

# Rantai Transport Elektron dan Fosforilasi Oksidatif

---

TIK :

Mahasiswa mampu menjelaskan rantai transport elektron dan menguraikan proses fosforilasi oksidatif

# Pokok Bahasan

---

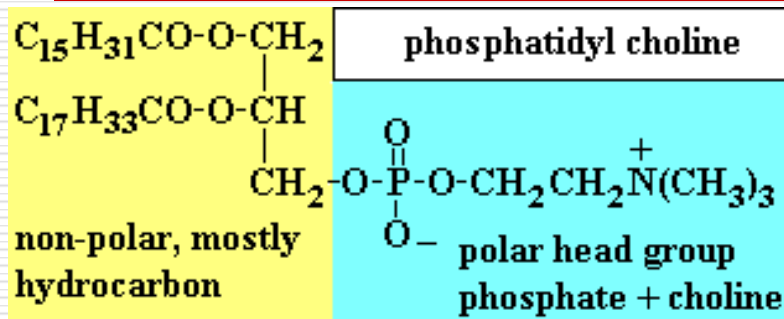
- Senyawa Dasar untuk Fosforilasi Oksidatif dan tempat kedudukannya
    - Membran dan komponennya
    - Mitokondria dan tempat terjadinya perpindahan elektron
  - Rantai Transport Elektron
  - Prinsip konservasi energi di membran
    - Gradient photon dan osmotik kimia
  - Sintesis ATP
-

# Membran dan pengorganisasian sel

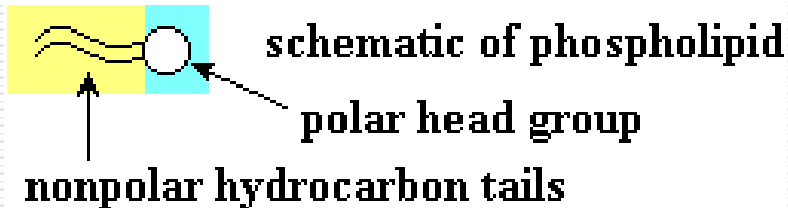
---

- Bagian dalam sel dan isinya terlindung dari luar oleh membran
  - Membran memiliki sifat selektif
  - Membran terdiri dari dua bagian :
    - **Lapisan ganda phospholipid**
    - **Embedded proteins** (protein yang melekat)
-

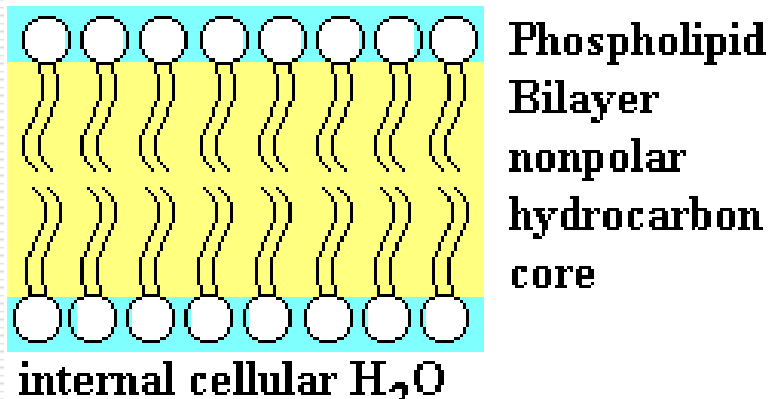
# Lapisan ganda phospholipid



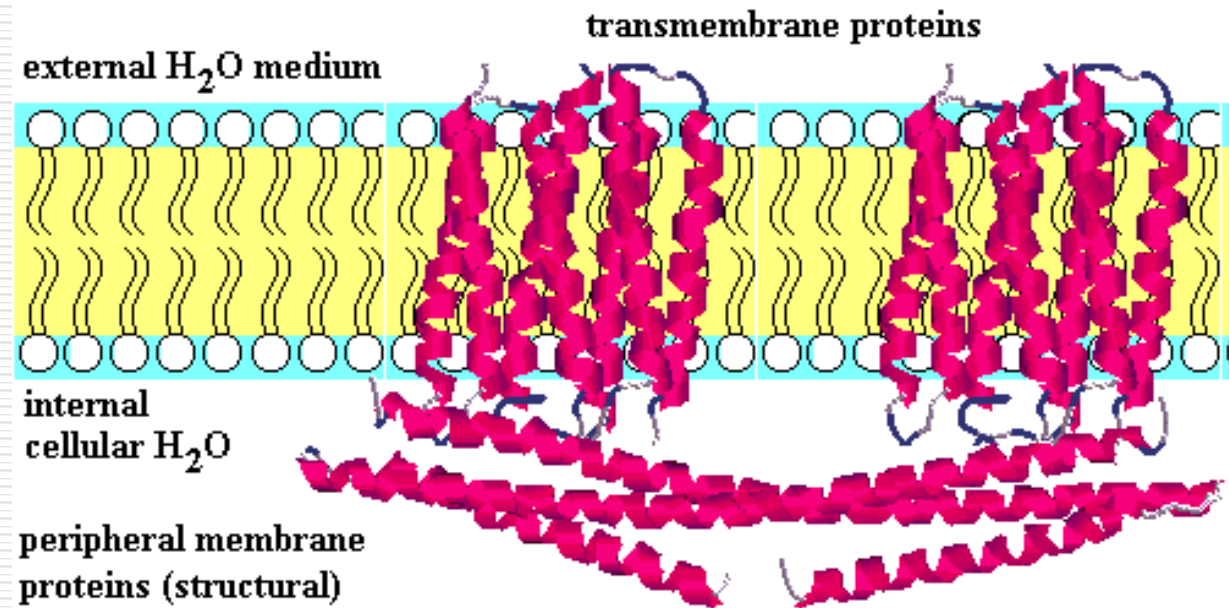
- ❑ Basis : diacylglycerol, OH ketiga glycerol terkait dengan polar "head group" turunan phosphate ester
- ❑ Gugus acyl; rantai hidrokarbon panjang yang non polar
- ❑ Phospholipids bergabung melalui interaksi hidrofobik diantara "tail" dan interaksi polar diantara "head" dan "head dengan H<sub>2</sub>O.
- ❑ Hydrocarbon tails terpisah jauh dari kontak dengan H<sub>2</sub>O; pengaturan **bilayer**, sandwich dari lapisan 2-dimensi.



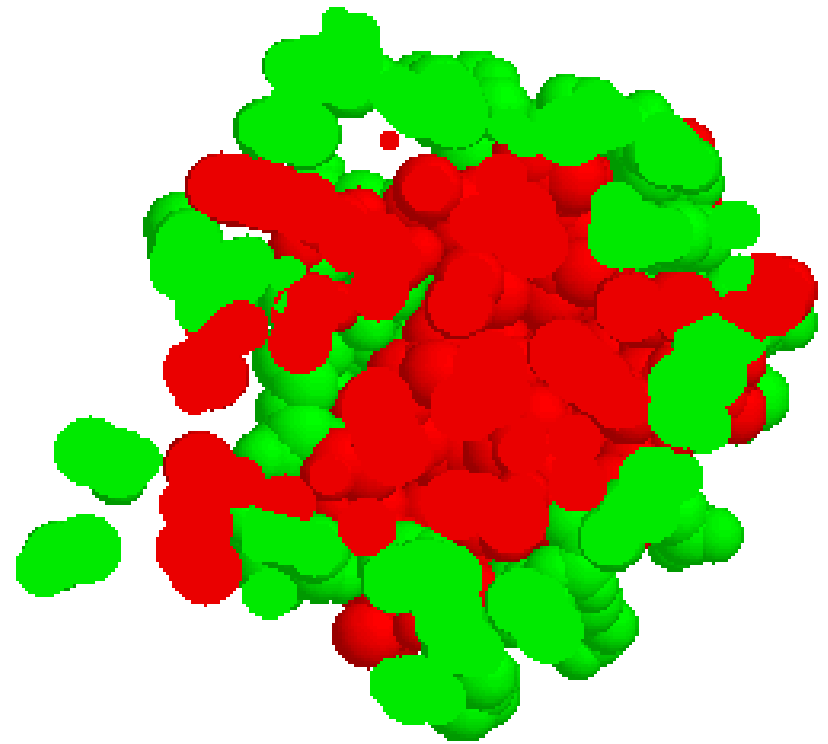
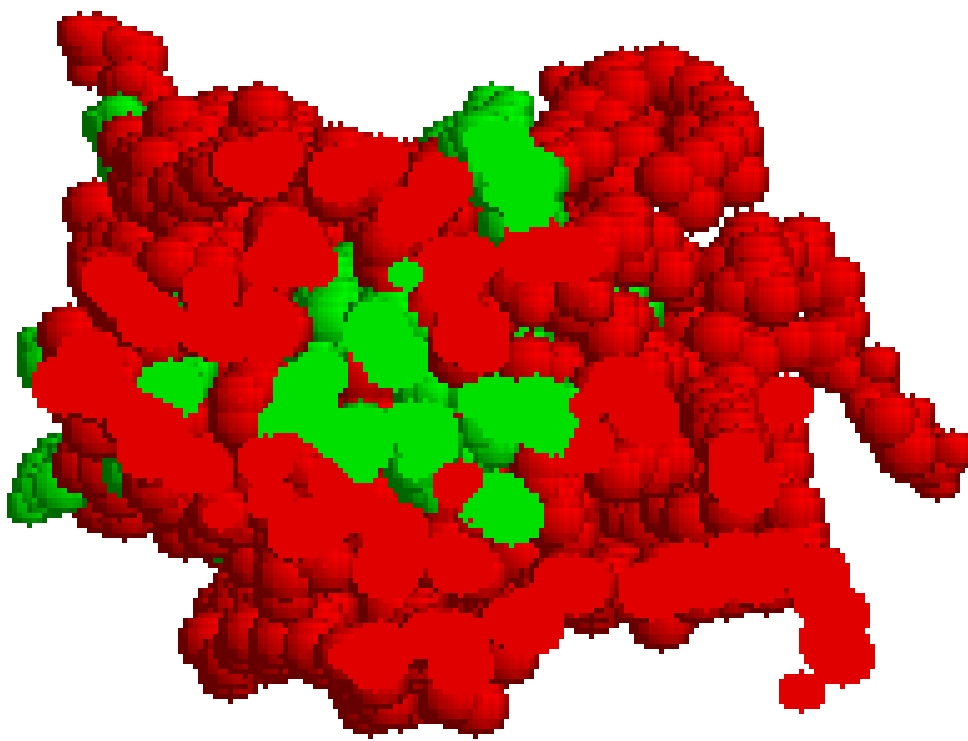
external H<sub>2</sub>O medium



## Protein terlekat di membran (transmembrane)



- ❑ Melintasi lapisan ganda (bilayer), bundel alpha helix, beta-barrels
- ❑ **Peripheral membrane proteins** lekat pada permukaan membran, fungsi struktural.



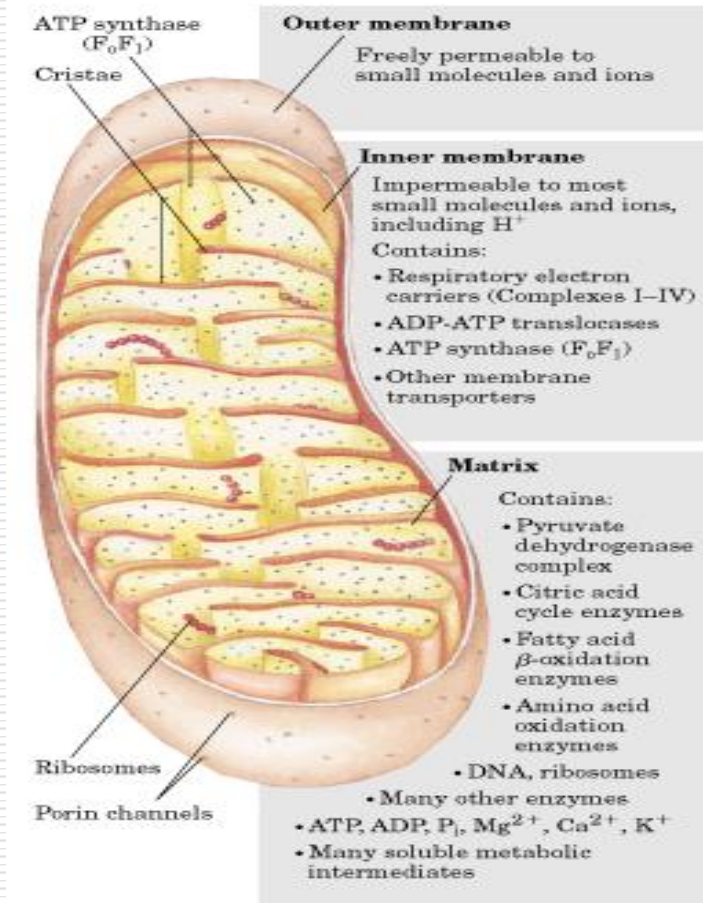
- ❑ *Bacteriorhodopsin*, AA non polar merah, dan polar hijau. Kanan : Myoglobin (normal soluble protein).
- ❑ Transmembran protein memiliki distribusi **inside-out dari AA polar dan nonpolar**;
- ❑ Sisi samping nonpolar di luar, kontak dengan hydrocarbon tails dari phospholipids.
- ❑ Sisi samping polar berhadapan muka dengan core protein.

# Fungsi phospholipid bilayer

---

- ❑ **Impermeabel** untuk semua molekul polar atau bermuatan.
  - ❑ Permeable untuk molekul kecil netral ( $O_2$ ,  $CO_2$ , ethanol) atau besar nonpolar.
  - ❑ Beberapa protein transmembran memiliki pengaturan dalam bentuk bundel; **lorong polar melintasi membran.**
  - ❑ Seleksi terhadap substrat yang bisa melintas, contoh **glucose and amino acid transport proteins.**
-

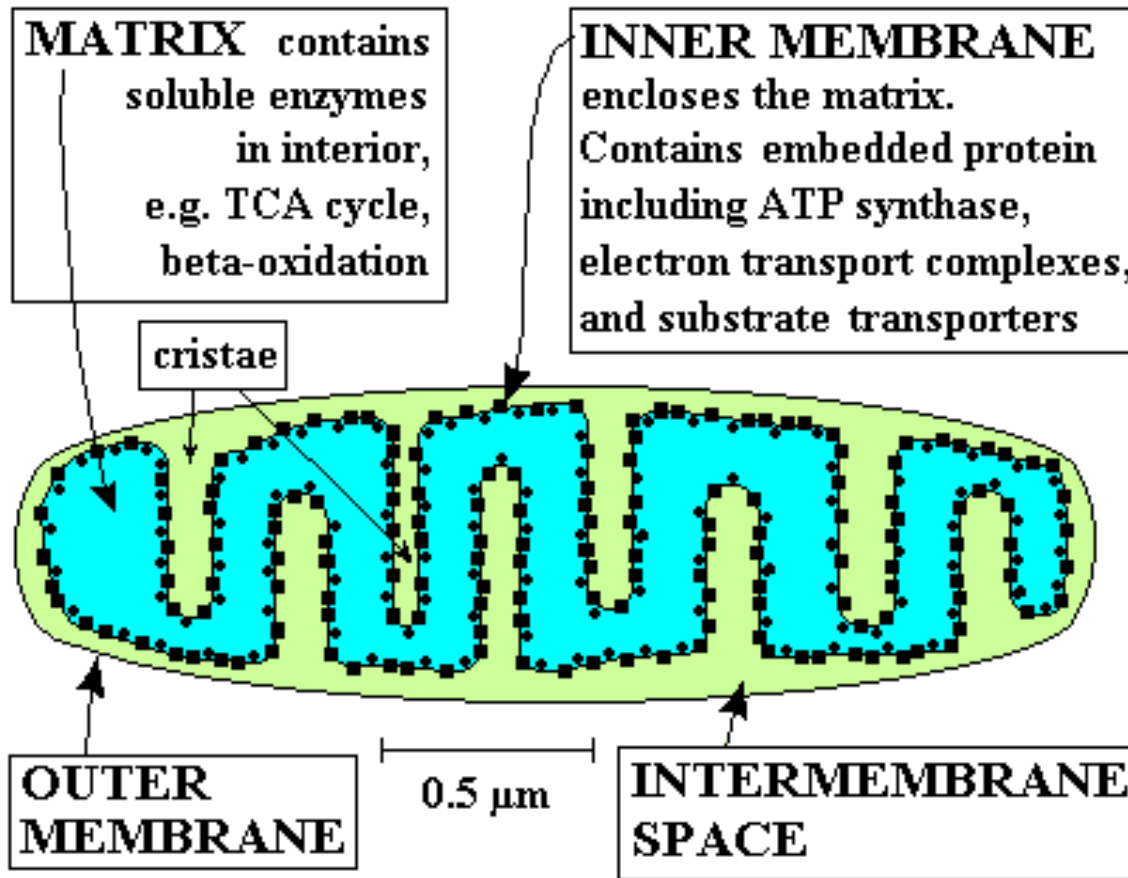
# Mitokondria



- ❑ Power House of cell
- ❑ Panjang 1 - 5 micrometers,
- ❑ Bentuk bervariasi.
- ❑ Dilingkupi oleh membran luar dan dalam.



# Mitokondria



- ❑ Fungsi oksidatif sel
- ❑ Siklus TCA, oksidasi asam lemak, asam amino, oxidative phosphorylation system.

# Membran Mitokondria

---

- ❑ Membran luar : protein struktural, pori besar, melewati molekul hingga 10 kDa.
  - ❑ Membran dalam : komponen fungsional, melewati molekul hingga 0,1 kDa.
  - ❑ Sangat convoluted untuk meningkatkan luas permukaan.
  - ❑ Kaya akan protein yang terlekat (70%).
    - Fungsi proteins : **electron transport complexes** penghubung oksidasi NADH dan  $\text{FADH}_2$  dengan  $\text{O}_2$ ,
    - **ATP synthase**
    - electron transport + ATP synthase = **oxidative phosphorylation** system.
-

# Kompleks transport elektron

---

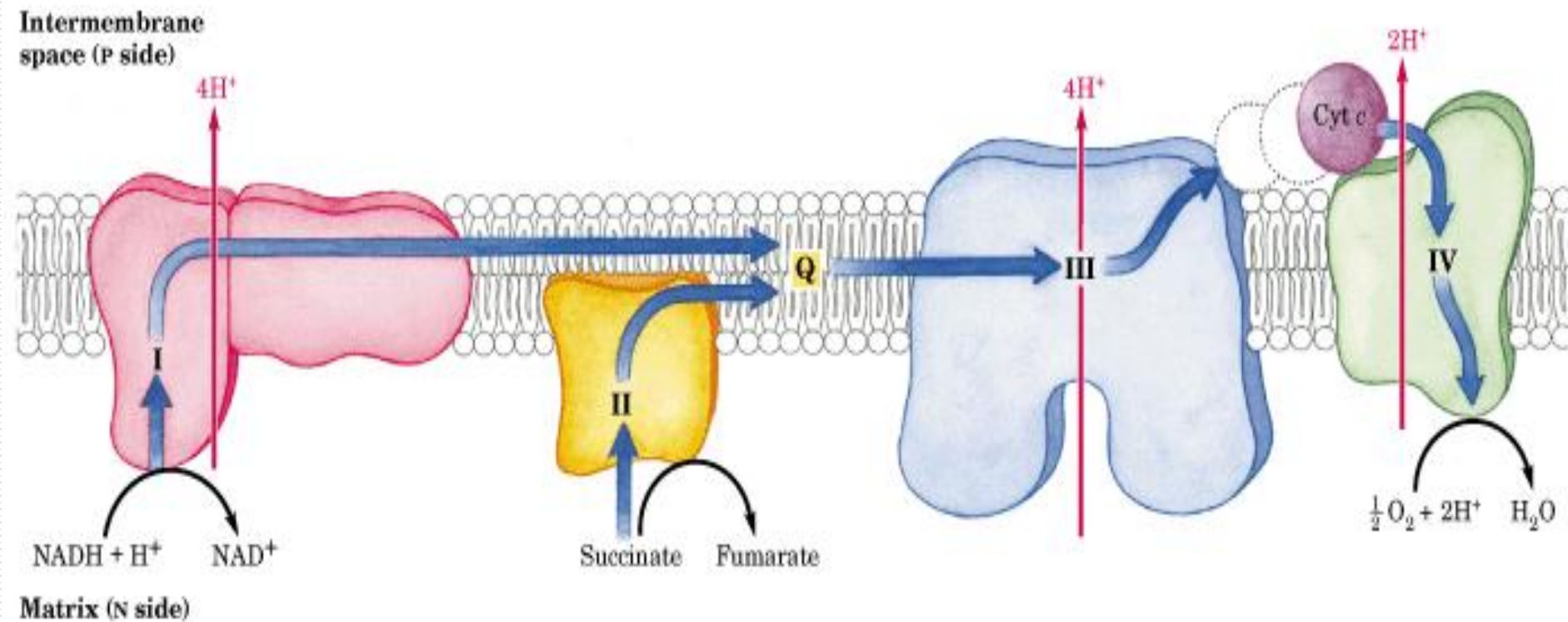
- ❑ Oksidasi dan reduksi : pemindahan elektron diantara reaktan
  - ❑ Oksidasi NADH dan  $\text{FADH}_2$  berlangsung bertahap, hingga elektron digunakan untuk mereduksi  $\text{O}_2$ , sehingga disebut **electron transport** (transport dari NADH ke  $\text{O}_2$ ).
  - ❑ Tahap dikatalisis oleh protein di membran dalam mitokondria yang dinamakan **electron transport complexes I-IV**.
  - ❑ Menyediakan sarana untuk menangkap energi dari oksidasi untuk sintesis ATP.
-

# The electron transport system

---

- ❑ Memecah proses oksidasi-reduksi agar recovery energi lebih baik
  - ❑ 2 senyawa intermediet yang menerima dan melewatkan elektron
  - ❑ 4 kompleks transport elektron
    - Kompleks I : NADH dehydrogenase (ubiquinone)
    - Kompleks II : Succinate dehydrogenase
    - Kompleks III : Ubiquinol-cytochrome-c reductase
    - Kompleks IV : Cytochrome-c-oxidase
  - ❑ Kompleks V : H<sup>+</sup> transporting ATP synthase
-

# Pengorganisasian



Treatment with digitonin

Outer membrane fragments discarded

Osmotic rupture

Inner membrane fragments

ATP synthase

Solubilization with detergent followed by ion-exchange chromatography

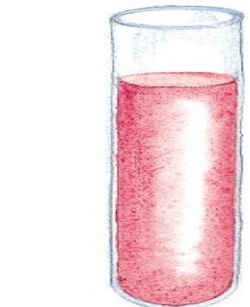
I

II

III

IV

ATP synthase



NADH → Q



Succinate → Q



Q → Cyt c



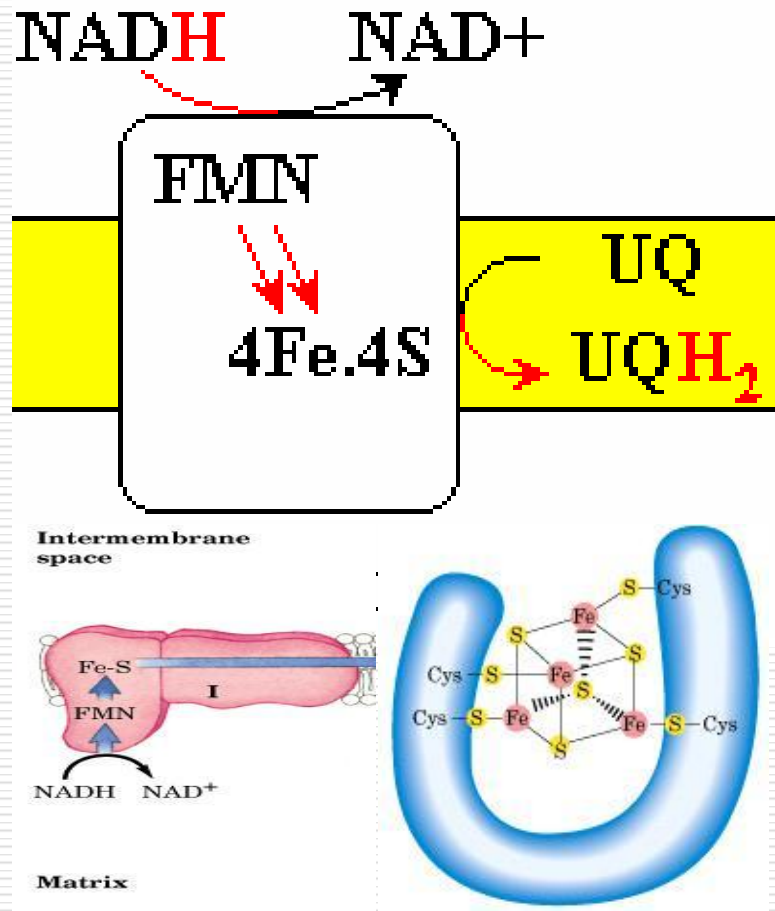
Cyt c → O<sub>2</sub>



ATP → ADP + P<sub>i</sub>

Reactions catalyzed by isolated fractions in vitro

# Kompleks 1 (NADH:UQ reductase)



- ☐ Tempat masuk NADH
- ☐ Jalur : FMN, Klaster 4Fe.4S dan Ubiquinon
- ☐ Memindahkan 4H<sup>+</sup>

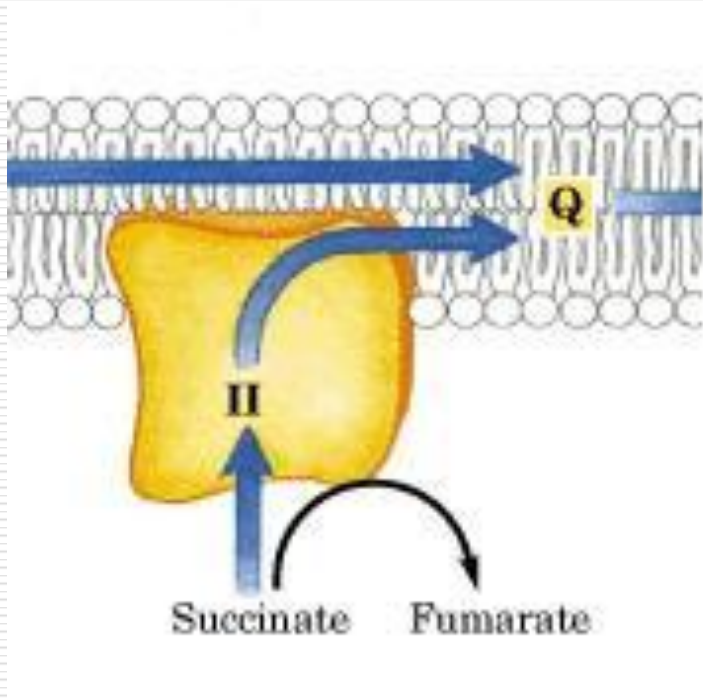


$$\Delta E^{\circ'} = +0,045 - (-0,321) = +0,366 \text{ volt}$$

$$\Delta G^{\circ'} = - (2) (96485) (0,366) = - 70,6 \text{ kJ/mol}$$



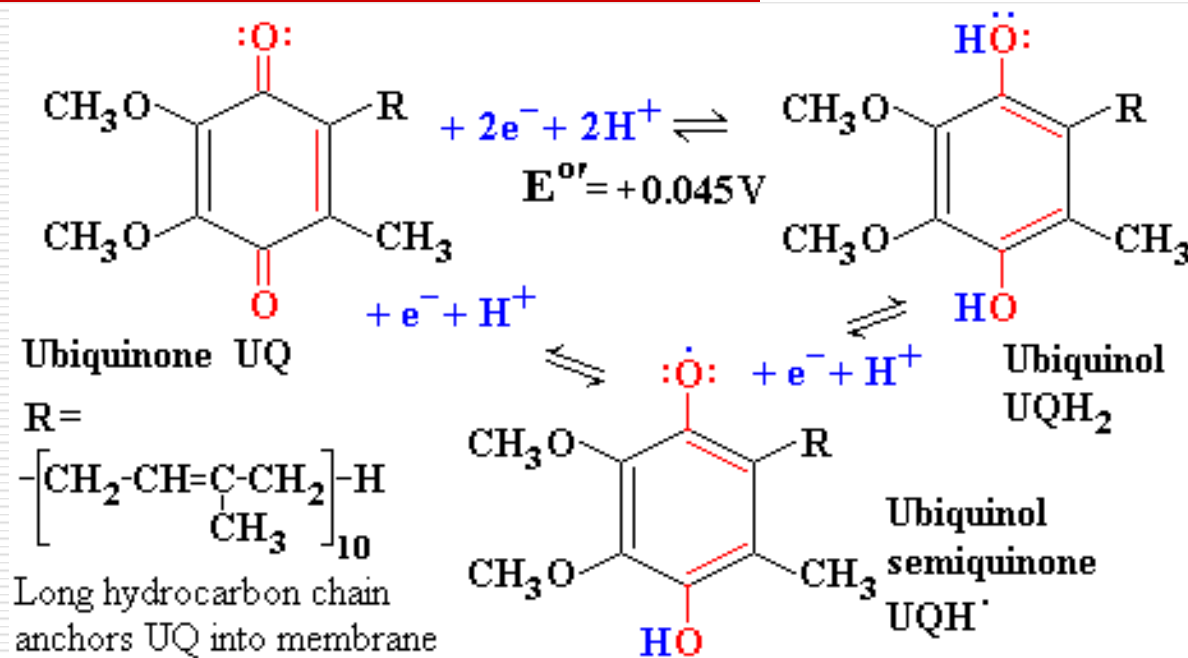
## Kompleks 2 (Succinate dehydrogenase)



- Tempat masuk suksinat
- Diterima oleh ubiquinon
- Hasil akhir Ubiquinol

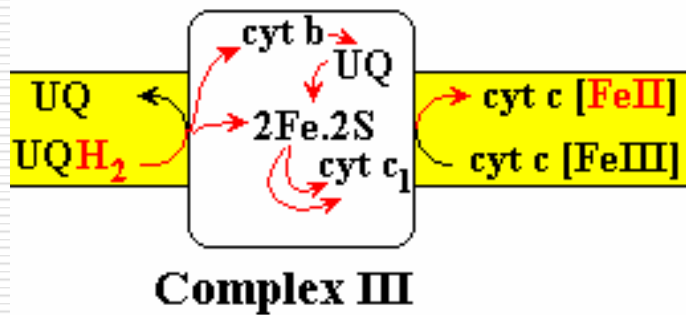
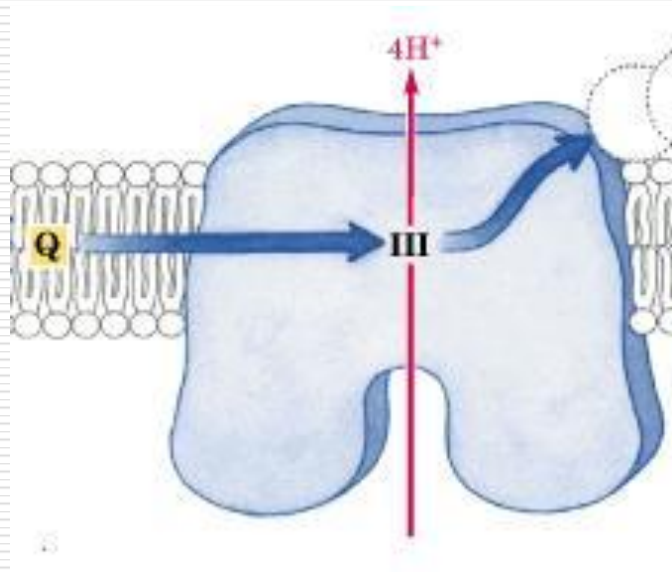


# IM 1 : Ubiquinone atau Coenzyme Q



- ❑ Menerima 2 elektron, tereduksi menjadi diphenol atau **ubiquinol (UQH<sub>2</sub>)**

## Kompleks 3 (Ubiquinol-cytochrome-c reductase)



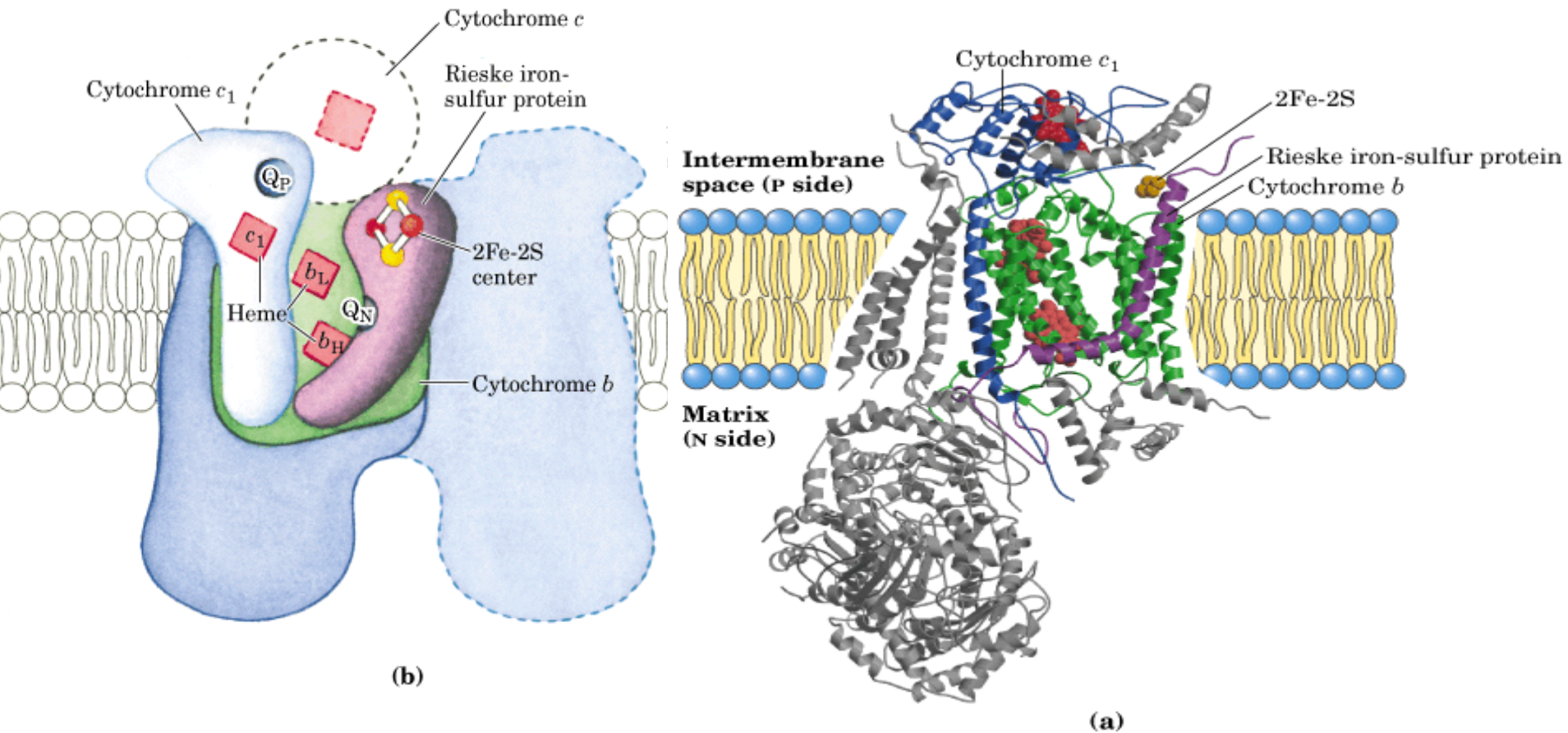
- Tempat Masuk Ubiquinol (UQH<sub>2</sub>)
- Jalur
  - Cyt b, UQ, 2Fe.2S, Cyt C1, Cyt C (FeIII)
  - 2Fe.2S, Cyt C1, Cyt C (FeIII)



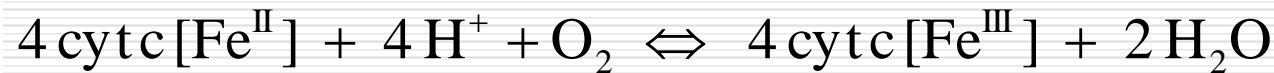
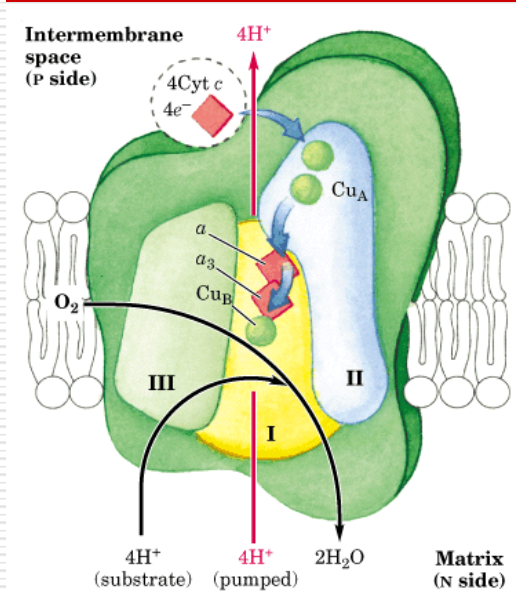
$$\Delta E^{\circ'} = +0,230 - 0,045 = +0,185$$

$$\Delta G^{\circ'} = -(2)(96485)(0,185) = -36,7 \text{ kJ/mol}$$

# Struktur



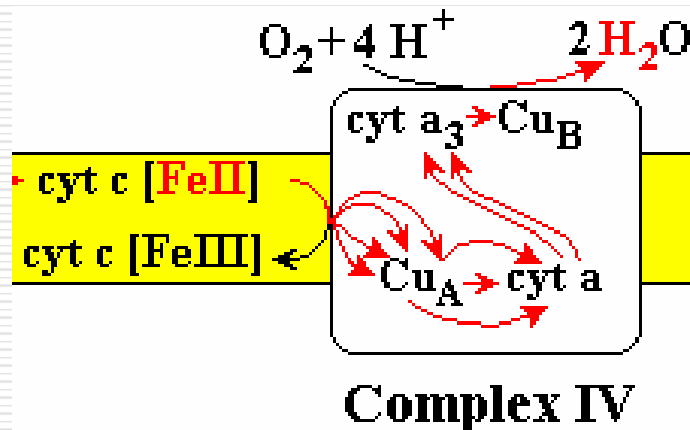
# Kompleks 4 (Cytochrome-c-oxidase)



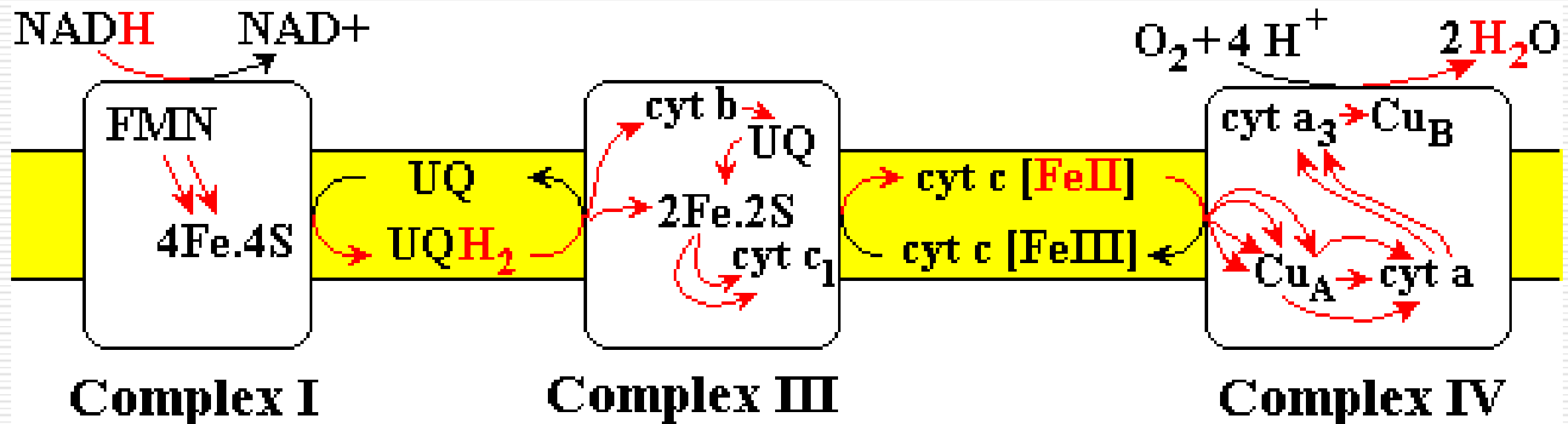
$$\Delta E^{\circ'} = +0,815 - 0,230 = +0,585$$

$$\Delta G^{\circ'} = - (2) (96485) (0,585) = -112,9 \text{ kJ/mol}$$

- ☐ Input Cyt C (FeII)
- ☐ Hasil akhir air

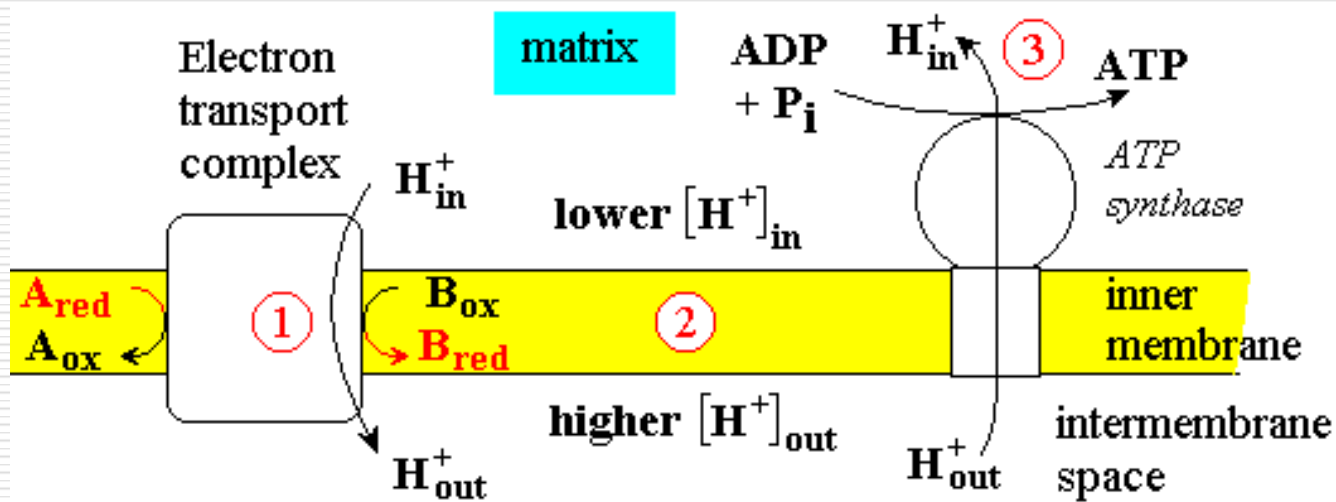


# Rantai keseluruhan



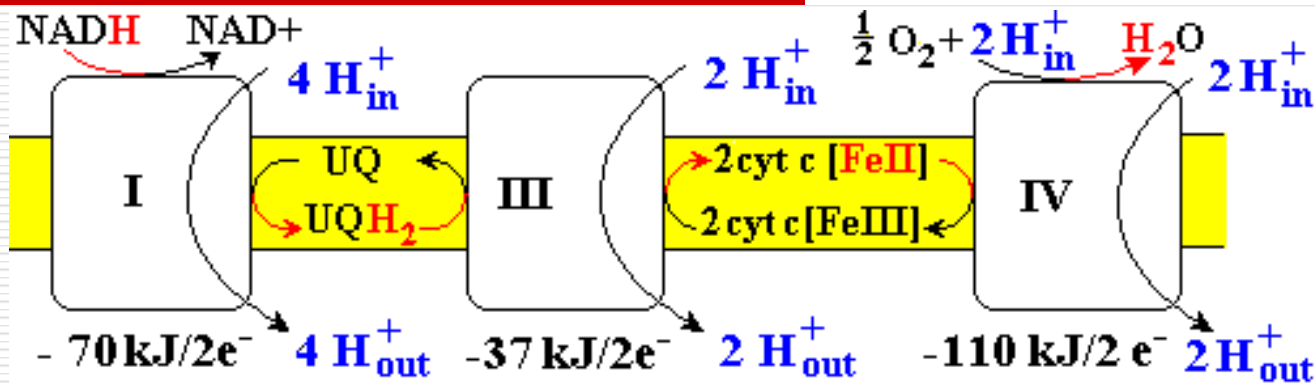
- **FMN**, transfer internal ke **iron-sulfur cluster (4Fe.4S)**, FeIII berubah menjadi FeII.
- Mereduksi UQ menjadi UQH<sub>2</sub>. UQ dan UQH<sub>2</sub> dapat bergerak antar kompleks
- **Complex III**, didistribusi ke cytochrome c, satu langsung ke kluster 2Fe.2S, satu lagi lewat cytochrome b lebih dahulu, dan ke 2Fe.2S, setelah yang pertama lewat.
- **Complex IV** menggunakan elektron dari cytochrome c untuk mereduksi O<sub>2</sub>. Elektron dikumpul dulu agar berjumlah 4 untuk reduksi penuh Oksigen. Reduksi parsial menghasilkan **O<sub>2</sub><sup>-</sup> (superoxide ion)** atau HO• (hydroxyl radical) yang sangat beracun.

# Perpindahan $H^+$



- ❑ Energi oksidasi untuk memompa ion  **$H^+$**  ke luar dari matrik
- ❑  **$[H^+]$  di dalam matrik lebih rendah dari  $[H^+]$  di luar.**  
Membran **impermeable terhadap  $H^+$**
- ❑ Mekanisme **ATP synthase** terangkai dengan kembalinya ion  **$H^+$**  ke matrik.

# Komplek I,III,IV sebagai Pompa Proton



- Untuk 1 NADH :
  - 4 H<sup>+</sup> oleh kompleks I,
  - 2 H<sup>+</sup> oleh III dan
  - 2 H<sup>+</sup> oleh IV
- Kompleks IV memakai 2 H<sup>+</sup> dari matrik untuk membuat H<sub>2</sub>O
- Netto 10 H<sup>+</sup> / NADH

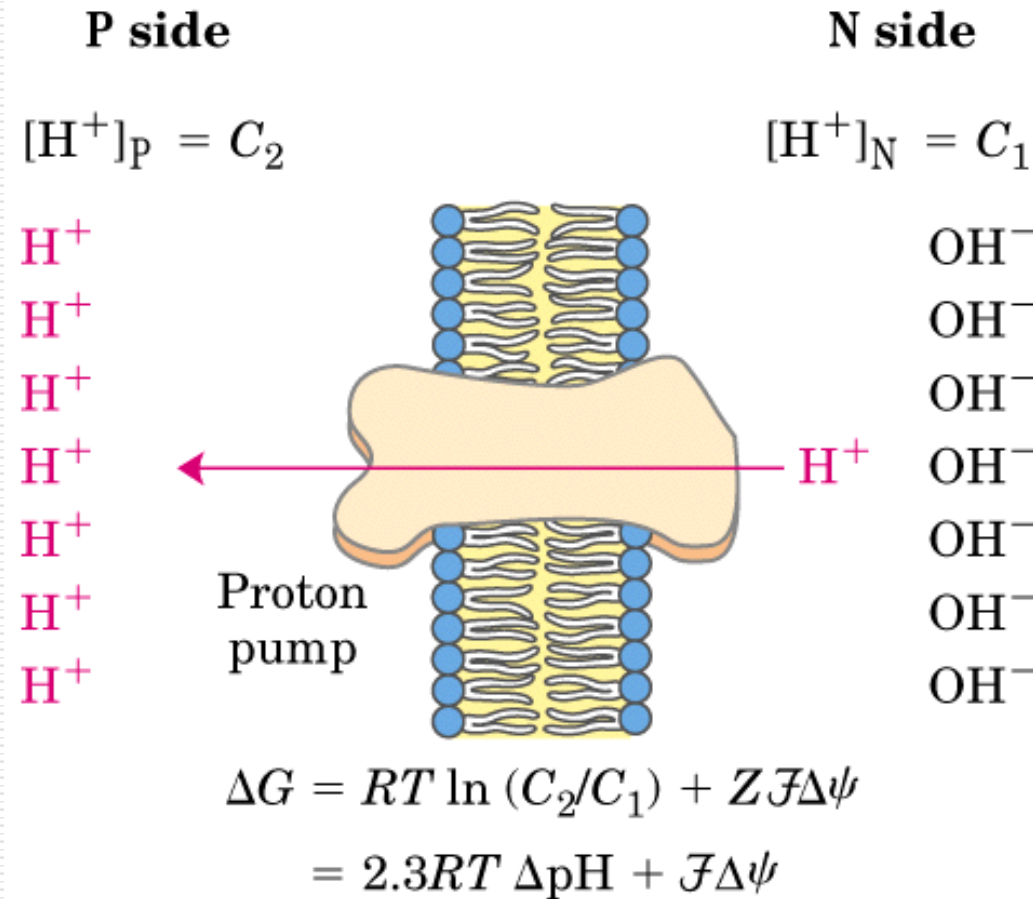
table 19–2

Standard Reduction Potentials of Respiratory Chain and Related Electron Carriers

Redox reaction (half-reaction)	<i>E</i> '° (V)
$2\text{H}^{+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{H}_2$	−0.414
$\text{NAD}^{+} + \text{H}^{+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{NADH}$	−0.320
$\text{NADP}^{+} + \text{H}^{+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{NADPH}$	−0.324
$\text{NADH dehydrogenase (FMN)} + 2\text{H}^{+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{NADH dehydrogenase (FMNH}_2\text{)}$	−0.30
$\text{Ubiquinone} + 2\text{H}^{+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{ubiquinol}$	0.045
$\text{Cytochrome } b (\text{Fe}^{3+}) + e^{-} \longrightarrow \text{cytochrome } b (\text{Fe}^{2+})$	0.077
$\text{Cytochrome } c_1 (\text{Fe}^{3+}) + e^{-} \longrightarrow \text{cytochrome } c_1 (\text{Fe}^{2+})$	0.22
$\text{Cytochrome } c (\text{Fe}^{3+}) + e^{-} \longrightarrow \text{cytochrome } c (\text{Fe}^{2+})$	0.254
$\text{Cytochrome } a (\text{Fe}^{3+}) + e^{-} \longrightarrow \text{cytochrome } a (\text{Fe}^{2+})$	0.29
$\text{Cytochrome } a_3 (\text{Fe}^{3+}) + e^{-} \longrightarrow \text{cytochrome } a_3 (\text{Fe}^{2+})$	0.55
$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^{+} + 2e^{-} \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$	0.816

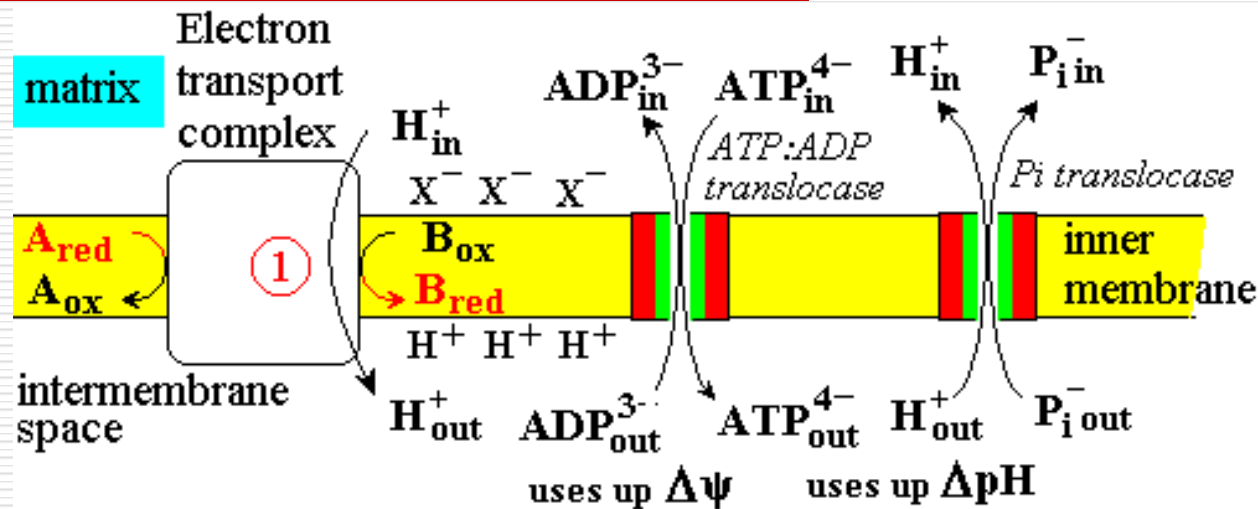


# Akibatnya .....



- ☐ Perbedaan konsentrasi  $H^+$
- ☒ Perbedaan pH
- ☒ Perbedaan potensial
- ☐ Proton motive force

# Transport ATP ke sitoplasma



- **ADP<sup>3-</sup>(out) + ATP<sup>4-</sup>(in) → ADP<sup>3-</sup>(in) + ATP<sup>4-</sup>(out)**
- ATP keluar dari mitokondria, diganti oleh ADP .
- **H<sup>+</sup>(out) + H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>(out) --> H<sup>+</sup>(in) + H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>(in)**

# Sehingga, ...

---

- ❑  $H^+$  yang kembali ke matrix
    - 3 buah untuk sintesis ATP
    - 1 buah untuk pemindahan ATP ke sitoplasma
    - Total 4 buah  $H^+$  kembali ke matrik
  - ❑ Hasil Netto Kompleks I, III, dan IV : **10  $H^+$  / NADH**
  - ❑ ATP yang siap digunakan :  $10 / 4 = \mathbf{2,5 \text{ ATP}}$
  - ❑ [LINK ANIMASI](#)
-

Fosforilasi Oksidatif; ITP 240

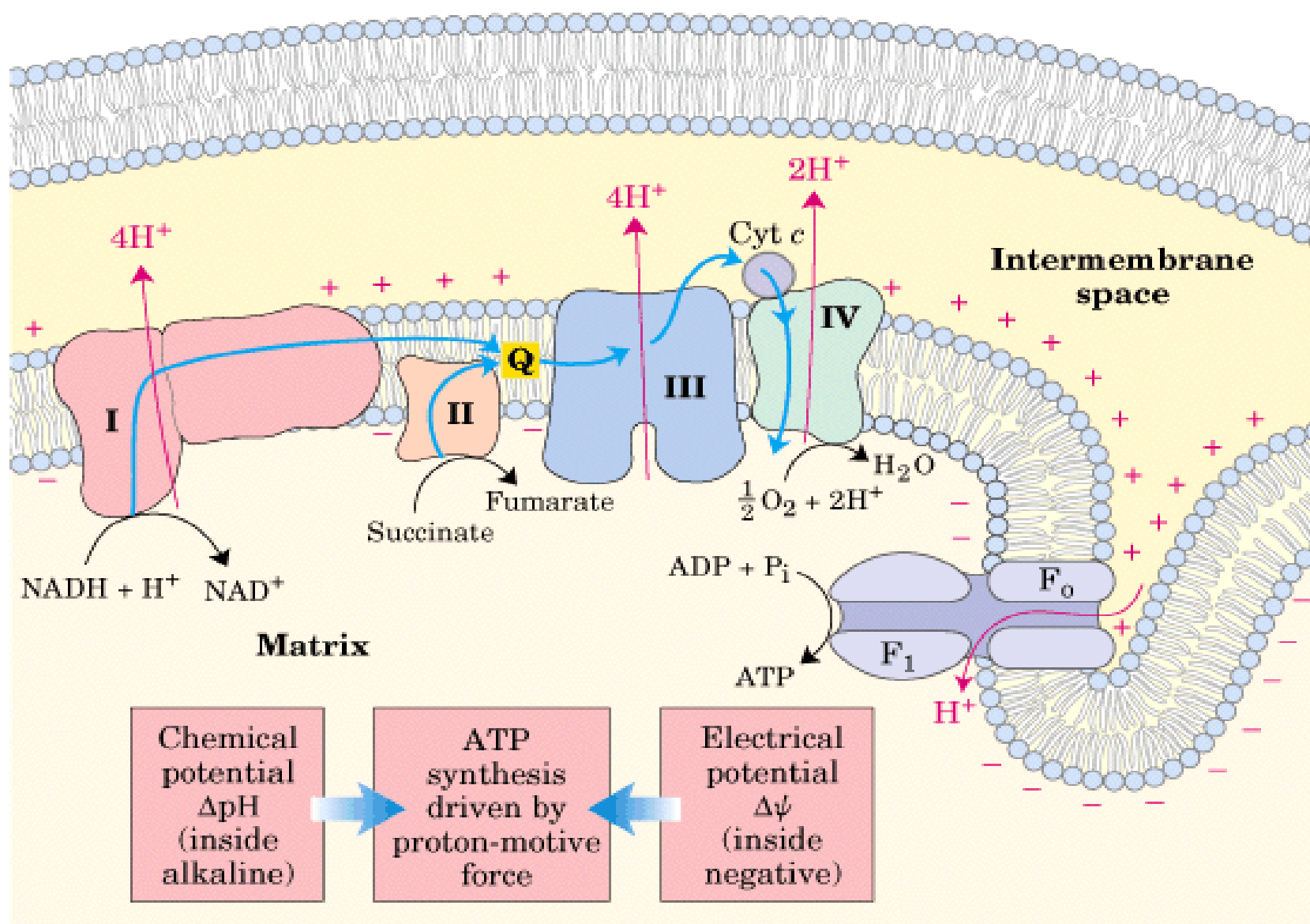




table 19–5

ATP Yield from Complete Oxidation of Glucose

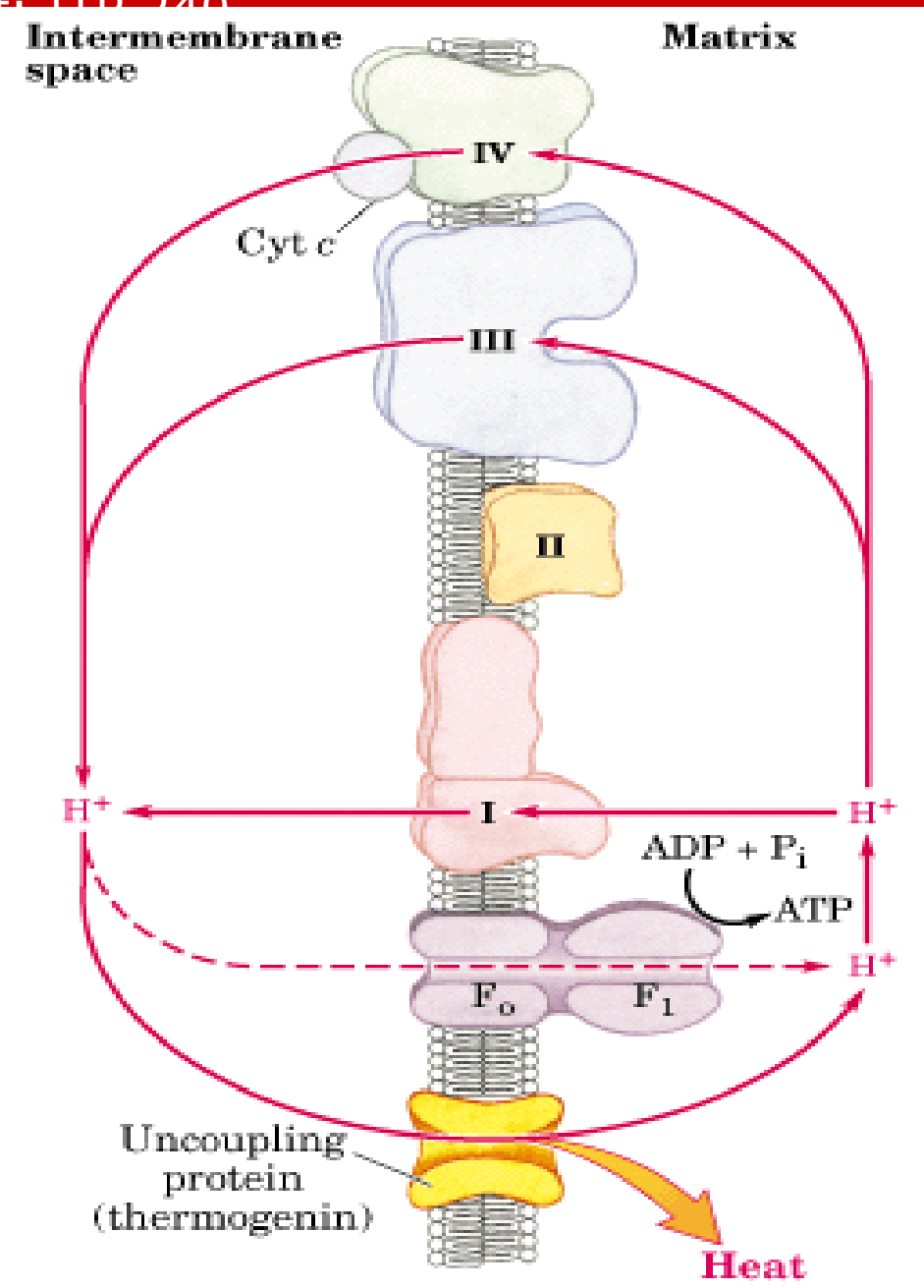
Process	Direct product	Final ATP
Glycolysis	2 NADH (cytosolic)	3 or 5*
	2 ATP	2
Pyruvate oxidation (two per glucose)	2 NADH (mitochondrial matrix)	5
Acetyl-CoA oxidation in citric acid cycle (two per glucose)	6 NADH (mitochondrial matrix)	15
	2 FADH <sub>2</sub>	3
	2 ATP or 2 GTP	2
Total yield per glucose		30 or 32

\*The number depends on which shuttle system transfers reducing equivalents into mitochondria.

# Mekanisme Sintesis ATP

---

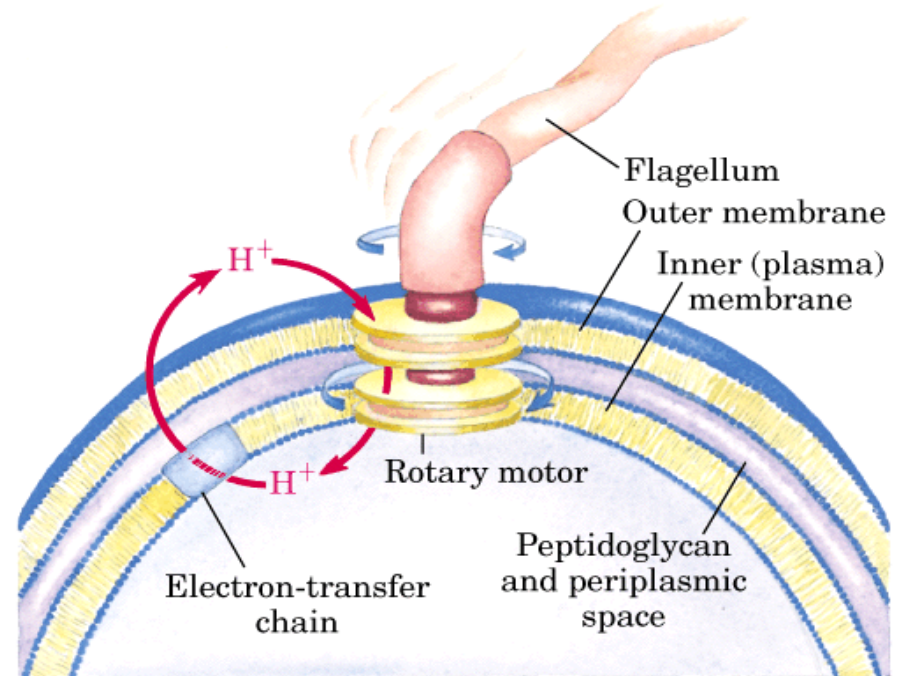
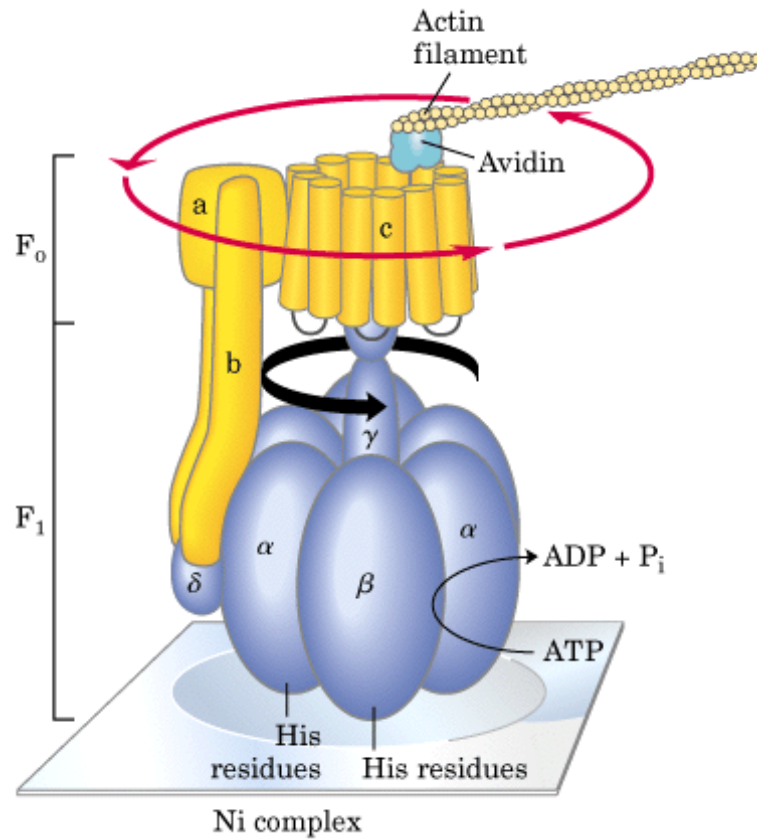
- ❑ Pergerakan  $H^+$  kembali ke matrik
  - ❑ 3  $H^+$  dibutuhkan untuk menggerakkan rotor ATP synthase
  - ❑ Rotor terdiri dari 3 kompartemen
  - ❑ Tiap kompartemen memiliki fungsi
    - Mengikat ADP dan P
    - Menyatukan ADP dan P membentuk ATP
    - Melepaskan ATP
-







# ATP untuk pergerakan



# Resume

---

- ❑ Kesamaan mekanisme pembentukan ATP antara respirasi dengan fotosintesis
  - ❑ Mekanisme dasar : Pompa proton
  - ❑ Translokasi proton terkait dengan sintesis ATP di membran
  - ❑ Membran : bagian dalam mitokondria dan thilakoid
-

