

Fungsi Air dan Perannya pada Tingkat Selular dan Tumbuhan secara Utuh

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 dan tubuh tumbuhan dan menghubungkannya dengan faktor lingkungan. Dalam modul ini Anda akan dipandu untuk mengetahui peran penting air bagi tumbuhan, karakteristiknya, dan mekanisme pergerakannya pada tingkat selular dan seluruh tubuh tumbuhan.

Modul ini terdiri dari dua kegiatan belajar, yaitu meliputi:

1. Kegiatan Belajar 1 : membahas tentang air sebagai penyusun sel tumbuhan.
2. Kegiatan Belajar 2 : membahas tentang transpirasi pada tumbuhan dan faktor-faktor yang mempengaruhi laju transpirasi.

Setelah mempelajari modul ini diharapkan Anda dapat menjelaskan sifat fisika dan kimia air, mekanisme pergerakan air dan konsep dasar tentang potensial air, transpirasi serta faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi transpirasi.

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

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

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

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, Anda seharusnya mengulangi lagi modul ini.

KEGIATAN BELAJAR 1

Air sebagai Penyusun Sel Tumbuhan

A. AIR BAGI KEHIDUPAN TUMBUHAN

Air merupakan bagian yang penting dari sel dan jaringan tumbuhan. 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 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 pertumbuhan 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 (tahan disimpan pada kadar air rendah), seperti biji sengan, 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.

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 seluruh air yang ada di dalam sel dan jaringan tumbuhan berperan aktif dalam seluruh proses fisiologis, ataukah hanya sekedar media bagi proses-proses tersebut? Itulah pertanyaan-pertanyaan yang ingin kita jawab dalam membahas tentang peran air bagi tumbuhan.

B. PERAN AIR BAGI TUMBUHAN

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, inti sel, dan vakuola) ditumbuhkan di dalam media kultur jaringan.

Dengan demikian jelaslah betapa penting air bagi organisme, termasuk tumbuhan. 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.

Selain itu air juga **berfungsi sebagai pelarut** hara mineral yang dibutuhkan bagi 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 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 sering kali juga menyebabkan kekurangan hara pada tumbuhan karena kelarutan hara di dalam tanah menjadi sangat rendah.

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. Dengan 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.

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.

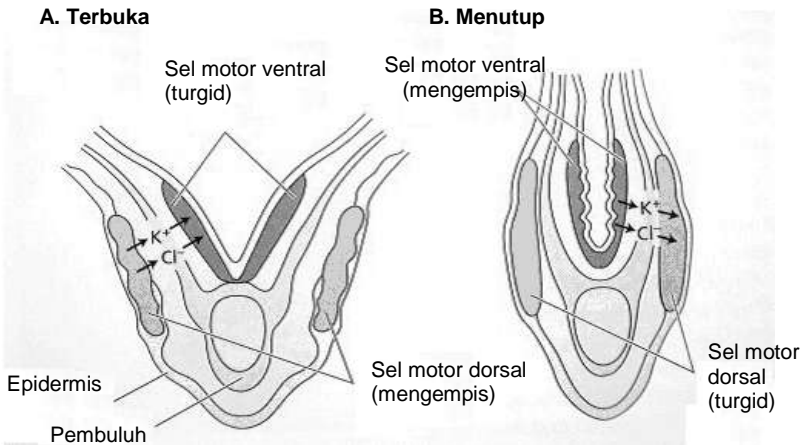
Hal lain yang tidak kalah pentingnya adalah fungsi air dalam **mempertahankan turgiditas sel, pertumbuhan sel dan pergerakan struktur tertentu dari tumbuhan**. Turgiditas sel atau dikenal dengan istilah sel turgor adalah tekanan sel akibat masuknya air ke dalam sel. Ketika sel tanaman mengalami banyak 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).

Itulah peran air dalam hubungannya dengan turgiditas sel-sel tumbuhan. Peran air yang demikian itu sangat penting karena tekanan turgor biasanya ada hubungannya 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. 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 dari pada tumbuhan yang kekurangan air. Proses pemanjangan sel tersebut disebabkan karena masuknya air ke dalam sel.

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 1.1. 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 mengembung yang berakibat pada pembukaan daun. Keadaan sebaliknya terjadi apabila air masuk ke dalam sel-sel pulvinus bawah (Gambar 1.1).



Gambar 1.1.

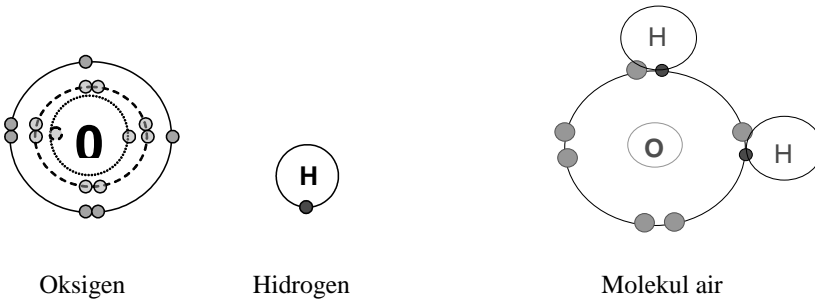
Skema pangkal daun putri malu dengan kelompok sel pulvinus di bagian atas dan bawah petiol daun mengatur membuka dan menutupnya daun

C. SIFAT FISIK DAN KIMIA AIR

Air merupakan molekul sederhana yang terdiri dari dua atom hidrogen (H) dan satu atom oksigen (O). Dua jenis atom ini saling terikat dengan ikatan kovalen, suatu ikatan di mana kedua jenis atom yang berikatan saling menyumbangkan elektron terluarnya untuk membentuk pasangan sehingga digunakan secara bersama (Gambar 1.2). 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 air (H_2O) (Gambar 1.2).

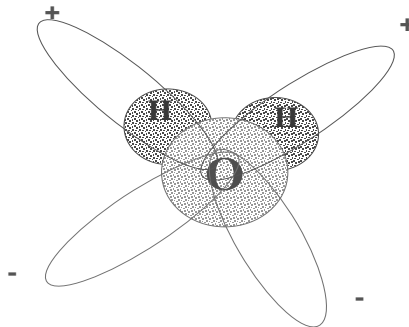
Molekul air dengan bentuk ikatan seperti yang telah disebutkan ternyata memiliki karakteristik yang unik. Keunikan ini terutama karena sifat polaritas (berkutub) yang dimiliki air, yaitu di bagian tertentu dari molekul air cenderung bermuatan positif dan di bagian lain dari molekul air cenderung bermuatan negatif (Gambar 1.2 bawah). Hal ini disebabkan atom hidrogen yang hanya memiliki satu elektron dalam membentuk ikatan dengan oksigen, elektron dari hidrogen cenderung lebih tertarik ke arah oksigen sehingga bagian lain dari atom hidrogen cenderung bermuatan agak positif. Sebaliknya

bagian pasangan elektron dari oksigen yang tidak berikatan dengan hidrogen akan cenderung lebih negatif daripada bagian yang berikatan dengan hidrogen. Adanya kecenderungan muatan positif di bagian yang berikatan dengan H dan muatan negatif di bagian elektron yang tidak berpasangan menyebabkan air bersifat polar. Adanya perbedaan muatan ini biasanya digambarkan dengan bentuk awan muatan yang membentang di kedua bagian dari molekul air seperti yang digambarkan pada Gambar 1.3.



Gambar 1.2.

Susunan elektron atom oksigen dan hidrogen, dan bentuk ikatan kovalen dari H dan O membentuk molekul air (H_2O)

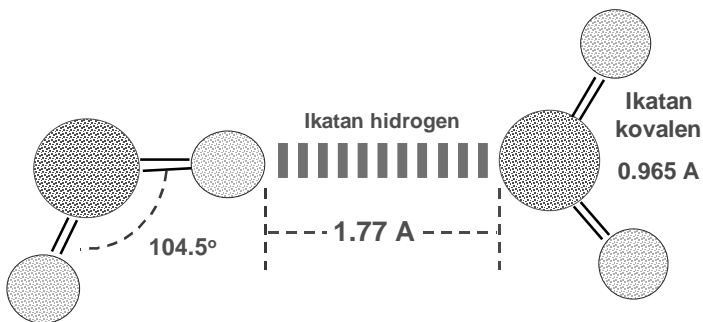


Polaritas molekul air

Gambar 1.3.

Molekul air (H_2O) dengan awan muatan positif (di kutub masing-masing atom H) dan awan muatan negatif (di bagian lain dari atom O yang elektronnya tidak berpasangan) sehingga bersifat polar (mengkutub)

Adanya awan muatan ini juga menyebabkan struktur molekul air tidak membentuk bidang yang lurus antara H-O-H, tetapi hubungan antaratom tersebut membentuk sudut lebih kurang $104,5^\circ$ (Gambar 1.4). Selain itu sifat polar dari air menyebabkan antarmolekul air terbentuk ikatan yang dikenal dengan **ikatan hidrogen**. Ikatan hidrogen terjadi antara atom O dari molekul air yang bermuatan agak negatif dengan atom H dari air yang bermuatan agak positif (Gambar 1.4). Ikatan ini memiliki jarak lebih kurang 1,77 angstrom, hampir dua kali lebih panjang daripada ikatan kovalen yang memiliki jarak hanya 0,965 angstrom. Walaupun ikatan hidrogen ini tidak sekuat ikatan kovalen atau ikatan ion, tetapi cukup menjadikan molekul air memiliki kekuatan untuk saling berikatan antarsesamanya atau yang dikenal dengan istilah **kohesi**. Molekul air dalam bentuk cairan dan padatan (es) terikat dengan ikatan hidrogen, namun uap air merupakan bentuk molekul yang tidak saling berikatan antarsesamanya.

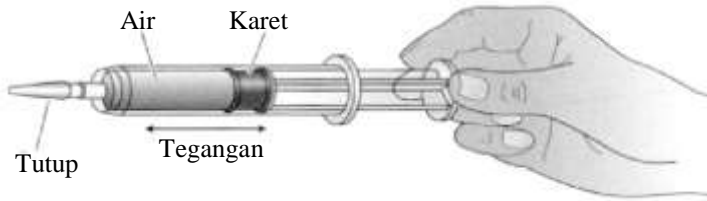


Gambar 1.4.

Ikatan hidrogen yang terjadi antarmolekul air akibat sifat polar yang dimiliki oleh molekul air

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. 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 masa air daripada molekul lain, seperti uap air di sebelah luarnya. Selain itu air juga memiliki kemampuan melawan regangan apabila ditempatkan dalam ruangan yang meregangnya, seperti dalam jarum

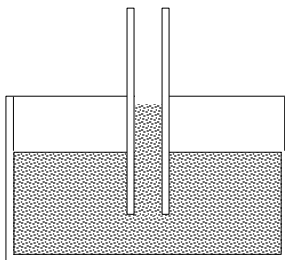
suntik (Gambar 1.5). Sifat ini penting artinya bagi pergerakan air dalam tumbuhan yang akan dibahas pada Kegiatan Belajar 2.



Gambar 1.5.

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 dapat seolah-olah merambat ke permukaan yang lebih tinggi ketika ditempatkan di dalam pipa **kapiler** berdiameter kecil. Permukaan yang lebih tinggi di dalam pipa kapiler dari pada di luarnya karena adanya sifat adhesi air yang menyebabkan molekul air berikatan dengan dinding kapiler sehingga mampu melawan sebagian gaya gravitasi. Semakin kecil diameter pipa, akan semakin tinggi permukaan yang ada di dalam pipa (Gambar 1.6).



Gambar 1.6.

Kapilaritas air terjadi akibat adanya gaya adhesi antara air dengan molekul penyusun pipa kapiler

D. KARAKTERISTIK AIR YANG PENTING SECARA FISIOLOGIS

Karena ikatan hidrogen antarmolekul air menyebabkan air memiliki karakteristik yang khas yang sangat penting secara fisiologis. Sifat-sifat tersebut adalah:

1. Air memiliki panas penguapan yang tinggi

Air memiliki panas penguapan yang tinggi, yaitu hampir dua kali lebih tinggi dari senyawa sejenis (amonia), bahkan metanol dan etanol yang memiliki bobot molekul yang jauh lebih tinggi. Panas penguapan adalah besarnya energi yang diperlukan untuk menguapkan 1 gram air (Joule/g). Semakin besar panas penguapan maka semakin besar energi yang diperlukan artinya 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. 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.

2. Air memiliki titik didih yang tinggi

Air memiliki titik didih 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.

E. POTENSIAL KIMIA AIR

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. Satuan dari potensial kimia air adalah bar (1 bar setara dengan 10^6 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** (Ψ) biasanya dikenal dengan istilah **potensial air** atau *water potential* (Ψ_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 karenanya, 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 dari pada 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 (Ψ_w) secara umum ditentukan oleh beberapa komponen:

1. Adanya Zat-zat Terlarut

Adanya zat-zat terlarut di dalam air menyebabkan terjadinya penurunan 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 Ψ_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.

Contoh larutan-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 dari pada 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 yang Bersifat Kaku

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 maka pembesaran volume sel tidak bisa berjalan terus, tetapi akan berhenti setelah mencapai ukuran tertentu sehingga air yang masuk ke dalam sel pun terhenti. Gaya tekan ke dalam dari dinding sel yang membatasi masuknya air ke dalam sel ini disebut **potensial tekanan** atau dilambangkan dengan Ψ_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 Ikatan Air dengan Komponen Dinding Sel dan Membran Sel

Komponen dinding sel yang terdiri dari karbohidrat dan protein, khususnya protein membran merupakan senyawa yang dapat berikatan dengan air. Adanya senyawa-senyawa tersebut menyebabkan adanya potensial matriks yang dapat menarik air. **Potensial matrik** dilambangkan dengan Ψ_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.

4. Adanya gaya gravitasi bumi

Selain ketiga hal di atas, gravitasi bumi juga menyebabkan terjadinya tekanan, yang disebut dengan **potensial grafitasi Ψ_g** . Kalau dibandingkan dengan nilai potensial lainnya, seperti potensial osmotik dan potensial tekanan, nilai potensial gravitasi dapat diabaikan.

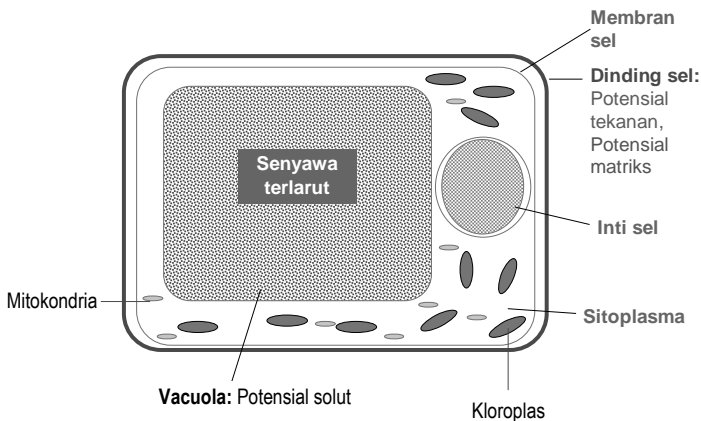
Dengan demikian secara umum rumusan potensial air dapat dituliskan sebagai:

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

Karena nilai potensial matriks (Ψ_m) hanya terjadi pada beberapa jenis tumbuhan (xerofit dan pada biji kering) maka persamaan umum yang sering dituliskan adalah:

$$\Psi = \Psi_s + \Psi_p$$

Gambaran hubungan antara ketiga jenis potensial dalam sel dan jaringan tumbuhan dapat dilihat pada Gambar 1.7 berikut.



Gambar 1.7.

Bagian-bagian sel dan pengaruhnya terhadap nilai potensial air. Senyawa-senyawa terlarut dalam vakuola menyebabkan potensial solut, dinding sel menyebabkan adanya potensial tekanan, sedangkan matriks membran dan dinding sel menyebabkan adanya potensial matriks

F. METODE PENGUKURAN POTENSIAL AIR

Untuk mengetahui besarnya potensial air jaringan, dan larutan harus dilakukan pengukuran dengan beberapa metode, antara lain metode ruang tekan (*pressure chamber*), metode equilibrasi uap, metode perendaman, dan metode imersi uap. Di antara metode tersebut, metode ruang tekan adalah metode pengukuran langsung yang cepat dan banyak dipakai dalam penelitian ilmiah. Selain itu metode equilibrasi uap (pengukuran dengan Thermocouple Psychrometer) juga banyak digunakan karena hasilnya sangat akurat. Metode lainnya umumnya digunakan dalam percobaan-percobaan sederhana dan praktikum fisiologi tumbuhan. Pengukuran masing-masing metode dapat dilihat sebagai berikut.

1. Metode Ruang Tekan (*Pressure chamber*)

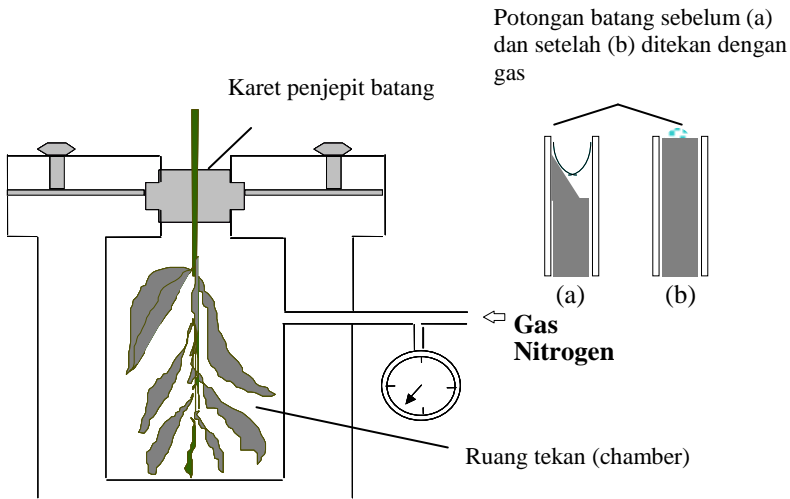
Metode ruang tekan merupakan metode pengukuran potensial air untuk organ tumbuhan, seperti daun dan dahan tumbuhan. Prinsip kerja dari metode ini adalah dengan memberikan tekanan pada seluruh permukaan organ tumbuhan sampai cairan tumbuhan keluar. Tahap-tahapnya adalah:

- 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.

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 1.8).



Gambar 1.8.
Pengukuran potensial air dengan metode ruang tekan

2. Metode Equilibrasi Uap

Metode ini didasarkan pada pengukuran tekanan uap dengan alat yang disebut *Thermocouple psychrometer*. Alat ini terdiri dari dua batang logam Chromel P dan Konstantan yang dihubungkan arus listrik untuk mendeteksi perubahan suhu yang terjadi akibat uap air yang ditimbulkan oleh daun tumbuhan. Perubahan suhu akan menyebabkan terjadinya aliran listrik yang dapat dideteksi oleh psychrometer dan kemudian dikonversi ke dalam bentuk satuan bar atau MPa. Selain untuk mengukur potensial air alat ini juga bisa digunakan untuk mengukur potensial osmotik, yaitu dengan cara mengekstrak cairan tanaman atau larutan lainnya. Alat ini terkenal sangat akurat dalam pengukuran, namun hanya bisa dilakukan di laboratorium dengan suhu yang konstan sehingga 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 dengan merendam jaringan ke dalam 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:

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

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:

$$\Psi_w = MiRT$$

, 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°K).

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.

5. Metode *Osmometer Cryoscopic*

Metode ini 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 larutan yang ditambahkan ke dalam air murni, misalnya gula sukrosa maka larutan tersebut memiliki titik beku yang lebih rendah sejalan dengan konsentrasi larutannya. Sebagai contoh, larutan yang mengandung 1 mol larutan 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.



LATIHAN

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

- 1) Jelaskan fungsi utama dari air bagi tumbuhan!
- 2) Apa yang mendasari bahwa air memiliki sifat yang unik sehingga dapat menstabilkan suhu tumbuhan?
- 3) Apa yang menyebabkan air bergerak dari satu sel ke sel lainnya?
- 4) Mengapa biji yang kering memiliki potensial matriks yang tinggi?
- 5) Apa yang terjadi apabila aberasi pantai terus berjalan hingga areal pertanian tergenang dengan air laut?

Petunjuk Jawaban Latihan

- 1) Untuk menjawab soal ini Anda perlu menjelaskan 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) Coba Anda jelaskan terlebih dahulu tentang konsep potensial air! Setelah itu coba Anda terapkan konsep potensial air ini pada sel dan jaringan tumbuhan yang berdekatan sehingga dapat menjelaskan tentang pergerakan air!
- 4) 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!
- 5) 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 senyawa yang sangat penting bagi tumbuhan karena 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.

Peran penting air ini tidak terlepas dari sifat fisika dan kimia air. Salah satu hal yang penting karena air yang bersifat polar dapat membentuk ikatan hidrogen dengan sesamanya maupun dengan molekul lain. Hal inilah yang menyebabkan air mampu menjadi stabilisator suhu tumbuhan karena air memiliki panas penguapan yang tinggi. Sifat kohesi dan adhesi dari air juga penting sehingga air memiliki tegangan permukaan yang besar.

Dalam sel dan jaringan tumbuhan air bergerak mengikuti gradien potensial kimia yang dikenal dengan potensial air. Potensial air jaringan tumbuhan (Ψ_w) merupakan perpaduan antara potensial solut (osmotik)

(Ψ_s) yang terjadi akibat adanya senyawa terlarut, potensial tekanan (Ψ_p), yaitu potensial yang terjadi karena adanya tekanan dinding sel, dan potensial matriks (Ψ_m) akibat matriks penyusun dinding sel dan membran. Besarnya potensial air akan menentukan status air tumbuhan terhadap lingkungannya.



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. non polar sehingga dapat masuk ke dalam sel
 - B. polar artinya tidak mengandung muatan pada atom-atom penyusunnya
 - C. non-polar 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
 - A. garis lurus
 - B. membentuk sudut siku-siku
 - C. tak beraturan
 - D. membentuk sudut 105°

- 6) Air memiliki tegangan permukaan yang tinggi, hal ini didukung oleh karakteristik air, yaitu
 - A. kohesi
 - B. adhesi
 - C. suhu yang rendah
 - D. titik beku = 0

- 7) Fungsi air yang penting dalam kaitannya dengan kemampuan tumbuhan dalam bertahan menghadapi lingkungan dengan cahaya yang tinggi adalah
 - A. air sebagai pelarut
 - B. panas penguapan yang tinggi
 - C. titik didih yang tinggi
 - D. kohesi

- 8) Nilai potensial osmotik suatu sel/jaringan ditentukan oleh adanya
 - A. dinding sel yang kaku
 - B. matriks komponen-komponen sel
 - C. membran sel yang elastik
 - D. senyawa-senyawa terlarut dalam sel

- 9) Keadaan berikut ini yang memungkinkan masuknya air ke dalam sel tumbuhan dengan mudah adalah
 - A. Ψ_s larutan = -0.12 MPa dan Ψ_s sel tumbuhan = -0.21 MPa
 - B. Ψ_s larutan = -0.21 MPa dan Ψ_s sel tumbuhan = -0.12 MPa
 - C. Ψ_s larutan = -0.19 MPa dan Ψ_s sel tumbuhan = -0.09 MPa
 - D. Ψ_s larutan = -0.19 MPa dan Ψ_s sel tumbuhan = -0.21 MPa

- 10) Pengukuran potensial air jaringan tumbuhan di lapangan paling mudah dan efektif dilakukan dengan metode
 - A. perendaman
 - B. *cryoscopy*
 - C. *pressure chamber*
 - D. *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

Transpirasi dan Faktor-faktor yang Mempengaruhi Laju Transpirasi Tumbuhan

A. PERGERAKAN AIR DALAM TUBUH TUMBUHAN

Telah lama diketahui bahwa air memiliki peran yang penting bagi pertumbuhan tanaman. Walaupun 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 terbunuh, 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 1.9). Kalau pompa air kita hanya mampu menarik air hingga kedalaman 10-12 m dan menaikkannya 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 dibutuhkan? Inilah pertanyaan-pertanyaan yang menarik untuk dipelajari. Namun, sebelum kita mengungkap perjalanan air secara utuh di dalam tumbuhan, terlebih dahulu kita perhatikan kaidah umum pergerakan air dalam sel dan jaringan.

B. PERGERAKAN AIR DALAM JARINGAN 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 daun. Adapun gradien tekanan uap biasa terjadi di stomata daun di mana air berubah dari 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 1.10).

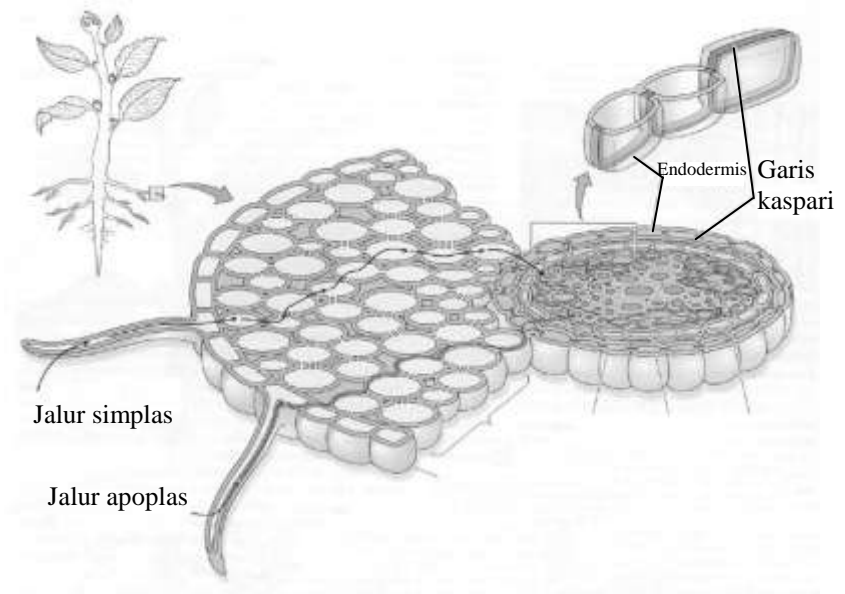
Dengan demikian air yang masuk ke dalam akar tumbuhan harus melewati epidermis, korteks dan endodermis akar, sehingga dapat mencapai xilem.

Pergerakan air dari tanah ke dalam akar bisa terjadi melalui dua mekanisme, yaitu (1) air masuk melalui ruang-ruang antarsel, atau dikenal dengan *jalur 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 *jalur simplas* (Gambar 1.10). Kedua mekanisme ini bisa sama-sama terjadi selama masih



Gambar 1.9. Tumbuhan raksasa, kayu merah (redwoods) di Amerika (*Sequoia sempervirens*) tingginya mencapai 112 m

dalam jaringan korteks akar. Namun ketika sampai pada jaringan endodermis, air dan garam mineral tidak lagi dapat melewati ruang-ruang antarsel (jalur apoplas) karena pada jaringan endodermis terdapat garis kaspari (Gambar 1.10). **Garis 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 jalur 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.

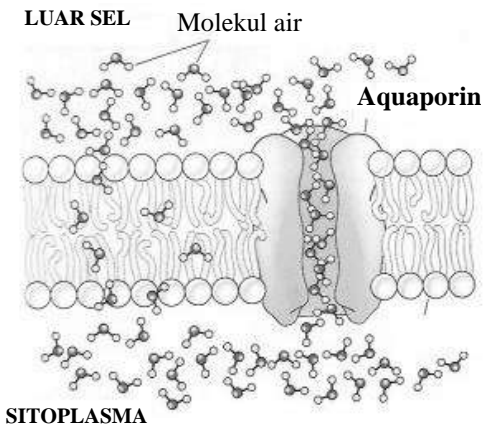


Gambar 1.10.

Jalur masuknya air ke dalam jaringan akar tumbuhan mungkin melewati ruang-ruang antarsel (apoplas) atau langsung masuk ke dalam sel (simplas) (Taiz dan Zeiger; 2002)

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. Yang menjadi pertanyaan kemudian adalah bagaimana air dapat naik ke atas/puncak pohon yang tinggi. Percobaan-percobaan mengenai hal ini telah banyak dilakukan untuk menguak rahasia naiknya air dari akar ke daun tumbuhan yang tinggi.

Walaupun telah diketahui bahwa air masuk ke dalam sel tumbuhan melalui osmosis, 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 1.11).



Gambar 1.11.

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

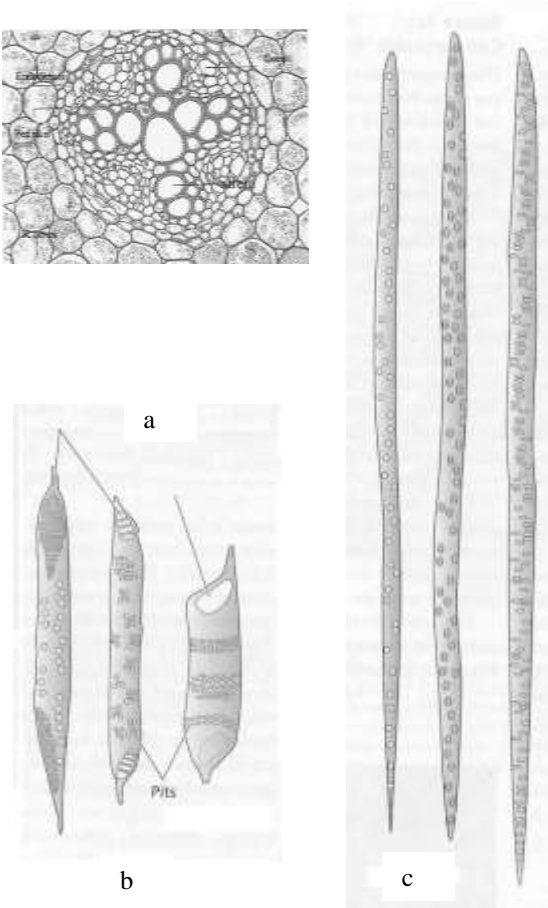
C. PERGERAKAN AIR DARI AKAR KE PUNCAK POHON YANG TINGGI

Banyak ilmuwan yang mencoba mengungkap mekanisme apa yang menjadi penggerak utama naiknya air di dalam tubuh tumbuhan. Ada beberapa teori yang dikemukakan untuk menjelaskan proses ini yang meliputi:

1. Teori kapilaritas
2. Teori tekanan akar
3. Teori adhesi-kohesi atau juga dikenal dengan Tarikan transpirasi

1. 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). 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 1.12) yang terdiri dari sel-sel trakeid dan elemen tabung. Sambung menyambung dari sel-sel ini ibarat kolom-kolom kapiler yang sangat panjang.



Gambar 1.12.
Penampang melintang jaringan xilem (a) dan bagian-bagian dari xilem yang berupa tabung xilem (b) dan trakeid (c).

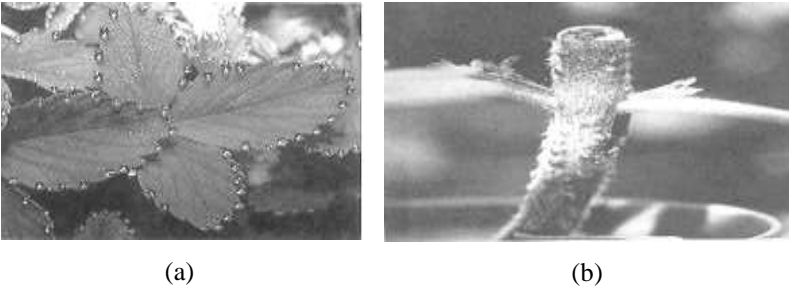
Walaupun demikian, hasil-hasil percobaan menunjukkan bahwa tingginya kenaikan di dalam pipa kapiler tergantung pada besarnya diameter pipa. Xilem memiliki rata-rata jari-jari antara 2,5-200 μm . Pada jari-jari 2,5 μm , kemampuan kenaikan air adalah 0,6 m, sedangkan dengan jari-jari 200 μm , air hanya dapat merayap hingga 0,08 m. Dengan hanya memperhatikan sifat kapilaritas, air hanya dapat naik di dalam tubuh tumbuhan pada lebih kurang 75 cm. Dengan demikian kapilaritas saja tidak cukup untuk menaikkan air hingga puncak pohon yang tinggi sehingga kapilaritas hanya memiliki kontribusi yang kecil dalam proses pergerakan air dalam sistem tumbuhan.

2. Teori Tekanan Akar

Teori lain yang mencoba menjelaskan sistem pergerakan air dalam tubuh tumbuhan adalah teori tekanan akar. Teori ini didasarkan bahwa di dalam sel-sel akar terdapat zat-zat terlarut yang mengakibatkan penurunan potensial 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 pinggir daun beberapa jenis tumbuhan pada malam atau pagi hari ketika tumbuhan mendapat cukup air (Gambar 1.13.a). 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 yang lain adalah apabila kita memotong batang tumbuhan yang cukup mendapat pengairan maka akan didapati cairan batang keluar dari luka bekas potongan (Gambar 1.13.b). Fenomena ini memberikan bukti adanya tekanan yang berasal dari akar tumbuhan sehingga air dapat naik dari akar ke batang tumbuhan. Walaupun demikian, 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 salin (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.



Gambar 1.13.

Fenomena terjadinya gutasi pada tumbuhan (a), tampak butiran-butiran air di pinggir daun, dan fenomena tekanan akar saat kita memotong batang tumbuhan, terlihat cairan akan keluar dari ujung batang (b).

3. Teori 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. 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 batang, demikian juga yang ada di akar sehingga sambungan kolom air yang tidak terputus mulai dari daun hingga di akar akan terus bergerak dari akar ke daun. Ikatan air ini juga terus menyambung 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 permukaan akar.

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 juga dikenal teori tarikan transpirasi ini dikenal 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 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?

D. 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 90% 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 dari pada 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 dari pada 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 (peran dalam **transpor hara** di dalam tubuh tumbuhan).

2. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Laju Transpirasi

Laju transpirasi biasanya dinyatakan dengan jumlah air yang diuapkan per satuan luas daun per satuan waktu atau dalam satuan liter/m per detik atau ml/cm 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.

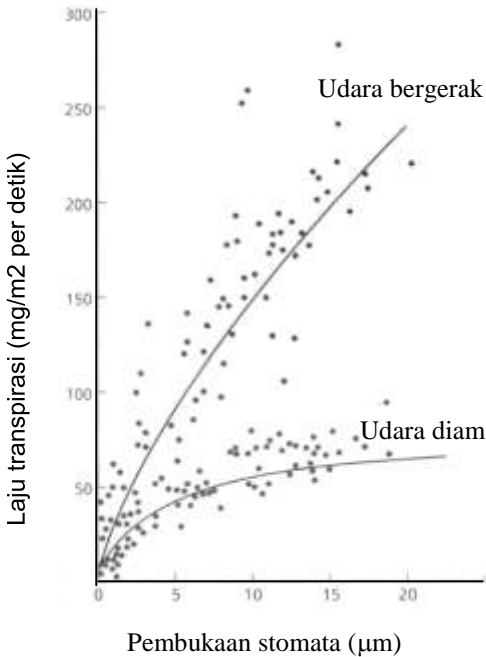
Suhu udara yang tinggi akan mempercepat laju transpirasi karena **suhu tinggi** akan menurunkan tekanan uap udara sehingga memacu transpirasi. Kelembaban udara berpengaruh besar terhadap laju transpirasi. Semakin **rendah RH** udara akan semakin mempercepat laju transpirasi karena uap air akan bergerak dari yang memiliki tekanan tinggi (daun) ke tekanan rendah (udara). Adanya **angin** berkaitan dengan fungsinya sebagai penghilang

hambatan akibat adanya lapisan udara lembab di sekitar daun (stomata). Dengan adanya angin maka udara lembab yang ada di sekitar lubang stomata akan hilang sehingga akan semakin mempercepat laju transpirasi daun. 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 intensitas cahaya 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, dari pada 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.

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 *bondary 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 dengan tanpa angin dan keadaan dengan angin (udara bergerak). Ketika udara diam, pembukaan stoma 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 1.14). Udara yang bergerak menghilangkan hambatan boundary layer sehingga laju transpirasi meningkat tajam sejalan dengan meningkatnya pembukaan stomata.



Gambar 1.14.

Hasil percobaan Bange yang mengukur peningkatan laju transpirasi akibat pembukaan stomata pada udara diam dan udara bergerak (dengan angin).

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

fotosintesisnya 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 potometer AP3 Delta-T Device buatan Cambridge, Inggris. Alat ini cukup akurat untuk menentukan laju transpirasi dan konduktansi stomata daun sehingga banyak digunakan dalam penelitian-penelitian ilmiah internasional.

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. Memang metode ini lebih untuk mengukur penyerapan air dari pada transpirasi daun.

4. Stomata sebagai Gerbang Keluarnya Air dan Pertukaran Gas

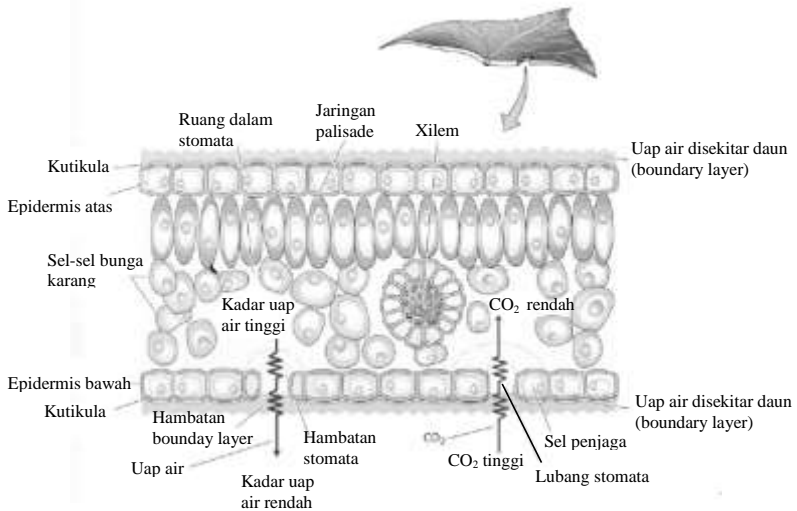
Walaupun transpirasi berperan penting dalam tubuh tumbuhan, kehilangan air yang berlebihan dari tubuh akan mengganggu proses-proses fisiologi lainnya, khususnya apabila ketersediaan air cukup terbatas. Apabila besarnya transpirasi melebihi kapasitas penyerapan air oleh akar tumbuhan

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.

Untuk menghadapi hal tersebut tumbuhan memiliki mekanisme untuk mengatur keluarnya air (transpirasi) dengan menutup stomata sebagian. Seperti dalam percobaan Bange (Gambar 1.14), penutupan stomata dapat menurunkan laju transpirasi, khususnya pada keadaan udara bergerak. Seperti kita ketahui di alam kondisi udara selalu bergerak. Ketika tumbuhan layu, biasanya stomatanya 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**. 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.

Selain sebagai gerbang keluarnya air, stomata daun juga merupakan pintu pertukaran gas, khususnya pintu masuknya gas CO_2 yang dibutuhkan dalam proses fotosintesis tumbuhan (Gambar 1.15). Sehingga apabila tumbuhan menutup stomatanya saat kekeringan maka akan menghadapi konsekuensi menutup masuknya gas CO_2 ke dalam daun sehingga menurunkan laju fotosintesis. Itulah sebabnya mengapa kekurangan air 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.



Gambar 1.15.

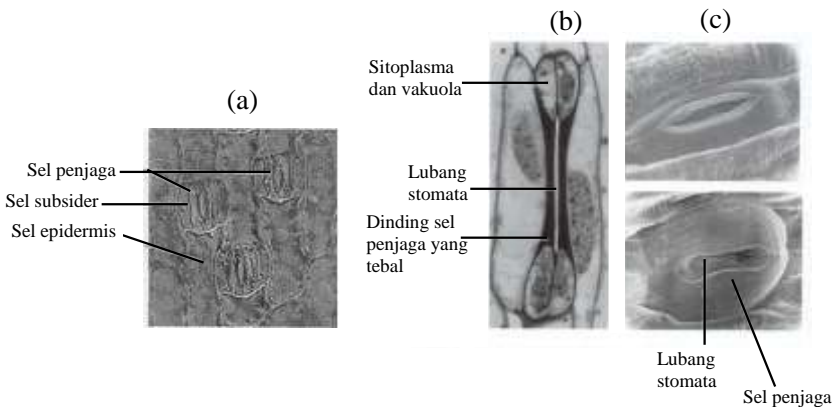
Skema penampang melintang daun dengan memperlihatkan stomata, transpirasi dan pergerakan gas CO₂ ke dalam daun serta hambatan dalam stomata dan hambatan boundary layer akibat lapisan uap air yang meliputi permukaan daun.

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.

5. Mekanisme Membuka dan Menutupnya Stomata

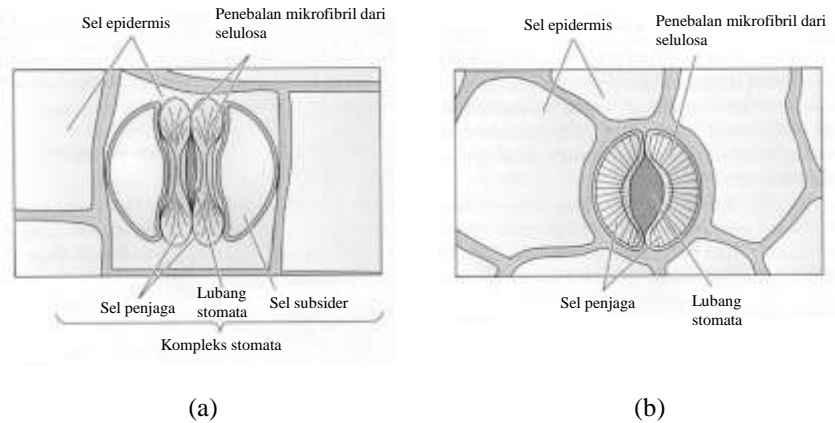
Stomata merupakan bagian penting dari daun, khususnya adalah sel epidermis daun. Stomata merupakan modifikasi dari sel epidermis daun

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 1.16). Umumnya sel penjaga memiliki bentuk **seperti halter** disertai dengan sepasang sel subsider (Gambar 1.17.a), bentuk sel penjaga seperti ini terjadi pada rumput-rumputan. Bentuk lainnya adalah seperti sepasang ginjal (Gambar 1.17.b). 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.



Gambar 1.16.

Beberapa jenis stomata (a) stomata pada *Carex*, (b) stomata dari tanaman rumput dan (c) stomata pada bawang bombay



Gambar 1.17.

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 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 (Ψ_s). Karena potensial osmotik (Ψ_s) sel penjaga lebih rendah dari potensial osmotik (Ψ_s) sel-sel epidermis di sekelilingnya, maka air akan masuk ke dalam sel penjaga. Sebaliknya jika ion K^+ dipompa keluar dari sel penjaga maka Ψ_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 absisik (ABA);
- c. konsentrasi CO_2 ;
- d. stres (cekaman) lingkungan khususnya kekeringan;
- e. suhu dan kelembaban (RH) udara.

Cahaya menyebabkan pembukaan stomata, sedangkan ketidakhadiran 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 Ψ_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.

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

Konsentrasi CO_2 yang tinggi, khususnya di dalam rongga stomata menyebabkan stomata menutup. Belum diketahui secara jelas mekanisme apa yang mempengaruhi penutupan stomata ketika konsentrasi CO_2 tinggi. Dugaan sementara adalah karena ada hubungannya dengan fotosintesis. Kadar CO_2 yang tinggi memacu reduksi 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 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.



LATIHAN

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

- 1) Apakah sama mekanisme naiknya air dari tumbuhan perdu seperti tomat dengan pohon yang tingginya lebih dari 40 m?
- 2) Apa yang mendasari adanya teori tekanan akar?
- 3) Sebutkan fungsi penting dari transpirasi pada tumbuhan!
- 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 tekanan akar. Kemudian coba Anda berikan contoh-contoh fenomena dari adanya tekanan akar pada tumbuhan.
- 3) Soal ini masih terkait dengan kegiatan belajar sebelumnya tentang sifat fisik dan kimia air.

- 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.



RANGKUMAN

Pergerakan air di dalam tubuh tumbuhan melibatkan proses fisika yang berkaitan dengan sifat fisika dan kimia air. Pergerakan ini terjadi karena adanya perbedaan (gradien) potensial air, potensial tekanan, dan tekanan uap. 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, 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 sehingga 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 selain untuk menjaga stabilitas suhu tumbuhan juga 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_2 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^+ ke/dari sel penjaga. Hal itu dipengaruhi beberapa faktor, seperti cahaya, hormon ABA, cekaman kekeringan, kadar CO_2 , 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. xilem
 - 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
- tumbuhan C3
 - tumbuhan C4
 - tumbuhan CAM
 - tumbuhan C4 dan CAM
- 7) Berikut ini adalah faktor internal yang mempengaruhi laju transpirasi tumbuhan, *kecuali*
- jumlah stomata
 - pembukaan stomata
 - luas daun
 - ketebalan daun
- 8) Pembukaan stomata akan sangat mempengaruhi laju transpirasi dalam keadaan
- suhu tinggi
 - cahaya terang
 - angin kencang
 - malam
- 9) Pembukaan stomata terjadi karena
- air masuk dalam sel penjaga
 - air keluar dari sel penjaga
 - potensial osmotik sel penjaga tinggi
 - air masuk ke dalam sel subsider
- 10) Dalam keadaan cekaman kekeringan, terjadinya penutupan stomata adalah karena distimulir oleh adanya
- cahaya tinggi
 - ABA
 - CO₂ tinggi
 - 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 (channel) 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, pitas kaspari atau cincin kaspari** : adalah penebalan dinding sel yang mengandung suberin dan 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 pinggiran 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.
- 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 tersebut. 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

- Kramer, P.J. and Boyer, J.S. (1995). *Water Relations of Plants and Soils*. London: Academic Press.
- Maurel. C. (1997). *Aquaporins and Water Permeability of Plant Membranes*. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 48: 399-429.
- Moore, R., Clark, W.D. and Vodopich. D.S. (1998). *Botany*. 2nd Edition. Mc Graw-Hill. New York. Bab. 21.
- Taiz, L. and Zeiger E. (2002). *Plant Physiology*. (3rd Edition). Massachusetts: Sinauer Associates, Inc. Publishers. Bab 3 dan 4.