang dibutuhkan dalam berkecambah, biji mampu menghidrasi dirinya sendiri sehingga mampu berkecambah dan memproduksi kecambah yang vigor. Pada akhirnya, akhirnya biji tersebut kemudian menghasilkan tumbuhan yang sehat. Faktor lingkungan yang berpengaruh

terhadap dormansi dan perkecambahan biji adalah cahaya, suhu, dan status air sedangkan hormon yang berpengaruh adalah hormon pertumbuhan yaitu asam absisat (ABA), asam giberelat (GA), dan etilen.

Gambar 21.3.1 menunjukkan bahwa terdapat beberapa gen dan hormon yang saling berkaitan mengatur terjadinya dormansi dan perkecambahan (Carrera-Castaño *et al.*, 2020). DOG1 meningkatkan sensitivitas ABA melalui sequestrasi PP2C (AHG1/3) dan secara genetik berinteraksi dengan gen ABI3 untuk memastikan sinyalnya selama proses pemasakan biji dan dormansi biji. Ekspresi gen DOG1 mengatur sinyal etilen (ETH) melalui lintasan ETR1/EFR12 dan memberikan hasil berupa dormansi melalui pengendalian dua antagonistik miRNA. Hormon lainnya seperti auksin (AUX) dengan lintasan ARF10/16 dan karrikin (KR) memiliki peran dalam dormansi dengan mengubah kandungan ABA atau pensinyalannya. ABI5 memiliki peranan kunci dalam pensinyalan ABA untuk menekan perkecambahan. Ekspresi gen *ABI5* meningkat di bawah kondisi yang kurang baik untuk perkecambahan dengan faktor transkripsi (TF, ABA-related TF atau NF-YC3/3/4/9). Timbal balik negatif dari RAV1 dan WRKY18/40/40 atau kondisi yang memicu perkecambahan menetralkan peningkatan ekspresi tersebut. Hal yang sama juga terjadi pada lintasan pensinyalan hormon lainnya (GA, brassinosteroid (BR), sitokinin (CK)) mengganggu dengan transkripsi yang berhubungan dengan ABI5 atau menciptakan kestabilan melalui protein regulatori (DELLA, ICE1, BES1, BIN2 atau ARR4/5/6).



Carrera-Castaño *et al.* (2020) memaparkan juga bahwa terdapat beberapa faktor lingkungan yang mengatur jalannya dormansi dan perkecambahan (Gambar 21.3.1). PIL5 menekan perkecambahan bila tidak ada cahaya. Penekanan tersebut meningkatkan keseimbangan ABA/GA yang sebagiannya ditingkatkan secara langsung oleh transkripsi gen *SOM*, *DELLA* (*RGA/RGA1*), dan *DAG1*. ABI3/5 dan DELLA juga berpartisipasi dalam meningkatkan transkripsi gen *SOM*. PIL5 dihambat dengan mekanisme yang dimediasi oleh fitokrom (PhyB) pada saat ada cahaya yaitu dengan meningkatkan degradasi dan mengurangi transkripsi dalam merespon tingkat nutrisi (NO) yang tinggi serta mengurangi fungsinya melalui interaksi kompetitif dengan HFR1. NO juga memiliki pengaruh pada stabilitas ERFVII, yaitu memediasi degradasinya sehingga mengurangi ekspresi *ABI5*. Selain itu, aktivasi Phy juga mengurangi ekspresi *DELLA* (*RGL2*) dan meningkatkan degradasinya dengan mengurangi ekspresi gen *circadian* (*RVE1/2*). DOG1 mengintegrasikan sinyal suhu untuk mengaktifkan dormansi pada biji segar yang baru dipanen. Pada biji kering, SPT menekan perkecambahan dengan ketiadaan suhu rendah. SPT mengaktifkan *ABI5* dan menekan ekspresi *MFT*. *MFT* menginduksi dormansi pada biji segar tetapi memicu perkecambahan pada biji AR dan hal tersebut merupakan titik konvergensi antara regulasi PIL5 dan SPT. Adanya patogen memicu ekspresi *ABI5* DELLA-dependet dan GA-independent untuk memblok perkecambahan sebagai antisipasi potensi rusaknya kecambah. Kekeringan dan salinitas menstimulasi biosintesis ABA dan menginduksi ekspresi *ABI5*, sebagai respon yang dimediasi HY5, RSM1 dan AGL21 dan ditekan oleh BBX21.

### 9.3.1 Dormansi

Dormansi merupakan proses fisiologis tumbuhan yang salah satunya hasil dari respon biji terhadap lingkungan. Beberapa pakar mendefinisikan dormansi biji berbeda. Long *et al.* (2015) dan Sano *et al.* (2020) menyatakan bahwa dormansi biji adalah karakteristik fisik atau fisiologis dari biji yang mencegah biji berkecambah ketika kondisi lingkungan tidak mendukung. Bareke (2018) menyatakan hal lain, dormansi biji adalah kondisi dimana biji masak dan viabel

tidak berkecambah meskipun sudah berada pada kondisi yang baik untuk berkecambah. Dari kedua definisi tersebut, dapat diasumsikan bahwa biji dorman tidak dapat berkecambah karena masih kurang memadainya atau memiliki blok penyerta yang perlu dihilangkan agar perkecambahan dapat diinisiasi (Nautiyal *et al.*, 2023). Selain itu, dormansi adalah mekanisme yang dapat mengelola perkecambahan dapat terjadi pada waktu dan tempat yang optimum serta memiliki perbedaan ekologis yang jelas (Nautiyal *et al.*, 2023) sehingga *deep dormancy* mencegah biji berkecambah sebelum dipanen (*field emergence*) dan *low dormancy* menyebabkan biji berkecambah (El-Maarouf-bouteau, 2022). Dormansi terjadi di akhir masa pembentukan dan perkembangan biji, dan akan selesai hingga beberapa minggu sampai beberapa tahun, yang disebut juga dengan istilah *after-ripening* (setelah pemasakan).

Baskin and Baskin (2004) membagi tipe dormansi menjadi lima, yaitu dormansi fisik, dormansi fisiologis, dormansi morfologi, dormansi morfofisiologi, dan dormansi kombinasi. Dormansi fisik disebabkan karena adanya penghalang fisik yang menyebabkan imbibisi tidak dapat masuk ke dalam biji. Hal tersebut disebabkan oleh impermeabilitas kulit buah maupun biji yang tersusun oleh sel palisade. Dormansi fisik dapat dipatahkan dengan membiarkan biji di ruangan terbuka atau dengan memberikan perlakuan mekanis maupun kimia yang dapat membantu masuknya air ke dalam biji. Metode tersebut efektif pada biji dengan *non-deep dormancy* saja. Dormansi fisiologis terjadi akibat dari keseimbangan hormon endogen, dimana ABA berperan sebagai penghambat dan GA sebagai pemicu. Kedua hormon tersebut secara simultan dan antagonis mengatur keberlangsungan dormansi biji. Dormansi morfologi terjadi saat embrio tidak berkembang secara penuh saat biji tersebar dan memerlukan waktu untuk tumbuh. Embrio pada dormansi morfologi tidak membutuhkan perlakuan pematangan dormansi dan hanya membutuhkan waktu agar embrio dapat berkembang sepenuhnya sehingga dapat berkecambah. Dormansi morfofisiologi terjadi saat embrio belum berkembang sempurna dan ketidakseimbangan hormon di dalam biji. Dormansi kombinasi

terjadi akibat adanya dormansi fisik dan dormansi fisiologi yang terjadi pada biji.

Berbeda halnya dengan Baskin and Baskin (2004), Bareke (2018) membagi dormansi menjadi tiga tipe, yaitu dormansi quiescent, struktural, dan fisiologi. Biji dengan dormansi quiescent memiliki kemampuan yang unik untuk berubah ke status dorman di bawah kondisi yang stres. Dormansi quiescent ini biasanya terjadi pada tumbuhan liar yang menggantungkan hidupnya pada alam untuk bertahan hidup. Dormansi struktural yang dimaksud oleh Bareke (2018) sama dengan dormansi fisik pada Baskin and Baskin (2004). Dormansi fisiologis pada Bareke (2018) didefinisikan sebagai dormansi embrio yang membutuhkan perlakuan khusus agar pertumbuhannya teraktivasi. Suhu dingin dengan suhu 1 – 7 °C dibutuhkan untuk mematahkan dormansi ini. Selain itu, kualitas cahaya juga dapat digunakan untuk memecahkan dormansi pada embrio, misal pada biji selada. Cahaya merah (660 nm) dapat menginduksi perkecambahan, sedangkan cahaya merah jauh (730 nm) menghambat perkecambahan (Wardani and Latifah, 2016).

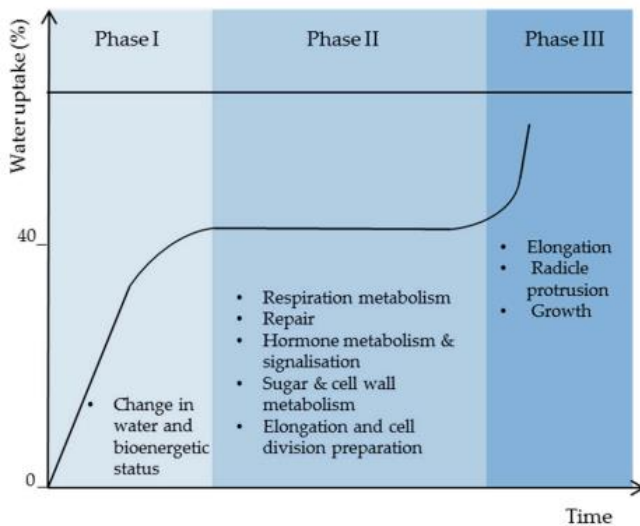
Dari berbagai tipe dan jenis dormansi di atas, maka dormansi dapat dipatahkan melalui dua cara, yaitu secara alami misalnya aktivitas pencernaan hewan, kebakaran hutan, hujan, dan sebagainya, serta secara buatan dengan skarifikasi, stratifikasi, menghilangkan senyawa penghambat dengan merendamnya ke dalam air, dan memberikan senyawa kimia. Skarifikasi adalah metode pematangan dormansi yang paling umum dilakukan, yaitu dengan membuat luka pada kulit biji sehingga air dapat masuk ke dalam biji dan menghidrasi embrio. Skarifikasi dapat dilakukan dengan perlakuan mekanis maupun kimia. Perlakuan mekanis dapat dilakukan dengan menggunakan suhu panas ( $\pm 50$  °C) ataupun dengan melukai kulit biji langsung dengan menggunakan alat seperti pisau, gunting, atau alat lainnya. Senyawa kimia yang biasa digunakan untuk skarifikasi yaitu (95%)  $\text{H}_2\text{SO}_4$  100 ml/kg dan NaOH (20%) selama 2 – 3 menit yang diikuti pencucian di bawah air mengalir untuk menghilang asam dan alkali yang digunakan. Stratifikasi dilakukan pada biji-biji yang memiliki dormansi morfofisiologi yaitu dengan memberikan perlakuan  $\text{GA}_3$  maupun

suhu dingin (3 – 5 °C). Senyawa kimia yang biasa digunakan untuk mematahkan dormansi ada GA<sub>3</sub>, KNO<sub>3</sub>, dan thiourea.

### 9.3.2 Perkecambahan

Perkecambahan sering didefinisikan sebagai pertumbuhan dari bagian embrio (biasanya radikula) yang mempenetrasi struktur yang mengelilinginya seperti kulit biji (Sano *et al.*, 2020). Perkecambahan bergantung pada status fisiologi dari biji (dormansi), yang sebagiannya disebabkan oleh interaksi antara genotipe tumbuhan dengan faktor lingkungan (suhu, kelembaban tanah, cahaya, dan ketersediaan nutrisi) (Long *et al.*, 2015; Bareke, 2018; Carrera-Castaño *et al.*, 2020). Interaksi genotipe dan faktor lingkungan dijelaskan secara rinci pada Gambar 9.5.

Perkecambahan biji terbagi menjadi tiga fase yaitu, imbibisi air, reaktivasi metabolisme, dan protrusi radikula (Ali and Elozeiri, 2017). Secara umum, fase yang paling kritis adalah fase kedua karena terjadi proses fisiologis dan biokimia yang penting seperti hidrolisis, biosintesis makromolekul, respirasi, struktur subseluler, dan pemanjangan sel sebagai proses inisiasi perkecambahan. Pada biji sereal, imbibisi air menstimulasi embrio untuk memproduksi fitohormon (GA), yang kemudian didifusikan ke lapisan aleuron dan menginisiasi lintasan pensinyalan untuk mensintesis enzim  $\alpha$ -amilase dan enzim hidrolitik lainnya. Enzim hidrolitik tersebut kemudian disekresikan ke endosperma dan menghidrolisis cadangan makanan. Cadangan makanan ini kemudian digunakan untuk mensintesis protein yang dibutuhkan dalam protrusi radikula.



**Gambar 9.5.** Tiga karakteristik fase imbibisi biji dan proses biologis yang terjadi  
(Sumber : El-Maarouf-bouteau, 2022)

Daya imbibisi air pada biji terbagi menjadi tiga fase (Gambar 9.5) (El-Maarouf-bouteau, 2022) sesuai dengan fase perkecambahan biji. Fase 1 merupakan fase penyerapan air yang cepat yang menginduksi transformasi membran sel dari fase gel ke fase kristal cair (*liquid crystal*) dan reorganisasi struktur dan molekul sel yang dibutuhkan pada fase kedua. Pada fase kedua terjadi proses metabolisme sel yang tinggi dan ditandai dengan berhentinya penyerapan air pada biji sehingga kandungan air dalam biji menjadi konstan (*plateau phase*). Aktivitas metabolisme yang terjadi yaitu respirasi, pembentukan hormon, pembentukan gula, metabolisme dinding sel, dan pergantian protein untuk memperbaiki dan persiapan untuk pemanjangan sel dan pertumbuhan. Pada fase ketiga, penyerapan air terjadi secara cepat kembali untuk memastikan mobilisasi cadangan nutrisi dan metabolisme untuk pemanjangan akar dan pertumbuhan.

## 9.4 Umur Simpan Biji dan Deteriosasi

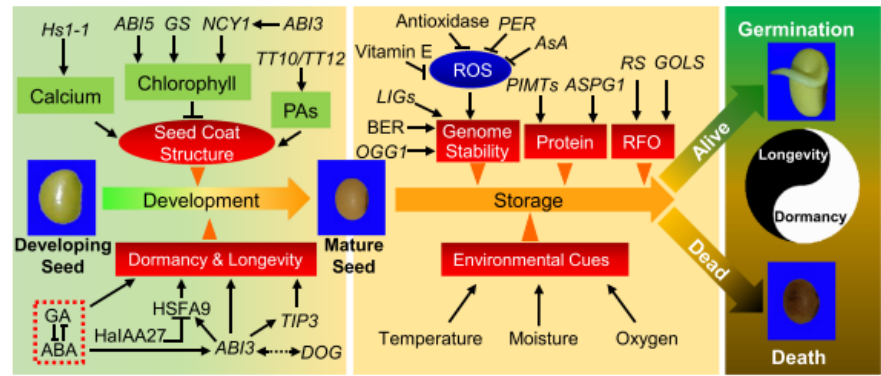
Biji sebagai makhluk hidup juga mengalami pemunduran (deteriosasi) yang secara bertahap akan kehilangan vigor dan



viabilitas kemudian mati (Ranganathan and Groot, 2023). Kemampuan biji untuk mempertahankan vigor dan viabilitasnya (*longevity*) merupakan gabungan beberapa proses fisiologis yaitu mobilisasi seluler, senyawa protektif internal, dan kemampuan sel untuk bertahan dan memperbaiki kerusakan (Long *et al.*, 2015). Umur simpan biji ini tidak hanya penting untuk aspek ekonomi tetapi dan agronomi yang berhubungan penyimpanan, tetapi juga untuk pengelolaan biodiversitas (Zhou *et al.*, 2020; El-Maarouf-bouteau, 2022). Secara umum, faktor yang mempengaruhi umur simpan biji dan deteriosasi dan faktor internal biji dan faktor eksternal (lingkungan) (Gambar 9.6).

9.4.1 Faktor Internal

Faktor internal yang mempengaruhi umur simpan biji adalah senyawa kimia protektif dan struktur kulit biji (Zhou *et al.*, 2020; Ranganathan and Groot, 2023). Faktor internal ini berperan dalam produksi dan eliminasi *reactive oxygen species* (ROS), sintesis protein, sintesis hormon, serta mekanisme perbaikan asam nukleat/protein. (Gambar 9.6).



**Gambar 9.6.** Interaksi faktor internal dan eksternal yang mempengaruhi umur simpan biji dan deteriosasi (Sumber : Zhou *et al.*, 2020)

**Produksi dan eliminasi ROS.** ROS merupakan regulator perkecambahan biji dan juga berpengaruh terhadap umur simpan biji. ROS memiliki pengaruh yang bertolak belakang pada kedua

proses tersebut (Zhou *et al.*, 2020). ROS memiliki korelasi positif terhadap proses imbibisi air dan ROS juga dapat mematahkan dormansi dengan menginduksi katabolisme dan meningkatkan biosintesis GA. Konsentrasi ROS yang tinggi pada biji menyebabkan umur simpan biji menjadi pendek karena ROS menyebabkan kerusakan oksidatif pada sel biji, termasuk protein, DNA, RNA, lipid pada sel membran, sehingga mengurangi integritas sel.

Umur simpan biji dapat diperpanjang dengan mengeliminasi akumulasi ROS. Eliminasi ROS (*ROS scavenging*) dapat dilakukan melalui dua lintasan yaitu lintasan enzim (antioksidase-) dan non-enzim (antioksidan) (Zhou *et al.*, 2020; Ranganathan and Groot, 2023). Enzim yang terlibat dalam eliminasi ROS adalah katalase, peroksidase, sitokrom oksidase, dan superoksida dismutase. Enzim-enzim tersebut akan berkurang seiring dengan lamanya biji disimpan. Antioksidan yang terlibat dalam eliminasi ROS adalah asam askorbat (AsA), vitamin E, glutathione (GSH), dan antioksidan lainnya.

1. **Sintesis protein.** Protein LEA dan HSP berperan dalam memperpanjang umur simpan biji dengan menstabilkan sitoplasma dalam status *glassy*, melindungi protein struktural, kondensasi kromatin dan pemecahan tilakoid pada kloroplas.
2. **Sintesis hormon.** Hormon yang berperan penting dalam umur simpan biji adalah ABA, auksin, dan GA (Ranganathan and Groot, 2023). ABA dan auksin merupakan hormon yang berperan positif pada umur simpan biji, sedangkan GA berperan negatif terhadap umur simpan biji. Selain itu, brassinosteroid (BR) juga berperan positif terhadap umur simpan biji.
3. **Mekanisme perbaikan asam nukleat, protein, dan peptida.** Biji mengalami pemunduran saat disimpan karena asam nukleat, protein, dan peptida dalam biji mengalami kerusakan. Makromolekul tersebut berperan sangat penting dalam tahap awal perkecambahan dan berkorelasi positif dengan umur simpan biji (Zhou *et al.*, 2020).

Umur simpan biji biji berkurang akibat asam nukleat mengalami proses degradasi dan hilangnya integritas (Zhou *et al.*, 2020). RNA lebih rentan terhadap kerusakan oksidatif dibandingkan DNA dalam merespon sinyal lingkungan. Hal tersebut karena RNA terdiri satu utas saja. Kerusakan pada RNA ini pada akhirnya akan mempengaruhi transkripsi dan translasi gen sehingga protein yang terbentuk akan berubah dan biji akan memiliki vigor yang rendah. Kerusakan dua utas DNA dibandingkan dengan kerusakan RNA lebih berbahaya karena menyebabkan hilangnya region kromosomal yang lebar dan membatasi perkecambahan biji (Zhou *et al.*, 2020). Mekanisme perbaikan kerusakan ini memerlukan enzim DNA ligase sehingga umur masa simpan biji akan terjaga. Salah satu penyebab utama kerusakan dua utas DNA adalah ROS dengan mendestruksi atau memodifikasi unit deoksiribosa.

Protein dan peptida merupakan makromolukel penting yang mendasari fungsi dasar seluler dan terbukti berpengaruh terhadap kemunduran biji di alam. Salah satu kerusakan protein pada biji adalah munculnya asam amino abnormal. Enzim PROTEIN L-ISOASPARTYL METHYLTRANSFERASE (PIMT) adalah enzim yang biasanya terlibat dalam mekanisme perbaikan protein. Enzim tersebut mengkatalis konversi *L-isoaspartyl* abnormal ke bentuk normalnya. Tipe kerusakan protein lainnya adalah oksidasi metionin. Kerusakan tersebut dapat diperbaiki melalui aktivitas *methionine sulfoxide reductase* (MSR).

**Struktur kulit biji.** Kulit biji merupakan jaringan maternal yang mengelilingi embrio dan jaringan bernutrisi (Ranganathan and Groot, 2023). Kulit biji ini membentuk perlindungan secara fisik dan kimia pada biji (Zhou *et al.*, 2020). Secara fisik, kulit biji menghambat deteriorasi dengan mencegah serangan cendawan dan bakteri. Selain itu, kulit biji yang mengandung konsentrasi hemiselulosa yang tinggi, biasanya xylan, memiliki impermeabilitas yang tinggi pula sehingga mampu memperpanjang umur simpan biji. Kandungan kalsium yang tinggi pada kulit biji juga dapat meningkatkan umur simpan biji.

Secara kimia, kulit biji mengandung beberapa senyawa metabolit sekunder seperti antosianin, isoflavon, dan polifenol

(flavonoid, lignin, dan lignan) (Zhou *et al.*, 2020; Ranganathan and Groot, 2023). Metabolit sekunder ini melindungi biji dari radiasi sinar ultraviolet dan serangan patogen. Flavonoid melindungi biji dari deteriosasi dan mengelola umur simpan biji dengan mengeliminasi ROS. Selain metabolit sekunder, pada kulit biji juga terdapat klorofil yang juga mengatur umur simpan biji (Zhou *et al.*, 2020). Konsentrasi klorofil berkorelasi negatif dengan umur simpan biji.

#### 9.4.2 Faktor Eksternal

Faktor eksternal yang mempengaruhi umur simpan biji dalam penyimpanan adalah suhu udara, kelembaban udara relatif, dan oksigen (Zhou *et al.*, 2020; Ranganathan and Groot, 2023) (Gambar 9.6). Selain itu, kondisi lingkungan pada saat pembentukan dan pemasakan biji juga mengatur umur simpan biji (Zhou *et al.*, 2020).

1. **Suhu udara.** Proses deteriosasi biji melambat pada saat suhu udara dan kelembaban relatif rendah, sedangkan pada suhu udara dan kelembaban tinggi menyebabkan proses deteriosasi akan lebih cepat akibat terjadinya proses oksidasi protein (Zhou *et al.*, 2020). Hal ini menyebabkan bank biji direkomendasikan menyimpan biji pada suhu dibawah 0 °C (Ranganathan and Groot, 2023). Akan tetapi, penyimpanan seperti ini hanya dapat dilakukan pada biji ortodoks saja.
2. **Kadar air.** Pada biji ortodoks, hal yang paling menentukan umur simpan biji adalah air karena penting untuk reaksi kimia dan enzimatik dalam biji (Ranganathan and Groot, 2023). Oksidasi lipid, protein, dan asam nukleat pada biji distimulasi oleh kadar air, oksigen, dan suhu. Pada lipofilik deteriosasi terjadi akibat dari oksidasi asam lemak tidak jenuh di dalam bagian yang berminyak dan membran. Pada bagian hidrofilik, deteriosasi terjadi akibat dari oksidasi protein, DNA, RNA, dan ikatan silang makromolekul. Pada biji ortodoks, semakin rendah kadar air biji semakin tinggi umur simpannya. Harrington (1972) dalam McDonald (2007) menyatakan bahwa umur simpan biji ortodoks akan

- menjadi dua kali lipat saat kadar airnya diturunkan 1%. Kadar air biji ortodoks dalam penyimpanan yaitu 5 - 14%.
3. **Oksigen.** Biji dalam masa simpannya tidak membutuhkan oksigen karena berada dalam kondisi kering sehingga metabolismenya tidak aktif (Ranganathan and Groot, 2023). Pada kondisi tersebut, oksigen molekuler merupakan sumber utama ROS. Biji kaya akan ion seperti  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Zn}^{2+}$  yang dibutuhkan untuk perkecambahan sebagai kofaktor enzim dalam respirasi dan fotosintesis. Interaksi antara ion-ion tersebut dengan oksigen molekuler akan membentuk ROS. ROS akan menyebabkan terjadinya oksidasi sehingga umur simpan biji menjadi pendek.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A.S. and Elozeiri, A.A. (2017) 'Metabolic Processes During Seed Germination', in *Advances in Seed Biology*, pp. 141–166. Available at: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.70653>.
- Bareke, T. (2018) 'Biology of seed development and germination physiology', *Advances in Plants & Agriculture Research*, 8(4). Available at: <https://doi.org/10.15406/apar.2018.08.00336>.
- Baskin, J.M. and Baskin, C.C. (2004) 'A classification system for seed dormancy', *Seed Science Research*, 14(1), pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.1079/ssr2003150>.
- Carrera-Castaño, G. *et al.* (2020) 'An updated overview on the regulation of seed germination', *Plants*, 9(6), pp. 1–42. Available at: <https://doi.org/10.3390/plants9060703>.
- Copeland, L.O. and McDonald, M.B. (2001) *Principles of Seed Science and Technology*.
- El-Maarouf-bouteau, H. (2022) 'The Seed and the Metabolism Regulation', *Biology*, 11(2). Available at: <https://doi.org/10.3390/biology11020168>.
- Ellis, R.H. (2019) 'Temporal patterns of seed quality development, decline, and timing of maximum quality during seed development and maturation', *Seed Science Research*, 29(2), pp. 135–142. Available at: <https://doi.org/10.1017/S0960258519000102>.
- Wardani, F.F. and Latifah, D. (2016) 'Perkecambahan Biji Dictyoneura acuminata Blume. pada Cahaya Merah dan Merah Jauh', *Jurnal Hortikultura Indonesia*, 7(1), p. 49. Available at: <https://doi.org/10.29244/jhi.7.1.49-55>.
- Long, R.L. *et al.* (2015) 'The ecophysiology of seed persistence: A mechanistic view of the journey to germination or demise', *Biological Reviews*, 90(1), pp. 31–59. Available at: <https://doi.org/10.1111/brv.12095>.
- McDonald, M.B. (2007) 'Seed Moisture and the Equilibrium Seed Moisture Content Curve Published by: Association of Official Seed Analysts and the Society of Commercial Seed

Technologists ( SCST ) Stable URL :  
<https://www.jstor.org/stable/23433589> REFERENCES  
 Linked references ar', 29(1), pp. 7–18.

- Nautiyal, P.C., Sivasubramaniam, K. and Dadlani, M. (2023) 'Seed Dormancy and Regulation of Germination', *Seed Science and Technology: Biology, Production, Quality*, pp. 39–66. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5_3).
- Pujiwati, I. (2019) 'Pengantar Fisiologi Tumbuhan', *Intimedia*, p. 13 hal.
- Ranganathan, U. and Groot, S.P.C. (2023) 'Seed Longevity and Deterioration', *Seed Science and Technology: Biology, Production, Quality*, pp. 91–108. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5_5).
- Sano, N., Rajjou, L. and North, H.M. (2020) 'Lost in translation: Physiological roles of stored mRNAs in seed germination', *Plants*, 9(3). Available at: <https://doi.org/10.3390/plants9030347>.
- Sliwinska, E. and Bewley, J.D. (2014) 'Overview of seed development, anatomy and morphology.', in *Seeds: the ecology of regeneration in plant communities*, pp. 1–17. Available at: <https://doi.org/10.1079/9781780641836.0001>.
- Sripathy, K. V. and Groot, S.P.C. (2023) 'Seed Development and Maturation', in *Seed Science and Technology: Biology, Production, Quality*, pp. 17–38. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5_2).
- Zhou, W. *et al.* (2020) 'A matter of life and death: Molecular, physiological, and environmental regulation of seed longevity', *Plant Cell and Environment*, 43(2), pp. 293–302. Available at: <https://doi.org/10.1111/pce.13666>.





## BIODATA PENULIS



### **Irfan Martiansyah, M.Si**

Periset di Pusat Riset Botani Terapan - 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. Saat ini penulis bekerja sebagai periset di Pusat Riset Botani Terapan, 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, Biologi Lingkungan, Fisiologi Tumbuhan, Bioteknologi* 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](mailto:magfirah.rasyid91@gmail.com)

## 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**



**Ite Morina Yostianti Thunay, S.Si., M.Si.**

**Dosen Program Studi Biologi**

**Fakultas Pertanian, Sains, dan Kesehatan, Universitas Timor**

Penulis lahir di Retraen, 22 Maret 1989. Penulis menamatkan Program Sarjana pada jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Nusa Cendana Kupang dan tamat pada tahun 2011. Penulis kemudian mengambil Program Magister pada Program Studi Biologi Tumbuhan, Departemen Biologi, Institut Pertanian Bogor pada tahun 2015 melalui Beasiswa Magister Program Afirmasi yang diselenggarakan oleh Lembaga Pengelola Dana Pendidikan Kementerian Keuangan. Penulis kini aktif menjadi Dosen pada Program Studi Biologi, Fakultas Pertanian, Sains, dan Kesehatan, Universitas Timor, serta menjadi tutor tutorial daring pada Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Terbuka.

## BIODATA PENULIS



**Ashari Bagus Setiawan, S.Pd., M.Si.**

Cambridge AS/A Level Biology Teacher for High School  
SMA AL WILDAN 4 ISLAMIC SCHOOL JAKARTA

Penulis lahir pada tanggal 17 Agustus 1992 di Surabaya. Saat ini, beliau bekerja sebagai pengajar tetap Biologi untuk kurikulum Cambridge AS/A Level. Penulis diamanahkan memegang jabatan sebagai Kepala Laboratorium Sains Terpadu di AL WILDAN 4 ISLAMIC SCHOOL Jakarta sejak 2023 hingga saat ini. Pendidikan Sarjana diselesaikan di Universitas Negeri Surabaya pada program studi Pendidikan Biologi, jurusan Biologi. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan magisternya di Departemen Biologi, program studi Biologi Tumbuhan minat Sistematika di IPB University. Buku ini merupakan buku ketujuh dari penulis.

Tahun 2018 hingga 2020, penulis bekerja sebagai Kurator Herbarium di UPT. Laboratorium Terpadu Universitas Trunojoyo Madura. Keahlian penulis di bidang Sistematika Tumbuhan telah dibuktikan dengan beberapa publikasi penelitian dan buku yang tersedia di Google Cendekia ([Ashari Bagus Setiawan](#)). Penulis dapat dihubungi melalui surel di: [asharibagussetiawan@gmail.com](mailto:asharibagussetiawan@gmail.com).

## **BIODATA PENULIS**



### **Saraswati Prabawardani**

Dosen Program Studi Agroteknologi  
Jurusan Budidaya Pertanian  
Fakultas Pertanian Universitas Papua

Penuli lahir di Kebumen 04 Mei 1962. Alamat Perguruan Tinggi: Jalan Gunung Salju Amban Manokwari-Papua Barat 98314. Menyelesaikan S1 bidang Agronomi pada Fakultas Pertanian Universitas Cenderawasih tahun 1986, S2 bidang Agronomi pada University of the Philippines Los Baños tahun 2005, S3 pada bidang Ekofisiologi Tanaman James Cook University, Australia tahun 2008. Ilmu yang ditekuni: Agronomi dan Ekofisiologi Tanaman. Penulis berperan aktif dalam menulis karya ilmiah pada jurnal Nasional terakreditasi dan Internasional terindeks, dalam seminar ilmiah baik Nasional maupun Internasional dan menghasilkan karya ilmiah dalam Prosiding Nasional dan Prosiding Internasional terindeks, jurnal Nasional Pengabdian kepada Masyarakat terakreditasi. Email: danysaraswati@gmail.com; s.prabawardani@unipa.ac.id

## BIODATA PENULIS



**Arinal Haq Izzawati Nurrahma, S.P., M.Si., Ph.D.**

Peneliti di Pusat Riset Tanaman Pangan  
Riset Organisasi Pertanian dan Pangan  
Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Penulis adalah seorang peneliti dengan keahlian dalam fisiologi tanaman di Pusat Riset Tanaman Pangan, Organisasi Riset Pertanian dan Pangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Ia menyelesaikan pendidikan tingkat sarjana (S1) pada tahun 2013 di Departemen Agronomi dan Hortikultura, Institut Pertanian Bogor (IPB University) dengan judul skripsi "Pengaruh Jenis Pupuk dan Dekomposer terhadap Pertumbuhan dan Produksi Padi Organik". Pada tahun 2016, penulis menyelesaikan pendidikan tingkat magister (S2) dari departemen yang sama dengan judul tesis "Adaptation of Rice Varieties (*Oryza sativa* L.) to Submergence Stress". Penulis meraih beasiswa MEXT dari pemerintah Jepang untuk menempuh pendidikan tingkat doktor (S3) di The United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University, dan menyelesaikan pendidikannya pada tahun 2021 dengan judul disertasi "Strategies of Transient Submergence Tolerance Cope with Translocation of Photosynthetic Product in Rice Plant".

## BIODATA PENULIS



### **apt Hendri Satria kamal Uyun M.Farm**

Dosen tetap pada bidang Biologi Farmasi STIFARM Padang

Penulis lahir di Tanjung Pinang tanggal 9 Agustus 1993. Penulis adalah dosen tetap pada bidang Biologi Farmasi STIFARM Padang. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 Farmasi Pada Sekolah Tinggi Farmasi Indonesia Perintis Padang kemudian melanjutkan pendidikan Profesi Apoteker Di Fakultas Farmasi Universitas Andalas dan melanjutkan Pendidikan S2 Di Fakultas Farmasi Universitas Andalas.



## BIODATA PENULIS



### **Fitri Fatma Wardani, S.P., M.Si.**

Peneliti Ahli Muda Pusat Riset Botani Terapan  
Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Penulis lahir di Pati tanggal 14 April 1991. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Hono dan Karyatun. Penulis menikah pada tahun 2016 dengan Nudin Lathief dan dikaruniai seorang putra bernama Denandra Abyan Lathief. Pendidikan S1 diselesaikan penulis pada tahun 2012 di Departemen Proteksi Tanaman, Fakultas Pertanian, IPB. Pada 2019, penulis kemudian menyelesaikan pendidikan S2 pada Program Studi Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman, Fakultas Pertanian, IPB. Pada tahun 2021, penulis meneruskan Pendidikan S3 di program studi yang sama hingga sekarang.

Penulis mulai bekerja pada tahun 2013 sebagai Pendamping Pembangunan Kebun Raya Daerah di Liwa, Lampung Barat, Provinsi Lampung. Pada tahun 2014, penulis diterima sebagai peneliti di Pusat Konservasi Tumbuhan-Kebun Raya Bogor LIPI yang kemudian berintegrasi dan berganti nama menjadi Pusat Riset Botani Terapan BRIN. Bidang kepakaran yang penulis geluti adalah botani yang fokus terhadap ilmu dan fisiologi biji. Penulis juga pernah menulis buku dengan judul “Flora Anemokori” pada tahun 2016 bersama-sama rekan-rekan peneliti biji di Kebun Raya Bogor. Selain buku, penulis juga banyak menghasilkan karya ilmiah

mengenai ilmu dan fisiologi biji di jurnal nasional maupun internasional.