

BIOENERGETICS

BIOENERGETIKA

Bioenergetika/termodinamika biokimia: ilmu pengetahuan mengenai perubahan energi yang menyertai reaksi biokimia.

Sistem nonbiologi menggunakan **energi panas** untuk melangsungkan kerjanya.

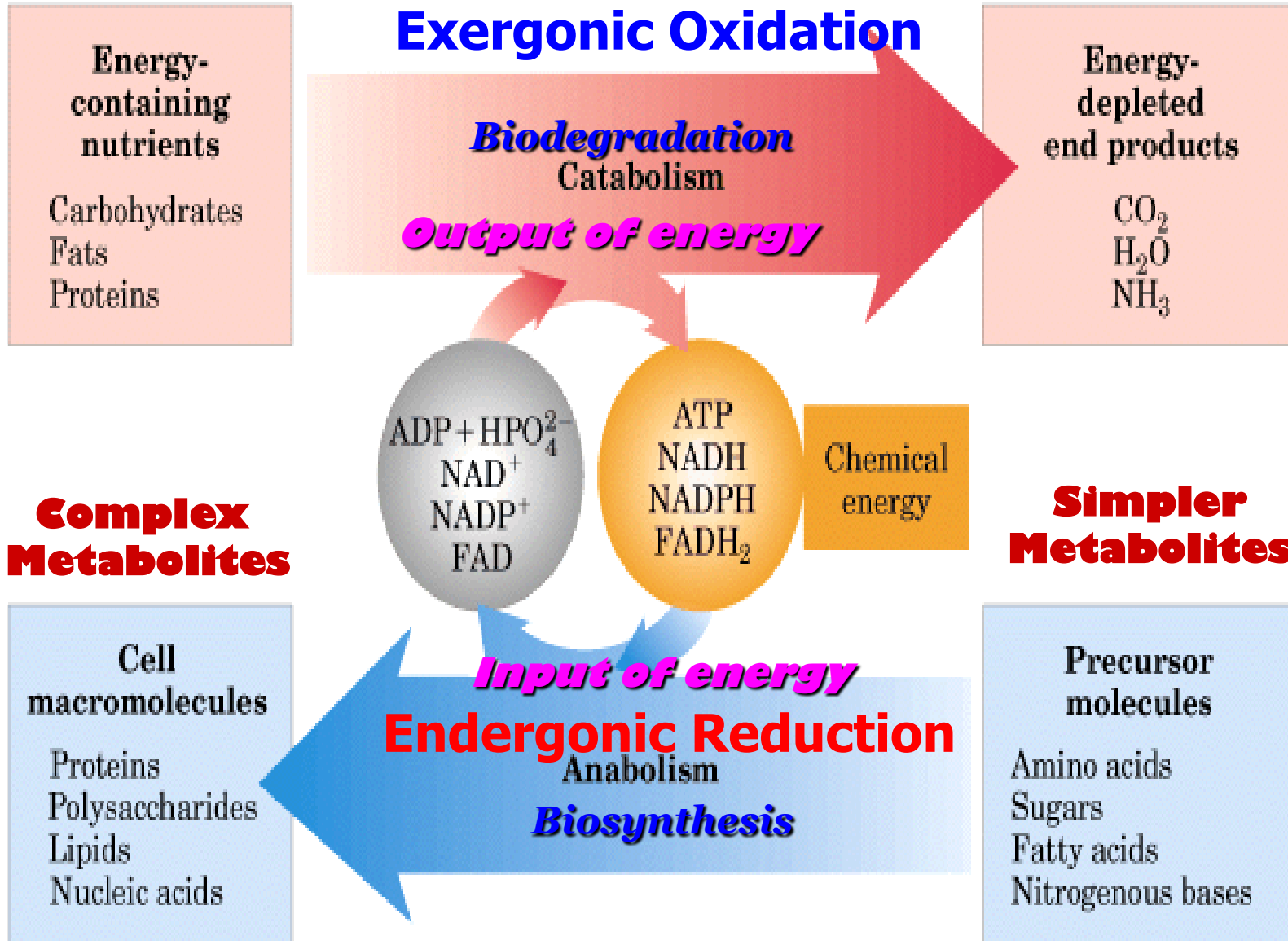
Sistem biologi bersifat **isotermik** dan menggunakan **energi kimia** untuk memberikan tenaga bagi proses kehidupan.

- **Living organisms** ;
- must work to stay alive, to grow and to reproduce
- have the ability to produce energy and to channel it into biological work
- carry out energy transductions, conversions of one form of energy to another form.

- **Modern organisms I**
- use the chemical energy in fuels (carbohydrates, lipids) to bring about the synthesis of complex macromolecules from simple precursors
- They also convert the chemical energy into concentration gradients and electrical gradients, into motion and heat, and, in a few organisms into light (fireflies, some deep-sea fishes)

Cells require sources of free energy

(Fuels)



Cells require sources of free energy

- Living organisms acquire free energy from nutrient molecules. Cells transform this free energy into ATP and other energy-rich compounds
- They are capable of providing energy for biological work at constant temperature.
- The composition of a reacting system tends to continue changing until equilibrium is reached. At the equilibrium the rates of the forward and reverse reactions are equal and no further change occurs in the system.

Kaidah termodinamika dalam sistem biologik

- Biological energy transductions obey the same physical laws that govern all other natural processes
- **Bioenergetics is the quantitative study of the energy transductions that occur in living cells and of the nature and function of the chemical process underlying these transductions**

Laws of thermodynamics

- 1. Hukum penyimpanan energi, yang berbunyi: **energi total sebuah sistem, termasuk energi sekitarnya adalah konstan.** Ini berarti bahwa saat terjadi perubahan di dalam sistem tidak ada energi yang hilang atau diperoleh.
- Namun energi dapat dialihkan antar bagian sistem atau dapat diubah menjadi energi bentuk lain. Contohnya **energi kimia dapat diubah menjadi energi listrik, panas, mekanik** dan sebagainya

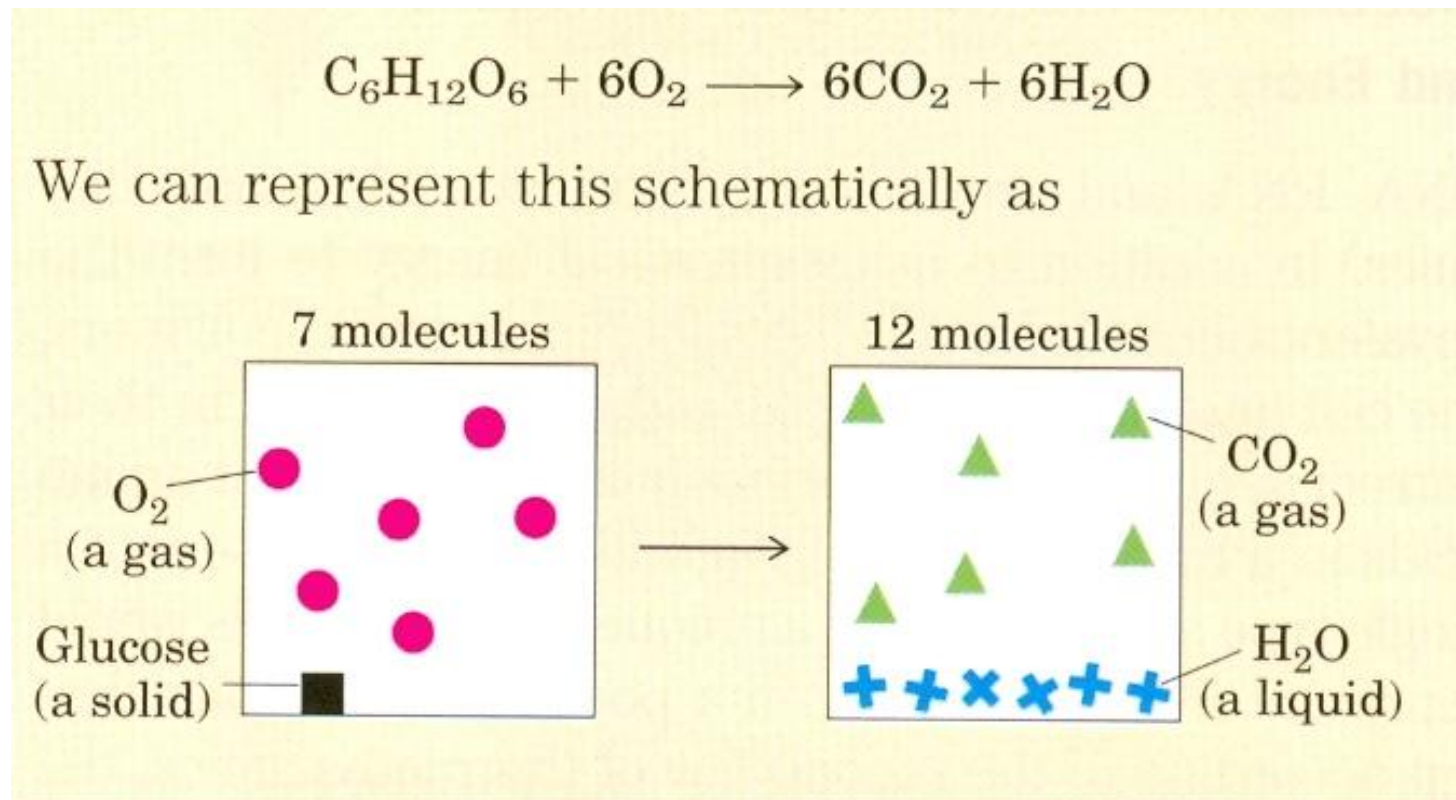
Laws of thermodynamics

- 2. Kaidah kedua berbunyi: **entropi total sebuah sistem harus meningkat bila proses ingin berlangsung spontan.** Entropi adalah derajat ketidakteraturan atau keteracakan sistem. Entropi akan mencapai taraf maksimal di dalam sistem seiring sistem mendekati keadaan seimbang yang sejati. Dalam kondisi suhu dan tekanan konstan, hubungan antara perubahan energi bebas (ΔG) pada sebuah sistem yang bereaksi, dengan perubahan entropi (ΔS), diungkapkan dalam persamaan:
 - $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$
 - Keterangan: ΔH adalah perubahan entalpi (panas) dan T adalah suhu absolut.

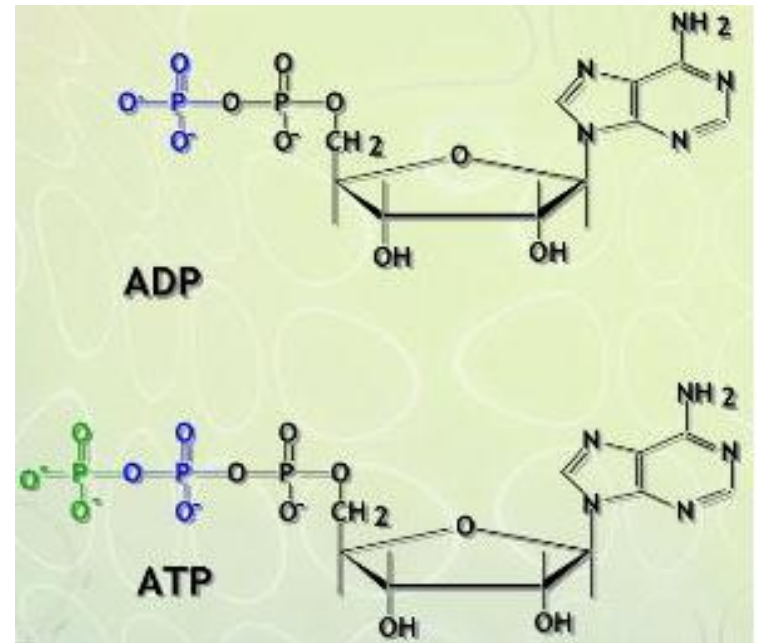
- Di dalam kondisi reaksi biokimia, mengingat ΔH kurang lebih sama dengan ΔE , perubahan total energi internal di dalam reaksi, hubungan di atas dapat diungkapkan dengan persamaan:
- $\Delta G = \Delta E - T\Delta S$
- Jika ΔG bertanda negatif, reaksi berlangsung spontan dengan kehilangan energi bebas (reaksi eksergonik). Jika ΔG sangat besar, reaksi benar-benar berlangsung sampai selesai dan tidak bisa membalik (irreversibel).
- Jika ΔG bertanda positif, reaksi berlangsung hanya jika memperoleh energi bebas (reaksi endergonik). Bila ΔG sangat besar, sistem akan stabil tanpa kecenderungan untuk terjadi reaksi.

Example: The oxidation of glucose

- Aerobic organisms extract free energy from glucose obtained from their surroundings by oxidizing the glucose with oxygen (also obtained from surroundings). The end products of this oxidation reaction are CO_2 and H_2O and they are returned to the surroundings. At the end of this process, the surroundings undergo an increase in entropy, whereas the organism itself remains in a steady state and no change occurs in its internal order



- **Peran senyawa fosfat berenergi tinggi dalam penangkapan dan pengalihan energi**
- Untuk mempertahankan kehidupan, semua organisme harus mendapatkan pasokan energi bebas dari lingkungannya. Organisme **autotrofik** melakukan metabolisme dengan proses eksergonik sederhana, misalnya tumbuhan hijau menggunakan energi cahaya matahari, bakteri tertentu menggunakan reaksi $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$. Sebaliknya organisme **heterotrofik**, memperoleh energi bebasnya dengan melakukan metabolisme yaitu pemecahan molekul organik kompleks.
- Mg^{2+}
- Adenosin trifosfat (ATP) berperan sentral dalam pemindahan energi bebas dari proses eksergonik ke proses endergonik. ATP adalah nukleotida trifosfat yang mengandung adenin, ribosa dan 3 gugus fosfat (lihat Gambar 3.1). Dalam reaksinya di dalam sel, ATP berfungsi sebagai kompleks Mg^{2+}

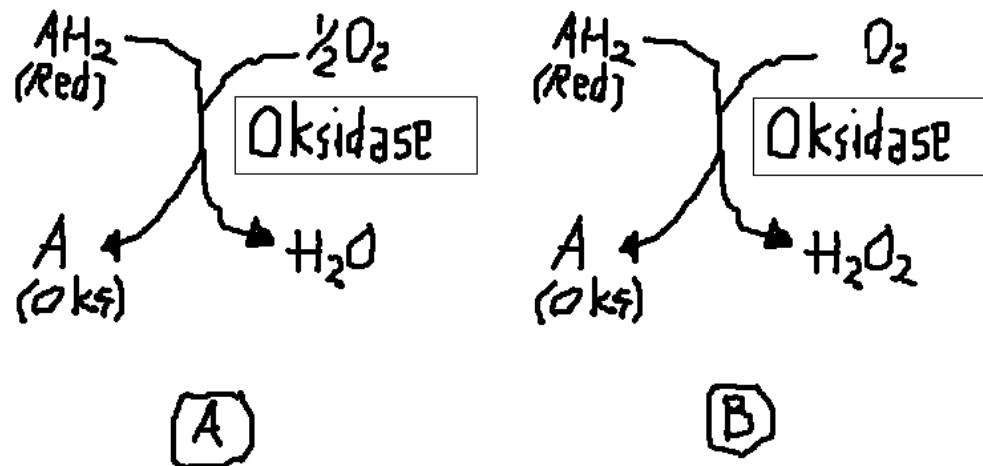


- Energi bebas baku hasil hidrolisis senyawa-senyawa fosfat penting dalam biokimia. Terlihat bahwa nilai hidrolisis gugus terminal fosfat pada ATP terbagi menjadi 2 kelompok. Pertama, fosfat berenergi rendah yang memiliki ΔG lebih rendah dari pada ΔG^0 pada ATP. Kedua, fosfat berenergi tinggi yang memiliki nilai ΔG lebih tinggi daripada ΔG^0 pada ATP, termasuk di dalamnya, ATP dan ADP, kreatin fosfat, fosfoenol piruvat dan sebagainya.
- Senyawa biologik penting lain yang berenergi tinggi adalah tiol ester yang mencakup koenzim A (misal asetil-KoA), protein pembawa asil, senyawa-senyawa ester asam amino yang terlibat dalam sintesis protein, S-adenosilmetionin (metionin aktif), uridin difosfat glukosa dan 5-fosforibosil-1-pirofosfat.

- organofosfat yang memiliki peran penting dalam biokimia
- Gugus fosfat berenergi tinggi oleh Lipmann dilambangkan dengan $\sim\text{P}$. Simbol ini menunjukkan bahwa gugus yang melekat pada ikatan, pada saat peralihan pada suatu akseptor yang tepat, akan mengakibatkan pemindahan kuantitas energi bebas yang lebih besar. Oleh karena itulah sebagian ahli biokimia lebih menyukai istilah **potensial pemindahan gugus** daripada **ikatan berenergi tinggi**.
- Berdasarkan posisi ATP pada Tabel 3.1, maka ATP merupakan donor fosfat berenergi tinggi (donor energi bebas) bagi senyawa-senyawa di bawahnya. Di sisi lain, ADP dapat menerima fosfat berenergi tinggi untuk membentuk ATP dari senyawa yang berada di atas ATP dalam tabel. Akibatnya siklus ATP/ADP menghubungkan proses-proses yang menghasilkan $\sim\text{P}$ dan proses-proses yang menggunakan $\sim\text{P}$. Dengan demikian **ATP terus dikonsumsi dan terus diproduksi**. Proses terjadi dengan kecepatan sangat tinggi, karena depot ATP/ADP sangat kecil dan hanya cukup untuk mempertahankan jaringan aktif dalam beberapa detik saja.

- Ada 3 sumber utama $\sim\text{P}$ yang berperan dalam konservasi atau penangkapan energi.
- Fosforilasi oksidatif
- Fosforilasi oksidatif adalah sumber $\sim\text{P}$ terbesar dalam organisme aerobik. Energi bebas untuk menggerakkan proses ini berasal dari oksidasi rantai respirasi di dalam mitokondria dengan menggunakan oksigen.
- Glikolisis
- Dalam glikolisis terjadi pembentukan netto dua $\sim\text{P}$ yang terjadi akibat pembentukan laktat
- Siklus asam sitrat
- Dalam siklus asam sitrat satu $\sim\text{P}$ dihasilkan langsung pada tahap suksinil tiokinase.
- **Oksidasi biologi**
- Oksidasi adalah pengeluaran elektron dan reduksi adalah pemerolehan elektron. Sebagai contoh adalah oksidasi ion ferro menjadi feri yang dilukiskan pada Gambar 3.3. Dengan demikian oksidasi akan selalu disertai reduksi akseptor elektron. **e- (elektron)**
- **Fe²⁺ Fe³⁺**

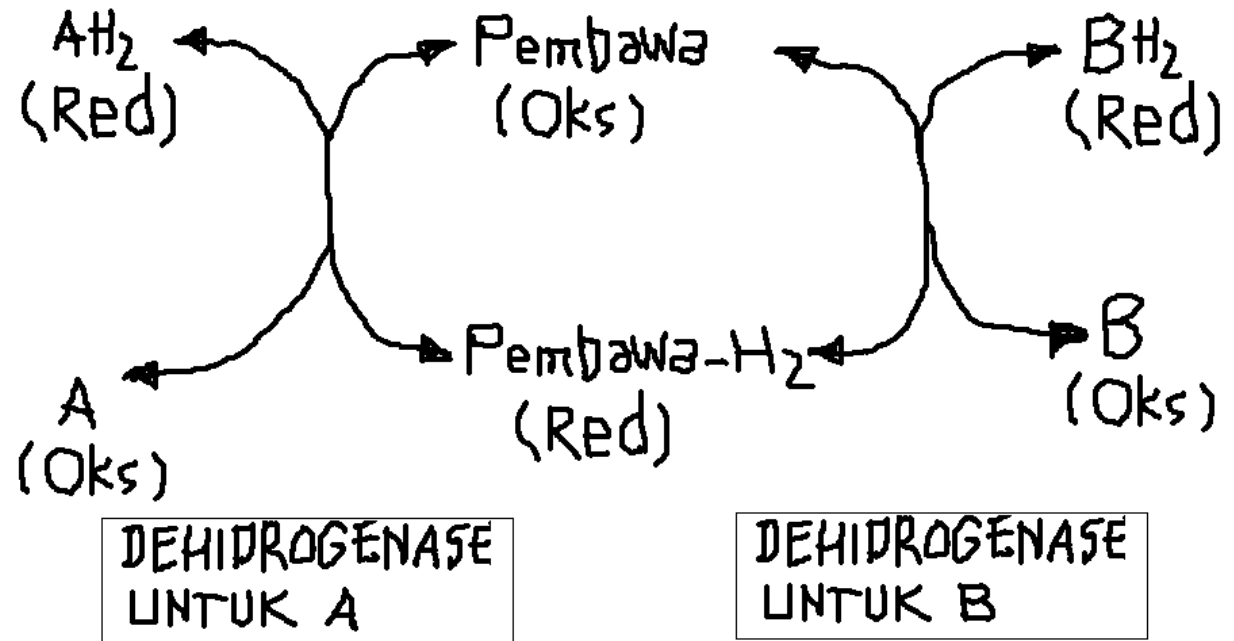
- **Enzim-enzim penting dalam oksidasi biologi**
- Enzim-enzim yang terlibat dalam reaksi reduksi dan oksidasi dinamakan enzim oksidoreduktase. Terdapat 4 kelompok enzim oksidoreduktase yaitu: oksidase, dehidrogenase, hidroperoksidase dan oksigenase.
- **Oksidase**
- Enzim oksidase mengkatalisis pengeluaran hidrogen dari substrat dengan menggunakan oksigen sebagai akseptor hidrogen. Enzim-enzim tersebut membentuk air atau hidrogen peroksida. Contoh peran enzim tersebut dilukiskan pada Gambar 3.4



Gambar Oksidasi metabolit yang dikatalisis oleh enzim oksidase

- Dehidrogenase
- Dehidrogenase tidak dapat menggunakan oksigen sebagai akseptor hidrogen. Enzim-enzim ini memiliki 2 fungsi utama yaitu:
- Pertama, berperan dalam pemindahan hidrogen dari substrat yang satu ke substrat yang lain dalam reaksi reduksi-oksidasi berpasangan.
- Kedua, sebagai komponen dalam rantai respirasi pengangkutan elektron dari substrat ke oksigen.

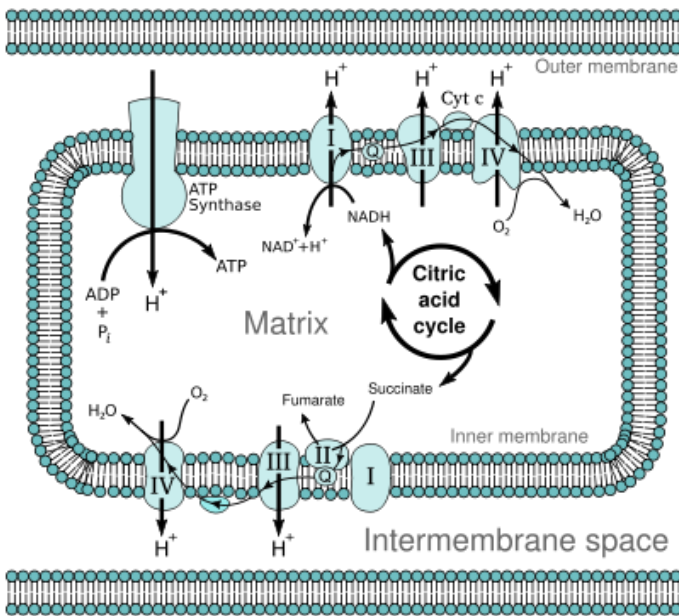
Gambar .Oksidasi suatu metabolit yang dikatalisis oleh enzim-enzim dehidrogenase



- **Rantai respirasi dan fosforilasi oksidatif**
- Rantai respirasi terjadi di dalam mitokondria sebagai pusat tenaga. Di dalam mitokondria inilah sebagian besar peristiwa penangkapan energi yang berasal dari oksidasi respiratorik berlangsung. Sistem respirasi dengan proses pembentukan intermediat berenergi tinggi (ATP) ini dinamakan **fosforilasi oksidatif**. Fosforilasi oksidatif memungkinkan organisme aerob menangkap energi bebas dari substrat respiratorik dalam proporsi jauh lebih besar daripada organisme anaerob.

- **Proses fosforilasi oksidatif**
- Organisme kemotrop memperoleh energi bebas dari oksidasi molekul bahan bakar, misalnya glukosa dan asam lemak. Pada organisme aerob, akseptor elektron terakhir adalah oksigen. Namun elektron tidak langsung ditransfer langsung ke oksigen, melainkan dipindah ke pengemban-pengemban khusus antara lain nikotinamida adenin dinukleotida (

- NAD⁺) dan flavin adenin dinukleotida (FAD).
- Pengemban tereduksi ini selanjutnya memindahkan elektron ke oksigen melalui rantai transport elektron yang terdapat pada sisi dalam membran mitokondria (Gambar 3.7). Gradien proton yang terbentuk sebagai hasil aliran elektron ini kemudian mendorong sintesis ATP dari ADP dan Pi dengan bantuan enzim ATP sintase. Proses tersebut dinamakan fosforilasi oksidatif. Dalam hal ini energi dipindahkan dari rantai transport elektron ke ATP sintase oleh perpindahan proton melintasi membran. Proses ini dinamakan kemiosmosis.



Gambar Ringkasan proses fosforilasi oksidatif di dalam mitokondria Rantai transport elektron membawa proton dan elektron, memindahkan elektron dari donor ke akseptor dan mengangkut proton melalui membran

Kompleks I NADH + H⁺ FMN Fe²⁺ SCoQ NAD⁺ FMN H² Fe³⁺ SCoQH₂ Kompleks

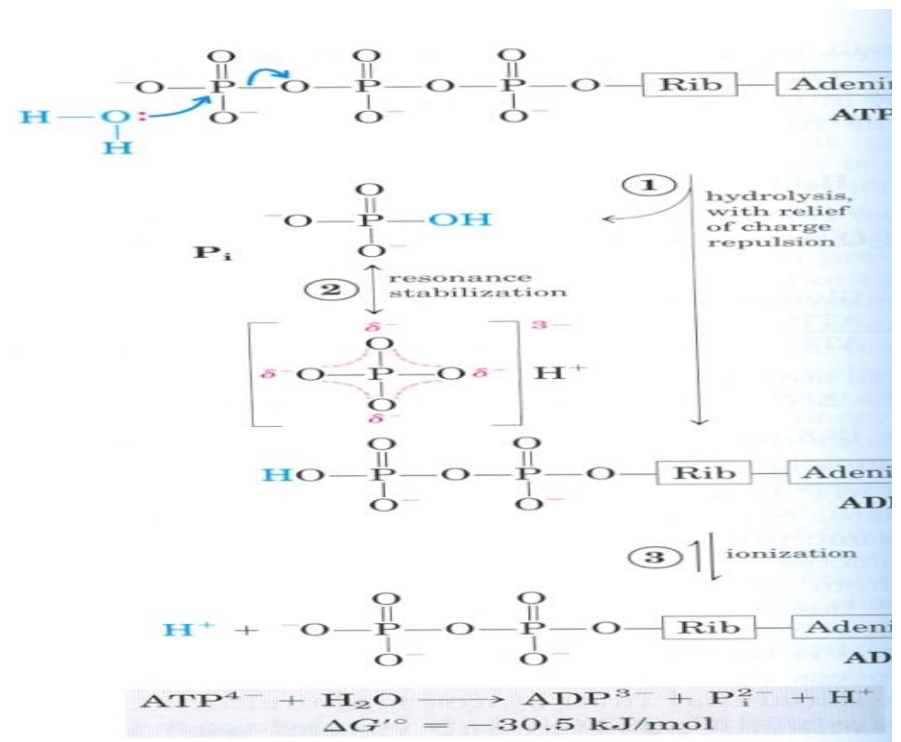
Tahap-tahap proses fosforilasi oksidatif Secara ringkas fosforilasi oksidatif, terdiri atas 5 proses dengan dikatalisis oleh kompleks enzim, masing-masing kompleks I, kompleks II, kompleks III, kompleks IV dan kompleks V

Phosphoryl group transfer and ATP

- Living cells obtain free energy in a chemical form by the catabolism of nutrient molecules
- They use that energy to make ATP from ADP and P_i .
- ATP donates some of its chemical energy to
 1. Endergonic processes such as the synthesis of metabolic intermediates and macromolecules from smaller precursors
 2. The transport of substances across membranes against concentration gradients
 3. Mechanical motion (muscle contraction)
- This donation of energy from ATP can occur in the two form
- A) $ATP \rightarrow ADP + P_i$ or
- B) $ATP \rightarrow AMP + 2 P_i$

The free energy change for ATP hydrolysis is large and negative

- The hydrolytic cleavage of the terminal phosphoanhydride bond in ATP separates one of the three negatively charged phosphates and thus relieves some of the electrostatic repulsion in ATP
- Released P_i is stabilized by the formation of several resonance forms not possible in ATP



- Although the hydrolysis of ATP is highly exergonic ($\Delta G'^{\circ} = -30.5 \text{ kJ/mol}$), the ATP is stable at pH 7, because the activation energy for ATP hydrolysis is relatively high. Rapid hydrolysis of ATP occurs only when catalyzed by an enzyme

SUMMARY

- **ATP is the chemical link between catabolism and anabolism. The exergonic conversion of ATP coupled to many endergonic processes in living organisms**
- **Cells also contain some high-energy compounds which have a high phosphorylation potential, like ATP. They are good donors of phosphoryl groups.**