

# Peranan dan Fungsi Air sebagai Penyusun Tubuh Tumbuhan

Dr. Ir. Hamim, M.Si.



## PENDAHULUAN

---

Modul pertama akan menyajikan pengetahuan dasar yang mencakup struktur dan fungsi dasar air bagi tumbuhan, mulai dari tingkat selular hingga jaringan dan tubuh tumbuhan secara utuh. Selain itu juga, dibahas hubungan air dengan unsur dan senyawa-senyawa lain yang mempengaruhi proses-proses fisiologi tumbuhan. Diharapkan setelah membaca modul ini Anda dapat menjelaskan prinsip dasar peran dan fungsi air dalam proses-proses fisiologi pada tingkat sel, tubuh tumbuhan, dan menghubungkannya dengan faktor lingkungan. Dalam modul ini, Anda akan dipandu untuk mengetahui peran penting air bagi tumbuhan, karakteristik, mekanisme penyerapan, dan pergerakannya pada tingkat selular pada seluruh tubuh tumbuhan.

Modul ini terdiri dari dua kegiatan belajar, yaitu:

1. Kegiatan Belajar 1 : membahas tentang peran air sebagai penyusun sel tumbuhan.
2. Kegiatan Belajar 2 : membahas tentang proses penyerapan air pada tumbuhan dan proses transpirasi

Setelah mempelajari modul ini, diharapkan Anda dapat menjelaskan struktur air dan sifat-sifatnya sebagai penyusun sel tumbuhan, pergerakan dan peranan air dalam tubuh tumbuhan, sistem pengaturan air tumbuhan termasuk transpirasi, dan faktor-faktor eksternal yang mempengaruhi keseimbangan air di dalam tumbuhan.

Secara lebih spesifik, setelah mempelajari modul ini Anda diharapkan dapat:

1. menjelaskan struktur dan karakteristik air;
2. menjelaskan sifat fisika dan kimia air sebagai penyusun sel tumbuhan;
3. menjelaskan fungsi air bagi tumbuhan;

4. membandingkan pergerakan air dan linarut dalam sel dan jaringan tumbuhan;
5. menjelaskan konsep dasar tentang potensial air dan metodologi pengukurannya;
6. membedakan beberapa teori dasar pergerakan air dalam tubuh tumbuhan;
7. menjelaskan mekanisme pembukaan dan penutupan stomata;
8. menjelaskan arti penting dari proses transpirasi bagi tumbuhan;
9. menjelaskan faktor-faktor yang mempengaruhi laju transpirasi tumbuhan;
10. menjelaskan metode pengukuran laju transpirasi.

Untuk dapat memahami materi ini dengan baik, Anda harus membaca modul ini dengan cermat. Selanjutnya, Anda harus mengerjakan tugas-tugas dengan baik, termasuk beberapa latihan soal yang diberikan, dengan tidak melihat kembali jawabannya di dalam modul. Jika dalam evaluasi hasil Anda belum memuaskan, seharusnya Anda mengulangi lagi modul ini.

**KEGIATAN BELAJAR 1****Peran Air sebagai Penyusun Sel Tumbuhan**

Air memegang peranan yang sangat penting di dalam sel dan jaringan tumbuhan karena air diperlukan dalam menunjang berbagai proses fisiologi di dalam sel dan jaringan tumbuhan. Tumbuhan menyerap air dalam jumlah besar melalui akar. Namun sebagian besar air tersebut (lebih kurang 97%) akan dilepaskan kembali dalam bentuk uap air melalui transpirasi. Hanya lebih kurang 2% saja yang digunakan dalam proses pertumbuhan serta 1% saja yang terlibat dalam proses metabolisme, seperti fotosintesis, respirasi, dan lainnya. Meskipun demikian, lepasnya air ke udara melalui transpirasi tersebut turut berperan serta menggerakkan berbagai proses yang dibutuhkan tumbuhan.

Sebagai contoh, transpirasi membantu menjaga stabilitas suhu sehingga suhu tubuh tumbuhan tetap berada pada rentang suhu fisiologis. Energi dan panas yang ditimbulkan oleh cahaya matahari dihasilkan dari proses metabolisme untuk penguapan, sehingga suhu tumbuhan tetap bisa dipertahankan. Pada saat transpirasi terjadi dan stomata membuka, maka gas CO<sub>2</sub> akan berdifusi masuk ke dalam sel mesofil. Melalui stomata tersebut tumbuhan dapat melakukan pengikatan karbon dalam proses fotosintesis. Proses transpirasi juga menjadi penggerak bagi penyerapan hara mineral yang dibutuhkan oleh tumbuhan melalui akar, jaringan pembuluh xylem, hingga ke daun. Secara lebih detail proses transpirasi tumbuhan akan dibahas pada Kegiatan Belajar 2.

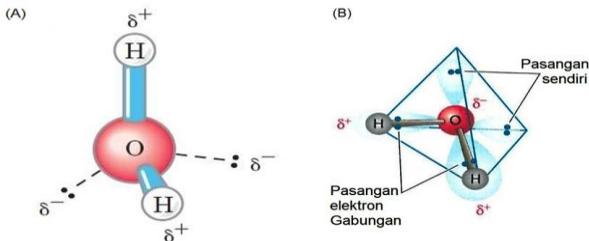
Peran air dalam berbagai proses di dalam tumbuhan tidak terlepas dari karakteristik air yang unik dan khas secara fisik, kimia, maupun fisiologis. Fungsi air secara selular akan diuraikan dalam Kegiatan Belajar 1 ini.

**A. STRUKTUR DAN KARAKTERISTIK AIR SEBAGAI PENYUSUN SEL TUMBUHAN**

Air merupakan molekul sederhana yang terdiri dari dua atom hidrogen (H) dan satu atom oksigen (O). Dua jenis atom ini saling berikatan dengan ikatan kovalen, suatu ikatan di mana kedua jenis atom yang berikatan saling menyumbangkan elektron terluarnya untuk membentuk pasangan, untuk

digunakan secara bersama (Gambar 1.1). Hal ini terjadi karena atom oksigen memiliki jumlah elektron terluar sebanyak 6 buah sehingga ada dua elektron yang bisa membentuk ikatan kovalen dengan atom lain. Karena atom H hanya memiliki 1 elektron maka dua atom hidrogen dapat berikatan dengan 1 atom O membentuk molekul air ( $H_2O$ ) (Gambar 1.1).

Air dipandang sebagai molekul kehidupan dengan karakteristik yang khas dan berbeda dengan molekul lain sejenisnya. Molekul air dengan bentuk ikatan seperti yang telah disebutkan di atas ternyata memiliki karakteristik yang unik. Keunikan ini terutama karena air bersifat polar (berkutub). Sifat polaritas (berkutub) yang dimiliki air maksudnya adalah di bagian tertentu dari molekul air cenderung bermuatan positif dan di bagian lain dari molekul air cenderung bermuatan negatif (Gambar 1.1.A). Hal ini disebabkan oleh keberadaan atom hidrogen yang hanya memiliki satu elektron yang disumbangkan dalam membentuk ikatan dengan oksigen. Akibatnya, elektron dari hidrogen cenderung lebih tertarik ke arah oksigen sehingga bagian lain dari atom hidrogen cenderung lebih bermuatan agak positif Gambar 1.1 dilambangkan dengan  $\delta^+$  positif ( $\delta^+$ ). Sebaliknya, bagian pasangan elektron dari oksigen yang tidak berikatan dengan hidrogen akan cenderung lebih negatif daripada bagian yang berikatan dengan hidrogen (dilambangkan dengan  $\delta^-$ ) sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1.1.A. Adanya kecenderungan lebih muatan positif di bagian yang berikatan dengan H dan muatan negatif di bagian elektron yang tidak berpasangan inilah yang menyebabkan air bersifat polar (Gambar 1.1).

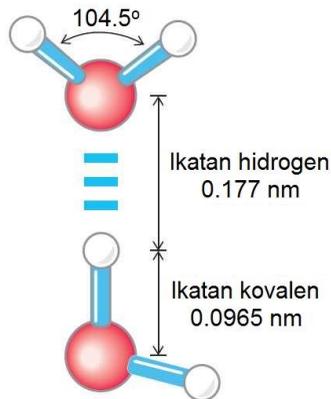


Sumber: Nelson dan Cox, 2004; Taiz dan Zeiger, (2010)

Gambar 1.1

Molekul air. Susunan elektron atom oksigen dan hidrogen dan bentuk ikatan kovalen dari H dan O membentuk molekul air ( $H_2O$ ). Adanya pasangan elektron yang bebas dan pasangan elektron gabungan antara hidrogen dan oksigen menyebabkan molekul air bersifat polar, di mana di bagian oksigen sedikit lebih negatif ( $\delta^-$ ) dan di bagian hidrogen sedikit lebih positif ( $\delta^+$ ) (A) dan menyebabkan molekul air berbentuk, seperti tetrahedron (B).

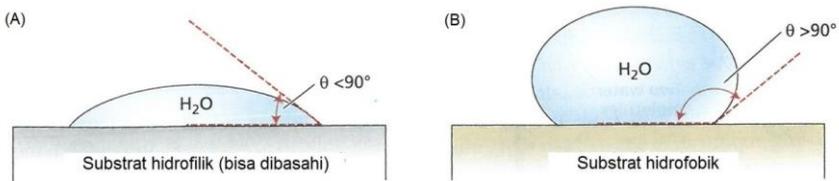
Adanya muatan menyebabkan struktur molekul air tidak membentuk bidang yang lurus antara H-O-H, tetapi hubungan antar atom tersebut membentuk sudut lebih kurang  $104,5^\circ$  (Gambar 1.2). Selain itu, sifat polar dari air menyebabkan terbentuk ikatan yang dikenal dengan ikatan hidrogen antar molekul air. Ikatan hidrogen terjadi antara atom O dari molekul air yang bermuatan agak negatif dengan atom H dari air yang bermuatan agak positif (Gambar 1.2). Ikatan ini memiliki jarak lebih kurang 1,77 angstrom atau 0.177 nano meter (nm), hampir dua kali lebih panjang daripada ikatan kovalen yang memiliki jarak hanya 0,0965 nm. Walaupun ikatan hidrogen ini tidak sekuat ikatan kovalen atau ikatan ion, tetapi cukup menjadikan molekul air memiliki kekuatan untuk saling berikatan antar sesamanya atau yang dikenal dengan istilah kohesi. Selain sifat kohesi, air juga memiliki sifat adhesi, yaitu kemampuan berikatan dengan molekul lain yang bukan sejenis, seperti dinding sel tumbuhan yang terbuat dari karbohidrat. Molekul air dalam bentuk cairan dan padatan (es) terikat dengan ikatan hidrogen, namun uap air merupakan bentuk molekul yang tidak saling berikatan antar sesamanya.



Sumber: Nelson dan Cox, (2004)

Gambar 1.2  
Ikatan Hidrogen yang Terjadi Antarmolekul Air Akibat Sifat Polar yang Dimiliki oleh Molekul Air

Sifat kohesi dari air menyebabkan air memiliki tegangan permukaan yang besar sehingga air cenderung membentuk formasi membulat (bukan menyebar) apabila ditempatkan di atas permukaan yang datar. Hal ini karena molekul air cenderung tertarik dengan sesamanya di bagian dalam massa air daripada molekul lain, seperti ikatan dengan udara atau uap air di sebelah luarnya. Hal inilah yang menyebabkan air memiliki tegangan permukaan, apabila berada di atas bahan yang dapat berikatan dengan air (hidrofilik), maka akan menyebar (ditunjukkan dengan sudut lengkung cairan yang kurang dari  $90^\circ$ ) dan apabila berada di atas bahan yang tidak mudah berikatan dengan air (hidrofobik) akan membentuk butiran (ditunjukkan dengan sudut lengkung cairan yang lebih dari  $90^\circ$ ) (Gambar 1.3).

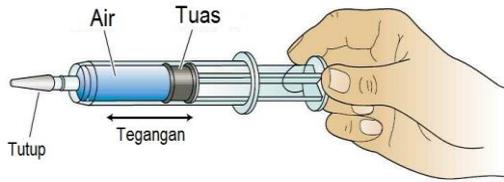


Sumber: Taiz dan Zeiger, (2010)

Gambar 1.3

Tetes air yang ditempatkan di atas bahan yang hidrofilik dan hidrofobik sudut lengkung cairan menunjukkan ikatan dengan benda yang ditempati.

Selain itu, sifat kohesi menyebabkan air juga memiliki kemampuan melawan regangan apabila ditempatkan dalam ruangan yang meregangnya, seperti dalam jarum suntik (Gambar 1.4). Sifat ini penting artinya bagi pergerakan air dalam tumbuhan, mengingat air yang bergerak dari akar hingga mencapai pucuk daun dari pohon yang tinggi akan mengalami tegangan yang sangat besar, sebagaimana akan dibahas pada Kegiatan Belajar 2. Karakteristik air yang demikian itulah yang menjamin keberlangsungan proses transpor air di dalam jaringan tumbuhan.

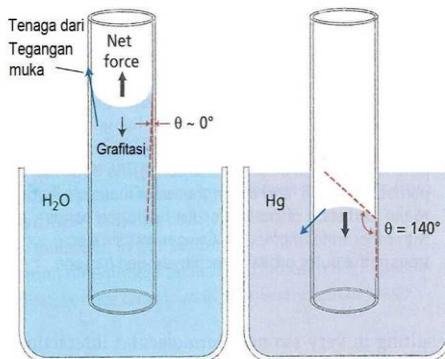


Sumber: Taiz dan Zeiger, (2002)

Gambar 1.4

Selain mampu menghadapi tekanan, air juga mampu menghadapi regangan (arah panah) sehingga kolom air tetap tidak terputus sampai pada tegangan tertentu yang sangat besar karena adanya gaya kohesi akibat ikatan hidrogen.

Sebaliknya, sifat adhesi memungkinkan air seolah-olah dapat merambat ke permukaan yang lebih tinggi ketika ditempatkan di dalam pipa kapiler berdiameter kecil, kita kenal dengan daya kapilaritas. Permukaan yang lebih tinggi di dalam pipa kapiler daripada di luarnya karena adanya sifat adhesi air yang menyebabkan molekul air berikatan dengan dinding kapiler sehingga mampu melawan sebagian gaya gravitasi. Hal ini berbeda dengan air raksa (Hg) yang justru terjadi sebaliknya (Gambar 1.5). Semakin kecil diameter pipa akan semakin tinggi permukaan air yang ada di dalam pipa (Gambar 1.5).



Sumber: Taiz dan Zeiger, (2010)

Gambar 1.5

Kapilaritas air terjadi akibat adanya gaya adhesi antara air dengan molekul

penyusun pipa kapiler sehingga membentuk tegangan dan air terdorong sedikit lebih tinggi di dalam pipa kapiler daripada air yang berada di luar. Hal sebaliknya terjadi pada air raksa (Hg).

Selain karakteristik fisik di atas, air juga memiliki kekhususan dibandingkan dengan molekul-molekul lain yang sejenis (dengan bobot molekul yang hampir sama), seperti hidrogen sulfida ( $H_2S$ ), amonia ( $NH_3$ ), gas  $CO_2$ , dan sebagainya. Meskipun berbobot molekul kecil (18), air memiliki titik leleh, titik didih dan panas penguapan (energi evaporasi) yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan amonia (17), metana (16), etanol (30) maupun methanol (32) sebagaimana tertera dalam Tabel 1.1 berikut.

Tabel 1.1  
Karakteristik Fisik Air Dibandingkan dengan Molekul-molekul Lain  
dengan Ukuran Molekul yang Hampir Sama

Jenis Molekul	Bobot Molekul (Dalton)	Titik Leleh (C°)	Titik Didih (C°)	Panas Penguapan (J/G)
Air ( $H_2O$ )	18	0	100	2452
Hidrogen Sulfida ( $H_2S$ )	34	-86	-61	-
Amonia ( $NH_3$ )	17	-77	-33	1234
Karbondioksida ( $CO_2$ )	44	-57	-78	301
Metana ( $CH_4$ )	16	-182	-164	556
Etana ( $C_2H_6$ )	30	-183	-88	523
Metanol ( $CH_3OH$ )	32	-94	65	1226
Etanol ( $C_2H_5OH$ )	46	-117	78	878

Sumber: Hopkins dan Huner, (2009)

Sifat yang demikian menjadikan air memiliki karakteristik yang sangat baik (secara fisis, kimiawi, maupun fisiologis) guna mendukung berbagai proses fisiologi di dalam tubuh tumbuhan. Keunikan karakteristik air ini adalah bagian dari anugerah luar biasa yang diberikan oleh Tuhan pencipta alam ini sehingga memang benar ungkapan bahwa tanpa air maka tidak ada kehidupan. Peran air dalam mendukung proses-proses fisiologi akan diuraikan pada bagian berikut ini.

## B. FUNGSI AIR DALAM TUBUH TUMBUHAN

Air adalah senyawa kehidupan yang sangat penting. Demikian juga bagi tumbuhan, air merupakan bagian yang penting dari sel dan jaringan. Sebagian besar dari jaringan tumbuhan terdiri dari air. Secara umum, jaringan tumbuhan mengandung air dengan kisaran 60 hingga 85%. Bahkan jaringan/organ tertentu dapat mengandung air lebih dari 85%, seperti buah tomat mengandung hingga 95% air, demikian juga sayur-sayuran. Jaringan transpor memiliki kisaran kadar air mulai dari 35-75%. Jaringan pembuluh tanaman herba tentunya memiliki kandungan air yang lebih tinggi dibandingkan dengan jaringan pembuluh tanaman berkayu.

Walaupun demikian, ada bagian-bagian tumbuhan yang hanya mengandung air dalam jumlah yang rendah. Biji tumbuhan bisa tetap hidup walaupun hanya memiliki kadar air 5-15%. Bahkan penurunan kadar air merupakan salah satu karakteristik perkembangan biji, sejalan dengan akumulasi bahan kering/cadangan makanan biji. Setelah cadangan makanan cukup maka kadar air biji akan menurun hingga terjadi pematangan biji. Selain itu, pada biji jenis ortodoks, yaitu biji yang tahan disimpan pada kadar air rendah, seperti biji sengon, padi, dan kedelai, kadar air yang rendah dapat meningkatkan daya simpan biji sehingga walaupun telah disimpan lama, biji tetap memiliki *viabilitas* yang tinggi. Hal ini karena kadar air biji yang rendah dapat menekan respirasi biji sehingga biji tidak kehilangan energi dan terkuras cadangan makanannya selama penyimpanan.

Tingginya kadar air pada jaringan tumbuhan akan memancing pertanyaan kita mengapa tumbuhan harus memiliki kadar air yang begitu tinggi? Mengapa biji dapat tetap bertahan walaupun kadar airnya sangat rendah? Adakah air yang ada di dalam sel dan jaringan tumbuhan berperan aktif dalam seluruh proses fisiologis ataukah hanya sekadar media bagi proses-proses tersebut? Itulah pertanyaan-pertanyaan yang ingin kita jawab dalam membahas tentang peran air bagi tumbuhan.

### 1. Air Memiliki Kapasitas Termal yang Unik dalam Menunjang Proses Fisiologi

Air memiliki kapasitas panas dan panas penguapan yang tinggi. Kapasitas panas adalah energi yang dibutuhkan untuk meningkatkan suhu 1°C. Air memiliki kapasitas panas 4184 J/g untuk penurunan 1°C. Hal ini

menjadikan air sebagai penjaga stabilitas suhu tumbuhan yang sangat baik sehingga dapat menunjang proses-proses fisiologi di dalam tubuh tumbuhan.

Air juga memiliki panas penguapan yang tinggi, yaitu hampir dua kali lebih tinggi dari senyawa sejenis (amonia) bahkan melebihi metanol dan etanol yang memiliki bobot molekul yang jauh lebih tinggi (Tabel 1.1). Panas penguapan adalah besarnya energi yang diperlukan untuk menguapkan 1 gram air (Joule/g). Artinya, untuk memutuskan ikatan hidrogen dari molekul-molekul air sehingga berubah dari bentuk cair menjadi bentuk gas diperlukan energi yang besar (2452 J/g air). Semakin besar panas penguapan maka semakin besar energi yang diperlukan. Ini berarti bahwa air di dalam tumbuhan dapat membuang energi panas lebih banyak. Hal ini penting mengingat tumbuhan tidak dapat bergerak dan pindah tempat, berbeda dengan hewan yang dapat pindah jika kepanasan. Dengan demikian, jika tumbuhan diterpa panas yang terik maka panas tersebut akan dibuang dengan jalan menguapkan air sehingga suhu tumbuhan tetap stabil.

Anda bisa membayangkan berapa energi panas yang diterima tumbuhan akibat terkena cahaya matahari selama lebih kurang 12 jam sehari. Coba Anda bandingkan suhu batang pohon di sekitar Anda dengan suhu kayu seperti kursi atau meja yang sama-sama berada di luar terkena terik matahari (dijemur). Pasti Anda mendapati bahwa suhu kayu akan jauh lebih tinggi dari pada suhu pohon yang hidup. Hal ini tidak terlepas dari fungsi air. Dalam hal ini, air sangat penting artinya dalam mengendalikan suhu tubuh tumbuhan sehingga suhu tumbuhan tersebut tidak melebihi suhu yang cocok untuk proses fisiologi dan metabolisme.

Air juga memiliki titik didih yang tinggi (100°C), sementara metanol dan etanol dengan bobot molekul yang jauh lebih tinggi hanya memiliki titik didih masing-masing 65°C dan 78°C. Adanya titik didih yang tinggi memungkinkan air tetap memiliki molekul yang stabil walaupun suhu lingkungan naik melebihi suhu fisiologis. Selain itu, kesetimbangan antara bentuk cairan dan uap dicapai pada suhu yang tinggi pula. Berbeda dengan amonia, senyawa yang bobot molekulnya hampir sama dengan air hanya memiliki titik didih -33°C sehingga dalam suhu ruangan senyawa tersebut sudah dalam bentuk uap.

## 2. Air sebagai Penyusun Protoplasma

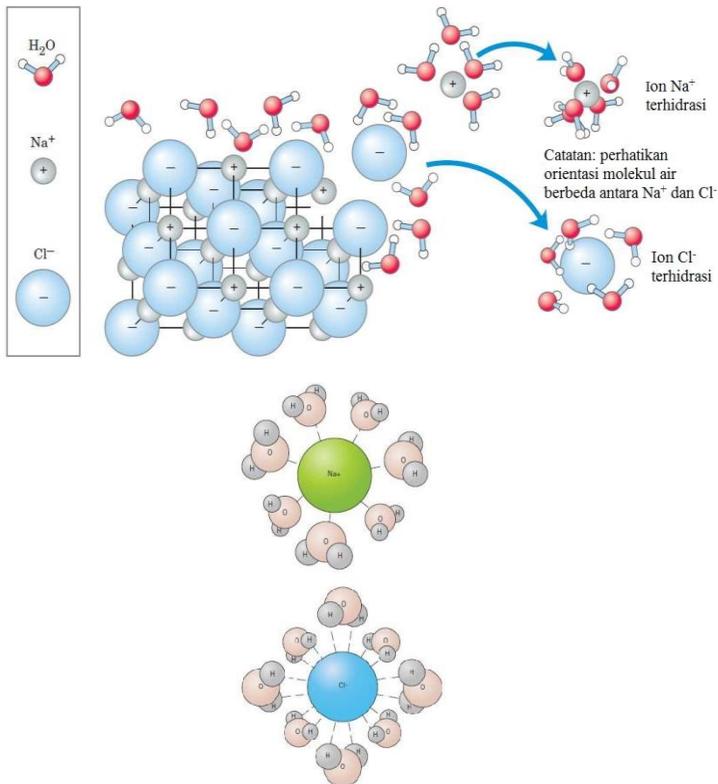
Coba Anda bayangkan, kalau Anda mengamati sel, akan Anda dapati bagian paling luar adalah dinding sel, kemudian membran plasma. Sebelah dalam dari membran plasma akan didapati sitoplasma yang berupa cairan semikental yang di dalamnya terdapat banyak organel, seperti mitokondria, kloroplas, peroksisom, mikrotubul, dan sebagainya. Bagian paling tengah akan Anda jumpai vakuola berupa membran yang membungkus cairan berisi senyawa terlarut, seperti cadangan makanan atau zat warna tertentu. Dengan demikian, praktis komponen terbesar dari sel adalah terdiri dari cairan. Itulah sebabnya maka sebagai fungsi pertama dari air adalah sebagai senyawa utama penyusun protoplasma. Protoplasma merupakan cairan utama penyusun sel, baik yang terdapat di dalam sitoplasma maupun vakuola sel. Dalam kultur jaringan juga dikenal istilah kultur protoplas, yaitu apabila sel yang telah dihilangkan dinding selnya (tinggal membran plasma dan seluruh komponen di dalamnya meliputi sitoplasma beserta semua organel, inti sel, dan vakuola) ditumbuhkan di dalam media kultur jaringan.

Dengan demikian, jelaslah betapa penting air bagi organisme, termasuk tumbuhan, yaitu karena organisme tersusun oleh sel-sel dan jaringan, sementara komponen utama dari sel itu sendiri adalah air. Adapun perbedaan kadar air dari masing-masing jaringan dan organ tumbuhan, seperti tersebut di bagian sebelumnya adalah karena perbedaan dari sel-sel penyusunnya. Sel-sel penyusun buah yang memiliki vakuola besar yang berisi cadangan makanan akan banyak mengandung air, sementara sel-sel biji yang kering memiliki karakteristik yang berbeda, sel-selnya kecil dan telah mengalami dehidrasi sehingga kadar airnya rendah.

## 3. Air sebagai Pelarut

Air juga berfungsi sebagai pelarut hara mineral yang dibutuhkan bagi tumbuhan. Hal ini tidak terlepas dari karakteristik air yang unik sehingga dapat menjadi pelarut bagi berbagai senyawa dan unsur hara yang dibutuhkan tumbuhan. Secara umum, hara mineral merupakan ion bermuatan positif (seperti  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $NH_4^+$ ) maupun negatif ( $NO_3^-$ ,  $SO_3^-$ ,  $HPO_4^-$ ) yang terlarut di dalam air. Ion-ion tersebut bisa berasal dari bahan mineral tanah, dari hasil dekomposisi bahan organik atau mungkin berasal dari pupuk yang kita berikan. Air berperan penting dalam melarutkan ion-ion tersebut dari sumbernya sehingga bisa diserap oleh tumbuhan dan masuk ke dalam jaringan tumbuhan. Selain itu, adanya air yang cukup juga menjadi sarana

yang baik bagi ion dan pupuk untuk berdifusi atau bergerak melalui aliran masa sehingga menjadi dekat dan tersedia bagi tumbuhan. Itulah sebabnya, kekurangan air seringkali juga menyebabkan kekurangan hara pada tumbuhan karena kelarutan hara di dalam tanah menjadi sangat rendah. Coba perhatikan contoh proses pelarutan Kristal NaCl di dalam air yang mengalami disosiasi menjadi ion  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$  sebagaimana dalam Gambar 1.6 berikut ini.



Sumber: Nelson dan Cox, 2004; Hopkins dan Huner, (2009)

Gambar 1.6

Air sebagai pelarut. Kristal garam NaCl yang terlarut dalam air, dalam hal ini ion  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$  akan diliputi oleh molekul air yang berikatan dengan formasi sebagaimana dalam gambar. Untuk ion  $\text{Na}^+$  bagian air yang berikatan adalah sisi negatif dari O, sementara untuk ion  $\text{Cl}^-$  maka bagian air yang berikatan adalah sisi positif dari H.

#### **4. Air sebagai Medium Reaksi Biokimia**

Dalam proses biokimia tumbuhan, air juga berfungsi penting sebagai medium reaksi maupun bahan bagi reaksi-reaksi metabolisme dalam tumbuhan. Banyak sekali reaksi-reaksi kimia di dalam sel tumbuhan memerlukan media air. Adanya kekurangan air menyebabkan terhambatnya banyak reaksi-reaksi metabolisme sehingga menghambat pertumbuhan tanaman. Dalam proses hidrolisis pati misalnya, pemecahan pati menjadi glukosa diperlukan air. Demikian juga reaksi-reaksi hidrolisis lainnya.

#### **5. Air sebagai Sumber Elektron dalam Reaksi Terang Fotosintesis**

Air juga mempunyai peran penting dalam proses reaksi terang fotosintesis. Dalam proses tersebut, air merupakan sumber elektron, yaitu ketika molekul air dipecah untuk menghasilkan  $O_2$ ,  $H^+$ , dan elektron. Walaupun proporsi kebutuhan air dalam reaksi sangat kecil dibandingkan dengan kebutuhan pada reaksi-reaksi biokimia lainnya, namun perannya cukup penting, sebagaimana yang akan dijelaskan pada Modul 3.

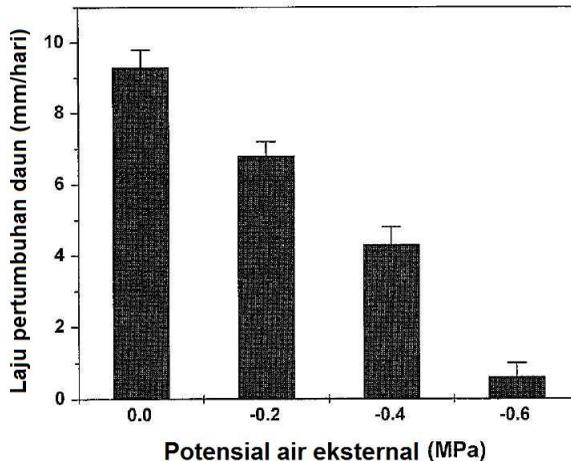
#### **6. Air Berperan dalam Turgiditas Sel serta Pertumbuhan Sel dan Jaringan**

Hal lain yang tidak kalah pentingnya adalah fungsi air dalam mempertahankan turgiditas sel, pertumbuhan sel, dan pergerakan struktur tertentu dari tumbuhan. Turgiditas sel atau dikenal dengan istilah sel turgor adalah tekanan sel akibat masuknya air ke dalam sel. Ketika sel tanaman mengalami banyak kehilangan air sehingga menjadi layu maka pada saat tersebut sel mempunyai nilai tekanan turgor yang sama dengan nol. Ketika air masuk ke dalam sel maka tekanan turgor akan meningkat (positif) dan sel akan mengembang sehingga sel mencapai ukuran yang maksimum. Ketika ini terjadi maka sel tumbuhan berada dalam keadaan turgor penuh. Pada pagi hari ketika air tanah atau media tanam cukup, biasanya sel-sel tumbuhan ada dalam keadaan turgor penuh. Pada tengah hari, saat matahari terik dan tumbuhan telah kehilangan banyak air akibat penguapan mungkin tumbuhan akan mengalami kehilangan tekanan turgor atau bahkan sampai mencapai nol (layu). Turgiditas sel pula yang menjadikan tumbuhan yang tidak berkayu termasuk kecambah yang baru tumbuh dapat tegak berdiri. Namun, jika tumbuhan tersebut kehilangan air maka akan terkulai layu tidak bisa tegak.

Itulah peran air dalam hubungannya dengan turgiditas sel-sel tumbuhan. Peran air yang demikian itu juga sangat penting secara fisiologis karena tekanan turgor biasanya berhubungan erat dengan tingkat metabolisme tumbuhan. Ketika tumbuhan memiliki tekanan turgor yang tinggi (penuh) maka kemampuan metabolismenya juga tinggi, sebaliknya ketika tumbuhan kehilangan tekanan turgor (misalnya saat layu) maka kemampuan metabolismenya, seperti fotosintesis dan respirasi juga rendah. Agar dapat memenuhi kebutuhan CO<sub>2</sub> dari udara misalnya, stomata harus dalam keadaan membuka dan ini ditentukan oleh turgiditas sel-sel daun. Jika turgor menurun maka stomata akan menutup dan CO<sub>2</sub> yang masuk ke sisi aktif fotosintesis juga akan mengalami penurunan. Dengan demikian, upaya mempertahankan turgor merupakan hal yang penting bagi tumbuhan.

Selain tekanan turgor, air juga penting dalam proses pembesaran dan pemanjangan sel. Coba Anda perhatikan, apabila tumbuhan kekurangan air maka tumbuhan biasanya kerdil, daunnya menjadi kecil-kecil, dan jarak antar ruas-ruas batangnya juga menjadi lebih pendek. Mengapa demikian?

Keadaan itu terkait dengan fungsi air dalam pembesaran/pemanjangan sel dan jaringan. Kalau kita bandingkan dua tumbuhan dengan usia yang sama, namun yang satu mengalami kekurangan air dan yang lainnya memperoleh cukup air maka secara kuantitatif jumlah selnya mungkin tidak terlalu berbeda. Namun, kalau kita perhatikan ukuran selnya akan berbeda sehingga tumbuhan yang hidup pada keadaan cukup air akan memiliki ukuran sel yang lebih besar/panjang daripada tumbuhan yang kekurangan air. Proses pemanjangan sel tersebut disebabkan karena masuknya air ke dalam sel. Gambar 1.7 memberikan contoh hubungan air yang ditunjukkan dengan nilai potensial air dengan laju pertumbuhan daun padi. Penjelasan tentang potensial air akan dibahas pada bagian selanjutnya. Gambar 1.7 menunjukkan bahwa dengan semakin rendah potensial air (ketersediaan air semakin sedikit) maka laju pertumbuhan daun padi semakin lambat. Hal ini menunjukkan bahwa dengan air yang sedikit maka pertumbuhan padi semakin terhambat.

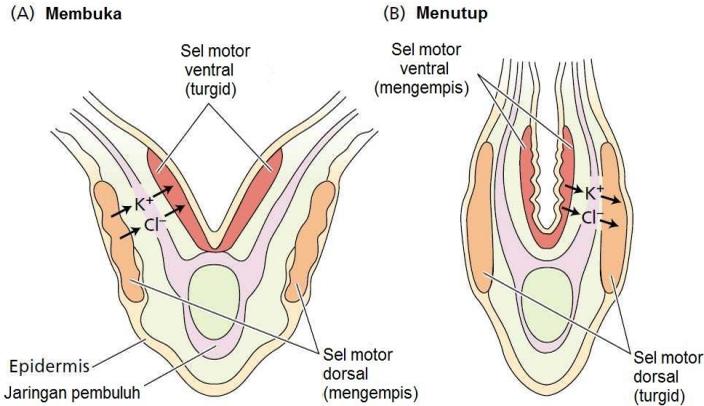


Sumber: Modifikasi dari Lu dan Neumann, (1999)

Gambar 1.7

Laju pertumbuhan daun padi IR20 yang mendapat perlakuan cekaman air selama 24 jam. Cekaman air diberikan dengan penambahan PEG 6000 ke media akar.

Pernahkah Anda mengamati pergerakan tumbuhan? Pergerakan yang dimaksudkan bukan karena digoyang oleh angin, tetapi karena organ tumbuhan sendiri yang bergerak. Pergerakan yang dimaksud adalah seperti yang terjadi pada daun putri malu yang menutup ketika disentuh. Penutupan daun ini terjadi karena distribusi air keluar atau masuk jaringan pulvinus. Skema Gambar 1.8 berikut menjelaskan bagaimana gerakan daun itu terjadi. Ada dua kelompok sel yang bisa menyerap atau memompa air di bagian atas dan bawah dari pangkal daun. Apabila sel-sel pulvinus bagian atas mengakumulasi ion  $K^+$  dan  $Cl^-$  dalam jumlah besar maka air dari sel sekelilingnya akan terserap masuk ke sel-sel pulvinus tersebut. Akibatnya, sel-sel tersebut akan menggebu yang berakibat pada pembukaan daun. Keadaan sebaliknya terjadi apabila air masuk ke dalam sel-sel pulvinus bawah (Gambar 1.8).



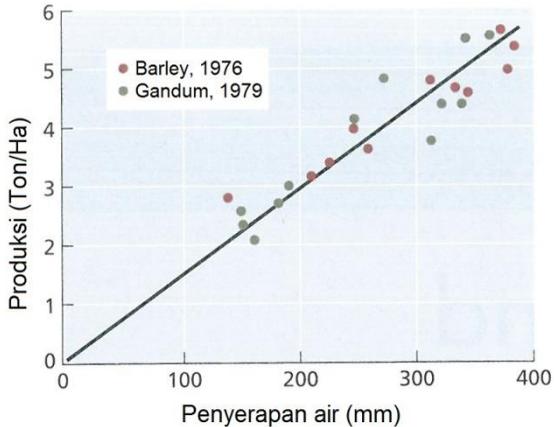
Sumber: Taiz dan Zeiger, (2002)

Gambar 1.8

Skema pangkal daun putri malu dengan kelompok sel pulvinus di bagian atas dan bawah petiol daun mengatur membuka dan menutupnya daun.

Pembukaan dan penutupan stomata juga sangat dipengaruhi oleh redistribusi air antara sel penjaga dengan sel-sel epidermis lain di sekitar sel penjaga sebagaimana akan dijelaskan pada Kegiatan Belajar 2 nanti. Berbagai gerakan yang dapat balik dari organ tumbuhan umumnya secara fisiologis dikendalikan oleh distribusi air di beberapa bagian dari organ tersebut.

Dengan demikian, begitu banyak aspek pada tumbuhan yang terkait langsung dengan peran air sehingga tidak mengherankan kalau defisit air yang terjadi pada tanaman berakibat besar terhadap penurunan produksi. Bahkan banyak data yang menunjukkan bahwa tingkat ketersediaan air sangat erat kaitannya dengan tingkat produksi tanaman. Gambar 1.9 berikut ini mengilustrasikan hubungan linier antara ketersediaan air dengan produksi tanaman barley dan gandum. Meskipun berbeda tanaman namun keduanya memiliki tren hubungan yang sama bahwa semakin tinggi penyerapan air (yang diakibatkan ketersediaan air yang cukup) maka akan semakin tinggi produksinya.



Sumber: Taiz dan Zeiger, (2010)

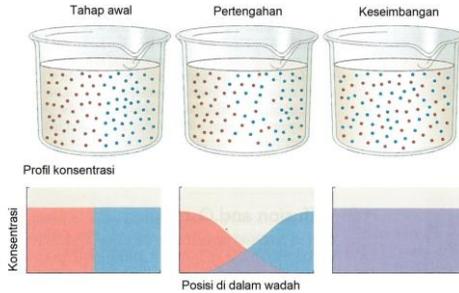
Gambar 1.9

Hubungan antara tingkat penyerapan air dengan produksi tanaman barley dan gandum yang bersifat linier. Semakin tinggi penyerapan air maka produktivitasnya semakin besar menggambarkan ketergantungan pada air yang sangat tinggi.

## C. PERGERAKAN DAN PERANAN AIR DALAM TUBUH TUMBUHAN

### 1. Difusi

Proses transpor di dalam sel melibatkan peran air sebagai pelarut ion atau molekul-molekul dari satu tempat ke tempat lain. Pada skala seluler, sistem transpor yang cukup dominan adalah melalui difusi. Difusi adalah pergerakan spontan dari suatu senyawa dari tempat yang berkonsentrasi tinggi ke tempat yang berkonsentrasi rendah. Percampuran senyawa di dalam proses difusi terjadi secara acak (random) yang didorong oleh perbedaan konsentrasi (Gambar 1.10).



Sumber: Taiz dan Zeiger, (2010)

Gambar 1.10

Difusi molekul dari dua senyawa yang berbeda. Gambar atas menunjukkan kondisi molekul sebelum dan sesudah difusi. Gambar bawah menunjukkan skema pencampuran konsentrasi kedua molekul tersebut.

Kecepatan difusi dari suatu bahan sangat tergantung pada perbedaan konsentrasi dari bahan tersebut. Adolf Fick adalah orang yang pertama pada tahun 1850-an melontarkan rumusan perhitungan kecepatan difusi dari suatu bahan yang besarnya tergantung pada gradien konsentrasi dengan rumusan yang dikenal dengan Hukum Fick-I sebagai berikut:

$$J_s = -D.A.\Delta C.l^{-1}$$

Di mana  $J_s$  adalah densitas flux atau jumlah bahan yang melintas dalam suatu luasan per unit waktu misalnya mol per  $m^2$  per detik.  $D$  adalah koefisien difusi, suatu konstanta yang menentukan laju difusi suatu molekul tertentu pada suatu media tertentu.  $A$  dan  $l$  masing-masing adalah luas area yang dilewati dan panjang jalur difusi.  $\Delta C$  menunjukkan perbedaan konsentrasi antara dua daerah yang berdifusi dikenal juga dengan gradient konsentrasi. Khusus untuk gas, biasanya digunakan satuan tekanan. Tanda negatif dari hukum Fick-I menunjukkan fakta bahwa difusi terjadi menuju ke konsentrasi yang lebih rendah. Singkatnya adalah bahwa difusi tergantung pada luas area difusi dan gradien konsentrasi.

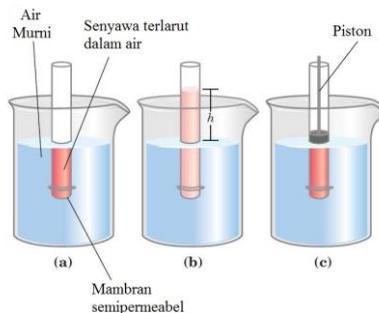
Melalui difusi hara mineral dapat bergerak dari tempat yang berkonsentrasi tinggi misalnya daerah pemupukan ke daerah yang dekat dengan akar tanaman dengan media larutan tanah di sekitar akar. Masuknya

gas  $\text{CO}_2$  melalui lubang stomata ke dalam sel-sel mesofil dan ke sisi aktif fotosintesis juga terjadi melalui difusi. Laju difusi keduanya sangat bergantung pada perbedaan (gradien) konsentrasinya.

## 2. Osmosis

Agak berbeda dengan difusi, osmosis adalah pergerakan air dari satu tempat ke tempat lain melintasi membran semipermeabel (*selectively permeable*). Pergerakan ini terjadi karena adanya perbedaan tekanan, antara dua larutan yang dipisahkan oleh membran tersebut yang disebut dengan tekanan osmosis. Sel tumbuhan memiliki banyak membran yang bersifat semipermeabel, artinya membran tersebut hanya dapat dilalui oleh air dan beberapa senyawa berukuran kecil, tak bermuatan. Sementara senyawa-senyawa besar, seperti gula sukrosa, protein, dan lainnya tidak dapat melintasi membran dengan mudah walaupun terjadi perbedaan konsentrasi.

Gambaran tentang osmosis dapat dilihat pada Gambar 1.11. Gelas beaker yang berisi air didalamnya dimasukkan tabung terbuka berisi larutan (gula), yang bagian bawahnya ditutup dengan membran semipermeabel (Gambar 1.11.a). Setelah berlangsung beberapa lama maka air dari gelas beaker akan masuk ke dalam tabung melewati membran, sementara larutan gula tidak bisa keluar dari tabung karena tertahan oleh membran sehingga permukaan cairan di dalam tabung akan meningkat setinggi  $h$  (Gambar 1.11.b). Untuk mengembalikan cairan dalam tabung setinggi cairan dalam gelas beaker dibutuhkan tekanan yang nilainya sama dengan tekanan osmosis (Gambar 1.11.c).



Sumber: Nelson dan Cox, (2004)

Gambar 1.11

Osmosis terjadi karena pergerakan air melintasi membran semipermeabel karena adanya perbedaan tekanan antar 2 larutan yang disebut dengan tekanan osmosis.

Sel tumbuhan terdiri dari banyak membran bersifat semipermeabel. Pergerakan air dan senyawa-senyawa di dalam dan antarsel ditentukan oleh fungsi membran tersebut. Di dalam tumbuhan, osmosis berperan penting dalam proses translokasi gula (produk asimilat) dan pergerakan hormon di dalam tumbuhan dan umumnya bersifat tertutup sehingga memungkinkan proses transpor yang bersifat tidak satu arah, sebagaimana dibahas di dalam Modul 4.

#### D. POTENSIAL AIR DAN METODOLOGI PENGUKURANNYA

Potensial air atau juga disebut sebagai potensial kimia air adalah energi bebas yang dimiliki oleh suatu cairan atau larutan tertentu yang dapat mempengaruhi perpindahan air dari satu bagian ke bagian lainnya. Di dalam termodinamika, energi bebas mewakili suatu kemampuan untuk melakukan kerja setara dengan: *kerja x jarak*. Satuan dari potensial kimia air adalah bar (1 bar setara dengan  $10^6 \text{ Erg cm}^{-3}$ ). Selain bar, satuan yang sering digunakan adalah mega pascal (MPa), di mana 1 MPa setara dengan 10 bar.

Dalam sistem tubuh tumbuhan, potensial kimia air yang dilambangkan dengan huruf Yunani psi ( $\Psi$ ) biasanya dikenal dengan istilah potensial air atau *water potential* ( $\Psi_w$ ). Potensial air sebenarnya merupakan suatu tetapan yang bersifat relatif, yaitu suatu tetapan yang besarnya ditentukan dengan membandingkannya pada potensial air murni. Untuk itu, ditetapkan bahwa potensial air murni besarnya sama dengan 0 (nol). Potensial air dari suatu sel atau jaringan ditentukan oleh banyaknya air murni yang dikandung oleh sel atau jaringan tersebut. Semakin tinggi kandungan air murni dari suatu jaringan akan semakin tinggi potensial airnya. Oleh karena itu, potensial air sel dan jaringan tumbuhan umumnya bernilai negatif (kurang dari nol). Air akan bergerak dari tempat/jaringan dengan potensial air yang tinggi ke tempat/jaringan dengan potensial air yang rendah. Karena potensial air dari tumbuhan adalah lebih rendah daripada air di dalam media atau di dalam tanah maka air dapat bergerak dari media tanam ke dalam sel dan jaringan tumbuhan.

Potensial air penting artinya untuk mengetahui status air dalam sel atau jaringan tumbuhan, apakah suatu tumbuhan cukup air atau mengalami defisit air. Perbedaan antara potensial air tumbuhan dengan potensial air dari lingkungan merupakan penggerak masuknya air ke dalam tumbuhan. Jika selisih antara potensial air tumbuhan dengan potensial air lingkungan (tanah)

cukup besar, misalnya potensial air tumbuhan  $-8$  bar, sedangkan potensial air tanah  $-1$  bar maka tumbuhan akan dapat menyerap air dengan mudah. Dengan demikian, tumbuhan mengalami cukup air. Namun jika tumbuhan, misalnya memiliki potensial air  $-12$  bar, sedangkan air di dalam tanah potensial airnya  $-11$  maka tumbuhan akan mengalami defisit air. Karena air akan sulit masuk ke dalam akar akibat perbedaan potensial yang sangat rendah (hanya satu bar).

Besarnya potensial air dari suatu sel dan jaringan tumbuhan ( $\Psi_w$ ) secara umum ditentukan oleh beberapa komponen, yaitu (1) zat-zat terlarut atau konsentrasi, (2) tekanan dinding sel, (3) gravitasi, dan (4) matriks.

### 1. Adanya Zat-zat Terlarut

Adanya zat-zat terlarut di dalam air menyebabkan terjadinya penurunan energi bebas dan potensial kimia air. Besarnya potensial kimia air yang diakibatkan oleh adanya zat-zat terlarut ini disebut sebagai **potensial solut** atau **potensial osmotik** yang disingkat dengan  $\Psi_s$ . Nilai potensial osmotik bersifat **negatif**. Semakin banyak kandungan zat terlarut akan semakin rendah nilai potensial osmotik dari larutan atau sel. Biasanya, di dalam sel, zat-zat terlarut seperti gula, asam organik, dan ion  $K^+$  diakumulasi dalam jumlah tinggi di dalam vakuola sel sehingga sel tersebut memiliki potensial solut/osmotik yang rendah. Sebagai contoh misalnya, ketika ada cahaya, sel-sel penjaga mengakumulasi  $K^+$  dan asam malat di dalam vakuola yang menyebabkan penurunan potensial osmotik, sehingga air masuk ke dalam sel penjaga dan stomata membuka.

Perkiraan besarnya potensial osmotik untuk larutan yang tidak berdisosiasi, seperti larutan gula sukrosa misalnya, dapat dihitung dengan rumus:

$$\Psi_s = -RTc_s$$

Di mana  $R$  adalah tetapan (konstanta) gas ( $8.32 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), dan  $T$  adalah suhu absolut (dalam derajat Kelvin atau K), sementara  $c_s$  adalah konsentrasi solut dalam larutan dengan satuan mol per liter. Tanda negatif menunjukkan bahwa adanya zat terlarut menyebabkan penurunan potensial air dari larutan dibandingkan dengan air murni.

Contoh larutan dengan potensial air yang rendah adalah air laut. Selain karena efek meracun dari NaCl, kadar garam yang tinggi juga menyebabkan air laut memiliki potensial osmotik yang rendah yang mungkin lebih rendah

daripada potensial osmotik sel tumbuhan sehingga air tidak bisa masuk ke dalam tumbuhan. Itulah sebabnya tumbuhan darat umumnya tidak dapat hidup di dalam air laut.

## 2. Adanya Tekanan dari Dinding Sel

Salah satu ciri sel tumbuhan adalah adanya dinding sel yang kaku walaupun sedikit agak elastis. Apabila air masuk ke dalam sel maka akan menyebabkan volume sel meningkat. Karena adanya dinding sel meningkatkan pembesaran volume sel tidak bisa berjalan terus, tetapi akan berhenti setelah mencapai ukuran tertentu sehingga air yang masuk ke dalam sel pun berhenti. Gaya tekan dari dinding sel yang membatasi masuknya air ke dalam sel ini disebut potensial tekanan atau juga bisa disebut sebagai tekanan hidrostatik, dilambangkan dengan  $\Psi_p$ . Berbeda dengan potensial osmotik yang nilainya negatif, potensial tekanan bernilai positif. Potensial tekanan biasanya berkaitan dengan turgiditas sel/jaringan tumbuhan atau yang dikenal dengan istilah tekanan turgor sebagaimana telah dijelaskan pada bagian yang lalu.

## 3. Adanya Gaya Gravitasi Bumi

Selain ketiga hal di atas, gravitasi bumi juga menyebabkan terjadinya tekanan yang disebut dengan potensial gravitasi  $\Psi_g$ . Besarnya potensial gravitasi tergantung pada tinggi kolom air ( $h$ ), densitas air ( $\rho_w$ ), dan akselerasi disebabkan gravitasi ( $g$ ).

$$\Psi_g = \rho_w g h$$

Di mana  $\rho_w g$  memiliki nilai 0.01 MPa/m sehingga dengan jarak vertikal 10 m nilainya sama dengan 0.1 MPa. Kalau dibandingkan dengan nilai potensial lainnya, seperti potensial osmotik dan potensial tekanan, nilai potensial gravitasi dapat diabaikan.

## 4. Adanya Ikatan Air dengan Komponen Dinding Sel dan Membran Sel

Komponen dinding sel yang terdiri dari karbohidrat dan protein, yang dapat berikatan dengan air, demikian juga protein pada membran. Adanya senyawa-senyawa tersebut menyebabkan adanya potensial matriks yang dapat menarik air. Potensial matriks dilambangkan dengan  $\Psi_m$  dan nilainya adalah negatif. Walaupun demikian, umumnya sel-sel dan jaringan tumbuhan

hidup dengan vakuola yang besar, memiliki nilai potensial matriks yang dapat diabaikan. Namun, pada beberapa tumbuhan xerofit (tumbuhan yang biasa hidup di daerah gurun) dan biji-biji yang kering memiliki nilai potensial matriks yang sangat rendah.

Dengan demikian, secara umum rumusan potensial air dapat dituliskan sebagai:

$$\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_m$$

Karena nilai potensial matriks ( $\Psi_m$ ) hanya terjadi pada beberapa jenis tumbuhan (xerofit dan pada biji kering) maka persamaan umum potensial air adalah:

$$\text{Potensial air} = \text{Potensial osmotik} + \text{Potensial tekanan}$$

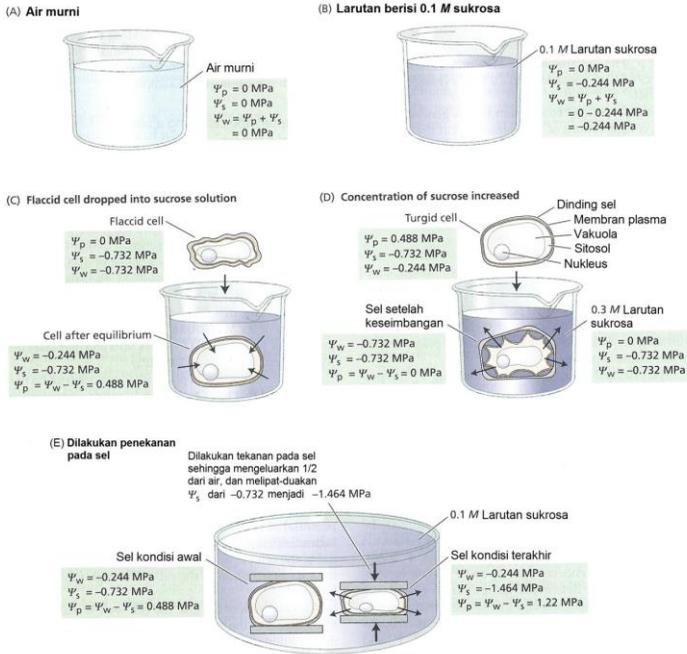
atau sering dituliskan:

$$\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p$$

Di beberapa kepustakaan lambang dari komponen potensial air sering juga dituliskan sebagai berikut:

$$\Psi = P - \pi$$

Di mana  $\Psi$  adalah potensial air,  $P$  adalah tekanan hidrostatik, dan  $\pi$  adalah potensial osmotik. Gambaran hubungan antara ketiga jenis potensial air dalam sel dan jaringan tumbuhan dapat dilihat pada Gambar 1.12 berikut.



Gambar 1.12

Gambaran tentang hubungan potensial air ( $\Psi_w$ ) dengan potensial tekanan (tekanan hidrostatik/tekanan turgor,  $\Psi_p$ ) dan potensial osmotik (potensial solute,  $\Psi_s$ ). A. Air murni dengan potensial air, tekanan dan osmotik yang bernilai =0; B. Larutan sukrosa dengan potensial tekanan=0 MPa dan potensial osmotik dan potensial air=-0.244 MPa; C. Sel dengan potensial tekanan=0 MPa dan potensial osmotik=-0.732 MPa yang dimasukkan ke dalam larutan sukrosa sehingga menjadi memiliki potensial tekanan menjadi=0.488 MPa; D. Sel turgid dimasukkan ke dalam sukrosa 0.3M sehingga mengalami plasmolisis dan potensial tekanannya menjadi=0 dan potensial osmotiknya=-0.732 MPa.

Konsep tentang potensial air ini telah secara luas diterima oleh para ahli fisiologi karena dapat menghindari kesulitan terkait dengan pengukuran potensial kimia. Dengan cara ini maka para peneliti dapat memprediksi perilaku air dengan dasar pengukuran kuantitatif yang mudah, yaitu melalui pengukuran tekanan hidrostatik ( $P$ ) dan potensial osmotik ( $\pi$ ). Cara ini juga memungkinkan untuk mewujudkan potensial air dalam unit tekanan (*pascal*)

yang relatif lebih relevan dalam penetapan hubungan tanah-tumbuhan-atmosfir daripada dengan menggunakan unit energi (*Joule*). Secara praktis, sistem pengukuran ini juga jauh lebih mudah karena dilakukan dengan mengukur perubahan tekanan tanpa harus mengukur energi yang dibutuhkan dalam menggerakkan air secara langsung.

Akhirnya, bisa dikatakan bahwa tenaga pendorong (*driving force*) untuk menggerakkan air adalah gradien potensial air sehingga air akan bergerak dari potensial air yang tinggi ke potensial air yang rendah. Mengingat potensial air murni adalah 0 maka potensial air tumbuhan adalah negatif, sehingga air akan bergerak ke daerah dengan potensial air yang lebih negatif. Hal yang menjadi pertanyaan adalah bagaimana potensial osmotik dan potensial tekanan bekerja dalam mempengaruhi potensial air sel dan jaringan. Kalau kita perhatikan sel tumbuhan, potensial osmotik umumnya disebabkan oleh isi vakuola yang volumenya besar, kecuali sel-sel meristem dan sel-sel yang sudah terspesialisasi. Untuk sel tumbuhan secara umum, vakuola menyumbang 50–80 persen dari cairan sel dengan kandungan senyawa terlarut yang ada di dalamnya. Senyawa terlarut di dalam vakuola biasanya terdiri dari gula, garam-garam inorganik, asam organik atau pigmen antosianin. Sementara sisa air lainnya berada di ruang antardinding sel, sedangkan sitoplasma hanya berkisar 5-10 persen. Dengan demikian, pengaruh dari larutan yang ada di dalam vakuola sel cukup besar dalam menentukan potensial osmotik. Kisaran potensial osmotik dari sel-sel parenkima adalah -0.1 MPa hingga -0.3 MPa dan umumnya disebabkan karena kandungan garam di dalam vakuola.

Adapun potensial tekanan di dalam sel umumnya disebabkan karena tekanan yang ditimbulkan akibat dinding sel yang bersifat kaku. Dinding sel akan memberikan tekanan balik saat protoplas membesar akibat masuknya air ke dalam vakuola sel (akibat osmosis). Hal inilah yang dikenal dengan tekanan turgor. Saat tekanan turgor meningkat akibat masuknya air maka sel dikatakan dalam keadaan turgid. Jika Anda perhatikan tanaman di dalam pot yang telah disiram air dan terlihat segar, tegak maka sel-sel dari tanaman tersebut dalam keadaan turgid. Sebaliknya, saat air keluar dari sel sehingga tekanan turgor menurun hingga mencapai nol maka sel dikatakan dalam kondisi flaccid. Hal ini seperti kalau Anda lihat tanaman di dalam pot yang tidak diberi air beberapa waktu sehingga menjadi layu, daunnya terkulai, tidak tegak maka sel-sel pada tanaman tersebut dalam keadaan flaccid.

## E. METODE PENGUKURAN POTENSIAL AIR

Potensial air merupakan parameter yang sering diamati untuk mengetahui status air dari suatu tanaman. Pengamatan bisa dilakukan pada daun, batang, akar atau bahkan potongan dari umbi. Guna mengetahui besarnya nilai potensial air jaringan, telah dikembangkan beberapa metode pengukuran potensial air mulai dari yang paling sederhana dengan tingkat akurasi yang agak kasar hingga metode dengan akurasi yang sangat tinggi. Saat ini beberapa metode yang sering digunakan untuk mengukur potensial air antara lain: (1) metode ruang tekan (*pressure chamber*), (2) metode equilibrasi uap (*psychrometry*), dan (3) *cryoscopic osmometer*, (4) metode perendaman, dan (5) metode imersi uap.

Di antara metode tersebut, metode ruang tekan adalah metode pengukuran potensial air yang dilakukan secara langsung pada tanaman. Metode ini dapat dilakukan dengan cepat dan banyak dipakai dalam penelitian ilmiah. Selain itu, metode equilibrasi uap (pengukuran dengan *thermocouple psychrometer*) dan *cryoscopic osmometer* juga banyak digunakan karena hasilnya sangat akurat. Metode lainnya umumnya digunakan dalam percobaan-percobaan sederhana pada praktikum fisiologi tumbuhan. Pengukuran masing-masing metode dapat dilihat sebagai berikut.

### 1. Metode Ruang Tekan (*Pressure Chamber*)

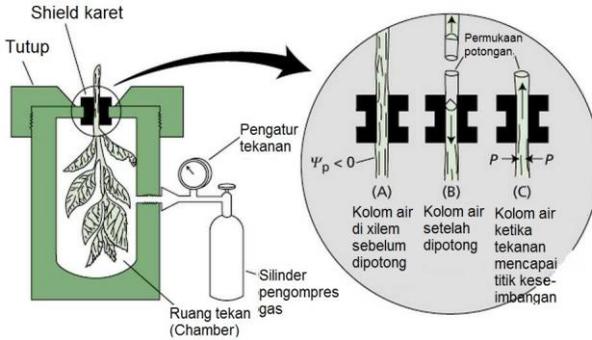
Metode ruang tekan atau dikenal sebagai *pressure chamber* merupakan metode pengukuran potensial air untuk jaringan dan organ tumbuhan, seperti daun atau pucuk tumbuhan. Metode ini awalnya diperkenalkan oleh Henry Dixon pada awal abad 20-an yang kemudian dikembangkan oleh P. Scholander tahun 1960-an dengan desain yang baik dan mudah digunakan sebagaimana terlihat pada Gambar 1.13.

Prinsip kerja dari metode ini adalah memberikan tekanan menggunakan gas pada seluruh permukaan organ tumbuhan sehingga menekan cairan yang ada di dalam tumbuhan yang apabila tekanan gas tersebut telah menyamai atau melampaui potensial air jaringan maka air akan keluar melalui xylem yang dapat terlihat pada bagian batang atau tangkai yang terpotong. Saat jaringan mendapat tekanan, tepat pada saat cairan keluar maka tekanan gas yang diberikan besarnya sama dengan potensial air yang dimiliki oleh tumbuhan tersebut. Titik ini dikenal sebagai titik kesamaan tekanan (*balance pressure*).

Tahap-tahap pengukuran dengan menggunakan *pressure chamber* adalah:

- a. Potonglah batang tumbuhan beserta daunnya atau satu helai daun beserta petiolnya (tangkainya).
- b. Tempatkan tangkainya ke dalam karet penjepit (*shield*).
- c. Masukkan daun ke dalam *chamber* dengan memasang karet penjepit sehingga bagian tangkai yang terpotong berada di sebelah luar *chamber*.
- d. Kencangkan sekrup *chamber* hingga tidak ada kebocoran gas ketika ditekan.
- e. Alirkan udara yang berasal dari tangki secara perlahan dengan regulator.
- f. Apabila gelembung-gelembung air telah muncul di bagian bekas potongan tangkai daun maka aliran udara dihentikan.
- g. Besarnya tekanan udara tepat saat gelembung air keluar dari bekas potongan adalah sama dengan potensial air organ tumbuhan tersebut (*balance pressure*).

Metode ini banyak dilakukan khususnya untuk tumbuhan dengan daun yang berpetiol. Walaupun ada karet penjepit yang bisa dipakai untuk tanaman monokotil, tetapi pengukurannya agak sulit. Permasalahan pengukuran dengan alat ini adalah apabila penempatan sampel pada karet penjepit tidak tepat maka akan terjadi kebocoran gas. Selain itu, beberapa jaringan tumbuhan terlalu lunak sehingga rusak saat mendapat tekanan tinggi. Walaupun demikian jika dilakukan secara hati-hati, metode ini cukup baik dan akurat sehingga banyak dipakai dalam penelitian di lapangan. Skema alat pengukur potensial dengan metode ruang tekan dapat dilihat sebagai berikut (Gambar 1.13).



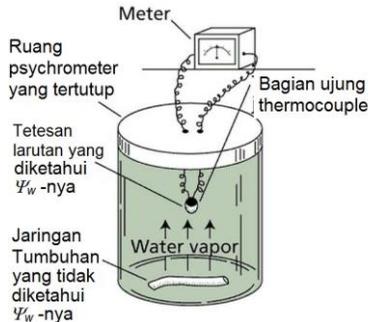
Sumber: *Plant Physiology Online*

Gambar 1.13

Pengukuran potensial air dengan metode ruang tekan. Alat ini terdiri dari ruang tekan (*chamber*) berupa tabung metal yang ditutup dengan penutup yang dilengkapi dengan lubang yang ukurannya bisa diatur sesuai dengan diameter bahan yang akan dimasukkan. Pengatur lubang dilengkapi dengan karet penjepit (*shield*) berbagai ukuran untuk menahan bahan tanaman dan menjaga kebocoran. Komponen kedua adalah tabung gas beserta regulator yang dapat dihubungkan dengan ruang tekan. Regulator yang dilengkapi dengan alat pengukur tekanan dapat mengatur tekanan sesuai dengan kebutuhan. Gambar bagian kanan mengilustrasikan potongan dahan yang diukur dengan *pressure chamber*.

## 2. Metode Equilibrasi Uap

Metode ini didasarkan pada pengukuran tekanan uap dari jaringan atau cairan tumbuhan dengan menggunakan alat yang disebut *thermocouple psychrometer*. Alat ini fungsinya adalah mengukur tekanan uap air melalui pengukuran perubahan suhu yang terjadi pada suatu logam tertentu. Alat ini dilengkapi penghantar listrik yang terdiri dari dua batang logam dari bahan yang berbeda, yaitu *Chromel P* dan *Konstantan* yang dihubungkan dengan arus listrik untuk mendeteksi perubahan suhu yang terjadi akibat uap air yang ditimbulkan oleh daun tumbuhan atau cairan yang ada didalam ruangan (*chamber*). Perubahan suhu akan menyebabkan terjadinya aliran listrik yang dapat dideteksi oleh *thermocouple* dan kemudian dikonversi ke dalam bentuk satuan bar atau MPa (Gambar 1.14).



Sumber: *Plant Physiology Online*

Gambar 1.14

*Thermocouple psychrometer*, alat pengukur potensial air dan potensial osmotik dengan metode ekuilibrasi uap. Kerja dari alat ini didasarkan pada pengukuran tekanan uap air melalui perubahan suhu yang terjadi.

Mekanisme kerja dari alat ini adalah sebagai berikut. Jaringan atau cairan ditempatkan di dalam *chamber* yang berisi sensor suhu (*thermocouple*) yang dibasahi dengan tetesan cairan standar (*droplet*, yang telah diketahui  $\Psi_s$  dan  $\Psi_w$ ). Jika jaringan memiliki potensial air lebih rendah daripada larutan standar maka air akan menguap dari *droplet* tersebut dan berdifusi ke udara sehingga akan menurunkan suhu *droplet*. Semakin rendah potensial airnya akan semakin besar penguapan sehingga akan semakin rendah suhunya. Sebaliknya, jika larutan standar pada *droplet* memiliki potensial air lebih rendah dari jaringan yang diukur maka air dari jaringan akan menguap dan diserap *droplet* menyebabkan peningkatan suhu *droplet*. Dengan mengukur perubahan suhu dari *droplet* untuk beberapa larutan yang diketahui  $\Psi_w$ -nya maka akan memungkinkan untuk menghitung potensial air dari larutan yang menyebabkan pergerakan air antara *droplet* dan jaringan adalah = 0 (nol) yang menunjukkan bahwa keduanya memiliki potensial air yang sama.

Selain untuk mengukur potensial air, alat ini juga bisa digunakan untuk mengukur potensial osmotik, yaitu dengan cara mengekstrak cairan tanaman atau larutan lainnya. Dengan mengukur potensial air jaringan, kemudian dilanjutkan dengan potensial osmotik jaringan maka jaringan tersebut dapat ditentukan tekanan turgornya:

$$\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p.$$

Alat ini terkenal sangat akurat dalam pengukuran, namun sangat sensitif terhadap perubahan suhu lingkungan sehingga hanya bisa dilakukan di laboratorium dengan suhu yang konstan dan tidak bisa digunakan untuk pengukuran di lapangan. Contoh dari alat ini adalah *tru-psy* yang diproduksi oleh Decagon, buatan Amerika Serikat.

### 3. Metode Perendaman

Metode ini sangat sederhana, yaitu sesuai dengan namanya metode ini dilakukan dengan cara merendam jaringan yang akan diukur ke dalam suatu seri larutan sukrosa atau manitol dengan konsentrasi yang berbeda-beda, mulai dari yang encer hingga yang pekat. Karena perbedaan konsentrasi ini maka jaringan yang dimasukkan akan mengalami dua kemungkinan:

- a. mengalami penambahan berat akibat air masuk ke dalam jaringan; atau
- b. mengalami penurunan berat karena air dari jaringan diserap oleh larutan gula yang ada di sekitarnya.

Sebelum direndam ke dalam masing-masing larutan, jaringan yang diukur potensial airnya ditimbang terlebih dahulu dan dicatat. Kemudian direndam di dalam larutan gula dan dibiarkan beberapa waktu (1-2 jam) hingga terjadi keseimbangan. Selanjutnya, jaringan dikeluarkan dari perendaman dan ditimbang kembali untuk mengetahui apakah terjadi penambahan atau pengurangan berat atau tidak terjadi perubahan berat. Jaringan yang tidak mengalami perubahan berat berarti memiliki potensial air yang sama dengan larutan perendamnya. Jika hal itu telah diketahui maka konsentrasi larutan gula tersebut dapat dikonversikan ke dalam potensial air dengan menggunakan rumus:

$$\Psi_w = M_iRT, \text{ di mana:}$$

**M:** konsentrasi larutan; **i:** konstanta pengionan pelarut, untuk larutan gula  $i=1$ ;

**R:** konstanta gas ( $0,00831 \text{ kg MPa mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$  atau  $0,0831 \text{ kg bar mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );

**T:** suhu mutlak derajat Kelvin (suhu celcius +  $273^\circ\text{K}$ ).

Jika setelah perendaman tidak terdapat satu pun jaringan yang tidak mengalami perubahan berat (artinya nilainya selalu bertambah atau berkurang dan tidak ada yang nilainya nol) maka bisa dilakukan pendekatan dengan membuat persamaan regresi antara selisih berat dengan konsentrasi gula sehingga dengan bantuan regresi tersebut titik “nol”-nya bisa ditetapkan.

Kelemahan dari metode ini adalah akurasi penimbangan setelah perendaman, mengingat cairan yang menempel pada jaringan mungkin berpengaruh terhadap berat penimbangan tersebut. Selain itu, untuk keperluan pengukuran dibutuhkan jumlah sampel yang cukup banyak sehingga menyulitkan jika jumlah sampelnya sedikit.

#### 4. Metode Imersi Uap

Metode ini juga didasarkan pada perubahan berat jaringan yang diamati, hampir sama dengan metode perendaman, tetapi jaringan tidak direndam dalam larutan, melainkan ditempatkan di dalam ruangan yang bagian bawahnya terdapat larutan NaCl baku. Larutan NaCl disiapkan dengan berbagai konsentrasi sehingga memiliki tekanan uap yang berbeda-beda. Setelah jaringan ditempatkan ke dalam *chamber* dengan NaCl hingga beberapa waktu (2-4 jam) akan terjadi keseimbangan antara jaringan dengan *chamber*. Semakin rendah tekanan uap larutan NaCl dari *chamber* akan menyebabkan penguapan jaringan sehingga beratnya menurun. Sebaliknya, semakin tinggi tekanan uap larutan NaCl akan menyebabkan uap air masuk ke dalam jaringan sehingga semakin berat. Konsentrasi yang tidak menyebabkan perubahan berat adalah yang sama dengan potensial air jaringan.

Kelebihan metode ini dari metode perendaman adalah tidak adanya kontak langsung jaringan dengan larutan, dan penimbangan kedua relatif lebih akurat. Namun, kelemahannya masih sama dengan metode perendaman karena memerlukan jumlah sampel yang cukup banyak.

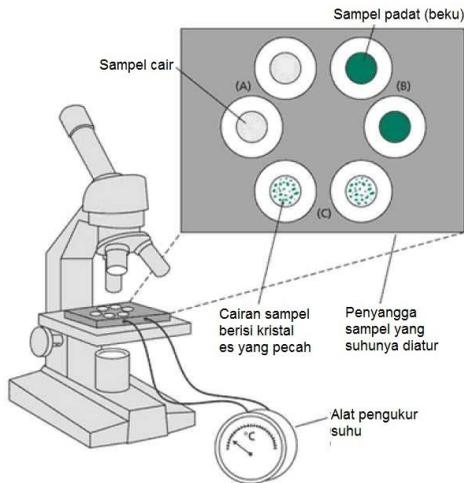
#### 5. Metode *Osmometer Cryoscopic*

Metode ini lebih tepatnya digunakan untuk mengukur potensial osmotik dari cairan di dalam jaringan. Cara kerja metode ini didasarkan pada perubahan titik beku cairan. Titik beku air murni adalah 0°C. Jika ada linarut yang ditambahkan ke dalam air murni, misalnya gula sukrosa maka larutan tersebut memiliki titik beku yang lebih rendah sejalan dengan konsentrasi linarutnya. Sebagai contoh, larutan yang mengandung 1 mol linarut per kg air akan memiliki nilai titik beku pada suhu -1.86°C. Dengan membandingkan perubahan penurunan titik beku tersebut dengan larutan standar yang diketahui potensial osmotiknya maka potensial osmotik dari larutan sampel dapat dihitung.

Apabila menggunakan metode ini, larutan sampel sebanyak 1 nano liter dapat diukur sehingga memungkinkan pengukuran cairan suatu sel. Dalam pengukuran biasanya digunakan wadah kecil dari pelat perak yang diisi dengan minyak, guna menghindari penguapan. Setelah cairan sampel dimasukkan kemudian suhu diturunkan dengan cepat hingga  $-30^{\circ}\text{C}$  sehingga menyebabkan cairan sampel menjadi beku. Setelah itu, suhu dinaikkan secara perlahan-lahan dan titik leleh dari cairan sampel diamati dengan menggunakan mikroskop. Jika Kristal es dari sampel terakhir meleleh maka suhu dicatat sebagai titik beku cairan (Gambar 1.15). Nilai potensial osmotik dihitung berdasarkan rumus:

$$\Psi_s = C_sRT$$

Di mana  $C_s$  adalah konsentrasi larutan,  $R$  adalah konstanta gas, dan  $T$  adalah suhu dalam  $^{\circ}\text{K}$ .



Sumber: *Plant Physiology Online*

Gambar 1.15

Ilustrasi pengukuran potensial osmotik larutan sel dengan menggunakan metode *Osmometer Cryoscopic*, yaitu dengan berdasarkan pengukuran titik beku dari larutan sampel.



## LATIHAN

---

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Jelaskan peran dan fungsi utama dari air bagi tumbuhan!
- 2) Apa yang mendasari bahwa air memiliki sifat yang unik sehingga dapat menstabilkan suhu tumbuhan?
- 3) Jelaskan mekanisme difusi dan osmosis di dalam sel tumbuhan!
- 4) Jelaskan konsep dasar tentang potensial air tumbuhan dan bagaimana pergerakan air itu terjadi di dalam tubuh tumbuhan!
- 5) Mengapa biji yang kering memiliki potensial matriks yang tinggi?
- 6) Apa yang terjadi apabila aberasi pantai terus berjalan hingga areal pertanian tergenang dengan air laut?

### *Petunjuk Jawaban Latihan*

- 1) Untuk menjawab pertanyaan ini Anda perlu menjelaskan peran dan fungsi air bagi tumbuhan, baik yang berkaitan dengan peran air secara fisika maupun biokimia. Selain itu, juga perannya dalam menjaga keberlangsungan hidup tumbuhan dalam jangka waktu yang lama.
- 2) Untuk menjawab ini, coba Anda jelaskan dulu sifat-sifat air secara umum, kemudian coba Anda jelaskan sifat-sifat air yang berbeda dengan senyawa lain sejenis, khususnya berkaitan dengan suhu tumbuhan.
- 3) Untuk menjawab ini, Anda perlu mengingat kembali peran air sebagai senyawa pelarut dan hubungannya dengan sel tumbuhan yang memiliki membran yang banyak.
- 4) Coba Anda jelaskan terlebih dahulu tentang konsep potensial air! Setelah itu coba Anda terapkan konsep potensial air pada sel dan jaringan tumbuhan yang berdekatan sehingga dapat menjelaskan tentang pergerakan air!
- 5) Terlebih dahulu Anda perlu menjelaskan apa yang dimaksud dengan potensial matriks! Setelah itu, coba Anda membayangkan tentang biji kering yang di dalamnya terdiri dari kumpulan sel-sel dan bandingkan dengan sel-sel umbi kentang dengan vakuolanya yang besar!

- 6) Untuk menjawab soal ini Anda perlu mengingat kembali konsep potensial air tumbuhan dan larutan dengan potensial solut yang rendah, seperti air laut.



## RANGKUMAN

---

Air merupakan suatu senyawa yang sangat penting bagi tumbuhan karena memiliki sifat yang unik. Susunan atom di dalam molekul air menjadikan air bersifat polar (berkutub), yaitu di bagian hidrogen bersifat agak positif dan di bagian oksigen bersifat agak negatif. Salah satu hal yang penting dari sifat polaritas air adalah kemampuannya untuk membentuk ikatan hidrogen dengan sesamanya maupun dengan molekul lain. Inilah yang menyebabkan air memiliki sifat kohesi (berikatan kuat dengan sesamanya) dan adhesi (kemampuan berikatan dengan senyawa lain). Air juga memiliki karakteristik unik dibandingkan dengan senyawa lain sejenis khususnya terkait dengan suhu lingkungan karena dalam suhu normal air berupa benda cair yang memiliki panas jenis dan panas penguapan yang tinggi. Hal ini pulalah yang menyebabkan air memiliki peran besar dalam sel dan jaringan tumbuhan, seperti dalam proses transpor, translokasi, maupun sebagai stabilisator suhu tumbuhan.

Air memiliki peran yang sentral dalam tubuh tumbuhan, baik secara fisik maupun secara kimiawi. Selain sebagai penyusun protoplasma tumbuhan, air merupakan pelarut yang baik bagi hara mineral sehingga sangat membantu penyerapan hara tanaman. Selain itu, air juga berperan langsung dalam metabolisme tumbuhan atau sebagai medium reaksi-reaksi metabolisme tumbuhan. Yang tidak kalah pentingnya, air merupakan bahan yang penting dalam pembesaran dan pemanjangan sel serta proses pergerakan struktur tumbuhan, seperti membuka dan menutupnya stomata, pergerakan daun, pembukaan bunga, dan sebagainya.

Air dan senyawa terlarut di dalam sel dan tubuh tumbuhan saling dipertukarkan baik melalui proses difusi biasa maupun melalui membran selektif (membran semipermeabel) atau yang dikenal sebagai osmosis. Dalam sel dan jaringan tumbuhan air bergerak mengikuti gradien potensial kimia atau dikenal dengan potensial air. Potensial air jaringan tumbuhan ( $\Psi_w$ ) merupakan perpaduan antara potensial solut (osmotik) ( $\Psi_s$ ) yang terjadi akibat adanya senyawa terlarut, potensial tekanan ( $\Psi_p$ ), yaitu potensial yang terjadi karena adanya tekanan dinding sel, potensial gravitasi ( $\Psi_g$ ) akibat adanya gaya gravitasi dan potensial matriks ( $\Psi_m$ ) akibat matriks penyusun dinding sel dan membran.

Meskipun demikian, secara umum yang dominan adalah potensial tekanan dan potensial osmotik sehingga nilai potensial air ( $\Psi_w$ ) =  $\Psi_s$  +  $\Psi_p$ . Besarnya potensial air akan menentukan status air tumbuhan terhadap lingkungannya. Beberapa metode pengukuran potensial air dan potensial osmotik yang biasa digunakan adalah metode ruang tekan (*pressure chamber*), metode equilibrasi uap (*thermocouple psychrometer*), metode perendaman, metode imersi uap, dan metode *osmometer cryoscopic*.



### TES FORMATIF 1 \_\_\_\_\_

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Berikut ini adalah beberapa fungsi air yang sangat penting bagi tumbuhan, *kecuali* ....
  - A. sebagai sumber pupuk
  - B. pelarut
  - C. medium reaksi metabolisme
  - D. berperan dalam gerak dari organ
  
- 2) Ketika tumbuhan layu akibat kekurangan air maka tekanan turgor tumbuhan bernilai ....
  - A. positif
  - B. nol
  - C. negatif
  - D. lebih besar dari 1
  
- 3) Molekul air merupakan molekul yang bersifat ....
  - A. nonpolar sehingga dapat masuk ke dalam sel
  - B. polar artinya tidak mengandung muatan pada atom-atom penyusunnya
  - C. nonpolar artinya mengandung muatan di bagian atom-atomnya
  - D. polar sehingga dapat berikatan dengan molekul-molekul lain yang sejenis
  
- 4) Dalam suatu cairan, antara molekul air yang satu dengan yang lain terhubung dengan ....
  - A. ikatan ion
  - B. ikatan peptida
  - C. ikatan hidrogen
  - D. ikatan kovalen

- 5) Antara atom H-O-H dalam molekul air membentuk formasi ....
- garis lurus
  - membentuk sudut siku-siku
  - tak beraturan
  - membentuk sudut  $105^\circ$
- 6) Air memiliki tegangan permukaan yang tinggi, hal ini didukung oleh karakteristik air, yaitu ....
- kohesi
  - adhesi
  - suhu yang rendah
  - titik beku = 0
- 7) Fungsi air yang penting dalam kaitannya dengan kemampuan tumbuhan dalam bertahan menghadapi lingkungan dengan cahaya yang tinggi adalah ....
- air sebagai pelarut
  - panas penguapan yang tinggi
  - titik didih yang tinggi
  - kohesi
- 8) Nilai potensial osmotik suatu sel/jaringan ditentukan oleh adanya ....
- dinding sel yang kaku
  - matriks komponen-komponen sel
  - membran sel yang elastik
  - senyawa-senyawa terlarut dalam sel
- 9) Keadaan berikut ini yang memungkinkan masuknya air ke dalam sel tumbuhan dengan mudah adalah ....
- $\Psi_s$  larutan = -0.12 MPa dan  $\Psi_s$  sel tumbuhan = -0.21 MPa
  - $\Psi_s$  larutan = -0.21 MPa dan  $\Psi_s$  sel tumbuhan = -0.12 MPa
  - $\Psi_s$  larutan = -0.19 MPa dan  $\Psi_s$  sel tumbuhan = -0.09 MPa
  - $\Psi_s$  larutan = -0.19 MPa dan  $\Psi_s$  sel tumbuhan = -0.21 MPa
- 10) Pengukuran potensial air jaringan tumbuhan di lapangan paling mudah dan efektif dilakukan dengan metode ....
- perendaman
  - cryoscopy*
  - pressure chamber*
  - equilibrasi uap*

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 1 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 1.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali

80 - 89% = baik

70 - 79% = cukup

< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan Kegiatan Belajar 2. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 1, terutama bagian yang belum dikuasai.

## KEGIATAN BELAJAR 2

## Proses Penyerapan Air pada Tumbuhan dan Proses Transpirasi

### A. PERGERAKAN AIR DALAM TUMBUHAN

Telah lama diketahui bahwa air memiliki peran yang penting bagi pertumbuhan dan produksi tanaman. Walaupun demikian mekanisme pergerakan air di dalam tumbuhan baru secara jelas diungkap menjelang akhir abad ke-19. Sebelum itu, para ilmuwan masih beranggapan bahwa pergerakan air di dalam tubuh tumbuhan melibatkan peran langsung elemen biologi sebagaimana layaknya peredaran cairan dan darah di dalam tubuh hewan dan manusia. Baru selepas tahun 1989, Eduard Strasburger berhasil membuktikan bahwa pergerakan air di dalam tumbuhan murni terjadi karena karakteristik fisik dari jaringan tumbuhan, yaitu dengan melakukan percobaan menggunakan cairan yang membunuh seluruh sel dan jaringan tumbuhan mulai dari batang hingga daun. Namun, walaupun sel-sel menjadi mati, cairan masih tetap dapat diserap tumbuhan hingga beberapa minggu. Sejak itulah perhatian ilmuwan terkait dengan pergerakan air lebih diarahkan pada aspek-aspek fisik dari air dan jaringan tumbuhan.

Pergerakan air dari akar ke bagian paling tinggi dari daun tumbuhan merupakan suatu yang menakjubkan karena air harus bergerak melawan gaya gravitasi yang cukup tinggi. Coba Anda bayangkan, ada tumbuhan yang tingginya mencapai lebih dari 100 m, seperti tumbuhan *kayu merah/redwood (Sequoia Sempervirens)* di Amerika (Gambar 1.16). Kalau pompa air kita hanya mampu menarik air hingga kedalaman 10-12 m dan menaikannya hingga ketinggian 14 meter maka pompa dengan daya 350 watt tersebut hanya mampu menaikkan air 24-26 m dengan energi listrik yang besar. Bagaimana dengan pohon yang tinggi? Berapa energi yang dibutuhkanannya? Inilah pertanyaan-pertanyaan yang menarik untuk dipelajari.

Di sisi lain, pergerakan air di dalam tubuh tumbuhan ibarat migrasi air dari tanah ke udara melewati sistem perakaran tumbuhan, lalu sepanjang jaringan xylem yang ada di batang, kemudian menuju daun, dan akhirnya dilepas ke udara melalui stomata. Sebagaimana pada Kegiatan Belajar 1 disebutkan bahwa air yang masuk ke tubuh tumbuhan lebih dari 95% akan

dilepas ke udara dalam bentuk transpirasi dan hanya kurang dari 5% yang terlibat langsung dalam berbagai proses fisiologis dan metabolisme. Tidak heran kalau transpirasi memiliki arti yang penting bagi kehidupan tumbuhan, karena selain menjadi sarana untuk menjaga keseimbangan suhu tubuh tumbuhan, transpirasi juga merupakan bentuk transaksi tumbuhan untuk menyerap gas CO<sub>2</sub> dari udara, bahkan juga menjadi penggerak yang sangat efektif dalam penyerapan hara tumbuhan. Pada Kegiatan Belajar 2 ini akan dibahas lebih banyak aspek pergerakan air di dalam tubuh tumbuhan termasuk aspek-aspek yang berkaitan dengan transpirasi tumbuhan. Namun, sebelum kita mengungkap perjalanan air secara utuh di dalam tumbuhan, terlebih dahulu kita perhatikan kaidah umum pergerakan air dalam sel dan jaringan sebagaimana telah dibahas pada kegiatan belajar sebelumnya.



Sumber: *Monumental Trees*, (2014)

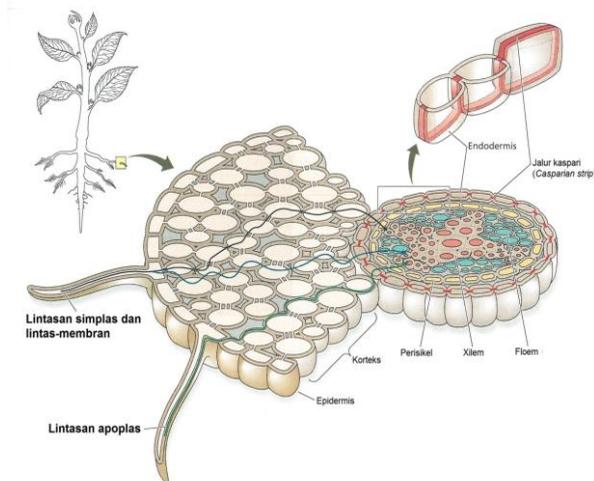
Gambar 1.16  
Tumbuhan raksasa, kayu merah (redwoods) yang tumbuh di Amerika  
(*Sequoia Sempervirens*) tingginya mencapai 112 m.

### 1. Pergerakan Air Masuk ke Dalam Akar Tumbuhan

Secara umum, air bergerak di dalam jaringan karena adanya perbedaan (gradien) tekanan, baik gradien potensial air, gradien tekanan hidrostatik, maupun karena gradien tekanan uap. Gradien potensial air biasanya terjadi apabila air melewati membran sel, seperti dari tanah/media ke dalam sel akar atau dari sel-sel yang satu ke sel-sel lainnya. Gradien tekanan hidrostatik

terjadi manakala air bergerak tanpa melalui membran sel, misalnya di dalam pembuluh xilem, yaitu dari xilem akar ke xilem batang dan kemudian ke xylem daun. Adapun gradien tekanan uap biasa terjadi di stomata daun di mana air berubah dari bentuk cairan menjadi uap. Dengan demikian, dalam sistem tumbuhan yang utuh ketiga jenis gradien ini terjadi dan saling sambung-menyambung.

Di dalam sel-sel akar, air harus masuk mulai dari sel-sel epidermis akar, melewati korteks akar hingga ke jaringan pembuluh (xilem akar). Gambar penampang melintang akar menunjukkan bahwa dari luar hingga ke dalam, jaringan akar terdiri dari epidermis, korteks, endodermis, dan silinder pusat. Silinder pusat terdiri dari jaringan xilem dan floem dalam posisi yang berselang dengan pusatnya adalah jaringan pengangkut xilem (Gambar 1.17). Dengan demikian, air yang masuk ke dalam akar tumbuhan harus melewati epidermis, korteks, dan endodermis akar sehingga dapat mencapai xilem.



Sumber: Taiz dan Zeiger, (2010)

Gambar 1.17

Jalur masuknya air ke dalam jaringan akar tumbuhan mungkin melewati ruang-ruang antarsel (*lintasan apoplas*) atau langsung masuk ke dalam sel (*lintasan simplas*)

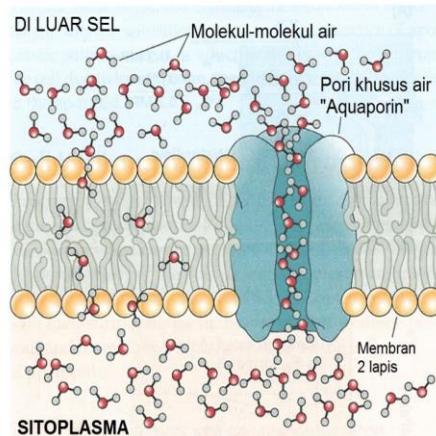
Pergerakan air dari tanah ke dalam akar bisa terjadi melalui dua mekanisme, yaitu (1) air masuk melalui ruang-ruang antarsel atau dikenal dengan *lintasan apoplas* dan (2) air masuk ke dalam sel epidermis akar, kemudian bergerak dari sel ke sel di dalam jaringan korteks melalui benang-benang plasmodesmata; mekanisme ini dikenal dengan *lintasan simplas* (Gambar 1.17). Kedua mekanisme ini bisa sama-sama terjadi selama masih dalam jaringan korteks akar. Namun, ketika sampai pada jaringan endodermis, air dan garam mineral tidak lagi dapat melewati ruang-ruang antarsel (*lintasan apoplas*) karena pada jaringan endodermis terdapat jalur kaspari (Gambar 1.17). Jalur kaspari atau yang juga disebut pita kaspari (*casparian strip*) adalah penebalan dinding sel yang mengandung suberin pada endodermis pada posisi radial. Adanya garis kaspari menyebabkan air dan mineral yang masuk melalui jalur apoplas menjadi terputus. Dengan demikian, ketika sampai pada jaringan endodermis, air hanya bergerak melalui lintasan simplas, yaitu masuk ke dalam sel dan bukan lagi melalui ruang-ruang antarsel. Adanya jaringan yang bersuberin ini, terutama pada jaringan endodermis akar yang sudah tidak mengalami pertumbuhan (daerah diferensiasi), sedangkan pada jaringan endodermis akar yang masih muda (beberapa mm di dekat ujung akar) belum terbentuk suberin.

Setelah melewati endodermis, air dan mineral akan sampai di jaringan pembuluh xilem akar. Xilem adalah jaringan yang tersusun oleh sel-sel yang mati yang berperan, seperti pipa-pipa kapiler yang banyak. Melalui jaringan xilem inilah air akan diangkut ke bagian atas tumbuhan, yaitu ke batang dan daun. Inilah salah satu kelebihan dari tumbuh-tumbuhan tinggi berpembuluh yang mampu mengantarkan air dari dalam tanah melalui jaringan pembuluh yang ada di akar hingga ke daun. Sistem pembuluh ini relatif sama antara tumbuhan yang kecil (tumbuhan herba) hingga tumbuhan berkayu yang ada di hutan. Yang membedakan hanyalah letak penyebaran pembuluh yang lebih spesifik antara tumbuhan dikotil dan monokotil.

Yang menjadi pertanyaan kemudian adalah bagaimana air dapat naik ke atas/puncak pohon yang tinggi seperti yang terjadi pada pohon *Sequoia sempervirens* yang tingginya hingga 112 m tersebut (Gambar 1.16). Percobaan-percobaan mengenai hal ini telah banyak dilakukan guna mengungkap rahasia naiknya air dari akar ke daun tumbuhan yang tinggi, sebagaimana akan dijelaskan kemudian.

Walaupun telah diketahui bahwa air masuk ke dalam sel tumbuhan melalui osmosis biasa, namun pergerakan air ke dalam sel akar tumbuhan

diyakini juga terjadi melalui cara yang lain agar air dapat masuk lebih cepat. Pada beberapa dekade terakhir ini telah diketahui bahwa ada protein saluran (*channel protein*) yang berfungsi khusus untuk melalukan air ke dalam sel akar. Protein saluran ini dikenal dengan istilah aquaporin. Sesuai dengan namanya protein ini ada pada membran akar dengan membentuk semacam pori/saluran yang khusus untuk lewatnya air. Dengan adanya aquaporin ini memungkinkan air bergerak lebih cepat jika dibandingkan dengan hanya melalui proses osmosis biasa, yaitu melewati dua lapisan lipid membran (perhatikan Gambar 1.18).



Gambar 1.18

Aquaporin, suatu protein yang terdapat pada membran akar yang dapat menjadi saluran khusus bagi masuknya air ke dalam sel akar tumbuhan. Adanya aquaporin memungkinkan air bergerak lebih cepat dibandingkan dengan osmosis biasa.

## 2. Pergerakan Air dari Akar ke Puncak Pohon yang Tinggi

Banyak ilmuwan yang mencoba mengungkap mekanisme apa yang menjadi penggerak utama naiknya air di dalam tubuh tumbuhan. Pertanyaan ini terlihat sederhana. Namun, kalau direnungkan secara mendalam pertanyaan ini cukup sulit untuk dijawab mengingat pergerakan air di dalam tumbuhan tersebut cukup besar. Sebagaimana catatan dari E. C. Miller di dalam buku teks klasik *Fisiologi Tumbuhan* yang dikutip oleh Hopkins dan Huner (2009) dikatakan bahwa satu tanaman jagung bisa melepaskan air ke

udara setara dengan 200 L sepanjang hidupnya. Apalagi pohon yang besar dan tinggi, seperti pohon-pohonan yang hidup di hutan alam. Tentunya akan jauh lebih besar lagi sehingga pertanyaan tersebut cukup dalam.

Hingga saat ini ada beberapa teori yang dikemukakan untuk menjelaskan proses pergerakan air ke puncak pohon, yang meliputi:

- a. Teori kapilaritas.
- b. Teori tekanan akar.
- c. Teori tegangan-koheksi atau juga dikenal dengan tarikan transpirasi.

#### a. *Teori Kapilaritas*

Kapilaritas merupakan salah satu fenomena yang terjadi di mana air dapat merambat ke atas manakala berada di dalam suatu kolom kapiler dengan diameter kecil (kurang dari 1 mm). Sebagaimana dijelaskan pada Kegiatan Belajar 1 (Gambar 1.5), kapilaritas terjadi karena adanya gaya adhesi antara air dengan molekul penyusun pipa kapiler. Dengan memandang bahwa xilem tumbuhan merupakan kolom-kolom kapiler yang sangat kecil maka memungkinkan terjadinya rambatan tersebut sehingga air dapat naik ke puncak pohon. Xilem merupakan suatu jaringan yang sel-selnya telah mati (Gambar 1.19) yang terdiri dari sel-sel trakeid dan elemen tabung. Sambung menyambung dari sel-sel ini ibarat kolom-kolom kapiler yang sangat panjang.

Peningkatan air karena kapilaritas sebenarnya dipengaruhi oleh beberapa gaya yang bekerja bersama, yaitu adhesi antara air dan dinding pipa kapiler, tegangan permukaan akibat koheksi dari molekul-molekul air, dan gaya grafitasi yang bekerja di dalam kolom kapiler. Nilai peningkatan air di dalam pipa kapiler dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

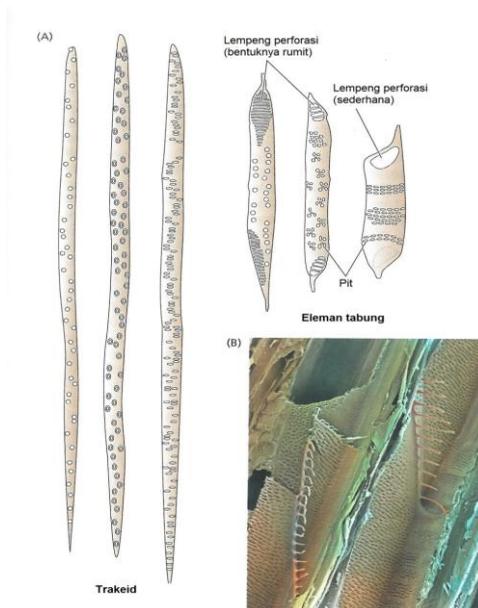
$$h = 1.49 \times 10^{-5} \text{ m}^2/r \text{ m}$$

di mana  $r$  adalah jari-jari dari pipa kapiler.

Dengan demikian, kenaikan air di dalam pipa kapiler berbanding terbalik dengan diameter dari pipa kapiler. Semakin kecil pipa kapiler akan semakin tinggi kenaikan air di dalam kolom, sebaliknya semakin besar pipa kapiler maka kemampuan air untuk meningkat di kolom kapiler akan semakin rendah. Untuk jaringan xilem yang berupa trakeid yang besar dengan rata-rata jari-jari antara 25  $\mu\text{m}$  maka kemampuan peningkatan air adalah setinggi 0.6 m. Sedangkan tabung xilem (yang berukuran besar) dengan jari-jari 200

$\mu\text{m}$  hanya mampu menaikkan air hingga 0,08 m. Dengan hanya memperhatikan sifat kapilaritas maka diperkirakan air hanya dapat naik di dalam tubuh tumbuhan lebih kurang 75 cm. Jika demikian, bagaimana dengan pergerakan air di alam tubuh pohon yang tinggi? Sebagaimana kita ketahui, pohon-pohonan yang tinggi pun mampu menyerap air dan mendistribusikannya hingga ke daun pucuk.

Dengan melihat fenomena tersebut maka kapilaritas saja dipandang tidak cukup untuk menaikkan air hingga puncak pohon yang tinggi sehingga kapilaritas hanya memiliki kontribusi yang kecil dalam proses pergerakan air dalam sistem tumbuhan. Ada faktor lain selain kapilaritas yang dapat mendukung pergerakan air di dalam tubuh tumbuhan.



Sumber: Taiz dan Zeiger, (2010)

Gambar 1.19

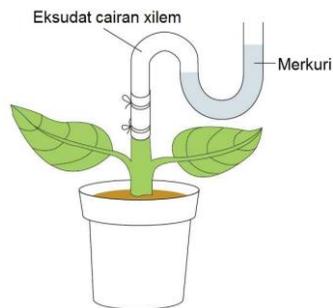
Penampang melintang jaringan xylem, (a) bagian-bagian dari xylem yang berupa trakeid dan tabung xylem, (b) gambar pengamatan xylem dengan mikroskop elektron

b. *Teori Tekanan Akar*

Teori lain yang mencoba menjelaskan sistem pergerakan air dalam tubuh tumbuhan adalah teori tekanan akar. Teori ini didasarkan pada kenyataan bahwa di dalam sel-sel akar terdapat zat-zat terlarut (khususnya garam-garam mineral) yang mengakibatkan penurunan potensial air akar. Akibat rendahnya potensial air dari akar maka air tanah akan diserap masuk ke dalam akar dan menimbulkan tekanan hidrostatik pada akar sehingga dapat menekan pergerakan air ke batang sampai ke daun.

Teori tekanan akar ini juga didukung oleh adanya percobaan di lapangan yang membuktikan adanya tekanan akar. Percobaan yang pertama adalah terjadinya gejala gutasi, yaitu keluarnya butiran air dari pinggiran daun beberapa jenis tumbuhan pada malam atau pagi hari ketika tumbuhan mendapat cukup air (Gambar 1.20a). Gutasi terjadi karena pada malam hari tidak terjadi transpirasi sehingga dalam keadaan air yang cukup, tumbuhan akan memiliki tekanan turgor yang tinggi. Akibatnya, air akan keluar melalui suatu celah yang disebut hidatoda. Hidatoda merupakan suatu celah pada daun, berupa struktur modifikasi dari stomata yang kehilangan fungsinya sehingga tidak bisa menutup.

Percobaan pengukuran tekanan akar dapat dilakukan dengan manometer. Tumbuhan yang diairi dengan cukup dihubungkan dengan selang kaca yang tersambung dengan cairan merkuri (Gambar 1.20b). Cairan batang akan keluar dari luka bekas potongan dan menekan selang pipa yang berisi merkuri tersebut. Besarnya tekanan akar bisa ditetapkan berdasarkan tinggi merkuri akibat tekanan cairan tersebut. Fenomena ini memberikan bukti adanya tekanan yang berasal dari akar tumbuhan sehingga air dapat naik dari akar ke batang tumbuhan.



Gambar 1.20  
Fenomena terjadinya gutasi pada tumbuhan yang membuktikan adanya

tekanan akar, (a) tampak butiran-butiran air di pinggir daun, dan (b) percobaan pembuktian adanya tekanan akar dengan manometer: tumbuhan yang mendapat cukup air dipotong batangnya lalu dihubungkan dengan pipa plastik maka tekanan bisa diukur berdasarkan tinggi merkuri.

Meskipun bukti adanya tekanan akar telah diketahui, namun fenomena ini tidak dapat memberi penjelasan yang cukup akan peran tekanan akar dalam menaikkan air pada pohon yang tinggi. Selain itu, dalam keadaan air tanah yang rendah, seperti tanah yang kering atau tanah yang sedikit asin (bergaram) maka tekanan akar saja akan sulit untuk dapat menaikkan air ke daun. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa tekanan akar bukan merupakan faktor dominan yang menggerakkan air dari akar hingga ke daun tumbuhan.

### c. *Teori Tegangan-Kohesi (Teori Tarikan Transpirasi)*

Teori ini didasari atas sifat fisika dan kimia air yang mampu berikatan sesamanya (kohesi) sehingga ketika diregang (ditarik) dengan kekuatan yang tinggi sekalipun maka kolom air tetap tidak terputus (ingat kembali Gambar 1.4 pada Kegiatan Belajar sebelumnya). Ketika terjadi transpirasi maka hilangnya (menguapnya) air pada permukaan dalam stomata menyebabkan air ditarik dari dalam sel-sel mesofil dan pembuluh daun. Karena adanya daya kohesi air maka kolom air pada pembuluh daun akan menarik air yang masih ada di dalam pembuluh batang, demikian juga seterusnya akan menarik air yang ada di dalam pembuluh akar sehingga terjadi sambung-menyambung kolom air yang tidak terputus mulai dari daun hingga ke akar akan terus bergerak dari akar ke daun. Ikatan air ini juga akan terus bersambung dengan air yang ada di dalam tanah. Teori ini didasarkan bahwa akibat terjadinya transpirasi akan timbul tegangan air (tekanan yang bersifat negatif) di daun. Selanjutnya, karena daya kohesi air maka tegangan dari daun akan dialirkan melalui sistem hidrodinamik ke batang hingga ke akar. Bahkan untuk pohon yang tinggi 100 m perbedaan tegangan dalam xylem diperkirakan hingga mencapai 2 MPa, suatu tegangan yang cukup besar.

Dengan kata lain, yang menyebabkan terjadinya pergerakan air dari akar ke daun adalah karena adanya tarikan transpirasi (penguapan air) melalui stomata daun tumbuhan. Akibat adanya transpirasi maka molekul-molekul air di bagian dalam sel-sel mesofil yang berbatasan dengan rongga dalam stomata akan ditarik ke rongga dalam stomata sehingga menimbulkan

tegangan. Oleh sifat kohesi air, tegangan akan dilanjutkan ke batang sampai ke akar tumbuhan sehingga air bergerak dalam bentuk kolom-kolom yang tidak terputus yang dihubungkan oleh ikatan hidrogen antarmolekul air (sifat kohesi air).

Hingga saat ini teori kohesi atau dikenal juga teori tarikan transpirasi ini sebagai konsep dasar utama yang menentukan pergerakan air di dalam xilem. Walaupun teori kapilaritas dan teori tekanan akar juga ikut berperan dalam proses pergerakan air ini, namun teori kohesi dipandang memiliki peran yang jauh lebih besar dari pada kedua teori lainnya.

Untuk mempelajari pergerakan air ini, Anda dapat melakukan percobaan sendiri dengan menggunakan tanaman kedelai, kacang tanah atau jagung. Tanamlah biji tanaman tersebut di dalam pot berdiameter 10 cm dengan jumlah tanah yang sama. Selanjutnya, sirami dan pelihara dengan baik hingga berumur 3 minggu. Pilihlah dua pot yang berisi tanaman dengan ukuran yang sama. Berilah air yang cukup kedua pot tanaman tersebut dan timbanglah. Usahakan kedua pot diairi dengan jumlah yang sama sehingga bobot kedua pot tersebut sama, kemudian tutuplah permukaan tanah dari pot dengan plastik untuk mengurangi evaporasi. Selanjutnya, taruhlah pot-1 di dalam ruangan yang beratap (tidak terkena sinar matahari langsung), sedangkan pot-2 ditempatkan di tempat yang terbuka dan terkena sinar matahari langsung. Biarkan di tempat tersebut selama 2 hari, setelah itu timbanglah kedua pot tersebut kembali. Anda tentukan mana pot yang kehilangan banyak air (timbangannya lebih ringan)? Mengapa hal itu terjadi?

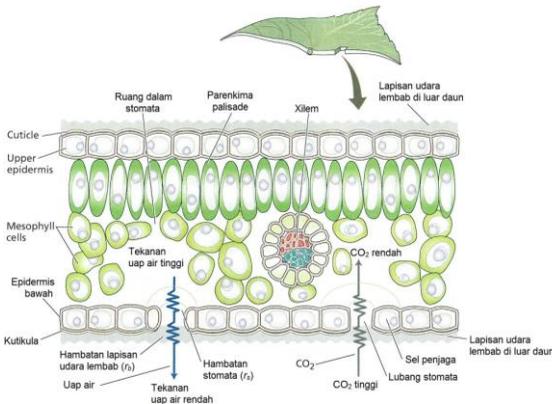
## **B. MEMBUKA DAN MENUTUPNYA STOMATA SEBAGAI PENGATURAN AIR TUMBUHAN**

### **1. Stomata sebagai Gerbang Keluarnya Air dan Pertukaran Gas**

Stomata daun adalah ibarat pintu gerbang bagi keluarnya air dari daun tumbuhan ke atmosfer (transpirasi). Air berdifusi keluar stomata pada saat stomata membuka karena perbedaan tekanan uap air antara atmosfer (tekanan uap air rendah) dengan ruang dalam stomata (tekanan uap air tinggi) (Gambar 1.21). Stomata tumbuhan umumnya lebih banyak terdapat di daun bagian bawah (*abaksial*), sedangkan permukaan daun bagian atas (*adaksial*) jumlah stomatanya relatif sedikit. Kondisi alamiah yang sedemikian ini juga

terkait dengan daya adaptasi tumbuhan terhadap lingkungan yang secara umum lebih kering.

Meskipun demikian, keluarnya air dari stomata (transpirasi) ditentukan diantaranya oleh dua hambatan (resistensi), yaitu hambatan stomata ( $r_s$ ) atau dikenal juga dengan hambatan dalam yang besarnya ditentukan oleh membuka dan menutupnya stomata dan hambatan akibat adanya lapisan udara lembab di luar daun (*boundary layer*) atau yang dikenal dengan hambatan luar (disingkat  $r_b$ ) (Gambar 1.21). Hambatan stomata ditentukan oleh tingkat pembukaan stomata daun, yang faktor penentunya akan dibahas kemudian. Hambatan luar ditentukan oleh adanya lapisan uap air yang ada di seputar daun. Hambatan luar ini biasanya akan kecil atau hilang apabila ada udara yang bergerak (angin) yang mempercepat difusi uap air dari permukaan daun ke udara sekitar. Semakin banyak angin maka akan semakin cepat terjadinya pergantian lapisan uap air yang ada di bagian luar daun sehingga dapat memacu atau mempercepat laju difusi uap air dari bagian dalam stomata ke luar sehingga berimplikasi terhadap peningkatan laju transpirasi. Penjelasan terkait hal ini akan dibahas pada bagian transpirasi.



Sumber: Taiz dan Zeiger, (2010)

Gambar 1.21

Skema penampang melintang daun dengan memperlihatkan stomata, transpirasi (Keluarnya air dari daun), dan pergerakan gas  $\text{CO}_2$  ke dalam daun, serta hambatan dalam stomata dan hambatan akibat adanya udara lembab di luar daun (*boundary layer*) akibat lapisan uap air yang meliputi permukaan daun.

Kalau dilihat dari sisi keluarnya air dari tumbuhan, transpirasi seakan-akan hanya membuang-buang sumber daya. Namun dibalik itu, saat tumbuhan membuka stomatanya yang berakibat terjadinya transpirasi maka pada saat yang bersamaan tumbuhan juga melakukan pengikatan  $\text{CO}_2$  dari udara untuk kebutuhan fotosintesis sehingga lepasnya air dan masuknya gas  $\text{CO}_2$  adalah ibarat pertukaran yang tidak bisa ditawar-tawar (*trade off*) yang harus terjadi pada tumbuhan untuk memenuhi kebutuhan akan proses tumbuh dan berkembang. Apabila tumbuhan menutup stomatanya, misalnya saat kekeringan maka akan menghadapi konsekuensi menutup masuknya gas  $\text{CO}_2$  ke dalam daun sehingga menurunkan laju fotosintesis. Itulah sebabnya mengapa defisit air (kekeringan) pada tumbuhan berefek pada penurunan laju pertumbuhan. Selain karena air dibutuhkan untuk perpanjangan (pembesaran) sel, penutupan stomata sendiri berakibat pada penurunan laju fotosintesis. Sementara itu, fotosintesis adalah proses yang menyediakan bahan baku bagi pembentukan bahan-bahan sel dan jaringan.

Dengan demikian, tumbuhan akan dihadapkan pada dilema antara tetap membuka stomata untuk mempertahankan laju fotosintesis yang tinggi atau menutup stomata karena air tanah yang terbatas. Pengaturan membuka dan menutupnya stomata ini sangat penting sehingga tumbuhan tetap dapat tumbuh dan berkembang dengan menghindari kekurangan air yang berlebihan, yaitu biasanya membuka stomatanya lebar-lebar pada pagi dan sore hari dan menutup stomatanya sebagian pada tengah hari yang panas.

Walaupun transpirasi berperan penting bagi tumbuhan, kehilangan air yang berlebihan dari tubuh tumbuhan akan mengganggu proses-proses fisiologi lainnya, khususnya apabila ketersediaan air cukup terbatas. Apabila besarnya transpirasi melebihi kapasitas penyerapan air oleh akar tumbuhan maka tumbuhan akan mengalami defisit air atau cekaman kekeringan (*water stress*). Hal itu mungkin terjadi pada tanah-tanah yang kering akibat curah hujan yang rendah atau tanah yang mengandung kadar garam tinggi (tanah salin). Kadar garam yang tinggi (misalnya air laut) menyebabkan potensial air menjadi sangat rendah sehingga air tidak dapat masuk (diserap) ke dalam tumbuhan.

Tumbuhan dalam menghadapi hal tersebut memiliki mekanisme untuk mengatur keluarnya air (transpirasi) dengan menutup stomata sebagian. Ketika tumbuhan layu, biasanya stomata akan menutup. Layu terjadi karena daun tumbuhan kehilangan tekanan turgor akibat kehilangan banyak air. Kelayuan merupakan salah satu bentuk strategi tumbuhan dalam mengurangi

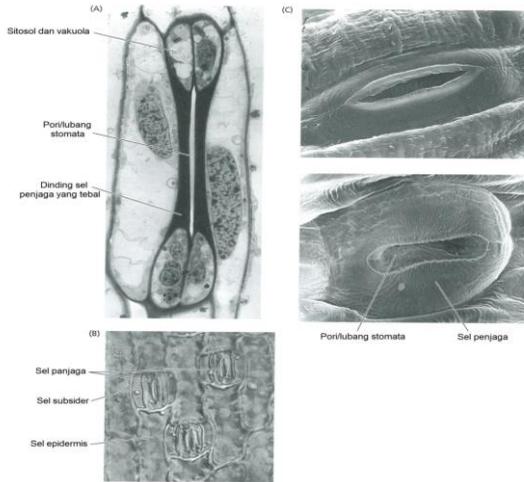
kehilangan air. Dalam keadaan air yang kurang tumbuhan biasanya layu di siang (tengah) hari, kemudian segar kembali pada sore dan pagi hari. Keadaan demikian disebut layu sementara. Kejadian layu sementara sering kita jumpai pada tanaman jagung, tebu, atau kedelai di lapangan. Kondisi tersebut merupakan bagian dari strategi tanaman dalam menjaga keseimbangan airnya. Namun, jika kekurangan air terus berlanjut, daun tumbuhan mungkin layu hingga sore, bahkan tidak dapat kembali lagi segar walaupun pagi hari. Keadaan ini disebut tumbuhan mengalami layu permanen. Kadar air tanah yang menyebabkan tumbuhan mengalami layu permanen disebut titik layu permanen.

Sebaliknya, tanah yang memiliki kandungan air terbesar yang dapat disediakan untuk tumbuhan disebut air tanah dalam keadaan kapasitas lapang. Kadar air kapasitas lapang tercapai apabila tanah kita siram dengan air yang berlebih, kemudian air yang tidak tertahan oleh tanah akibat gravitasi telah semuanya keluar. Hal ini bisa dibuat dengan menyediakan tanah dalam pot, kemudian disiram air secara berlebih. Setelah permukaan atas pot ditutup dengan plastik untuk menghindari evaporasi, selanjutnya pot tersebut disimpan di tempat teduh selama 1 hingga 2 hari untuk meyakinkan bahwa air gravitasi telah semua keluar. Kemudian jika kita ukur kadar air tanah tersebut maka itu adalah kadar air tanah dalam keadaan kapasitas lapang.

## 2. Mekanisme Membuka dan Menutupnya Stomata

Stomata merupakan bagian penting dari daun, khususnya adalah sel epidermis daun. Stomata merupakan modifikasi dari sel epidermis daun, berupa sepasang (dua buah) sel penjaga yang bisa menimbulkan celah (lubang) sehingga uap air dan gas dapat dipertukarkan antara bagian dalam dari stomata dengan lingkungan luarnya. Sel penjaga memiliki bentuk yang berbeda dari sel-sel epidermis lainnya, yaitu bentuknya lebih kecil dan agak memanjang (Gambar 1.22 dan 1.23). Umumnya sel penjaga rumput-rumputan memiliki bentuk seperti halter disertai dengan sepasang sel subsider (Gambar 1.22a dan 1.23b), dengan sitosol berada di kedua ujungnya yang terhubung oleh bagian dengan dinding sel yang tebal. Bentuk lainnya adalah seperti sepasang ginjal (Gambar 1.22c dan 1.23a). Bentuk ini biasanya tidak disertai dengan sel subsider. Kedua jenis sel penjaga tersebut biasanya memiliki penebalan dinding sel yang berbeda antara di bagian ujung dan tengahnya karena adanya benang mikrofibril dari selulosa. Bentuk yang

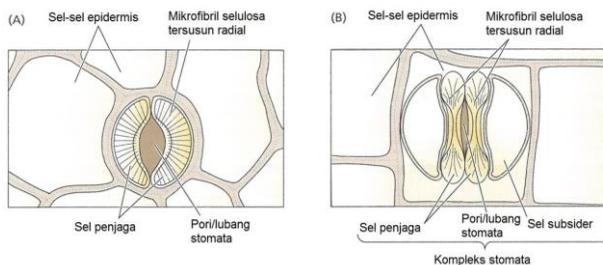
khusus inilah yang mendukung fungsi dari stomata yang bisa membuka dan menutup.



Sumber: Taiz dan Zeiger, (2010)

Gambar 1.22

Gambar mikroskop elektron beberapa jenis stomata (a) stomata pada tanaman rumput, (b) kompleks stomata dari *Carex* dan (c) stomata pada bawang bombay



Sumber: Taiz dan Zeiger, (2010)

Gambar 1.23

Stomata meliputi sel penjaga (beserta sel subsider untuk stomata rumput-rumputan) dan lubang atau celah stomata. Sel penjaga biasanya memiliki dinding yang menebal karena adanya benang mikrofibril dari selulosa

Pembukaan dan penutupan stomata digerakkan oleh keluar-masuknya air (redistribusi air) antara sel penjaga, sel subsider, dan sel-sel mesofil lainnya. Apabila air masuk ke dalam sel penjaga maka sel penjaga akan membesar. Karena sel penjaga memiliki dinding dengan penebalan yang berbeda maka pembesaran sel penjaga menyebabkan terbentuknya celah (lubang) sehingga stomata membuka. Sebaliknya, jika air keluar dari sel penjaga menuju ke sel-sel epidermis yang ada di sekitarnya maka stomata akan menutup.

Masuk dan keluarnya air dari dan ke sel penjaga biasanya diakibatkan oleh adanya distribusi ion  $K^+$  keluar/masuk sel penjaga. Ion  $K^+$  sangat berperan besar dalam proses membuka dan menutupnya stomata karena dengan masuknya ion  $K^+$  ke sel penjaga maka sel penjaga mengalami penurunan potensial osmotik ( $\Psi_s$ ). Karena potensial osmotik ( $\Psi_s$ ) sel penjaga lebih rendah dari potensial osmotik ( $\Psi_s$ ) sel-sel epidermis di sekelilingnya maka air akan masuk ke dalam sel penjaga. Sebaliknya, jika ion  $K^+$  dipompa keluar dari sel penjaga maka  $\Psi_s$  sel penjaga akan meningkat (lebih tinggi dari sel-sel epidermis) sehingga air akan keluar dari sel penjaga menuju sel-sel epidermis yang ada di sekelilingnya sehingga stomata menutup.

Apa yang mengatur keluar masuknya ion  $K^+$  ke sel penjaga? Ada beberapa faktor yang mempengaruhi membuka dan menutupnya stomata:

- a. cahaya;
- b. hormon asam absisat (ABA);
- c. konsentrasi  $CO_2$ ;
- d. stres (cekaman) lingkungan khususnya kekeringan;
- e. suhu dan kelembaban (RH) udara.

Cahaya menyebabkan pembukaan stomata, sedangkan ketidakadaan cahaya (gelap) akan menyebabkan penutupan stomata. Pengaruh positif dari cahaya terhadap pembukaan stomata bisa disebabkan karena peningkatan fotosintesis pada sel penjaga atau karena adanya respons khusus dari sel penjaga terhadap cahaya biru. Terjadinya fotosintesis sel penjaga yang disebabkan adanya cahaya menyebabkan terjadinya pemompaan aktif ion  $K^+$  dan asam malat ke dalam sel penjaga sehingga  $\Psi_s$  sel penjaga menurun dan air masuk ke dalam sel penjaga. Selain itu, pemberian cahaya biru juga mengaktifkan pemompaan ion  $K^+$  ke dalam sel penjaga melalui aktivasi pompa proton ATP-ase di membran sel dari sel penjaga. Akumulasi ion  $K^+$  bisa mencapai 400 mM atau bahkan 800mM pada saat stomata membuka, sementara saat menutup konsentrasinya hanya 100 mM. Selain  $K^+$  ion malat

juga diakumulasi dalam sel penjaga saat stomata membuka melalui metabolisme hidrolisis pati.

Hormon asam absisik (ABA) yang tinggi pada sel penjaga menyebabkan penutupan stomata. Adanya ABA menyebabkan pengaktifan protein channel dari ion  $\text{Ca}^+$  sehingga  $\text{Ca}^+$  tinggi di dalam sel penjaga. Tingginya ion  $\text{Ca}^+$  dapat menghambat masuknya ion  $\text{K}^+$  ke dalam sel penjaga. Selain itu,  $\text{Ca}^+$  yang tinggi juga dapat meningkatkan pH sel penjaga sehingga menyebabkan pemompaan keluar ion  $\text{K}^+$  dari sel penjaga yang menyebabkan potensial air sel penjaga meningkat. Akibatnya, air keluar dari sel penjaga sehingga stomata menutup.

Konsentrasi  $\text{CO}_2$  yang tinggi, khususnya di dalam rongga stomata menyebabkan stomata menutup. Belum diketahui secara jelas mekanisme apa yang mempengaruhi penutupan stomata ketika konsentrasi  $\text{CO}_2$  tinggi. Dugaan sementara adalah karena ada hubungannya dengan fotosintesis. Kadar  $\text{CO}_2$  yang tinggi memacu reduksi  $\text{CO}_2$  dalam fotosintesis menjadi tinggi sehingga penggunaan energi dari reaksi terang cukup besar. Akibatnya, terjadi kekurangan energi yang digunakan dalam pemompaan dan menjaga ion  $\text{K}^+$  di dalam sel penjaga.

Stomata juga menutup saat tumbuhan mengalami cekaman kekeringan. Hal ini terkait dengan kemampuan adaptasi tumbuhan untuk mengurangi laju kehilangan air. Penutupan stomata akibat cekaman kekeringan biasanya berhubungan dengan peningkatan kadar ABA daun. Ketika tumbuhan mengalami kekeringan, akar tumbuhan akan mengirim sinyal dengan memproduksi ABA dalam jumlah tinggi dan dikirim ke daun melalui aliran transpirasi. Tingginya ABA daun, khususnya pada stomata akan menyebabkan penutupan stomata, sebagaimana yang telah diuraikan pada bagian sebelumnya.

Suhu udara yang tinggi menyebabkan stomata daun menutup. Hal ini berkaitan dengan peningkatan laju evaporasi akibat suhu yang tinggi sehingga stomata menutup. Sebaliknya, RH yang rendah menyebabkan penutupan stomata karena RH yang rendah menjadi penggerak transpirasi yang tinggi.

## C. FAKTOR-FAKTOR INTERNAL DAN EKSTERNAL YANG MEMENGARUHI TRANSPIRASI

### 1. Pengertian Transpirasi

Transpirasi adalah proses hilangnya air dari tumbuhan melalui permukaan daun atau bagian lain dari tumbuhan. Umumnya (sebagian besar) transpirasi terjadi melalui daun. Walaupun proses transpirasi juga bisa terjadi melalui sel epidermis yang umumnya dilapisi oleh lapisan kutikula sehingga jika ini terjadi disebut sebagai transpirasi kutikular. Transpirasi kutikular mungkin terjadi saat tumbuhan menutup stomatanya, sementara cahaya matahari dan suhu udara di sekitar tumbuhan cukup tinggi. Transpirasi merupakan cara yang efektif bagi tumbuhan untuk menghilangkan energi (panas laten) sehingga tumbuhan suhunya tetap terjaga pada suhu fisiologis.

Di alam, air yang hilang melalui transpirasi dari daun bisa mencapai lebih dari 95% dari total air yang diserap oleh tumbuhan tersebut. Artinya, sebagian besar air yang diserap tumbuhan dibuang melalui proses transpirasi. Walaupun demikian, jika dilihat dari produksi bahan kering yang dihasilkan, ada tumbuhan yang relatif efisien dalam penggunaan air dibandingkan dengan jenis tumbuhan lainnya. Semakin besar air yang diuapkan (diperlukan) untuk memproduksi satu satuan (gram) bahan kering oleh tumbuhan maka semakin tidak efisien. Rasio besarnya air yang diuapkan per bahan kering yang dihasilkan tumbuhan disebut sebagai rasio transpirasi. Tumbuhan C3 memiliki rasio transpirasi lebih besar daripada tumbuhan C4 dan tumbuhan CAM. (Penjelasan akan C3, C4, dan CAM dapat Anda pelajari pada Modul 3 tentang fotosintesis). Dengan demikian, tumbuhan C4 dan CAM lebih efisien daripada tumbuhan C3 dalam penggunaan air.

Selain berperan penting dalam menjaga stabilitas suhu tumbuhan, transpirasi juga sangat penting dalam penyerapan unsur hara tanaman. Ion-ion mineral yang ada di dalam larutan tanah akan ikut bergerak bersama-sama dengan kolom-kolom air sehingga hara tersebut secara aliran masa akan mendekati akar tumbuhan dan mudah diserap oleh tumbuhan. Selain itu, larutan hara yang telah berada di dalam jaringan xilem akar juga dapat bergerak ke batang dan daun mengikuti aliran air yang ditarik oleh transpirasi. Hal ini menjadikan transpirasi berperan penting dalam transpor hara di dalam tubuh tumbuhan.

## 2. Faktor-faktor yang Memengaruhi Laju Transpirasi

Laju transpirasi biasanya dinyatakan dengan jumlah air yang diuapkan per satuan luas daun per satuan waktu atau dalam satuan liter/m<sup>2</sup> per detik atau ml/cm<sup>2</sup> per detik. Penggerak transpirasi adalah perbedaan konsentrasi uap air di ruang dalam stomata dengan konsentrasi uap air di udara bebas. Semakin tinggi perbedaan konsentrasi uap air antara kedua ruang tersebut akan semakin besar laju transpirasi. Besarnya laju transpirasi dari suatu jenis tumbuhan ditentukan oleh beberapa faktor yang secara garis besar terdiri dari:

- a. Faktor luar tumbuhan: suhu udara, kelembaban (RH), kecepatan angin, dan intensitas cahaya.
- b. Faktor dalam tumbuhan: jumlah stomata, ukuran stomata, pembukaan stomata, luas dan jumlah daun.

Suhu udara yang tinggi akan mempercepat laju transpirasi karena suhu tinggi akan menurunkan tekanan uap udara yang ada di seputar tumbuhan. Perbedaan tekanan uap air antara udara luar dengan bagian dalam stomata semakin besar akibatnya akan memacu transpirasi. Kelembaban udara juga berpengaruh besar terhadap laju transpirasi. Semakin rendah RH udara akan semakin mempercepat laju transpirasi karena uap air akan bergerak dari yang memiliki tekanan tinggi (daun) ke tekanan rendah (udara). Hal ini juga berhubungan dengan suhu udara sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya.

Angin juga memiliki peran besar dalam memacu laju transpirasi tumbuhan. Adanya angin berkaitan dengan fungsinya sebagai penghapus hambatan akibat adanya lapisan udara lembab di sekitar daun (stomata) atau yang dikenal dengan hambatan *boundary layer* ( $r_b$ ). Dengan adanya angin maka udara lembab yang ada di sekitar lubang stomata akan hilang sehingga akan semakin mempercepat laju transpirasi daun (lihat Gambar 1.24 pada percobaan Bange). Ingat, bukankah kita tahu bahwa jika kita menjemur baju maka adanya angin kencang akan mempercepat keringnya baju yang kita jemur dibandingkan kalau tidak ada angin sama sekali.

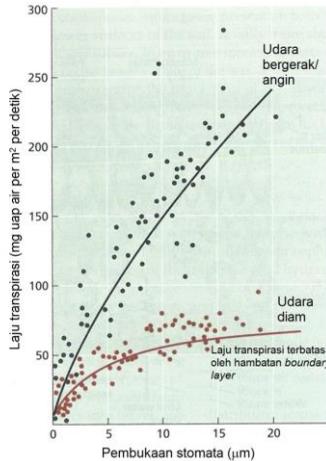
Adapun pengaruh intensitas cahaya terhadap laju transpirasi adalah terkait dengan pembukaan stomata daun. Intensitas cahaya yang tinggi akan menyebabkan stomata membuka secara maksimum. Karena stomata adalah jalan terbesar bagi transpirasi maka cahaya yang tinggi akan meningkatkan laju transpirasi daun.

Hambatan dalam tumbuhan mencirikan jenis tumbuhan. Tumbuhan dengan jumlah stomata yang banyak akan memiliki laju transpirasi per satuan luas yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan tumbuhan yang stomatanya sedikit. Stomata umumnya banyak terdapat di bagian bawah daun, daripada di bagian atas. Hal ini berkaitan dengan daya adaptasi tumbuhan untuk mengurangi laju transpirasi. Selain jumlah, ukuran stomata juga menentukan laju transpirasi. Stomata dengan ukuran yang besar memiliki laju transpirasi relatif lebih besar. Pembukaan stomata biasanya berkaitan dengan fisiologis tumbuhan. Stomata membuka dengan adanya cahaya. Stomata cenderung menutup saat tumbuhan mengalami stres (cekaman), misalnya kekurangan air, suhu yang tinggi, dan sebagainya. Ketika stomata menutup maka laju transpirasi akan menurun.

Luas dan jumlah daun menentukan besarnya laju transpirasi pada skala individu tumbuhan. Total luas daun adalah jumlah daun dikalikan dengan luas daun atau merupakan penjumlahan luas dari semua daun tumbuhan tersebut. Tumbuhan dengan total luas daun yang besar akan memiliki laju transpirasi yang besar pula. Selain itu, daun yang lebar akan mendapatkan panas laten yang lebih besar sehingga transpirasi juga lebih besar dibandingkan dengan daun yang sempit.

Ketika uap air keluar dari dalam daun, akan menghadapi dua jenis hambatan. Hambatan yang pertama adalah hambatan stomata yang ditentukan oleh besarnya lubang stomata dan pembukaan stomata atau dikenal dengan hambatan stomata atau *stomatal resistance* ( $r_s$ ). Hambatan ini dapat dikurangi dengan pembukaan stomata, misalnya dengan intensitas cahaya yang tinggi. Hambatan yang kedua adalah hambatan karena adanya lapisan udara lembab di sekitar permukaan daun, dikenal dengan *boundary layer resistance* ( $r_b$ ). Hambatan ini dapat dikurangi atau dihilangkan dengan adanya udara yang bergerak (angin). Percobaan di bawah ini memberikan gambaran akan pentingnya kedua jenis hambatan ini. Bange pada tahun 1953 mengadakan percobaan dengan menggunakan tumbuhan zebra (*Zebrina Pendula*) di dua keadaan, yaitu keadaan tanpa angin dan keadaan dengan angin (udara bergerak). Ketika udara diam, pembukaan stomata hanya menaikkan laju transpirasi sedikit hingga pembukaan stomata mencapai maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa hambatan luar stomata (*boundary layer*) masih besar sehingga laju transpirasi tidak meningkat tinggi. Namun, pada udara yang bergerak (dengan angin) pembukaan stomata menyebabkan peningkatan laju transpirasi yang sangat tinggi (Gambar 1.24). Udara yang

bergerak menghilangkan hambatan *boundary layer* sehingga laju transpirasi meningkat tajam sejalan dengan meningkatnya pembukaan stomata.



Sumber: Taiz dan Zeiger, (2010)

Gambar 1.24

Hasil percobaan Bange yang mengukur peningkatan laju transpirasi akibat pembukaan stomata pada udara diam dan udara bergerak (dengan angin). Pada udara diam, pembukaan stomata yang semakin besar tidak berpengaruh besar terhadap laju respirasi. Pada udara bergerak (berangin), peningkatan pembukaan stomata menyebabkan peningkatan laju transpirasi yang tinggi (hampir linier).

### 3. Pengukuran Laju Transpirasi

Pengukuran laju transpirasi biasa dilakukan dengan menggunakan beberapa metodologi, antara lain: (1) metode gravimetri atau lisimeter, (2) metode porometer, (3) metode cobalt clorida, dan (4) metode fotometer. **Metode gravimetri** adalah metode pengukuran transpirasi sederhana, yaitu dengan metode penimbangan biasa. Tumbuhan yang akan diukur laju transpirasinya ditumbuhkan dalam pot. Setelah disiram dengan cukup air dan ditimbang, tumbuhan ditempatkan pada ruangan atau tempat yang dikehendaki. Setelah berselang beberapa hari atau jam, pot ditimbang kembali untuk mengetahui jumlah air yang telah berkurang selama periode tersebut. Untuk menghindari kehilangan air akibat evaporasi biasa maka bagian atas tanah dalam pot ditutup dengan plastik. Dengan mengkonversi

total luasan daun dan waktu yang digunakan maka dapat dihitung laju transpirasi per satuan luas per detik atau menit.

**Metode porometer** adalah pengukuran laju transpirasi berdasarkan perbedaan kelembaban antara udara di seputar daun dan kelembaban standar yang telah ditetapkan. Prinsip kerja dari metode ini adalah dengan melalukan udara di atas daun, kemudian perbedaan kelembaban antara sebelum dan setelah dilalukan angin ditentukan untuk mengetahui besarnya laju penguapan daun. Contoh alat ini adalah fotometer AP3 Delta-T Dvice buatan Cambridge, Inggris. Alat ini cukup akurat untuk menentukan laju transpirasi dan konduktansi stomata daun sehingga banyak digunakan dalam penelitian-penelitian ilmiah internasional. Saat ini pengukuran laju transpirasi juga sudah disatukan dengan pengukuran laju fotosintesis melalui metode *gas exchange* sehingga beberapa alat pengukur fotosintesis seperti Licor 6400 Li (buatan Amerika Serikat), Ciras (buatan Inggris) juga bisa digunakan untuk pengukur laju transpirasi. Contoh Licor 6400 dapat dilihat pada Gambar 1.25.



Sumber: Licor.com

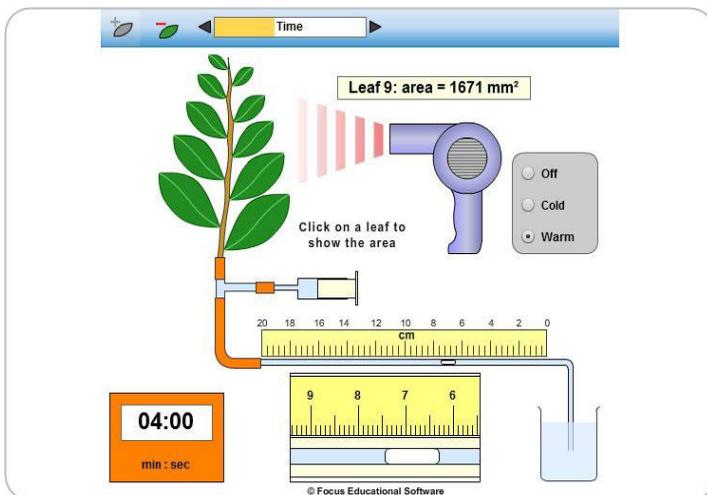
Gambar 1.25

Alat pengukur fotosintesis dengan metode pertukaran gas (*gas exchange*) Licor 6400 yang dapat digunakan untuk mengukur laju transpirasi daun.

Metode berikutnya adalah metode cobalt clorida. Disebut demikian karena pengukurannya menggunakan lapisan kertas yang mengandung cobalt clorida. Metode ini bersifat sederhana, yaitu daun bagian atas atau bawah dilapisi dengan kertas mengandung cobalt clorida yang bagian luarnya dilapisi dengan plastik. Jika dalam keadaan kering, kertas tersebut berwarna

biru muda, sedangkan ketika mendapat uap air (kelembaban) maka akan berubah menjadi berwarna pink (merah muda). Kecepatan perubahan dari biru ke pink, menunjukkan kecepatan laju transpirasi.

Metode lainnya adalah metode fotometer. Metode ini sering digunakan untuk percobaan sederhana, yaitu dengan menempatkan batang tumbuhan berdaun di dalam suatu bejana kapiler yang berisi air. Dengan mengetahui penyerapan air oleh batang berdaun di dalam pipa kapiler, maka dapat diketahui besarnya air yang diuapkan oleh daun tumbuhan tersebut (Gambar 1.26). Memang metode ini lebih untuk mengukur penyerapan air daripada transpirasi daun.



Sumber: Softpedia

Gambar 1.26

Pengukuran transpirasi dengan alat sederhana 'fotometer' didasarkan pada pergerakan air yang diamati dengan pipa kapiler berskala.



## LATIHAN

---

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Adakah kesamaan mekanisme naiknya air antara tumbuhan yang kecil seperti tomat dengan pohon-pohon yang tingginya lebih dari 40 m? Coba jelaskan!
- 2) Apa yang membedakan teori kapilaritas dengan teori tekanan akar dalam membantu pergerakan air di dalam tubuh tumbuhan?
- 3) Betulkan transpirasi itu penting bagi tumbuhan? Coba Anda jelaskan!
- 4) Mana yang lebih besar pengaruhnya terhadap laju transpirasi, hambatan pembukaan stomata atau hambatan uap air di seputar daun?
- 5) Jelaskan mekanisme dasar membuka dan menutupnya stomata!

### *Petunjuk Jawaban Latihan*

- 1) Untuk menjawab soal ini perlu Anda jelaskan terlebih dahulu mekanisme dan penggerak jalannya air di dalam tubuh tumbuhan. Selanjutnya, coba Anda bandingkan adakah perbedaan antara kedua jenis tumbuhan tersebut!
- 2) Coba Anda jelaskan terlebih dahulu apa yang dimaksudkan dengan teori kapilaritas, kemudian apa pula yang dimaksudkan dengan teori tekanan akar. Kemudian coba Anda jelaskan apa yang membedakan diantara keduanya dalam menunjang mekanisme pergerakan air di dalam tumbuhan.
- 3) Untuk menjawab pertanyaan ini, sebaiknya Anda sebutkan dulu peran transpirasi bagi tumbuhan. Selanjutnya coba Anda uraikan urgensinya bagi proses fisiologi tumbuhan.
- 4) Coba Anda jelaskan dulu jenis-jenis hambatan transpirasi pada daun tumbuhan. Selanjutnya, coba hubungkan hal ini dengan percobaan Bange yang ada di dalam modul ini.
- 5) Untuk menjawab soal ini perlu Anda jelaskan dahulu struktur stomata daun, kemudian ingat kembali konsep pergerakan air dalam sel. Kaitkan antara struktur dan konsep potensial air tersebut.



Pergerakan air di dalam tubuh tumbuhan melibatkan proses yang berkaitan dengan sifat fisika dan kimia air. Pergerakan ini terjadi karena adanya perbedaan (gradien) tekanan hidrostatik antara dua bagian. Di dalam sel yang memiliki membran pergerakan air terjadi melalui osmosis. Air masuk ke dalam akar melalui jalur apoplas dan simplas hingga ke korteks, kemudian memasuki endodermis secara simplas hingga ke xilem akar. Selain melalui osmosis biasa, masuknya air ke dalam sel-sel akar difasilitasi oleh protein saluran, aquaporin.

Pergerakan air ke atas terjadi melalui xilem dengan tenaga penggerak utama aliran transpirasi dan sifat kohesi air mempertahankan kolom air dari daun hingga ke akar, dikenal sebagai teori kohesi atau aliran transpirasi. Sementara itu, sifat kapilaritas dan tekanan akar dipandang hanya memiliki kontribusi yang tidak terlalu besar. Transpirasi berperan besar, yaitu selain untuk menjaga stabilitas suhu tumbuhan, transpirasi juga penting untuk penyerapan dan pengangkutan hara dalam tubuh tumbuhan. Laju transpirasi ditentukan oleh faktor dalam, seperti jumlah stomata, ukuran stomata, pembukaan stomata, luas dan jumlah daun, maupun faktor luar tumbuhan seperti suhu, kelembaban (RH), kecepatan angin, dan intensitas cahaya.

Stomata merupakan gerbang utama proses transpirasi tumbuhan sekaligus pintu masuknya gas CO<sub>2</sub> untuk fotosintesis. Pembukaan stomata menguntungkan proses fotosintesis, namun menyebabkan tumbuhan kehilangan banyak air sehingga tumbuhan mengatur hal tersebut dengan membuka, menutup atau menutup sebagian. Pembukaan dan penutupan stomata terjadi karena redistribusi air akibat masuk atau keluarnya ion K<sup>+</sup> ke/dari sel penjaga. Hal itu dipengaruhi beberapa faktor, seperti cahaya, hormon ABA, cekaman kekeringan, kadar CO<sub>2</sub>, suhu, dan RH lingkungan.

**TES FORMATIF 2**

---

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Perjalanan air dari akar ke daun tumbuhan terjadi melalui jaringan ....
  - A. floem
  - B. xilem
  - C. pembuluh
  - D. endodermis

- 2) Ketika sampai pada endodermis akar, air dan senyawa terlarut masuk ke dalam silinder pusat akar melalui ....
  - A. ruang antarsel
  - B. jalur apoplas
  - C. jalur simplas
  - D. xilem
  
- 3) Selain melalui mekanisme osmosis untuk mempercepat pergerakan air ke dalam sel akar air masuk melalui ....
  - A. garis kaspari
  - B. xylem
  - C. aquaporin
  - D. epidermis
  
- 4) Sebagai penggerak utama perjalanan air dari akar ke daun yang tinggi adalah ....
  - A. transpirasi
  - B. tekanan akar
  - C. kapilaritas
  - D. semua benar
  
- 5) Gutasi terjadi melalui suatu struktur pada daun tumbuhan yang disebut ....
  - A. hidatoda
  - B. stomata
  - C. sel subsider
  - D. sel penjaga
  
- 6) Di antara jenis tumbuhan berikut yang memiliki rasio transpirasi paling tinggi adalah ....
  - A. tumbuhan C3
  - B. tumbuhan C4
  - C. tumbuhan CAM
  - D. tumbuhan C4 dan CAM
  
- 7) Berikut ini adalah faktor internal yang mempengaruhi laju transpirasi tumbuhan, *kecuali* ....
  - A. jumlah stomata
  - B. pembukaan stomata
  - C. luas daun
  - D. ketebalan daun

- 8) Pembukaan stomata akan sangat mempengaruhi laju transpirasi dalam keadaan ....
- A. suhu tinggi
  - B. cahaya terang
  - C. angin kencang
  - D. malam
- 9) Pembukaan stomata terjadi karena ....
- A. air masuk dalam sel penjaga
  - B. air keluar dari sel penjaga
  - C. potensial osmotik sel penjaga tinggi
  - D. air masuk ke dalam sel subsider
- 10) Dalam keadaan cekaman kekeringan, terjadinya penutupan stomata adalah karena distimulir oleh adanya ....
- A. cahaya tinggi
  - B. ABA
  - C. CO<sub>2</sub> tinggi
  - D. angin

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 2 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 2.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali  
80 - 89% = baik  
70 - 79% = cukup  
< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan modul selanjutnya. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 2, terutama bagian yang belum dikuasai.

## Kunci Jawaban Tes Formatif

### *Tes Formatif 1*

- 1) A. Air bukan merupakan sumber pupuk.
- 2) B. Tumbuhan layu tekanan turgornya = nol.
- 3) D. Air merupakan senyawa polar sehingga dapat berikatan dengan molekul-molekul lain.
- 4) C. Hubungan antarmolekul air terjadi dengan ikatan hidrogen.
- 5) D. Hubungan H-O-H pada molekul air bersudut 105°.
- 6) A. Tegangan permukaan air yang tinggi didukung oleh sifat kohesi antarmolekul air.
- 7) B. Berkaitan dengan cahaya tinggi dan suhu tinggi sifat air yang menguntungkan tumbuhan adalah panas penguapan yang tinggi. Karena energi akan diserap untuk menguapkan air sehingga suhu tumbuhan stabil.
- 8) D. Potensial osmotik ditentukan senyawa terlarut dalam sel.
- 9) A. Yang memungkinkan pergerakan air adalah apabila gradien (perbedaan) antara potensial osmotik tumbuhan dan potensial osmotik larutan cukup besar di mana potensial osmotik tumbuhan lebih rendah daripada potensial osmotik larutan.
- 10) C. Pengukuran potensial di lapangan mudah dilakukan dengan *pressure chamber* (metode ruang tekan).

### *Tes Formatif 2*

- 1) B. Xilem adalah jaringan pembuluh untuk mengangkut air dan mineral dari akar ke daun.
- 2) C. Air harus masuk melewati sel (simplas) saat sampai di jaringan endodermis.
- 3) C. Aquaporin adalah protein saluran khusus untuk masuknya air ke dalam sel sehingga air masuk lebih cepat.
- 4) A. Penggerak utama (yang berkontribusi paling besar) bagi pergerakan air ke atas adalah aliran transpirasi.
- 5) A. Hidatoda merupakan struktur khusus yang memungkinkan terjadinya gutasi.
- 6) A. Rasio transpirasi (jumlah air diuapkan/produksi bahan kering) tertinggi ada pada tumbuhan C3.

- 7) D. Ketebalan daun tidak berpengaruh langsung terhadap proses transpirasi.
- 8) C. Angin kencang mempercepat transpirasi (lihat percobaan Bange).
- 9) A. Stomata membuka karena air masuk sel penjaga.
- 10) B. ABA menstimulir penutupan stomata saat tumbuhan mengalami kekeringan.

## Glosarium

Adhesi	:	sifat suatu molekul yang dapat berikatan dengan molekul lain.
Aquaporin	:	suatu protein saluran ( <i>channel</i> ) pada membran sel-sel akar yang secara khusus melewatkan air sehingga pergerakan air ke dalam sel tumbuhan bisa berjalan lebih cepat dibandingkan kalau hanya melalui mekanisme osmosis biasa.
Garis kaspari, pita kaspari atau cincin kaspari	:	penebalan dinding sel yang mengandung suberin sehingga kedap air pada bagian radial dari jaringan endodermis sehingga air tidak bisa melewati ruang-ruang antarsel, tetapi harus masuk secara simplas melewati membran sel.
Gutasi	:	keluarnya butiran-butiran air pada daun beberapa jenis tumbuhan (biasanya pada pinggir daun) di pagi hari saat tumbuhan mendapat cukup air.
Hidatoda	:	suatu celah pada daun tempat keluarnya air gutasi. Hidatoda merupakan modifikasi tak sempurna dari stomata sehingga tidak bisa menutup.
Ikatan hidrogen	:	ikatan kimia yang terjadi antara molekul air dengan sesamanya atau molekul polar lain. Dalam molekul air ikatan hidrogen terjadi antara H dengan O pada satu molekul air dengan mol air lainnya.
Jalur apoplas	:	jalur pergerakan air memasuki akar tumbuhan melewati ruang-ruang antarsel, tidak melewati bagian dalam sel.
Jalur simplas	:	jalur pergerakan air memasuki akar tumbuhan dengan memasuki sel melewati membran sel, kemudian bergerak dari sel ke sel melalui plasmodesmata.
Kapasitas lapang	:	kandungan air tanah maksimum setelah air gravitasi tidak ada. Air yang ada

		adalah air yang diikat oleh pori-pori mikro tanah.
Kohesi	:	sifat suatu molekul yang dapat berikatan dengan sesamanya.
Layu permanen	:	kelayuan pada daun tumbuhan karena tumbuhan mengalami kekeringan yang berat sehingga daun tidak mampu kembali segar walaupun sore dan malam hari.
Layu sementara	:	kelayuan pada daun tumbuhan saat tumbuhan mengalami defisit air di tengah hari karena cahaya matahari yang kuat dan suhu udara yang panas, namun daun kemudian segar kembali ketika sore hari.
Potensial air	:	status energi bebas air di dalam larutan atau jaringan tumbuhan yang mempengaruhi perpindahan air dari satu bagian ke bagian lainnya.
Potensial matrik	:	suatu potensial kimia akibat adanya ikatan antara air dengan senyawa-senyawa penyusun sel, seperti dinding sel, membran, dan sebagainya. Potensial matriks menyebabkan biji yang kering dapat menyerap air dengan cepat.
Potensial osmotik	:	suatu potensial kimia air yang timbul akibat adanya senyawa-senyawa terlarut di dalam cairan. Semakin tinggi konsentrasi larutan semakin rendah potensial osmotiknya.
Potensial tekanan	:	suatu potensial kimia yang timbul akibat adanya pembatasan oleh dinding sel tumbuhan yang bersifat kaku. Berhubungan dengan turgiditas sel.
Protoplasma	:	cairan utama penyusun sel, baik yang terdapat di dalam sitoplasma maupun vakuola sel.
Pulvinus	:	sel-sel yang ada pada pangkal daun tumbuhan putri malu yang berperan

		dalam membuka dan menutupnya daun.
Rasio transpirasi	:	rasio besarnya air yang diuapkan per produk bahan kering yang dihasilkan tumbuhan.
Reaksi terang fotosintesis	:	reaksi pemanfaatan energi surya menjadi energi kimia dalam bentuk ATP dan NADPH. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Modul 3.
Tegangan permukaan	:	terjadinya tegangan pada air akibat ikatan antara molekul air dalam bentuk cair lebih besar daripada molekul air dalam fase gas (di udara). Adanya tegangan permukaan yang tinggi menyebabkan air berbentuk butiran (bulatan) dan tidak menyebar jika ditempatkan pada suatu permukaan.
Turgiditas sel, tekanan turgor	:	tekanan sel oleh dinding sel yang kaku apabila air masuk ke dalam sel. Saat layu tekanan turgor sama dengan nol, saat air masuk tekanan akan meningkat dan mencapai maksimum saat tumbuhan mencapai turgor penuh sehingga air tidak lagi dapat masuk.

## Daftar Pustaka

- Hopkins, W.G. and Huner, N.P.A. 2009. *Introduction to Plant Physiology. (4th Edition)*. Bab 1 dan 2. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Kramer, P.J. and Boyer, J.S.1995. *Water Relations of Plants and Soils*. London: Academic Press.
- Licor6400.2014.Licor.com.(Online).(http://www.licor.com/env/products/phot osynthesis/?gclid=CKqgs7GtwMMCFYiCvQodM4UASw).
- Lu, Z. and Neumann, P.M. 1999. *Water Stress Inhibits Hydraulic Conductance and Leaf Growth in Rice Seedlings but Not the Transport of Water via Mercury-Sensitive Water Channels in the Root*. 120:143-151. *Plant Physiology*.
- Maurel. C. 1997. *Aquaporins and Water Permeability of Plant Membranes. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 48: 399-429.
- Monumentaltrees.(Online).(http://www.monumentaltrees.com/en/trees/coastr edwood/coastredwood/, diakses 12 Desember 2014).
- Nelson, D.L. and Cox, M.M. 2004. *Lehninger Principles of Biochemistry 4th Edition*. W. H. Freeman & Company.
- Plant Physiology Online. Web Topic 3.6. *Measuring Water Potential. A Companion to Plant Physiology, Fifth Edition by Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger*. (Online). (http://5e.plantphys.net/article.php?ch=3&id=29, diakses pada 12 November 2014).
- Softpedia. 2014. *Transpiration experiment*. (Online). (http://softpedia.net/files/transpiration%20experiment&id=mix).
- Taiz, L. and Zeiger E. 2002. *Plant Physiology (3th Edition)*. Bab 3. Massachusetts: Sinauer Associates, Inc. Publishers.

Taiz, L and Zeiger E. 2010. *Plant Physiology (5th Edition)*. Bab 3. Massachusetts: Sinauer Associates, Inc. Publishers.

([http://www.plant-phenotyping-network.eu/lw\\_resource/datapool/\\_items/item\\_198/co2\\_handout.pdf](http://www.plant-phenotyping-network.eu/lw_resource/datapool/_items/item_198/co2_handout.pdf))

(<http://www.irb.hr/users/precali/Znanost.o.Moru/Biokemija/Literatura/Lehninger%20Principles%20of%20Biochemistry,%20Fourth%20Edition%20-%20David%20L.%20Nelson,%20Michael%20M.%20Cox.pdf>)