



FISIOLOGI TANAMAN

Pengenalan Kehidupan Tanaman

Prof. Dr. S.M. Sitompul
Lab. Plant Physiology, Faculty of Agriculture, Universitas Brawijaya
Email : dl@ub.ac.id



1.1 PENDAHULUAN

- Dampak Pembelajaran
- Definisi

1.2 FUNGSI TANAMAN

- 1.2.1 Fungsi Organ Tanaman
- 1.2.2 Fungsi Jaringan Sel

1.2.3 Fungsi Sel

1.2.4 Teori Sel

1.3 FUNGSI DAN ENERGY

- 1.3.1 Transformasi Energi
- 1.3.2 Sumber Energi
- 1.3.3 Energi Bebas Gibbs

MODUL

01

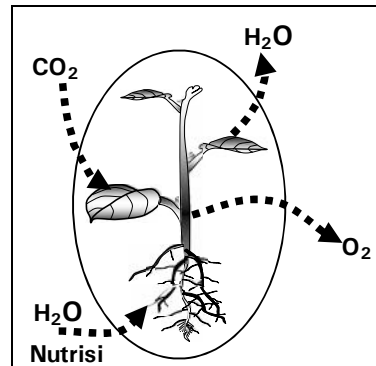


SELF-PROPGATING ENTREPRENEURIAL EDUCATION DEVELOPMENT

Hak cipta dilindungi undang-undang. ©Modul ini tidak boleh digandakan seluruhnya atau sebagian tanpa izin dari penulis

1. PENDAHULUAN

- Tanaman dapat dipandang sebagai suatu sistem (sistem biologi) dengan aktivitas kehidupan yang menggunakan karbon dioksida (CO_2) dari atmosfer, serta air dan nutrisi dari tanah dalam proses metabolisme untuk menghasilkan pertumbuhan dan reproduksi (Gambar 1.1). Kehidupan tanaman yang baik dapat dihasilkan apabila sistem itu bekerja dengan baik.
- Bagaimana sistem tanaman bekerja atau bagaimana kehidupan tanaman dijalankan sangat penting dipelajari dalam optimalisasi dan peningkatan kinerja sistem tanaman. Ini didasarkan atas ragam guna tanaman dalam kehidupan manusia yang tidak terbatas hanya pada sumber bahan makanan. Tanaman juga menjadi sumber bahan penting lain seperti bahan minuman (Kopi, Teh, Anggur dll), obat-obatan (Quinine, Aspirin, Antibiotik dll), serat (kapas, linen, rayon dll), ekstrak (minyak, getah, cat dll), dan bahan bangunan.
- Tanaman juga berperan dalam pemeliharaan kualitas lingkungan yang diperlukan untuk kehidupan sehubungan dengan fungsi tanaman yang dapat mengikat CO_2 dan menghasilkan O_2 , dan memperlambat aliran air. Peranan ini menarik banyak perhatian belakangan ini dengan fenomena pemanasan global yang diikuti dengan perubahan iklim (climate change) sebagai dampak dari

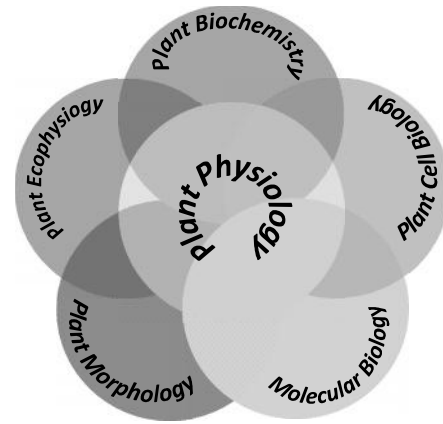


Gambar 1.1 Sistem tanaman secara sederhana



akumulasi gas rumah kaca (greenhouse gases) seperti CO₂ di atmosfer bumi.

- Kinerja tanaman menjalankan ragam kegiatan kehidupan tersebut berhubungan dengan fungsi dari komponen penyusun tubuh tanaman. Fungsi ini dipelajari secara khusus dalam fisiologi tanaman yang merupakan cabang dari ilmu tanaman (plant sciences). Fisiologi tanaman (plant physiology) tidak berdiri sendiri, tapi berhubungan dengan bidang lain. Bidang lain yang terkait erat dengan fisiologi tanaman adalah morfologi tanaman (plant morphology) yang mencakup struktur tanaman, ekologi khususnya ekofisiologi tanaman (plant ecophysiology) yang menyangkut interaksi tanaman dengan lingkungannya, biokimia tanaman (phytochemistry atau plant biochemistry), biologi sel tanaman (plant cell biology), dan biologi molekuler (molecular biology) (Gambar 1.2).
- Sasaran akhir yang dituju dalam studi fisiologi tanaman adalah pengungkapan dan pemahaman hukum kegiatan kehidupan tanaman (the law of life activity of plant). Ini adalah landasan dasar dari upaya optimalisasi sistem kehidupan tanaman untuk mendukung sistem kehidupan secara keseluruhan.



Gambar 1.2 Interaksi Fisiologi Tanaman dengan bidang ilmu lain

Dampak Pembelajaran

Dengan penguasaan materi dalam modul ini yang dirancang sebagai landasan dasar fisiologi tanaman, peserta didik diharapkan mampu untuk

1. Menjelaskan pengertian fisiologi tanaman dan fungsi yang terdapat dalam kehidupan tanaman khususnya fungsi organ, cell dan organella tanaman
2. Menjelaskan bagaimana tanaman bekerja dalam aktivitas kehidupan tanaman
3. Menjelaskan energi khususnya energi bebas dan hubungannya dengan kehidupan dan fungsi tanaman atau fisiologi tanaman
4. Membangun secara mandiri dan bertahap informasi fisiologi tanaman melalui studi literatur
5. Mampu membuat prakarsa penggunaan dan perlindungan tanaman melalui usaha pertanian sesuai dengan hukum yang berlaku

Definisi

Fisiologi tanaman (Plant physiology), yang dapat diartikan secara sederhana dengan fungsi dari tanaman dan bagian-bagiannya dalam kehidupan tanaman, dibatasi dengan beberapa pengertian berikut.

- Fisiologi tanaman adalah suatu ilmu pengetahuan yang mempelajari hukum kegiatan kehidupan tanaman (the law of the life activity of plant) yaitu fungsi yang terdapat dalam kehidupan tanaman yang meliputi, antara lain, proses dinamik pertumbuhan, metabolisme dan reproduksi tanaman hidup.
- Fisiologi tanaman adalah studi proses kehidupan tanaman yang mencakup,

antara lain yang fundamental, fotosintesis, respirasi, nutrisi tanaman, hormon tumbuh, tropisme, gerakan nastik, fotoperiodisme, fotomorfogenesis, ritme circadian, perkembangan, dormansi, transpirasi, dan sistem tranport.

- Fisiologi tanaman dapat dibatasi dengan studi bagaimana tanaman hidup bekerja (how living plants work) dalam kehidupannya seperti, antara lain
 1. bagaimana tanaman menggunakan energi radiasi matahari dalam asimilasi (reduksi) karbon dioksida (CO₂)
 2. bagaimana tanaman menghubungkan karbon yang direduksi menjadi bahan penyusun tubuhnya
 3. bagaimana tanaman memperoleh air dan unsur hara yang kemudian disebarkan ke seluruh bagian tubuhnya
 4. bagaimana tanaman tumbuh dan berkembang
 5. bagaimana tanaman memberikan tanggapan pada lingkungannya
 6. bagaimana tanaman memberikan tanggapan pada cekaman lingkungan
 7. bagaimana tanaman berkembang-biak (reproduksi)

Contoh: Gerakan Nyctinastic

- * Salah satu aspek fisiologi tanaman yang dapat menarik untuk disimak pada tahap awal ini adalah gerakan nastik (nastic) yaitu gerakan yang ditentukan oleh anatomi tanaman dari pada posisi asal stimulus sebagaimana pada fenomena tropisme. Gerakan nastik yang luas dikenal adalah Nyctinastic yaitu gerakan pembukaan pada siang dan penutupan pada malam hari secara teratur dari helai daun (gerakan bangun dan tidur). Gerakan nastik lain adalah Thigmonastic yaitu gerakan yang dipicu oleh sentuhan atau stimulus mekanis. Kedua gerakan ini dapat dijumpai pada jenis tanaman leguminosa famili Fabaceae seperti tanaman putri malu (*Mimosa pudica* L.). Sebagaimana diketahui, tanaman putrid malu melakukan gerakan malu (*pudica* = shy = malu) atau penutupan daun dalam waktu yang relatif singkat setelah sentuhan.
- * Mengapa tanaman putri malu melakukan gerakan demikian dan fungsi apa yang bekerja dalam penutupan daun tersebut. Kepentingan penutupan daun tersebut bagi tanaman tidak diketahui secara pasti, tapi dipertimbangkan sebagai mekanisme pertahanan tanaman terhadap predator. Predator dapat takut akan gerakan cepat demikian dan memilih tanaman yang tidak bergerak.
- * Sel pulvini adalah pengendali utama gerakan penutupan daun tersebut melalui perubahan tekanan turgor sel (pulvini) pada pangkal helai daun yang berhubungan langsung dengan tulang daun utama (midrib). Sentuhan mengakibatkan pengeluaran ion kalium (K⁺) dari sel pulvini ke sel di sekitarnya yang diikuti dengan pengeluaran air dan penurunan tekanan turgor sel yang akhirnya mengakibatkan penutupan daun. Ini dikendalikan sebagian oleh phytochrome karena penghambatan penutupan daun terjadi pada daun yang dipaparkan terhadap cahaya merah-jauh (FR = far-red).



2 FUNGSI TANAMAN

2.1 Fungsi Organ Tanaman

- Kegiatan kehidupan tanaman ditentukan oleh fungsi dari seluruh komponen penyusun tubuh tanaman yang tidak terlepas dari pengaruh faktor lingkungan. Pada tingkat individu tanaman, komponen tersebut dapat dibagi menjadi

empat bagian yaitu organ akar, batang, daun dan bunga atau organ reproduktif (Gambar 1.3).

- Akar

Ini berfungsi menyerap air dan unsur hara serta sebagai tempat penyimpanan cadangan makanan, dan ladaan dasar tanaman dengan cekeraman jaringan akar pada tanah. Pada tanaman tertentu, akar sebagai tempat penyimpanan karbohidrat yang sangat jelas pada umbi akar (tuberous roots) pada tanaman ubikayu dan ubi jalar.

- Batang

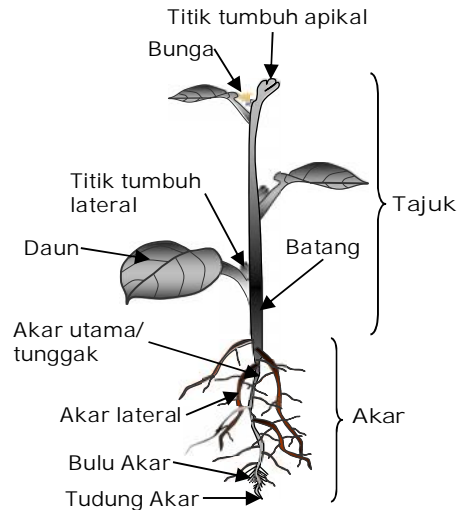
Ini, yang mencakup cabang dan ranting, berfungsi menopang bagian tajuk tanaman dan menyediakan saluran transport serta sebagai tempat penyimpanan cadangan makanan. Batang sebagai tempat penyimpanan karbohidrat sangat jelas pada umbi batang (tuberous stem) pada tanaman bawang.

- Daun

Ini berfungsi sebagai alat fotosintensis yang menghasilkan karbohidrat serta tempat pertukaran gas dan penyimpanan karbohidrat (pati) dalam jangka pendek.

- Bunga

Ini berfungsi sebagai alat perkembang-biakan tanaman (reproduksi) dan tempat simpanan karbohidrat seperti buah pada banyak jenis tanaman.



Gambar 1.3 Organ tanaman

2.2 Fungsi Jaringan Sel

- Fungsi organ tanaman ditentukan oleh fungsi jaringan tanaman yang berkembang dari sel tanaman pada meristem (titik tumbuh) pada saat awal. Sel ini kemudian mengalami differensiasi menjadi tipe sel tertentu yang selanjutnya membentuk jaringan (tissue) tertentu. Secara umum, jaringan tanaman dapat dibagi menjadi tiga kelompok yaitu jaringan kulit atau dermis (dermal), angkut (pembuluh) atau vaskular (vascular), dan dasar (ground) (Taiz & Zeiger, 2002 & 1991).
- Jaringan kulit (dermis) berfungsi untuk melindungi jaringan sel dibawahnya (endodermis) dan membentuk jaringan komunikasi tanaman dengan dunia luar. Ini terdiri dari jaringan sel epidermis atau lapisan luar dari daun dan batang (epi = over & upon), rhizodermis atau lapisan luar dari akar (rhizo = akar), dan endodermis (lapisan dalam, endo = dalam). Sel epidermis yang tersusun secara padat mengeluarkan kutikula (cuticle), sebagai lapisan terluar dari epidermis, yang terdiri dari lipid dan polimer hidrokarbon dalam zat lilin (wax) dengan fungsi mencegah kehilangan air. Jaringan sel rizodermis (rhizodermis), yang tidak dilapisi oleh kutikula, menghasilkan bulu akar yang

merupakan perkembangan dari sel rizodermis dengan satu sel rizodermis yang berkembang menjadi satu bulu akar yang hidup sangat pendek (1-2 hari) karena kerusakan mekanis.

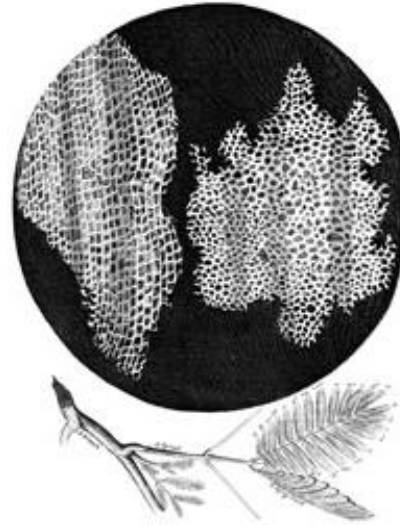
- Jaringan vaskular adalah kelompok sel yang berfungsi sebagai saluran angkut bahan (air, nutrisi dan zat organik) dan terdiri terutama dari pembuluh xylem dan phloem, serta kambium (cambium). Xylem dan phloem kadang-kadang disebut secara berturut-turut pembuluh kayu dan tapis. Kambium adalah rangkaian sel, yang terletak antara xylem dengan phloem dan merupakan lapisan sel tunggal secara teoritis, yang aktif membelah menghasilkan pertumbuhan sekunder (pertumbuhan arah horisontal, pembesaran batang) termasuk xylem ke arah dalam dan phloem ke arah luar. Transport air antara xylem dengan phloem dan zat lain termasuk unsur hara dari xylem ke phloem terjadi lintas kambium baik melalui lintasan symplast (cytoplasma, plasmodesmata, dan membran plasma) atau apoplast (dinding sel).
- Jaringan Dasar (ground tissue) yang membentuk sebagian besar tubuh tanaman dapat dibagi tiga kelompok yaitu sel parenchima (parenchyma), kolensima (collenchyma), dan sklerensima (sclerenchyma)
 - **Parenchima**, yang dapat berarti bagian dalam (visceral flesh) atau yang mengisi (filling, chyma) dari samping (paren, para, beride), adalah jaringan dasar paling banyak dari organ yang fungsional dan tidak berkayu. Ini terdiri dari jaringan sel dengan dinding sel tipis dan aktif dalam metabolisme serta melaksanakan ragam fungsi dalam tanaman termasuk fotosintesis dan penyimpanan.
 - **Kolensima** adalah jaringan yang terdiri dari sel kecil memanjang dengan dinding sel primer tebal yang memberikan topangan struktural pada tubuh tanaman yang tumbuh khususnya tajuk. Fungsi ini didukung oleh dinding sel yang tidak mengandung lignin sehingga dapat merentang sejalan dengan perkembangan organ. Sel kolensima tersusun dalam suatu berkas (bundle) atau lapisan dekat bagian luar (periphery) batang atau tangkai daun.
 - **Sklerensima** adalah jaringan yang terdiri dari dua tipe sel yaitu sel sklereid (sclereids) dan serat (fibers) dengan dinding sel sekunder tebal dan sering mati setelah dewasa. Sklereid terdapat dalam ragam bentuk dari mulai agak bulat hingga bercabang dan tersebar diseluruh bagian tanaman. Sebaliknya, serat adalah sel kecil memanjang yang umumnya berkaitan dengan saluran pengangkut (vascular) yang sudah berkembang penuh. Sklerensima berfungsi sebagai penopang mekanis khususnya untuk bagian tanaman yang tidak lagi mengalami pemanjangan.

2.3 Fungsi Sel

- Semua fungsi organ yang terjadi dalam kehidupan tanaman adalah integrasi dari aktivitas dalam sel sebagai struktur dasar fungsional dari jaringan, dan karenanya organ tanaman dan keseluruhan tubuh tanaman. Fungsi sel, selain sebagai bahan bangunan struktur tubuh tanaman, adalah tempat aktivitas

kehidupan (pertumbuhan dan perkembangan) berlangsung yang dapat diketahui dari struktur sel.

- Pengetahuan mengenai sel diawali dari hasil pengamatan rongga dalam irisan tipis gabus (cork) dengan mikroskop sederhana dengan pembesaran 50x oleh Robert Hooke, seorang ilmuwan Inggris, pada tahun 1665 (Gambar 1.4). Robert Hooke sangat terkesan dengan struktur rongga (ruang kosong antara sekat) tersebut yang secara keseluruhan nampak seperti sarang lebah. Ini kemudian diberi nama sel (cell), yang diturunkan dari kata cellula yang berarti ruang kecil (apartemen), yang dihitung oleh Robert Hooke sebanyak $1.259.712.000 \text{ sel/inch}^3$ ($\sim 76.872.342 \text{ sel/cm}^3$).



Gambar 1.4 Rongga dalam gabus dari Robert C. Hooke (<http://www.science-of-aging.com/timelines/hooke-history-cell-discovery.php>)

2.4 Teori Sel

- Sel yang diamati oleh Robert Hooke tersebut sesungguhnya adalah ruang sel mati kosong yang dikelilingi oleh dinding sel. Studi struktur sel lebih lanjut tidak dapat dilakukan pada sel mati tersebut. Struktur sel lebih rinci dapat dipelajari pada bahan hidup terutama dengan bantuan perkembangan mikroskop cahaya dan khususnya mikroskop elektron yang membantu penemuan antara lain retikulum endoplasma (ER, endoplasmic reticulum), organella (organ kecil), dan struktur nukleus. Perkembangan pengetahuan mengenai sel dari hasil penelitian secara ringkas adalah sebagai berikut.
 - Antoni van Leeuwenhoek pada tahun 1674, yang terinspirasi dengan karya Robert Hook tersebut, menggunakan kaca pembesar yang dikembangkan sendiri (pembesaran 250x) dan menemukan sel dari organisme hidup yang disebut animalcules.
 - Mirbel (1802) menerbitkan suatu risalat (treatise) dan mengusulkan bahwa semua jaringan tanaman adalah modifikasi dari jaringan dasar pendukung (parenchyma), dan kemudian mengajukan pandangan pada tahun 1809 bahwa setiap sel berada dalam suatu membran malar (a continuous membrane) yang merupakan sumbangan nyata pada cytology.
 - Lamarck (1819) mengembangkan lebih lanjut pandangan dari Mirbel yang mengatakan bahwa kehidupan organisme tidak dapat terjadi jika bagian penyusunnya bukan jaringan sel atau tidak terbentuk dari sel (no body can have life, if its constituent parts are not cellular tissue or are not formed by cell)
 - Robert Brown (1831) mendapatkan benda bulat yang sangat menyolok dalam setiap sel yang disebut kemudian dengan nucleus (inti sel) yang

mendorong sel menjadi suatu bidang penelitian yang banyak menarik perhatian peneliti kemudian.

- Matthias Schleiden, seorang ilmuwan German, pada tahun 1838 mengamati dengan mikroskop bagian tanaman yang terdiri dari sel, dan menyimpulkan bahwa semua bagian tanaman tersusun dari sel. Ini diikuti dengan pengamatan dari Theodor Schwann, seorang ahli fisiologi German dan teman dekat dari Matthias Schleiden, yang menyatakan bahwa jaringan khewan tersusun dari sel.
- M.J. Schleiden dan Theodor Schwan (1839) mengajukan "teori sel" dan mengatakan bahwa sel adalah organisme, dan khewan demikian juga tanaman merupakan kumpulan (agregat) dari organisme (sel) tersebut yang ditata menurut hukum definitif (The cells are organisms; and animals as well as plants are aggregates of these organisms arranged in accordance with definite laws).
- Purkinje (1840) memperkenalkan istilah protoplasma untuk cytoplasma (cytoplasm) dan nukleus secara bersama.
- Von Mohl (1846) mengamati zat cair kental disekeliling nukleus dan kemudian menyatakan suatu konsep bahwa protoplasma (protoplasm) adalah landasan fisik kehidupan. Dia juga menyarankan bahwa cytoplasma dan nukleus secara bersama disebut protoplasma.
- Rudolf Virchow, seorang dokter German, pada tahun 1858 menyimpulkan dari hasil studi patologi pada tingkat sel secara luas bahwa sel hidup baru berasal dari reproduksi sel yang sudah ada sebelumnya (Omnis cellula-e-cellula). Dia memperoleh penghargaan dengan perumusan hipotesis ini sekalipun pernyataan demikian sesungguhnya sudah terdapat dalam Vedas prasejarah.
- Teori sel kemudian berkembang, yang dianggap diprakarsai oleh Schleiden dan Schwann, yang terdiri dari tiga pernyataan yaitu;
 1. Semua organisme tersusun dari satu atau lebih sel (Schleiden & Schwann: 1838-39)
 2. Sel adalah satuan (unit) dasar kehidupan dalam semua organisme hidup (Schleiden & Schwann: 1838-39)
 3. Semua sel dihasilkan melalui pembelahan sel sebelumnya (Virchow: 1858)
- Max Schultze (1861) menetapkan kesamaan antara protoplasma sel tanaman dengan sel khewan.
- Perkembangan hasil penelitian yang pesat kemudian membawa pada pengembangan Teori sel modern, yang melengkapi teori sel awal, dengan empat pernyataan tambahan yaitu;
 1. Sel mengandung informasi genetik (DNA) yang diturunkan dari sel ke sel saat pembelahan sel
 2. Semua sel pada dasarnya sama dalam komposisi kimia dan kegiatan metabolisme
 3. Semua fungsi kimia dan fisiologi dasar dilaksanakan dalam sel
 4. Aktivitas sel tergantung pada aktivitas struktur subselular dalam sel (organella, nukleus dan membrane plasma)

3 FUNGSI DAN ENERGI

3.1 Transformasi Energi

- Semua organisme hidup termasuk tanaman membutuhkan energi untuk melakukan kegiatan (aktivitas) kehidupan. Ini didasarkan pada pengertian dari energi yaitu "kemampuan melakukan kerja (the ability to do work)". Karena fisiologi tanaman adalah studi tentang bagaimana tanaman bekerja (how plants work), fisiologi dan energi berkaitan erat sehingga pemahaman yang memadai tentang energi menjadi perlu dalam studi fisiologi tanaman.

- Hukum I termodinamika menegaskan bahwa energi di alam semesta adalah konstan, dan tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan, tapi dapat dirubah dari suatu bentuk ke bentuk lain. Salah satu bentuk nyata dari hukum ini adalah pertumbuhan tanaman, yang berkembang dari embrio, memperoleh energi dari lingkungannya. Jadi biomassa tanaman, yang dihasilkan dalam proses pertumbuhan tanaman sebagai salah satu hasil kegiatan utama dari kehidupan tanaman, adalah suatu bentuk transformasi energi dari lingkungan tanaman. Nilai kalori (CV, calorific value) dapat diestimasi dari kandungan unsur dari biomass (Moka, 2012) sebagai berikut.

$$CV = C^2 + C \times O^2 + 0.03C \times H + 0.60C - O + 0.11O \times N + 0.53S - 0.33S \times O \text{ (MJ/kg)}$$

Nilai kalori bersih (NCV, Net Calorific Value) adalah kuantitas panas yang dihasilkan dengan pembakaran lengkap dari satu unit bahan bakar apabila uap air yang dihasilkan tetap sebagai uap dan panas penguapan tidak diambil. Sebagai gambaran, nilai kalori residu padi berdasarkan kandungan C, H, N dan S dari kulit dan jerami padi (Lim et al., 2012) secara berturut-turut adalah 503,6 dan 517,3 MJ/kg.

- Hubungan antara massa dengan energi telah dikembangkan oleh Einstein pada tahun 1905 seperti berikut.

$$E = mc^2 \quad (1.1)$$

dimana E = energi (J, Joule, $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$), m = massa benda (kg) dan c = kecepatan cahaya ($299.792.458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Dengan penggunaan persamaan diatas, total energi dari suatu benda dengan massa 1 g dapat dihitung seperti berikut.

$$E = mc^2$$

$$m = 1 \text{ g} = 10^{-3} \text{ kg} \text{ dan } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ (disederhanakan)}$$

sehingga

$$E = 10^{-3} \text{ kg} \times (3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 = 9,0 \cdot 10^{13} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

$$= 9,0 \cdot 10^{13} \text{ J} = 9,0 \cdot 10^{20} \text{ Erg} = 2.151 \cdot 10^{13} \text{ cal} = 5.617 \cdot 10^{32} \text{ eV}$$

Apabila kebutuhan energy = $16,5 \cdot 10^6 \text{ J/hari}$ untuk orang dewasa, total

$$\text{energy dari 1 g benda cukup untuk} = 9,0 \cdot 10^{13} \text{ J} / (16,5 \cdot 10^6 \text{ J/hari}) =$$

$$5.454.545 \text{ hari} = 14.943,96 \text{ tahun} = 149,4 \text{ abad}$$

43,96 If you are able to make use of the total energy of 1 g mass, then you can live for 5325091 days or 14589.29 years or 145.89 centuries without food

Catatan:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \times 1 \text{ m}^2 \times 1 \text{ sec}^{-2} = 10^7 \text{ erg}, 1 \text{ erg} = 6.2415 \times 10^{11} \text{ eV} \text{ \& } 1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$$

- Persamaan massa dengan energi dapat diturunkan secara sederhana dari hubungan momentum dengan energi untuk photon dan massa relativistik.

PENURUNAN PERSAMAAN $E = mc^2$

Momentum dari suatu benda (objek) ditentukan oleh massa dari benda tersebut dan kecepatan benda bergerak sebagaimana ditunjukkan berikut ini

$$p = mv$$

m = massa benda (kg), v = kecepatan benda bergerak ($m \cdot s^{-1}$), dan p = momentum ($kg \cdot m \cdot s^{-1}$). Untuk photon yang tidak mempunyai massa, momentum adalah

$$p = E/c$$

Dengan pendekatan diatas ($E = cp$), dan $p = mv = mc$, hubungan m dengan m_0 (massa pada keadaan diam) perlu diketahui yaitu

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Sehingga

$$E = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right)$$

Komponen penyebut dalam kurung dari persamaan diatas dapat diuraikan lebih lanjut dengan teori binomial seperti berikut

$$(a + x)^n = a^n + na^{n-1}x + \frac{n(n-1)}{2!}a^{n-2}x^2 +$$

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} = 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{-1 \left(\frac{-1-2}{2}\right)}{2!} \left(-\frac{v^2}{c^2}\right)^2 + \dots$$

Sehingga, dengan penyederhanaan

$$E = m_0 c^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \dots \right)$$

$$E = m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2$$

Apabila $v = 0$ untuk benda yang tidak bergerak, persamaan diatas dapat disederhanakan menjadi

$$E = mc^2$$

Contoh

Energi Kimia

Sebuah apel dengan berat 100 g mengandung energi kimia 418,4 J

$$E = 0,1 \times (3 \cdot 10^{10})^2 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = 9 \cdot 10^{15} \text{ J}$$

Ini berarti hanya sekitar $0,25 \cdot 10^{-6}$ bagian energi apel yang dapat dimanfaatkan. Salah satu cara peningkatan serapan energi makanan adalah dengan pengolahannya dalam bentuk yang sangat halus (mis. jus buah)

- Transformasi (konversi) energi yang paling umum adalah konversi energi potensial menjadi energi kinetik. Energi potensial adalah energi yang tersedia secara potensial (mis. gelang karet yang direntangkan, busur panah yang ditarik, dan batu yang ditempatkan pada ketinggian tertentu). Energi dari suatu benda akibat kedudukannya di atas permukaan tanah disebut dengan energi potensial gravitasi (gravitational potential energy) yang dirumuskan dengan

$$E_p = mgh \quad (1.2)$$

PE = energi potensial ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \text{J}$), m = massa benda (kg), g = gaya gravitasi ($9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$), dan h = tinggi benda di atas permukaan tanah atau bidang referensi tertentu (m).

- Energi kinetik adalah energi yang tersedia untuk melakukan kerja sebagai akibat dari pergerakannya dengan kecepatan tertentu yang dirumuskan dengan persamaan berikut.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.3)$$

E_k = energi kinetik (J), m = massa benda (kg), dan v = kecepatan gerak benda (m/s). Energi kinetik sering juga diartikan dengan maksimum kerja yang dapat dilakukan suatu benda dengan massa m dan kecepatan v . Pertukaran energi potensial dengan energi kinetik ($mgh = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}pv$; p = momentum) disajikan pada contoh berikut.

Contoh

Air terjun Niagara dengan ketinggian 58 m akan menghasilkan energi untuk setiap 1 kg air yang jatuh sebesar

$$PE = mgh = 1 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times 58 \text{ m} = 568 \text{ J}$$

Setiap detik, air mengalir sebanyak 7.6 juta kg, sehingga

$$PE = 7.6 \times 10^6 \text{ kg/s} \times 586 \text{ J/kg} = 4.3 \cdot 10^9 \text{ J/s} = 4.310^9 \text{ W}$$

Perhitungan energi dari air yang jatuh bebas di atas dapat juga didekati dari energi yang terlibat dalam pergerakan benda jatuh bebas tersebut berdasarkan momentum dan kecepatan, karena

$$E = pV_r$$

$$p = mV_f \text{ dan } V_f = at$$

$$X = h = at^2/2$$

dimana E = energi, p = momentum ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) a = percepatan ($\text{g} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), X = jarak (ketinggian) yang ditempuh, dan V = kecepatan. Untuk mendapatkan kecepatan rata-rata (V_r), waktu tempuh perlu dihitung seperti berikut.

$$t^2 = 2X/a = 2 \times 58 \text{ m} / (9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}) = 11.8367 \text{ s}^2 \rightarrow t = 3.44 \text{ s}$$

Kecepatan akhir (V_f) adalah

$$V_f = at = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times 3.44 \text{ s} = 33.716 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$p = mV = 1 \text{ kg} \times 33.716 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 33.716 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Dengan kecepatan awal $V_0 = 0$, maka kecepatan rata-rata adalah

$$V_r = \frac{1}{2}(V_0 + V_f) = \frac{1}{2}(0 + 33.716) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 16.858 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Dengan demikian, energi yang terlibat dalam pergerakan 1 kg air yang jatuh tersebut adalah

$$E_p = pv = 33.716 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \times 16.858 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$E_p = 568.4 \text{ J}$$

1.3.2 Sumber Energi

- Organisme hidup berdasarkan sumber awal energi yang digunakan dapat dibagi menjadi dua kelompok yaitu
 1. Fototrop (Phototroph) yaitu organisme yang menggunakan radiasi matahari sebagai sumber energi
 2. Kemotrop (Chemotroph) yaitu organisme yang menggunakan reaksi kimia (oksidasi) sebagai sumber energi
 Pembagian lain dari organism hidup didasarkan atas sumber karbon yaitu
 1. Autotrop (Autotroph) yaitu organisme yang menggunakan karbon anorganik sebagai sumber karbon (tanaman)
 2. Heterotrop (Heterotroph) organisme yang menggunakan karbon organik sebagai sumber karbon (khewans)
- Kombinasi dari kedua kriteria pengelompokan tersebut menghasilkan empat kelompok organisme yaitu
 1. Fotoautotrop yaitu organisme yang menggunakan cahaya sebagai sumber energi dan CO₂ sebagai sumber karbon utama (mis. Tanaman tingkat tinggi, ganggang, cyanobacteria, serta bakteri sulfur jingga dan hijau)
 2. Ftoheterotrop yaitu organisme yang tergantung pada cahaya sebagai sumber energi dan senyawa organik sebagai sumber karbon (mis. Kelompok bakteri fotosintesis khusus yang mencakup bakteri sulfur jingga dan hijau)
 3. Kemoautotrop yaitu organisme yang memperoleh energi dari oksidasi senyawa anorganik dan menggunakan CO₂ sebagai sumber karbon utama (mis. Beberapa kelompok bakteri tertentu seperti bakteri nitrifikasi dan thiobacillus)
 4. Kemoheterotrop yaitu organisme yang menggunakan senyawa organik baik sebagai sumber energi maupun sumber karbon (mis. Khewan, protozoa, jamur dan kebanyakan bakteri)

1.3.3 Energi Bebas Gibbs

- Fungsi yang terdapat dalam kehidupan tanaman dijalankan sebagian besar melalui reaksi kimia. Penggunaan dan pembentukan energi dalam suatu reaksi kimia dievaluasi dengan energi bebas Gibbs (Gibbs Free Energy) yang diartikan dengan total energi yang dapat tersedia untuk melakukan kerja sebagaimana ditunjukkan persamaan berikut

$$G = E + PV - TS \quad (1.4)$$

dimana G = energi bebas, E = total energi, PV = tekanan dan volume dan T = suhu absolut, dan S = entropi.

- Kandungan energi bebas suatu zat tidak dapat diukur secara langsung dengan percobaan, tetapi perubahan energi bebas (ΔG) dapat dievaluasi dan diturunkan dari hukum I dan II termodinamika (Sanders, 2010). Hukum II termodinamika menyatakan (Clausius, 1850) bahwa total entropi akan meningkat untuk suatu sistem dengan lingkungannya (universe) dengan semua perubahan dalam sistem tersebut. Jadi perubahan (Δ) dari entropi (keacakan atau ketidak-teraturan) dari suatu sistem dengan lingkungannya akan lebih besar dari nol seperti ditunjukkan persamaan berikut.

$$(\Delta S_{\text{Sys}} + \Delta S_{\text{Surr}}) > 0$$

dimana ΔS = perubahan entropi (univ = universe. sys = system & surr = lingkungan). Persamaan menjadi syarat untuk spontanitas reaksi (reaksi yang berlangsung sendiri tanpa tambahan energi dari luar) dan dapat dijabarkan lebih lanjut dengan persamaan berikut.

$$S_{\text{univ}} = S_{\text{tot}} = S_{\text{surr}} + S_{\text{sys}}$$

$$S_{\text{surr}} = -H_{\text{sys}}/T$$

$$S_{\text{sys}} = -H_{\text{sys}}/T + S_{\text{sys}}$$

dimana ΔH = perubahan entalpi (enthalpy), dan T = suhu absolut.

- Pada akhir abad ke-19, J. W. Gibbs (late 19th Century) menggabungkan Hukum I dan II termodinamika tersebut untuk menyatakan spontanitas reaksi dari segi parameter sistem yang dapat diukur.

$$G = H - T S \quad (1.5)$$

dimana ΔG adalah perubahan energi bebas Gibbs (J/mol). Perubahan energi bebas Gibbs (Gibbs free energy change) dapat menggambarkan spontanitas reaksi dengan kondisi berikut.

Jika $G < 0 \rightarrow$ proses spontan

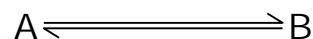
Jika $G > 0 \rightarrow$ proses spontan pada arah yang berlawanan

Jika $G = 0 \rightarrow$ setimbang

Perubahan energi bebas Gibbs setara dengan $T S$ sebagaimana ditunjukkan persamaan berikut.

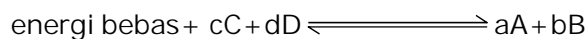
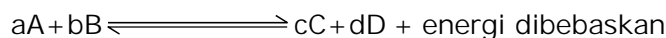
$$-T S_{\text{tot}} = H_{\text{sys}} - T S_{\text{sys}}$$

- Penentuan ΔG dapat digambarkan melalui suatu reaksi yang mengubah substrat A menjadi produk B berikut



$$\Delta G = G_B - G_A$$

Reaksi bersifat eksergonik apabila $G_B > G_A$, dan sebaliknya reaksi bersifat endergonik apabila $G_B < G_A$. Jadi pada keadaan pertama dan kedua, energi dibebaskan dan dikonsumsi seperti ditunjukkan reaksi berikut.



Pada keadaan setimbang yaitu perubahan konsentrasi reaktan dan produk tidak lagi terjadi, maka $\Delta G = 0$ dengan konstanta kesetimbangan

$$K_{\text{eq}} = \frac{[B]}{[A]} \quad \text{atau} \quad K_{\text{eq}} = \frac{[C]^c + [D]^d}{[A]^a + [B]^b} \quad (1.6)$$

- Sebagaimana diketahui bahwa ΔG merupakan fungsi dari konsentrasi reaktan dan produk serta perubahan energi bebas standar

$$\Delta G = -RT \ln K_{\text{eq}} + RT \ln \frac{[B]}{[A]} \quad (1.7)$$

Pada keadaan standar

- Keadaan standar (baku) dibatasi dengan (i) konsentrasi semua zat yang terlibat dalam reaksi termasuk air (mis, dalam reaksi hidrolisis) adalah 1 M, (ii) tekanan parsial gas yang terlibat dalam reaksi adalah 1 atm, dan (iii) Suhu adalah 25°C (298,15°K). Jadi ΔG standar (ΔG^0) adalah

$$G^0 = -RT \cdot \ln(K_{\text{eq}}) + RT \cdot \ln(1)$$

$$G^0 = -RT \cdot \ln(\text{Keq})$$

Sehingga

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{[B]}{[A]} \quad \Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{[C]^c + [D]^d}{[A]^a + [B]^b} \quad (1.8)$$

Standard

Kimia fisik : konsentrasi reaktan & produk = 1 M, dan ΔG & ΔG^0 dinyatakan pada pH = 0

Biokimia : konsentrasi reaktan & produk = 1 M kecuali $[H^+] = 10^{-7}$ M, $\Delta G'$ & $\Delta G^{0'}$ dinyatakan pada pH = 7

- Jadi perubahan energi bebas standar berbeda antara biokimia dan kimia fisik untuk reaksi yang melibatkan ion hidrogen. Untuk reaksi yang melibatkan H^+ sebagai produk



Pada keadaan standar, $[A] = [B] = [C] = 1$ M dan $[H^+] = 10^{-7}$ M, sehingga $\Delta G^{0'} = \Delta G^0 + RT \ln [H^+]^x = \Delta G^0 + x RT \ln 10^{-7}$

Jika $x = 1$, maka pada 298^0 K

$$\Delta G^{0'} = \Delta G^0 - 39,95 \text{ kJ} \quad \text{atau} \quad \Delta G^0 = \Delta G^{0'} + 39,95 \text{ kJ}$$

Jadi $\Delta G^0 > \Delta G^{0'}$ sebesar 39,95 kJ/mol H^+ yang dibebaskan untuk reaksi yang melibatkan H^+ yang berarti reaksi lebih spontan pada pH = 7

- Sebaliknya, reaksi yang melibatkan H^+ sebagai reaktan



$\Delta G^0 = \Delta G^{0'} - 39,95 \text{ kJ}$, sehingga reaksi akan lebih spontan pada pH = 0

Contoh

- Hitunglah perubahan entropi dari 36.0 g es yang mencair pada suhu 273^0 K dan tekanan $P = 1$ atm dengan enthalpy fusi es sebesar 6.01 kJ/mol.

Jawab

1 mol air = 18 g atau 1 g air = $1/18$ mol

Jadi untuk 36 g es, $-H_{\text{sys}} = 36 \text{ g} / (18 \text{ g mol}^{-1}) * (6.01 \text{ kJ mol}^{-1})$

$$S_{\text{surr}} = -H_{\text{sys}}/T$$

$$\Delta S = (6.01 \text{ kJ mol}^{-1}) / 273^0 \text{ K} * (36 \text{ g}) / (18 \text{ g mol}^{-1})$$

$$= 1.22 \text{ kJ / K}$$

- Jika glucose 1-phosphate [G1-P] dikonversi ke G 6-P oleh enzim phosphoglucomutase pada 25^0 C dengan [G 1-P] turun dari 0,02 M menjadi 0,001 M bersamaan dengan peningkatan [G 6-P] menjadi 0,019, hitunglah ΔG^0

Jawab

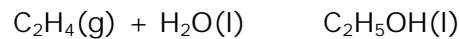
Konsentrasi substrat, [G 1-P] = 0,02 yang menjadi 0.001 M dengan pembentukan produk [G 6-P] = 0,019, sehingga

$$\text{Keq} = 0,019 / 0,001 = 19$$

$$\Delta G^0 = -RT \ln \text{Keq} = -1363 \log \text{Keq}$$

$$= -1363 \log 19 = -1745 \text{ cal}$$

3. Tentukan ΔG° dari reaksi berikut ini



Jawab

Sumber informasi (literature) menunjukkan bahwa

$$\Delta G^\circ_f(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{l})) = -175 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G^\circ_f(\text{C}_2\text{H}_4(\text{g})) = 68 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G^\circ_f(\text{H}_2\text{O}(\text{l})) = -237 \text{ kJ/mol}$$

Sehingga

$$\Delta G^\circ_{\text{rxn}} = \Delta G^\circ_f(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{l})) - \Delta G^\circ_f(\text{C}_2\text{H}_4(\text{g})) - \Delta G^\circ_f(\text{H}_2\text{O}(\text{l}))$$

$$\Delta G^\circ_{\text{rxn}} = -175 \text{ kJ} - 68 \text{ kJ} - (-237 \text{ kJ})$$

$$\Delta G^\circ_{\text{rxn}} = -6 \text{ kJ} < 0 ; \text{ therefore, spontaneous}$$

REFERENSI

- Lim, J.S., Manan, Z.A., Alwi, S.R.W. Hashim, H., 2012. A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16: 3084– 3094
- Moka, V.K., 2012. Estimation Of Calorific Value Of Biomass From Its Elementary Components By Regression Analysis. Department of Mechanical Engineering, N.I.T Rourkela, Odisha
- Sanders, D., 2010. Module 101: Molecular Biology and Biochemistry of the Cell. Lecture 6 The Principles of Free Energy, The University of York. <http://www.york.ac.uk/biology/staff/sanders/mod101/mod101Lect6.pdf>
- Taiz, L. and Zeiger, E., 2002 *Plant Physiology Online*, a companion to *Plant Physiology, Third Edition*, published by *Sinauer Associates*
- Taiz, L. and Zeiger, E., 1991. *Plant physiology*. Benjamin/Cummings, Company, Inc., Redwood City, California

PROPAGASI

A. Penguasaan Materi (Membaca dan Menulis kembali)

Penguasaan materi dapat dilakukan dengan membaca modul ini secara cermat yang diikuti dengan membuat catatan/ringkasan dari setiap bagian dengan cara dan bahasa sendiri.

B. Pendalaman Materi (Studi Literatur)

Pendalaman materi dapat dilakukan dengan studi literatur untuk materi yang dianggap perlu didalami lebih lanjut baik karena tidak jelas atau menarik untuk mendapat informasi lebih rinci.

C. Pemantapan (Latihan/Evaluasi Mandiri)

Pemantapan dapat dilakukan dengan membuat pertanyaan yang dapat timbul dari setiap bagian materi pembelajaran seperti yang disajikan dibawah ini, dan menjawab pertanyaan tersebut. Ini dapat diikuti dengan pemecahan masalah atau permasalahan (problematic) yang relevan.

Pertanyaan

1. Apa yang dimaksud dengan energi?
2. Dari mana tanaman untuk pertama kali memperoleh energi?

3. Apa yang dimaksud dengan energi potensial?
4. Bagaimana hubungan entropi dengan energi bebas Gibbs?
5. Pada keadaan apakah suatu reaksi terjadi secara spontan?

Problematic

Masalah atau problematik untuk dipecahkan sendiri atau dalam diskusi kelompok dapat berasal dari materi pembelajaran, studi pustaka dan dari lapangan yang berhubungan dengan topik pembelajaran seperti contoh berikut ini.

1. Hitunglah energi bebas dari hidrolisis ATP pada $\text{pH} = 7$, 25°C dan keadaan tetap (steady state) apabila konsentrasi ATP, ADP dan P_i secara berurutan adalah 10^{-5} M , 10^{-3} M dan 10^{-7} M (ΔG° dari ATP = $7700 \text{ cal.mol}^{-1}$)
2. Apabila ΔG° dari hidrolisis ATP ke ADP+ P_i = $-7,3 \text{ kcal.mol}^{-1}$, hitunglah K_{eq} reaksi tersebut
3. NAD^+ dan NADH adalah bentuk oksidasi dan reduksi nicotinamide adenine dinucleotide. Harga ΔG° untuk oksidasi NADH = $-21,83 \text{ KJ.mol}^{-1}$ pada 298°K . Hitunglah ΔG° , K_{eq} dari reaksi tsb. Hitung juga ΔG dan $\Delta G'$ jika $[\text{NADH}] = 1,5 \cdot 10^{-2}$, $[\text{H}^+] = 3 \cdot 10^{-5}$, $[\text{NAD}^+] = 4,6 \cdot 10^{-3}$ dan $\text{pH}_2 = 0,01 \text{ atm}$.

D. Pengembangan (Diskusi Kelompok)

Pengembangan kompetensi dapat dilakukan dengan diskusi kelompok (kelompok studi) untuk

- (a) evaluasi kemampuan yang berkembang dengan upaya yang telah dilakukan,
- (b) mengembangkan kemampuan mengemukakan apa yang telah diketahui secara ilmiah (logis dan sistematis), dan
- (c) untuk membagi kemampuan/pengetahuan antara anggota kelompok diskusi

E. Entrepreneurship

Kompetensi entrepreneurship dapat dilakukan secara mandiri dan diskusi untuk menggali (explorasi) kegiatan yang dapat dilakukan sebagai bidang usaha (entrepreneurship) seperti

- (a) Usaha Jasa/Konsultasi
- (b) Usaha Kreatif (E-Commerce)
- (c) Usaha Produksi/Lapangan