

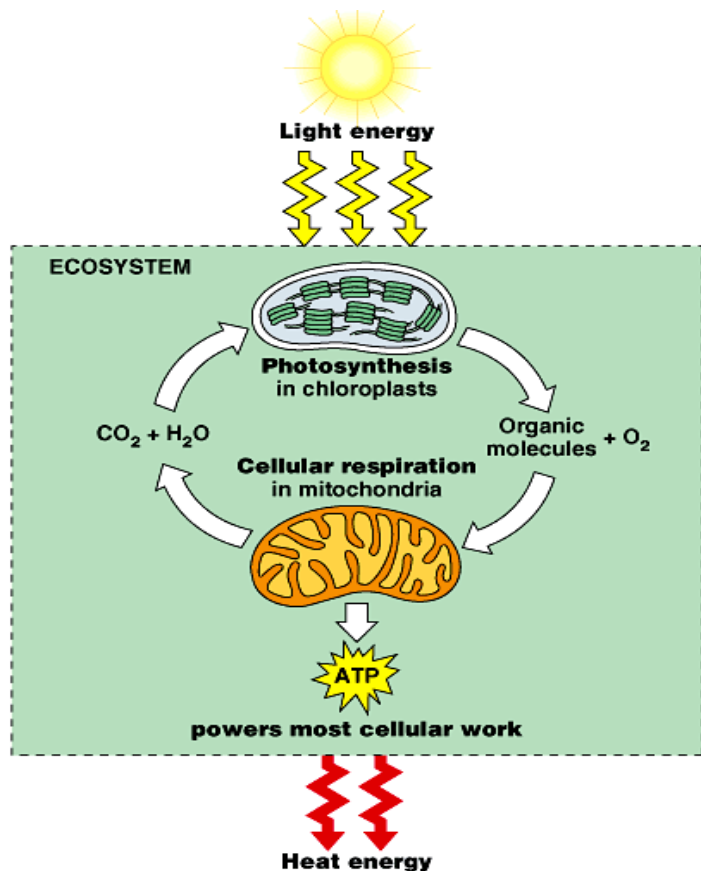
การสลายอาหารระดับเซลล์

(Cellular respiration)



by Rungtiwa Radchakid

การเปลี่ยนรูปพลังงานและการหมุนเวียนสารเคมีในระบบนิเวศ



Chloroplast และ mitochondria เป็น organelles ที่เปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่ง

- Chloroplast เกิดกระบวนการ photosynthesis ซึ่งพลังงานแสงถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานสะสมในรูปคาร์โบไฮเดรต
- mitochondria เกิดกระบวนการ cellular respiration พลังงานที่เก็บไว้ในรูปคาร์โบไฮเดรตจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูป ATP

Sunlight

PHOTOSYNTHESIS

Plants Produce

Carbohydrate ($C_6H_{12}O_6$)
and Oxygen (O_2)

Animals Use

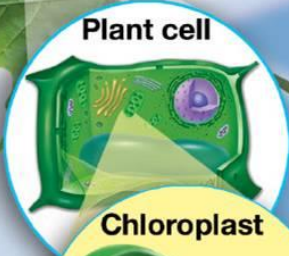
Carbohydrate
($C_6H_{12}O_6$)
and Oxygen
(O_2)

Plants Use
Carbon
Dioxide (CO_2)
and
Water (H_2O)

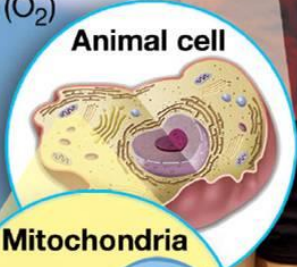
Animals Produce

Carbon Dioxide (CO_2)
and Water (H_2O)

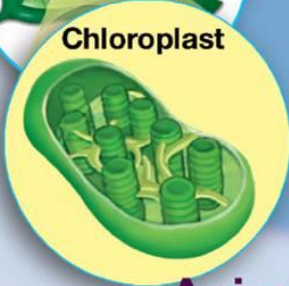
Plant cell



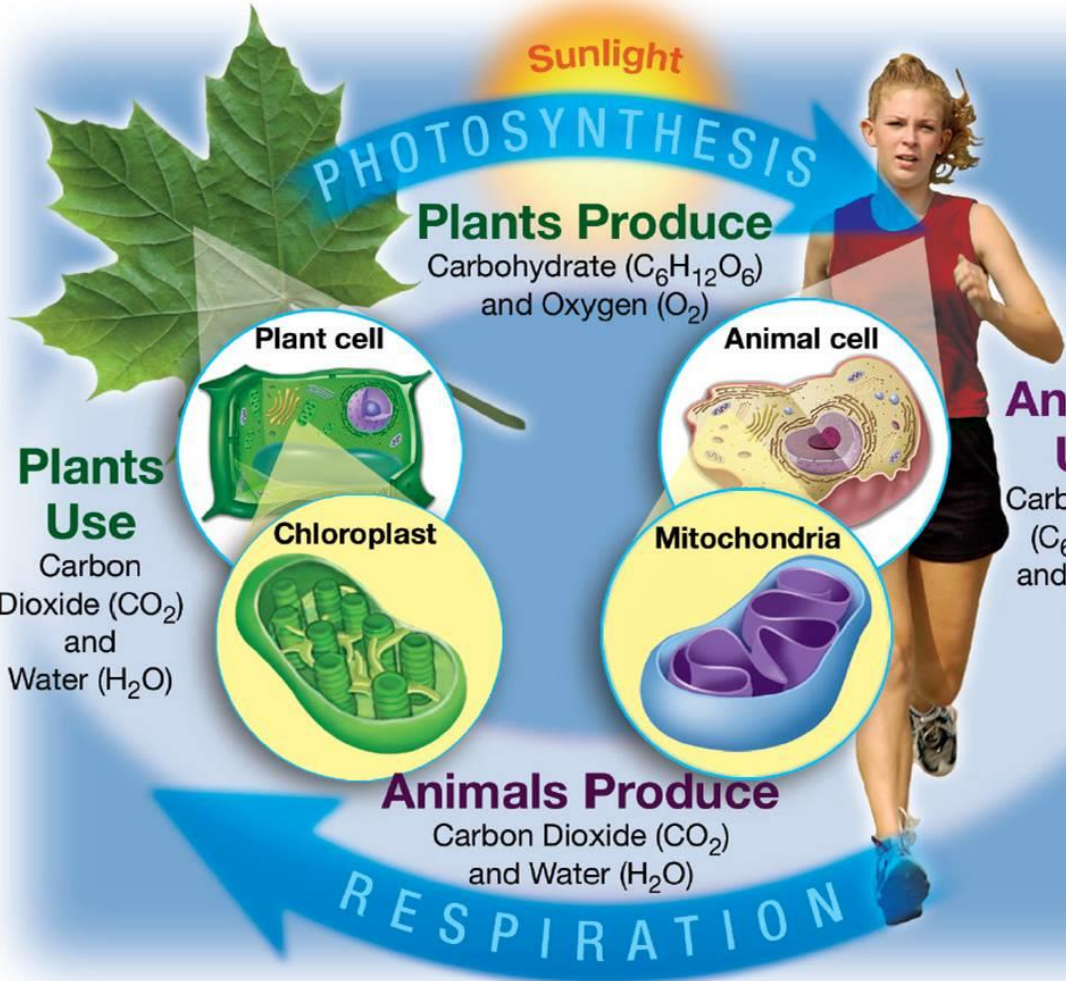
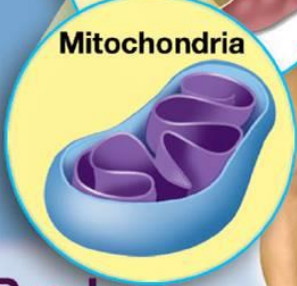
Animal cell



Chloroplast



Mitochondria



Cellular respiration



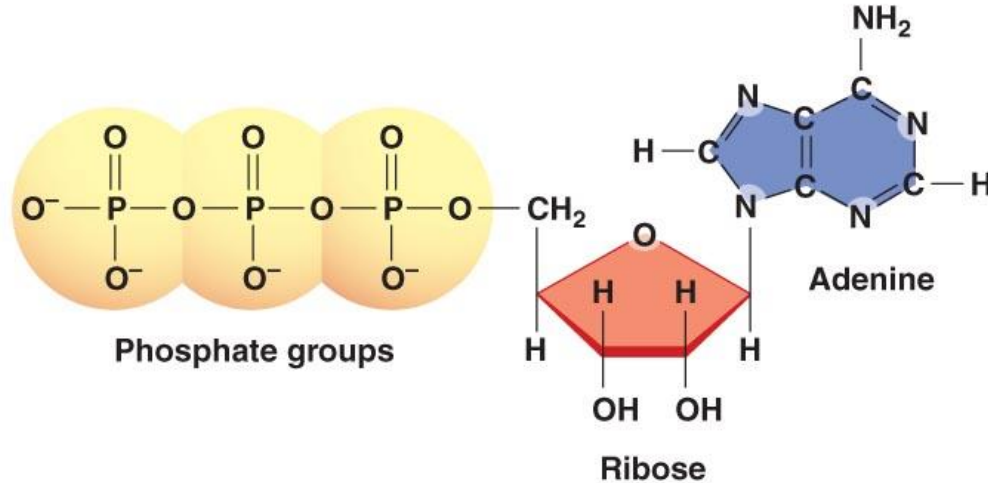
สารอินทรีย์ -----> energy (ATP)

Aerobic respiration

Anaerobic respiration

ATP (Adenosine triphosphate)

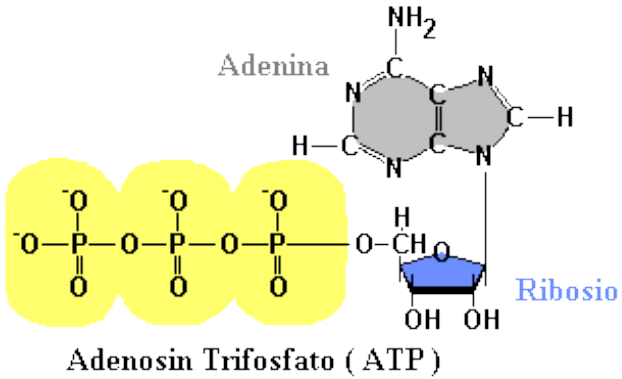
(a) ATP consists of three phosphate groups, ribose, and adenine.



Copyright © 2008 Pearson Benjamin Cummings. All rights reserved.

เป็นสารที่มีพลังงานสูง ทำหน้าที่เก็บพลังงานที่ได้จาก
กระบวนการสลายสารอาหารของเซลล์

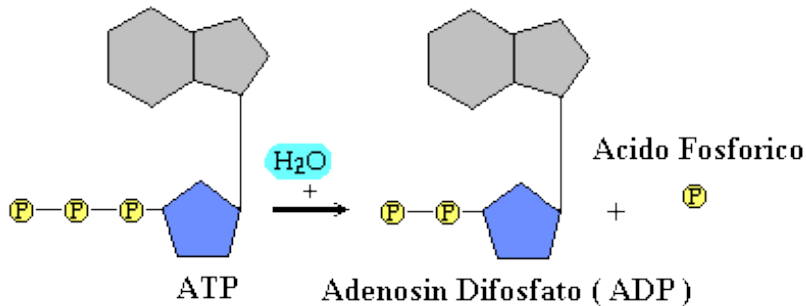
การสร้าง ATP



เซลล์สามารถสร้าง ATP ได้ 2 วิธีคือ

substrate level phosphorylation

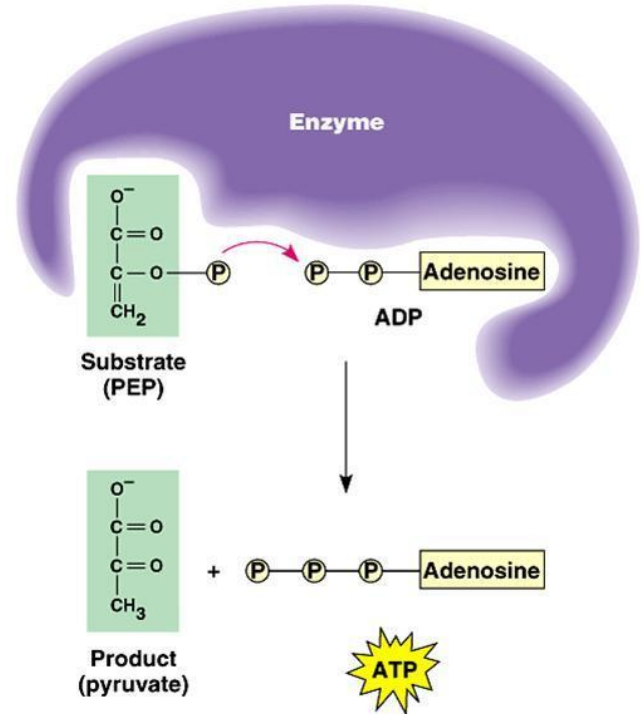
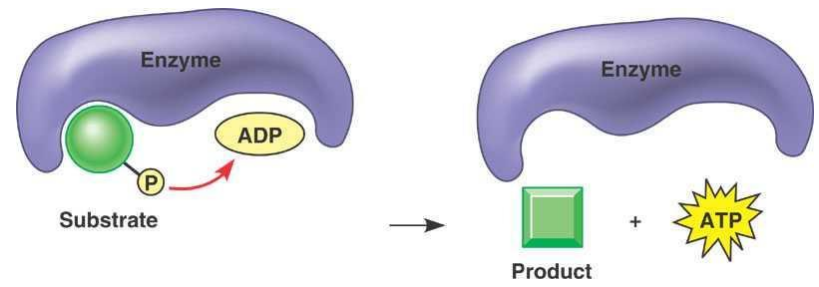
oxidative phosphorylation



substrate level phosphorylation

เป็นการสร้าง ATP โดยการถ่ายโอนหมู่ฟอสเฟตจากโมเลกุลของสารตั้งต้น (substrate) มายังโมเลกุลของ ADP (adenosine diphosphate) โดยตรง

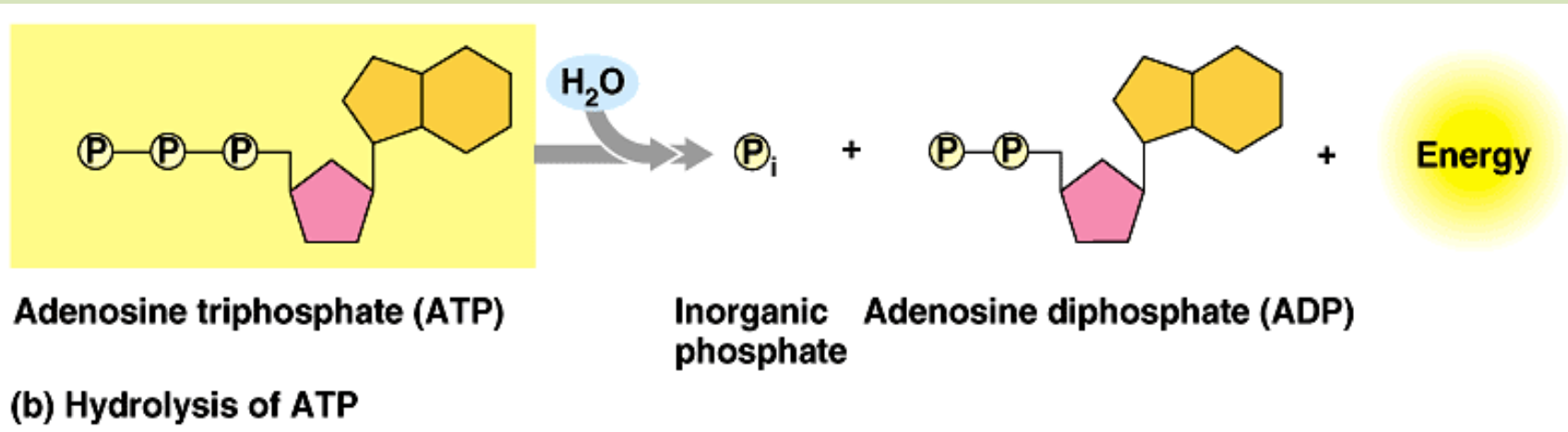
การตัดหมู่ฟอสเฟตออกจากสารตั้งต้น



เมื่อ P สลายภายในเซลล์ พลังงานบางส่วนจะสูญเสียไปในรูป
ของความร้อน และบางส่วนถูกนำไปใช้ทำงาน

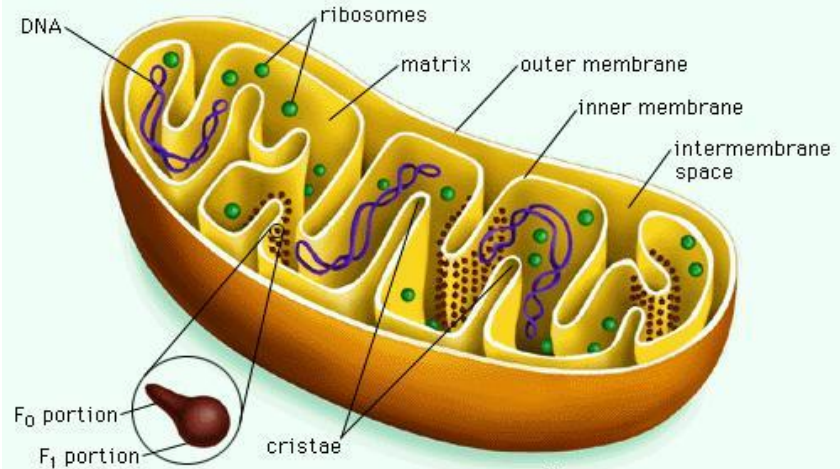
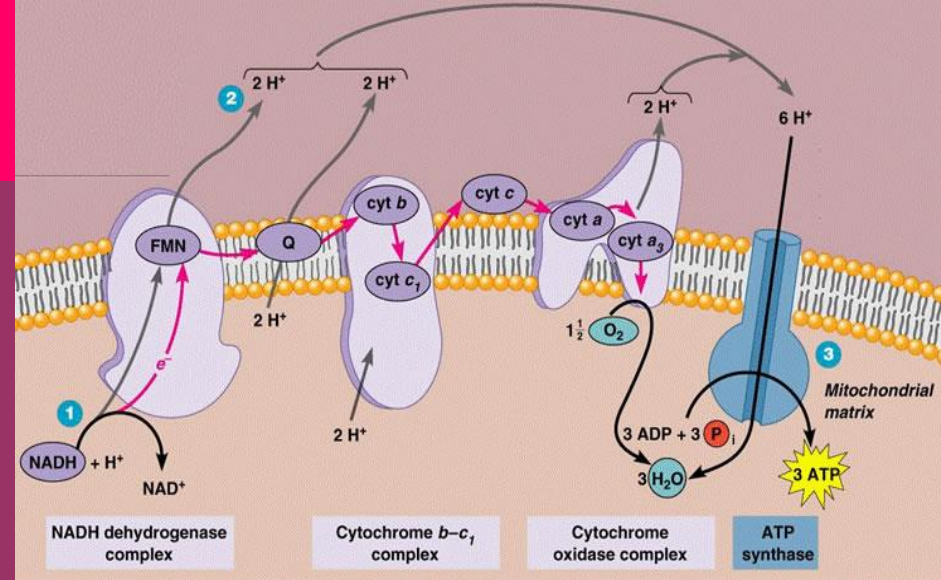
เมื่อ ATP ถ่ายทอด P ให้กับโมเลกุลของสารอื่น โมเลกุลของสารนั้น
จะได้พลังงานเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้เกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นต่อไป

ดังนั้นพลังงานจาก ATP สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์ได้



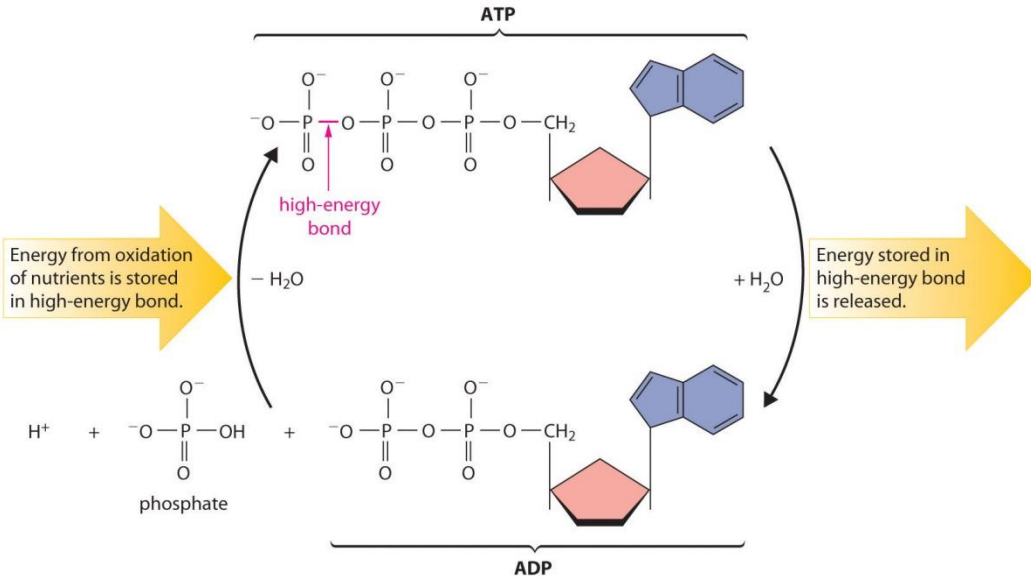
oxidative phosphorylation

เป็นการสร้าง ATP โดยใช้พลังงาน
ที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน-
รีดักชัน (oxidation-reduction) ใน
ระหว่างการส่งอิเล็กตรอนไปตาม
ลูกโซ่หายใจในไมโทคอนเดรีย



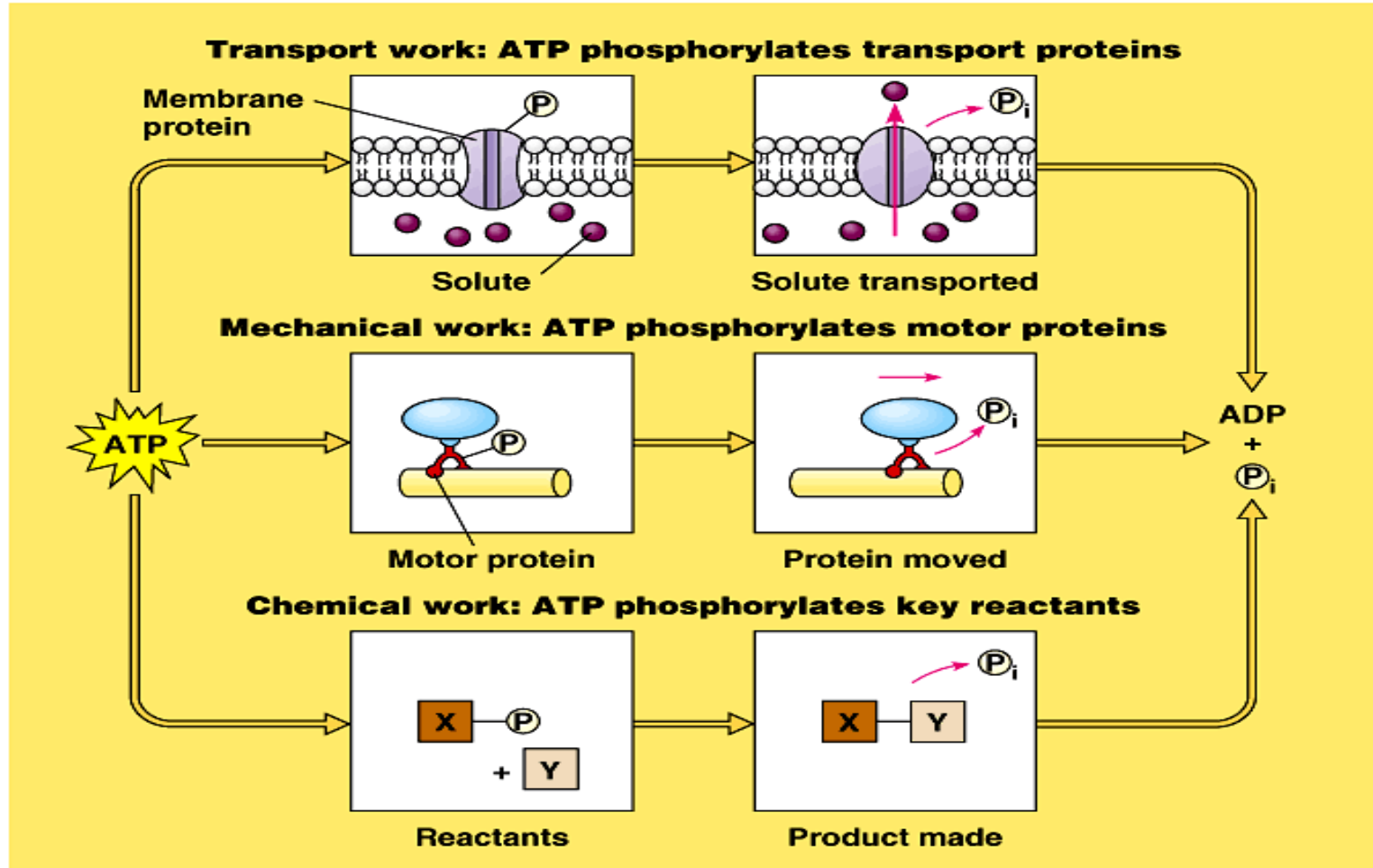
สรุป : การสร้าง ATP

กระบวนการสร้าง ATP จาก ADP และหมู่ P เรียกว่า **กระบวนการฟอสโฟรีเลชัน (Phosphorylation)**



ATP เมื่อถูกใช้แล้ว
สามารถสร้างกลับมา
ใหม่ได้

พลังงานในรูป ATP ถูกนำไปใช้ทำงานต่าง ๆ ภายในเซลล์

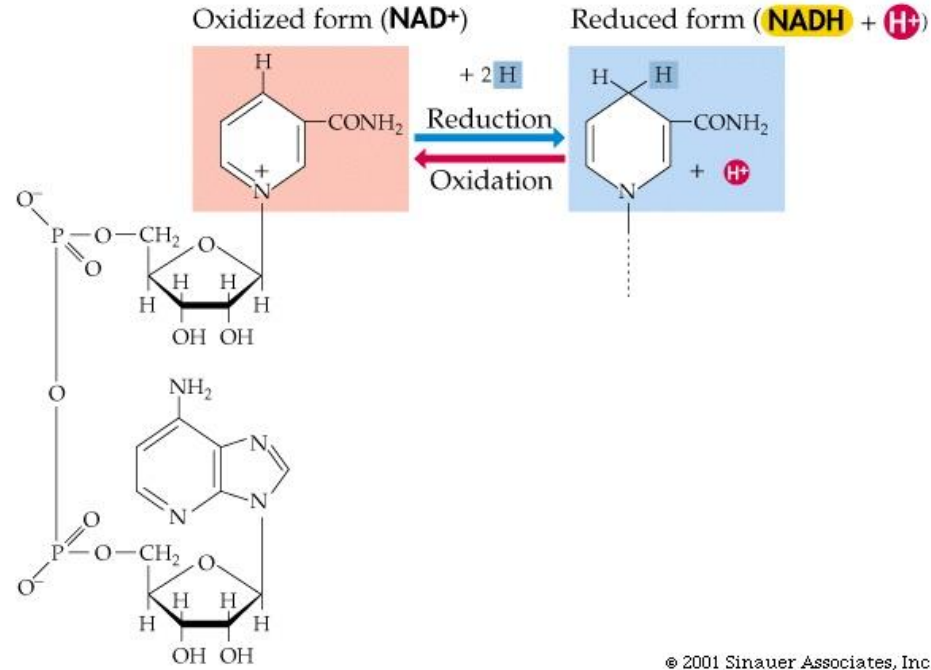


○ นอกจาก ATP แล้ว ยังมีสารพลังงานสูงอีกประเภท คือ ตัวรับอิเล็กตรอนที่เข้าร่วมในปฏิกิริยารีดอกซ์ต่างๆ เช่น NAD^+ , FAD ซึ่งอยู่ในรูป coenzyme และเมื่อรับอิเล็กตรอนแล้วจะเป็นตัวรีดิวซ์

1. NAD^+ (nicotinamide adenine dinucleotide)

2. FAD (flavin adenine dinucleotide)

NAD⁺ (nicotinamide adenine dinucleotide) **NAD⁺** 1 โมเลกุล
 รับโปรตอนและ 2 อิเล็กตรอน จะ
 เปลี่ยนเป็น **NADH** ซึ่งมีสมบัติเป็น
 ตัวให้อิเล็กตรอนเข้าสู่กระบวนการ
 ถ่ายทอดอิเล็กตรอน เพื่อนำ
 พลังงานที่อยู่ใน NADH มาใช้ในการ
 สร้างพลังงาน



FAD (flavin adenine dinucleotide)

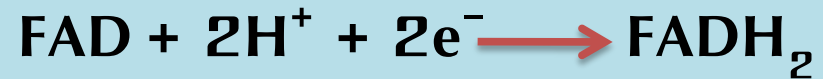
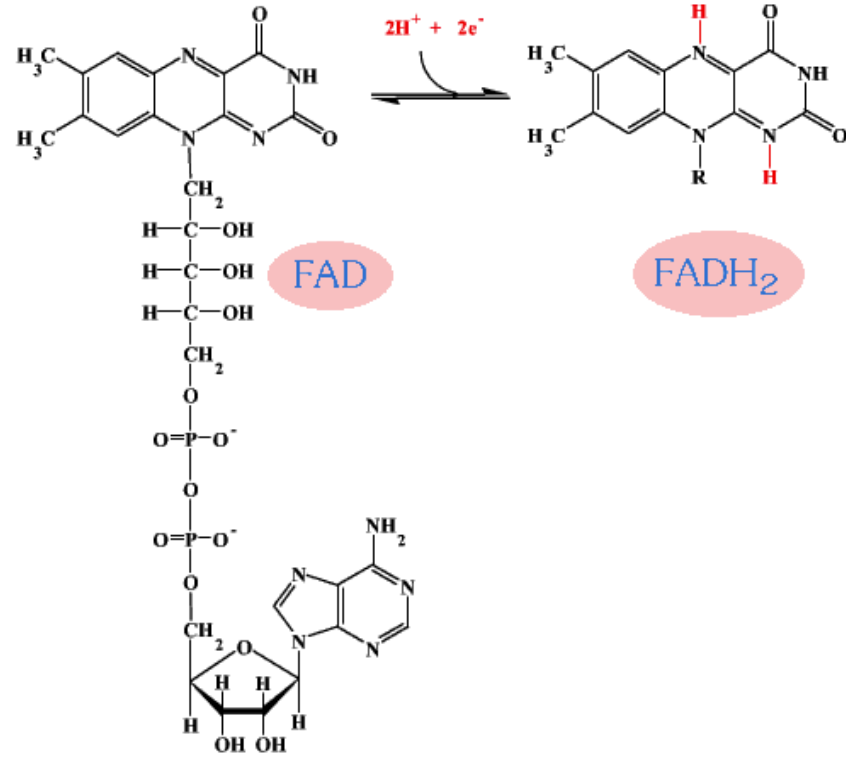
FAD 1 โมเลกุลรับ 2 โปรตอนและ 2 อิเล็กตรอน จะเปลี่ยนเป็น $FADH_2$ ซึ่ง

มีสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเข้าสู่

กระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน เพื่อ

นำพลังงานที่อยู่ใน $FADH_2$ มาใช้ในการ

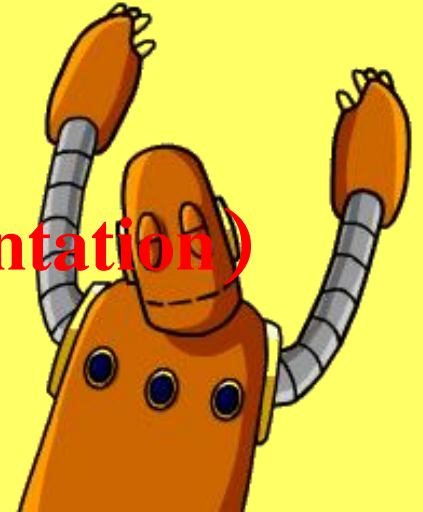
สร้างพลังงาน



Cellular respiration

การสลายสารอาหารระดับเซลล์ เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนพลังงานของพันธะเคมีของสารอาหารให้มาอยู่ในรูปสารประกอบพลังงานสูง มี 2 รูปแบบ คือ

- **Aerobic respiration**
- **Anaerobic respiration (Fermentation)**



Aerobic respiration

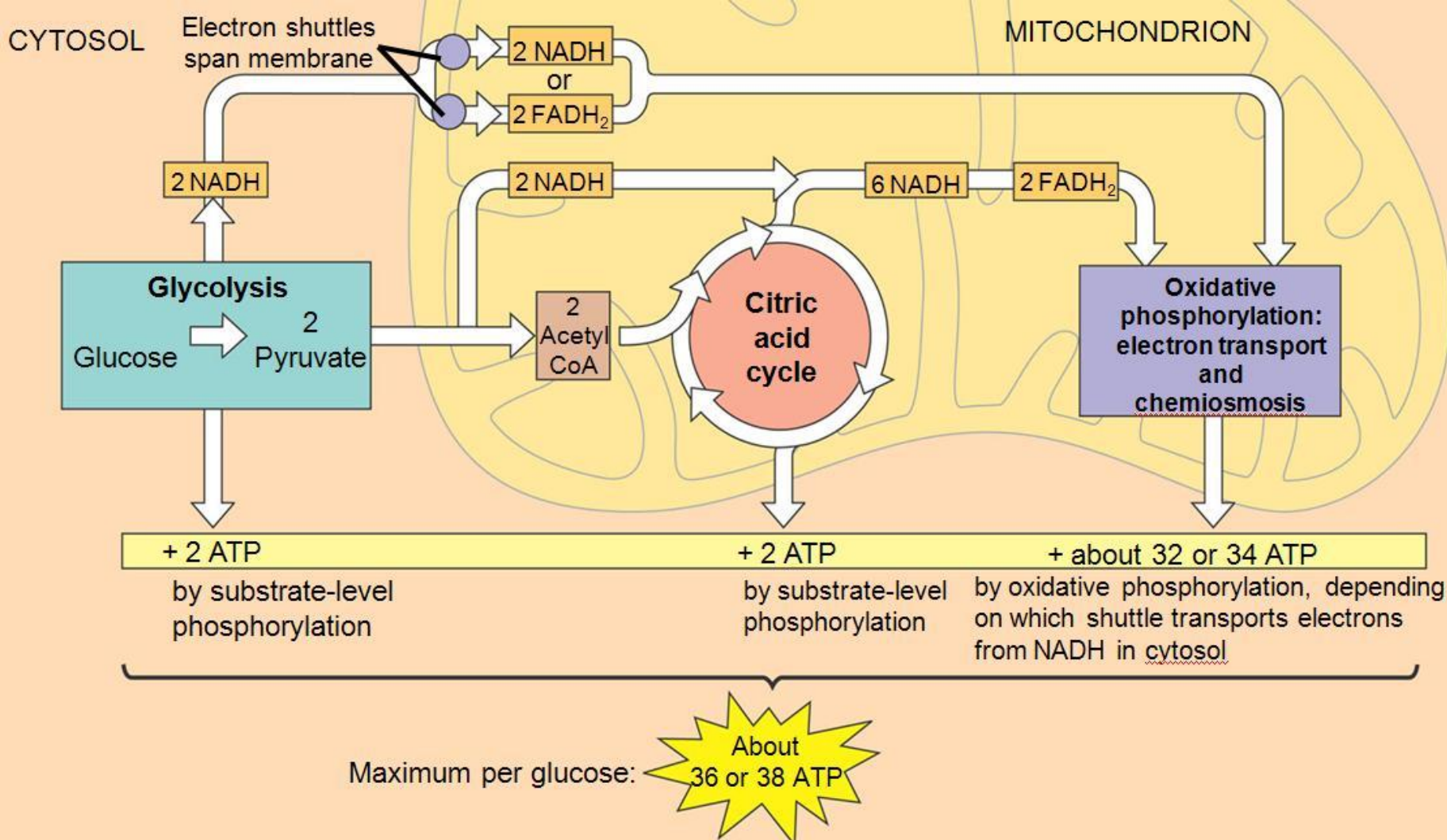
คือกระบวนการสลายสารอาหารแบบใช้ออกซิเจน เป็นการสลายสารอินทรีย์ที่มีพลังงานสูงให้เป็นสารอินทรีย์ที่มีพลังงานต่ำโดยมี O_2 เป็นตัวรับ e^- ตัวสุดท้าย



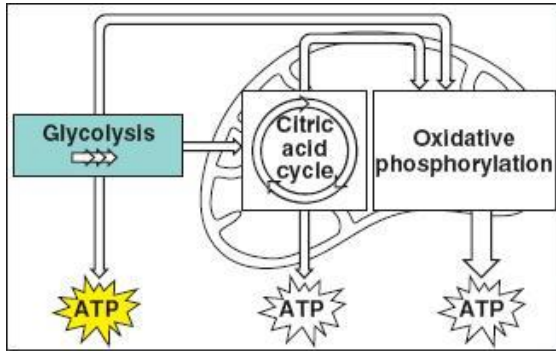
ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน

1. Glycolysis
2. Krebs cycle
3. Electron transport chain

โดยทั่วไป cellular respiration จะอธิบายถึง Oxidation ของ glucose



Glycolysis



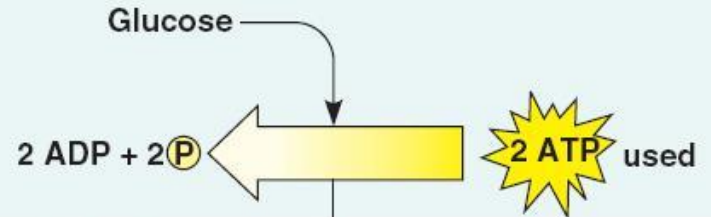
กระบวนการไกลโคไลซิส

ประกอบด้วย 2 phase

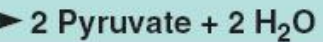
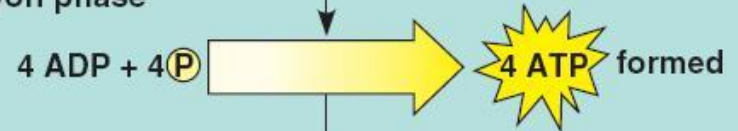
1. energy investment phase

2. energy payoff phase

Energy investment phase



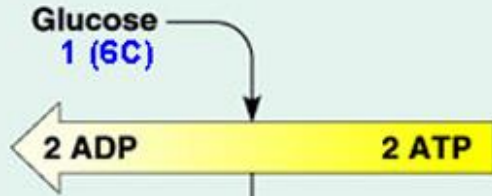
Energy payoff phase



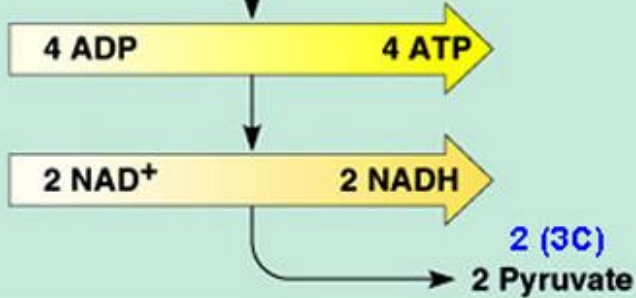
Net



ENERGY-INVESTMENT PHASE



ENERGY-PAYOFF PHASE



NET



Glycolysis

เป็นกระบวนการสลายกลูโคส 6 อะตอม ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) ให้มาอยู่ในรูปกรดไพรูวิก (Pyruvic acid)

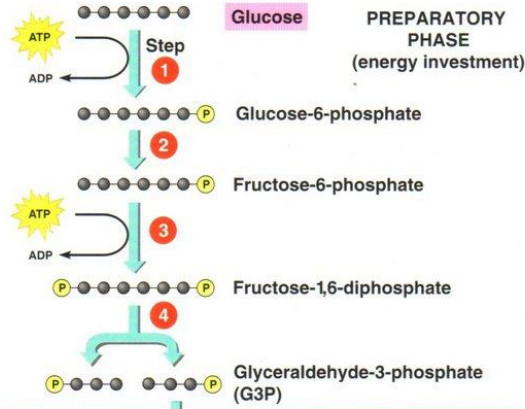


เกิดขึ้นที่บริเวณ Cytosol

แต่ขั้นตอนนั้นมีเอนไซม์ต่างชนิดกันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Figure 6.9B Details of glycolysis (Layer 3)

Steps 1–3 A fuel molecule is energized, using ATP.

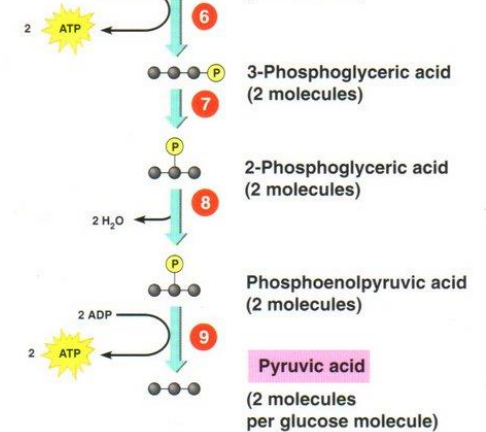


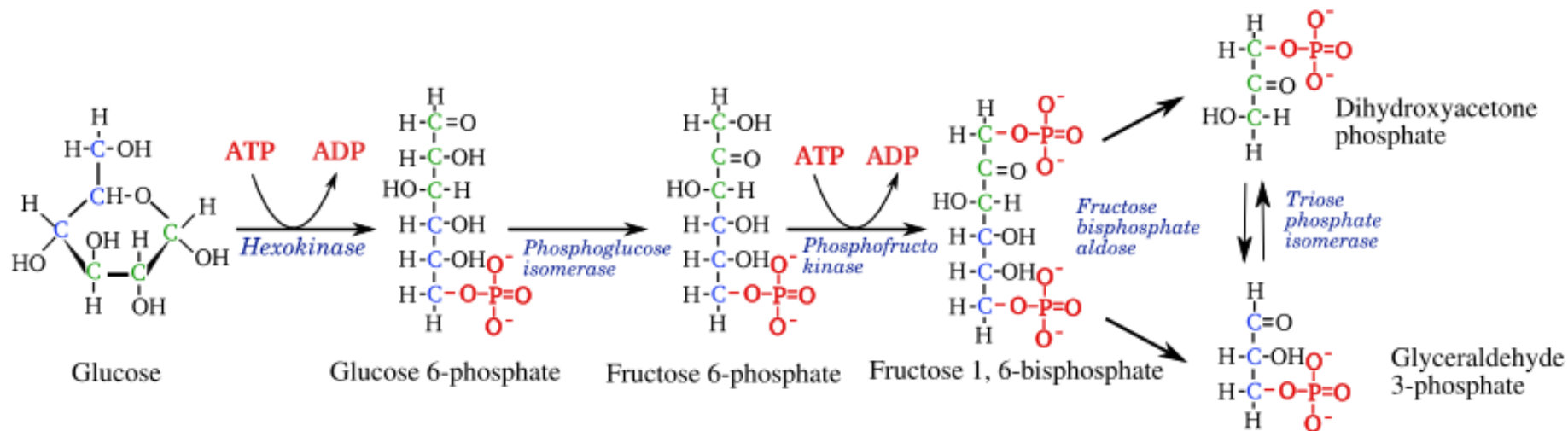
Step 4 A six-carbon intermediate splits into two three-carbon intermediates.

Step 5 A redox reaction generates NADH.

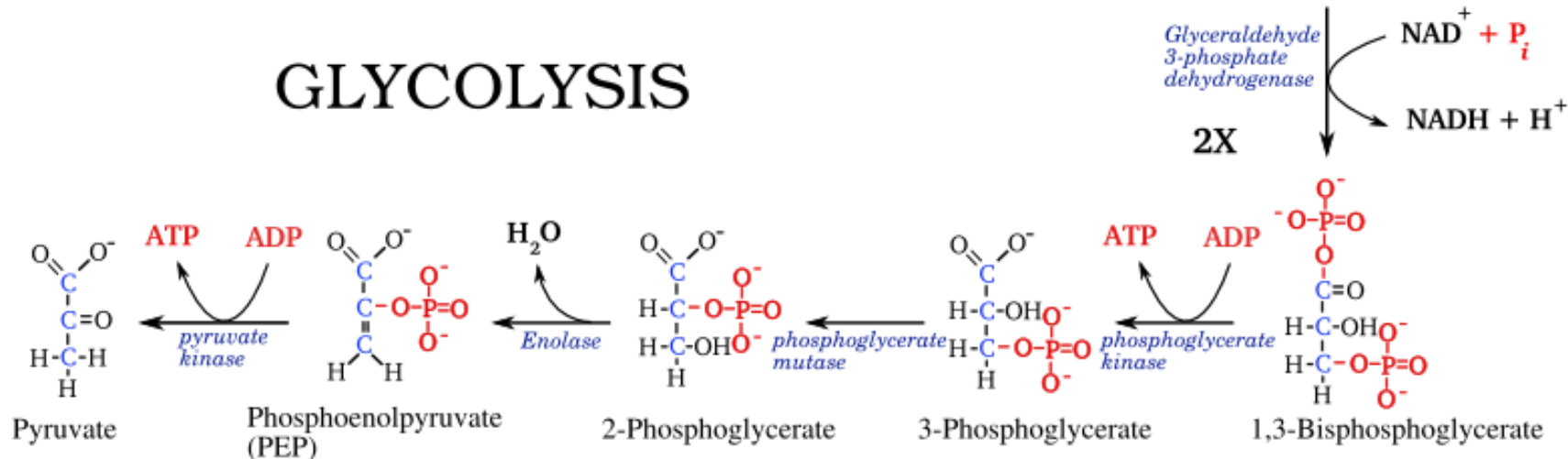


Steps 6–9 ATP and pyruvic acid are produced.





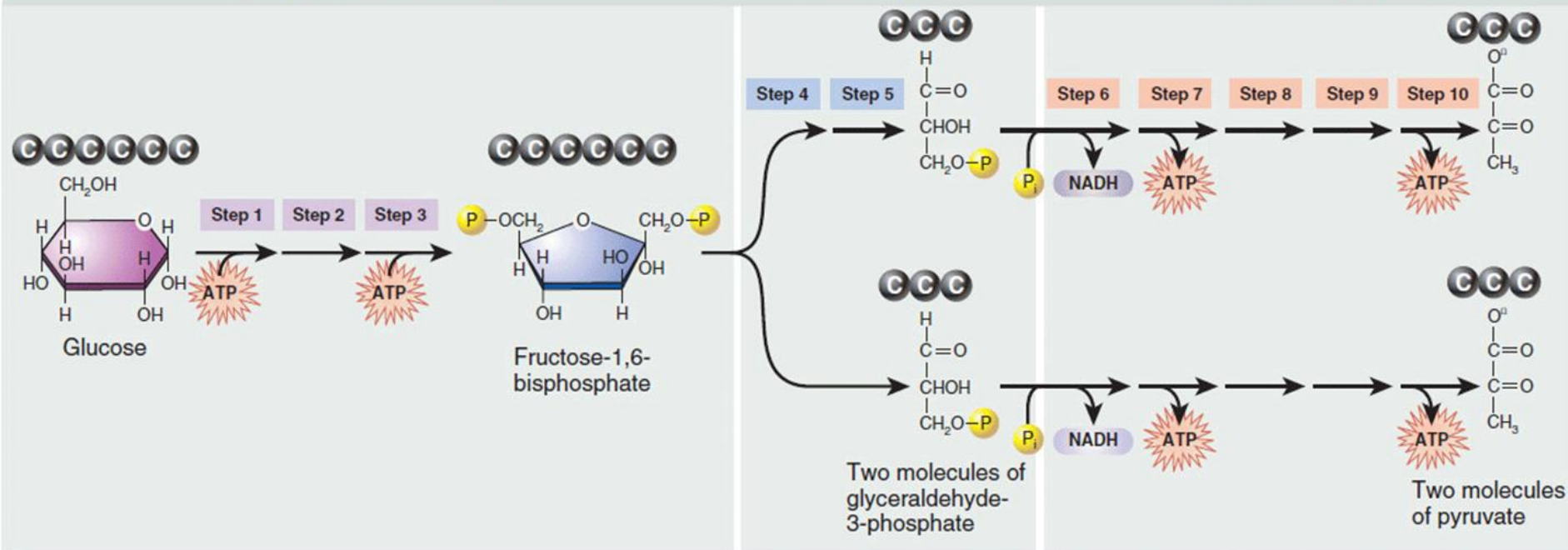
GLYCOLYSIS



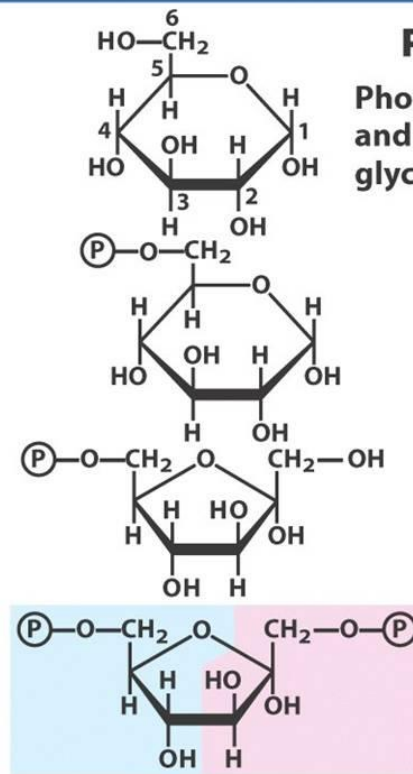
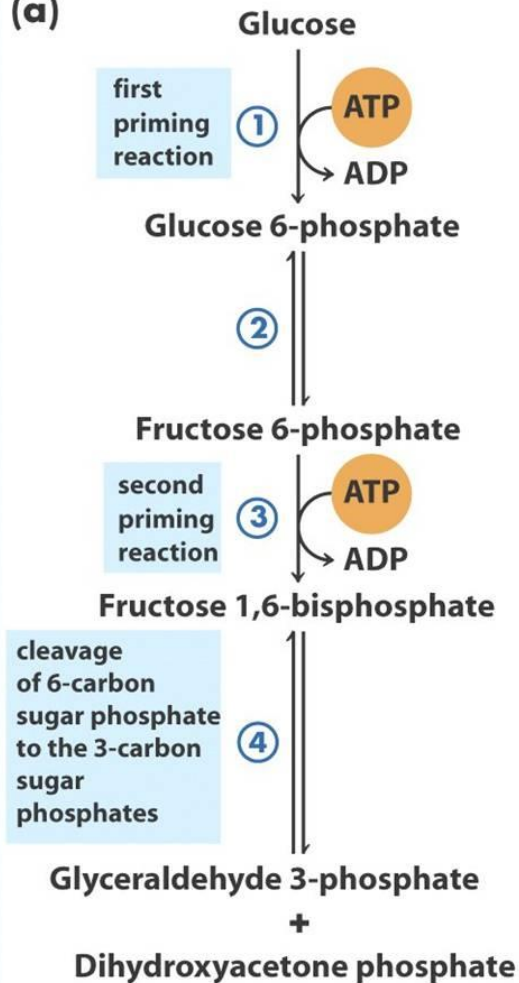
Energy investment phase

Cleavage phase

Energy liberation phase



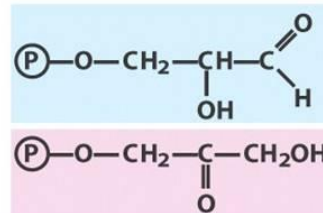
(a)



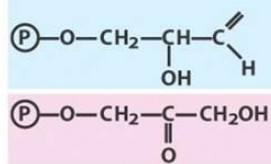
Preparatory phase

Phosphorylation of glucose and its conversion to glyceraldehyde 3-phosphate

- ① Hexokinase
- ② Phosphohexose isomerase
- ③ Phospho-fructokinase-1
- ④ Aldolase
- ⑤ Triose phosphate isomerase



Glyceraldehyde 3-phosphate
+
Dihydroxyacetone phosphate



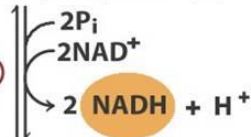
⑤ **Triose phosphate isomerase**

(b)

Glyceraldehyde 3-phosphate (2)

oxidation and phosphorylation

⑥



1,3-Bisphosphoglycerate (2)

first ATP-forming reaction (substrate-level phosphorylation)

⑦



3-Phosphoglycerate (2)

⑧

2-Phosphoglycerate (2)

⑨



Phosphoenolpyruvate (2)

second ATP-forming reaction (substrate-level phosphorylation)

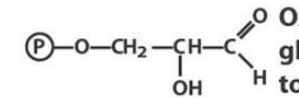
⑩



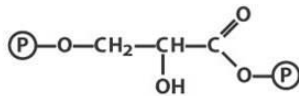
Pyruvate (2)

Payoff phase

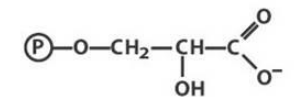
Oxidative conversion of glyceraldehyde 3-phosphate to pyruvate and the coupled formation of ATP and NADH



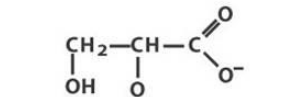
⑥ **Glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase**



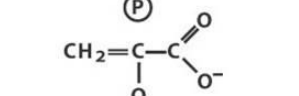
⑦ **Phosphoglycerate kinase**



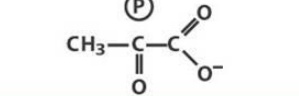
⑧ **Phosphoglycerate mutase**



⑨ **Enolase**



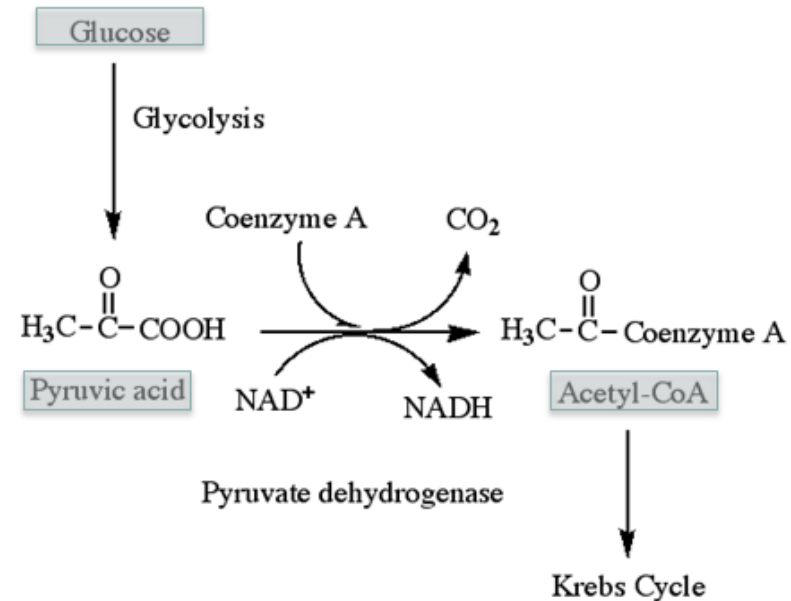
⑩ **Pyruvate kinase**



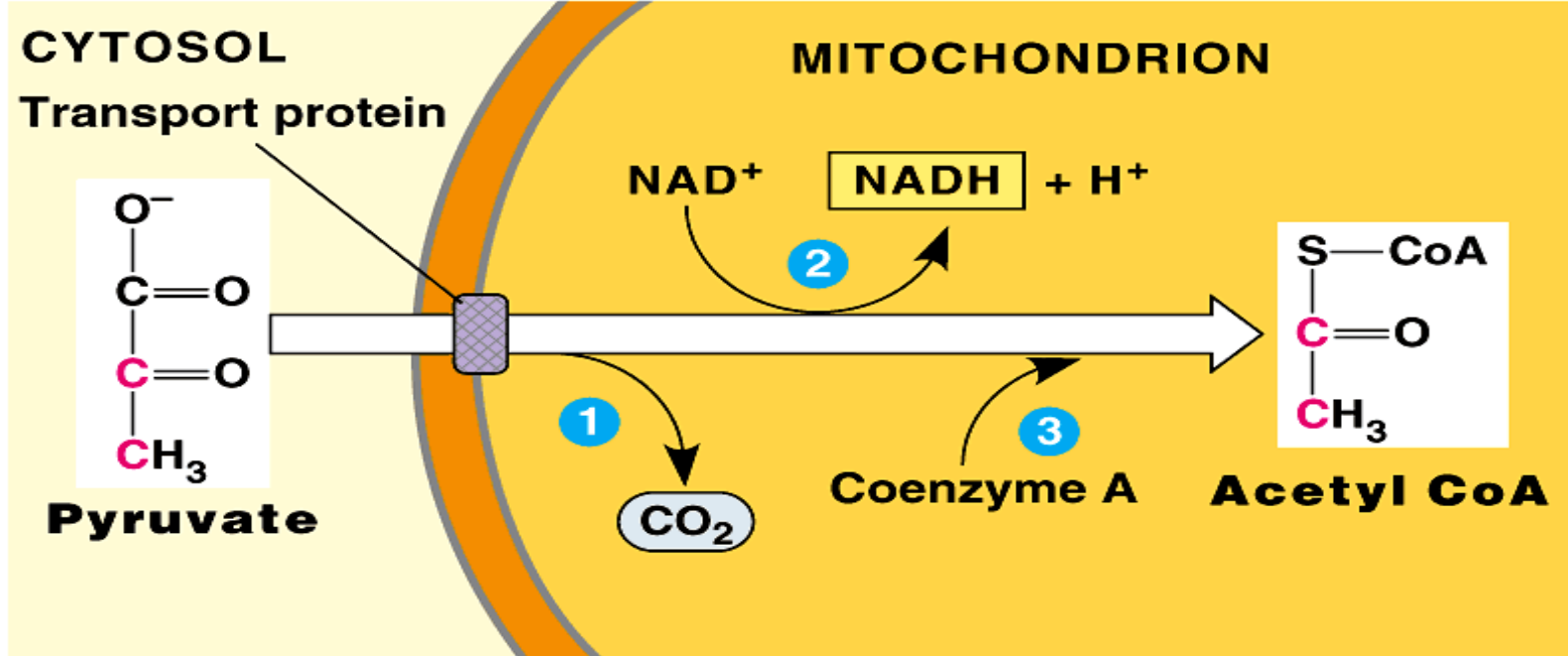
การสร้าง Acetyl CoA

เป็นสารเริ่มต้นของ Krebs cycle เกิดที่ Matrix เป็นการทำให้ Pyruvate (C 3 อะตอม) จากกระบวนการ Glycolysis แต่ละโมเลกุลเหลือเป็นสาร C 2 อะตอม มี CO_2 หลุดออกมา 1 โมเลกุล พร้อมกับ e^- โดยมี NAD^+ มารับ e^- เก็บเอาไว้เปลี่ยนเป็น NADH

coenzyme A เป็น coenzyme ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีวิตามิน pantothenic acid เป็นองค์ประกอบ



โปรตีนที่อยู่ผิวของ mitochondria จะขนส่ง pyruvate เข้าไปใน mitochondria



Krebs cycle

○ เกิดที่ mitochondria matrix

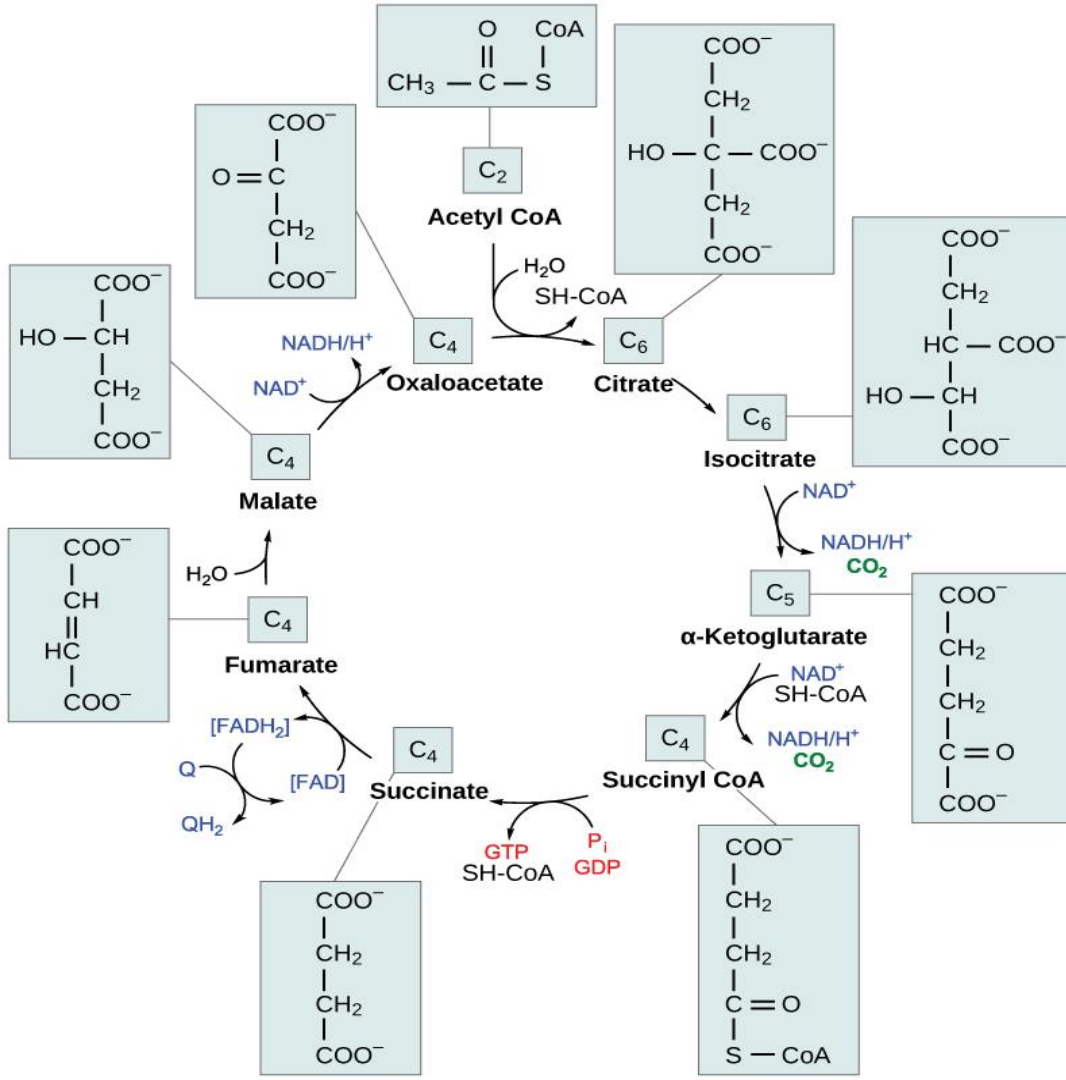
○ เป็นการสลาย Acetyl

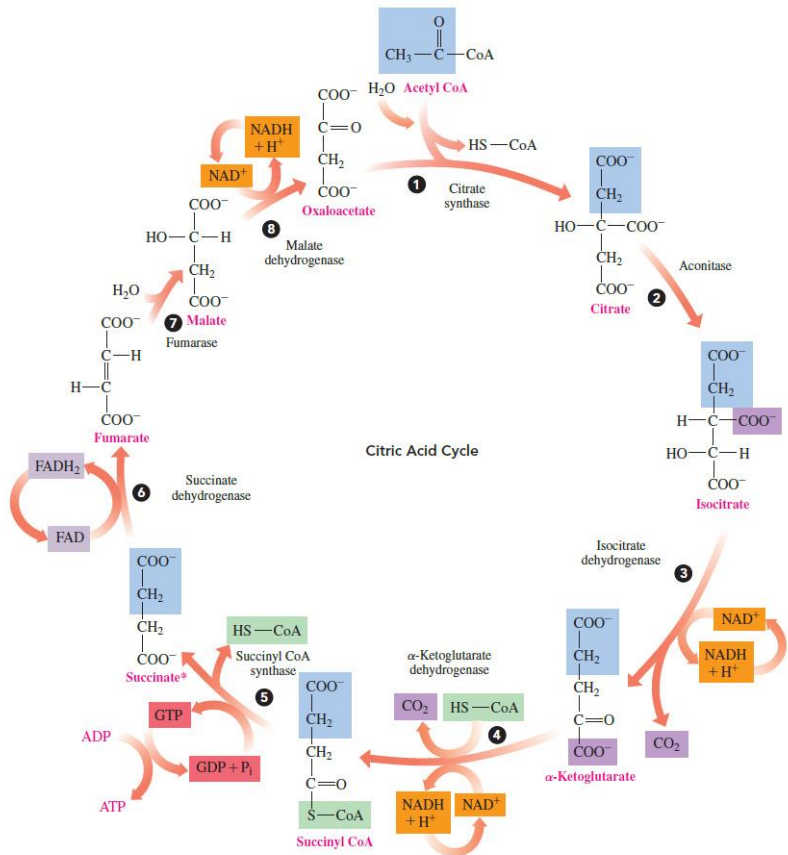
CoA ให้ได้เป็น CO_2

และเก็บพลังงานที่ได้

ไว้ในรูปของ NADH,

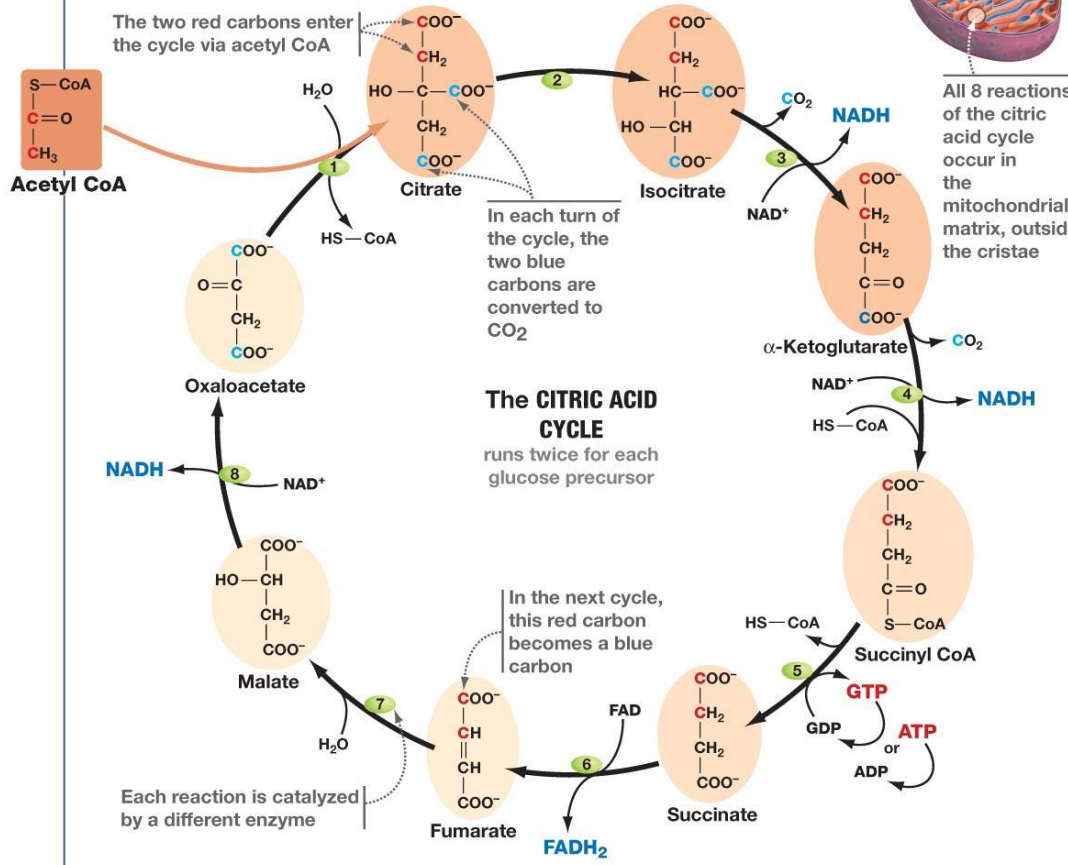
FADH_2 และ ATP



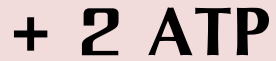


*Succinate is a symmetrical compound.

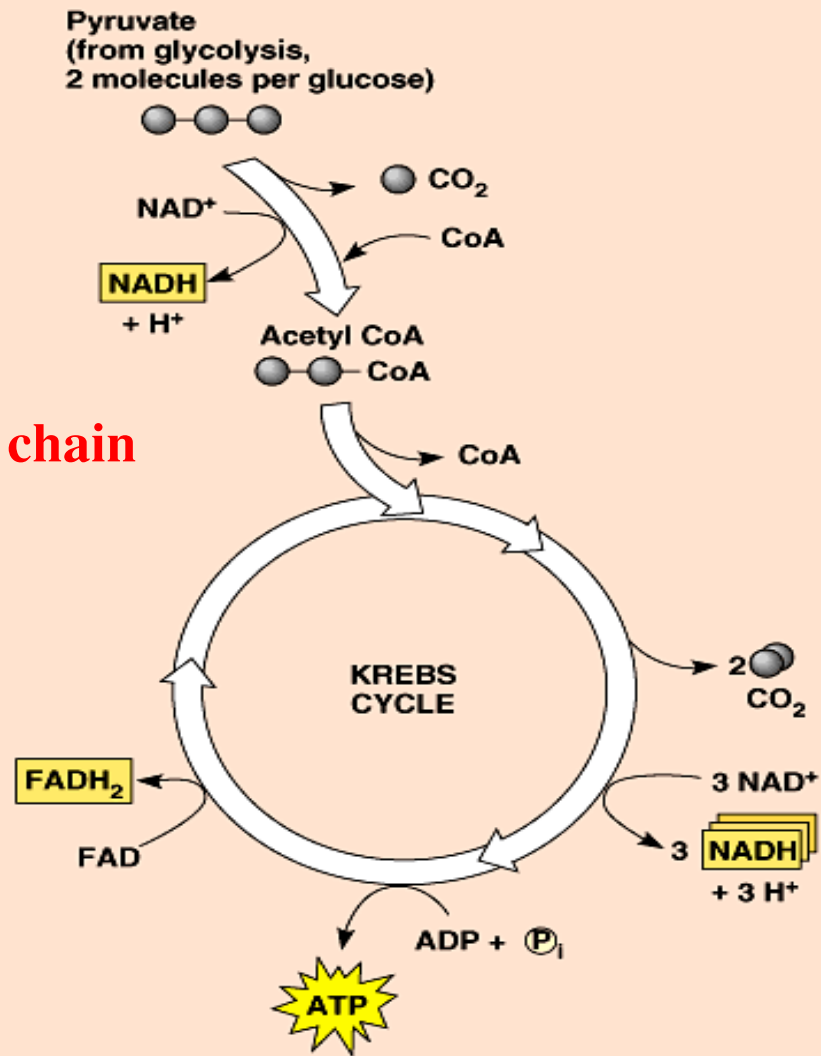
PROCESS: CITRIC ACID CYCLE

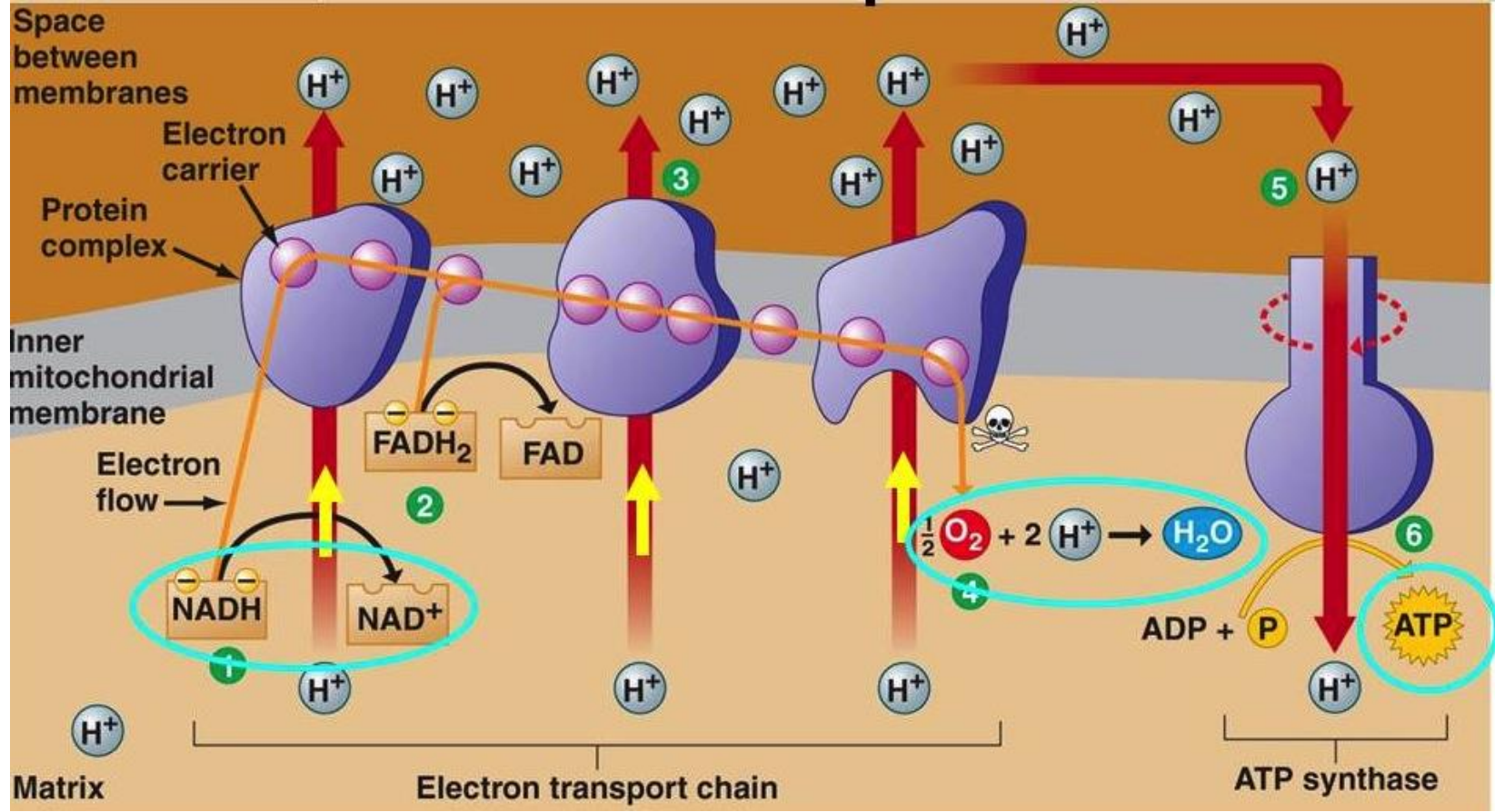


Net : Krebs cycle 2 cycle



→ } **e⁻ transport chain**



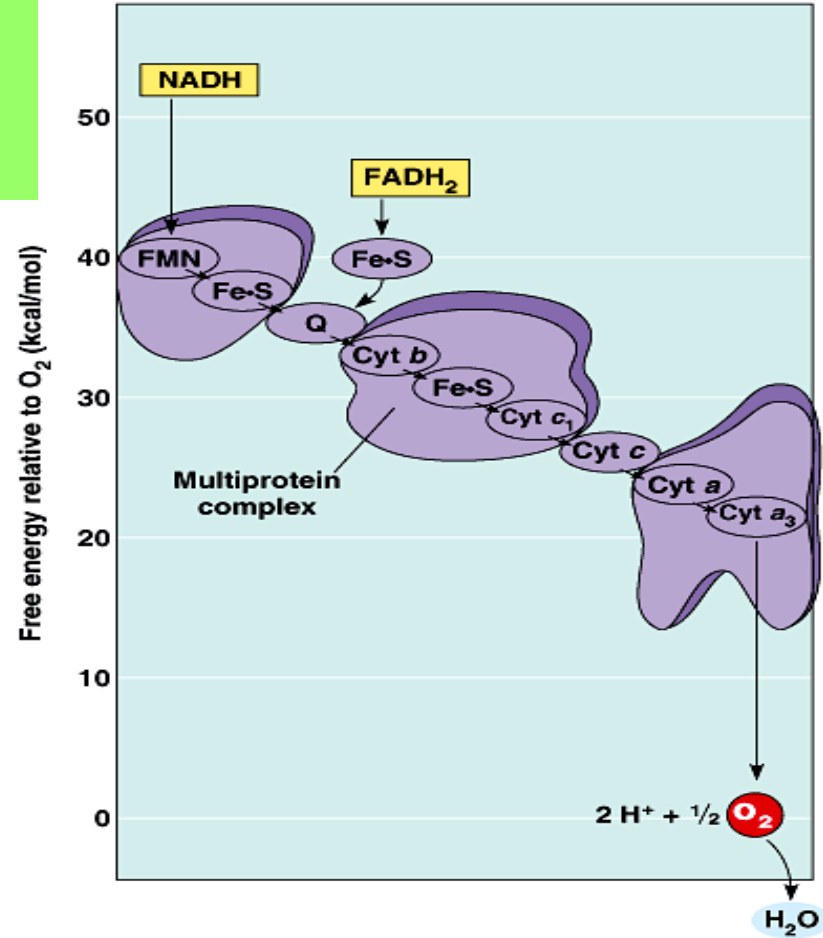


electron transport chain

Electron transport chain

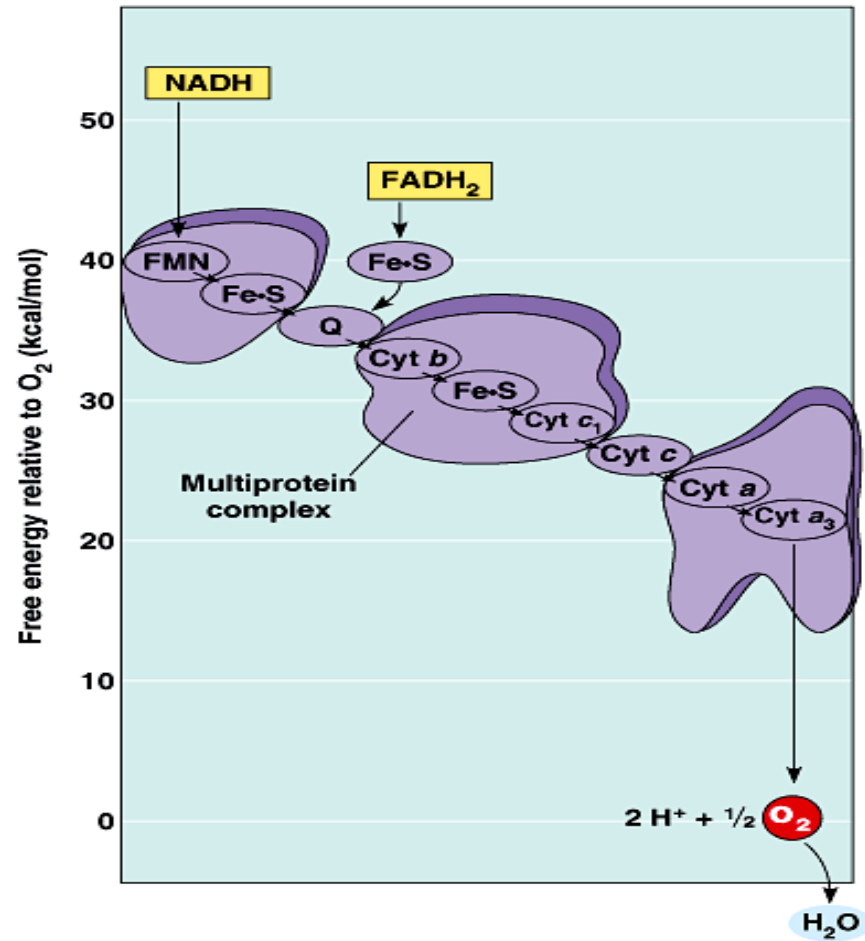
The pathway of electron transport

- การนำ e^- ที่อยู่ใน NADH และ $FADH_2$ มาส่งต่อให้ตัวถ่ายทอด e^-
- ETC ประกอบด้วย electron carrier molecules (ตัวรับ e^-) ที่อยู่ใน inner mitochondrial membrane
- มี O_2 เป็นตัวรับ e^- ตัวสุดท้าย รวมกับ H^+ กลายเป็น H_2O



□ ในการส่ง e- พลังงานใน e- จะค่อย ๆ ถูกปล่อยออกมา

□ พลังงานที่ปล่อยออกมาจะนำมาเป็นพลังงานในการขนย้าย H^+ จาก matrix และส่งออกไปที่ intermembrane space

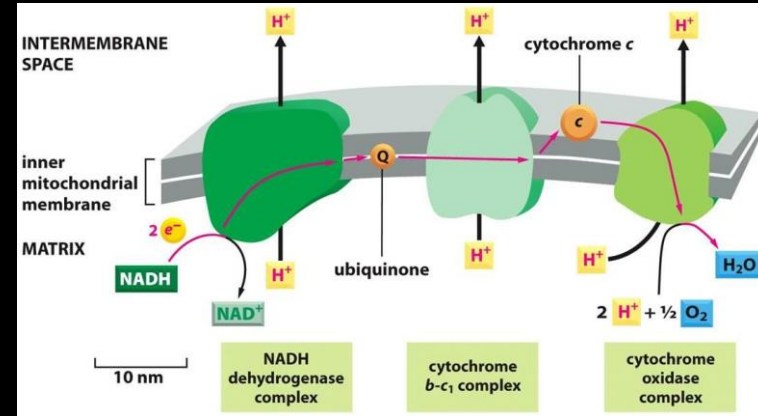


โมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของลูกโซ่หายใจที่พบในไมโทคอนเดรีย
คือโปรตีนเชิงซ้อน 3 กลุ่มที่ฝังตัวอยู่ในเยื่อหุ้มชั้นในของไมโท
คอนเดรีย ได้แก่

1. NADH dehydrogenase complex

2. cytochrome b-c₁ complex

3. cytochrome oxidase complex

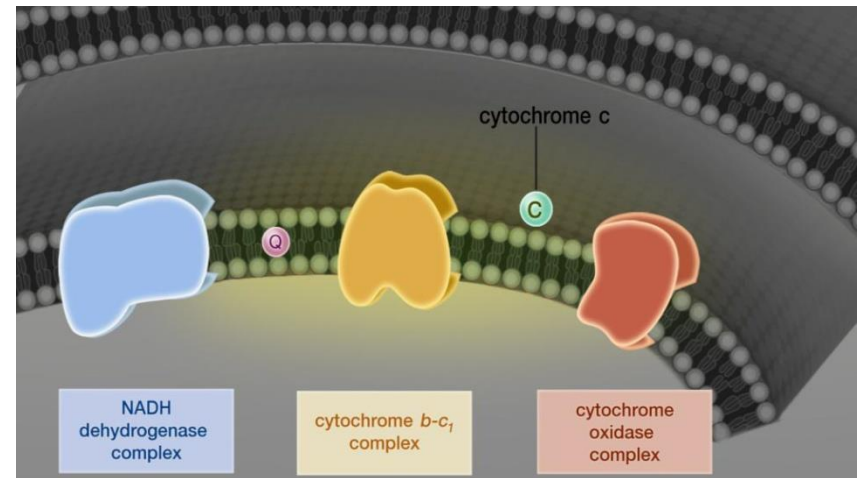
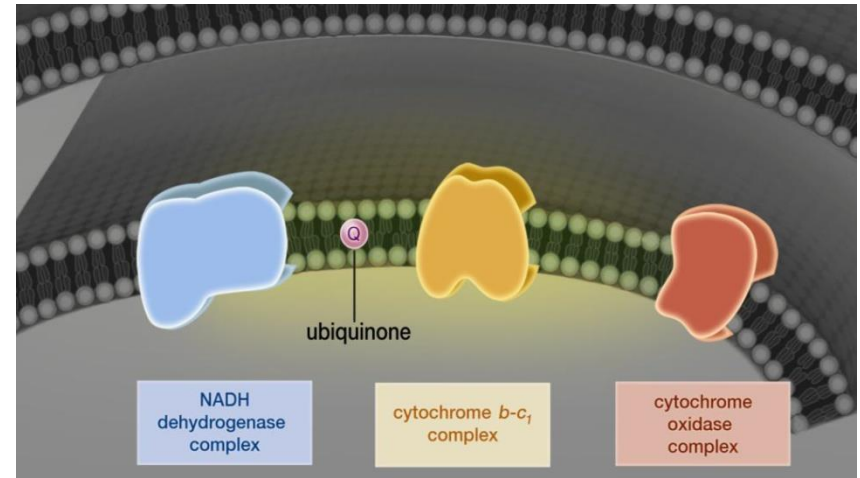


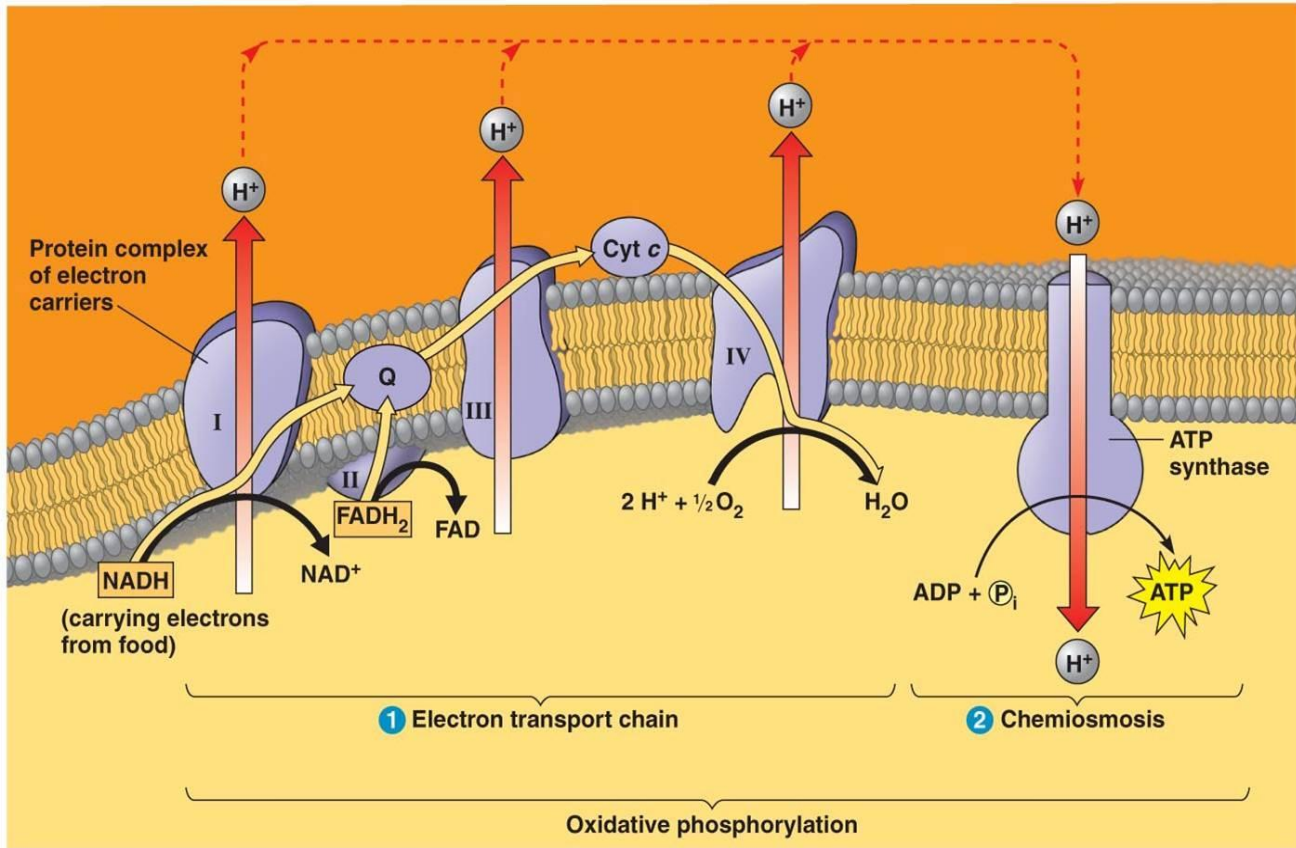
นอกจากโปรตีนเชิงซ้อนทั้ง 3 กลุ่ม
แล้ว ลูกโซ่หายใจในไมโทคอนเดรีย
ยังประกอบด้วยโมเลกุลอีก 2 ชนิด

- ยูบิควิโนน (ubiquinone)

ซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดเล็กและ
มีคุณสมบัติ hydrophobic

- ไซโทโครมซี (cytochrome c)



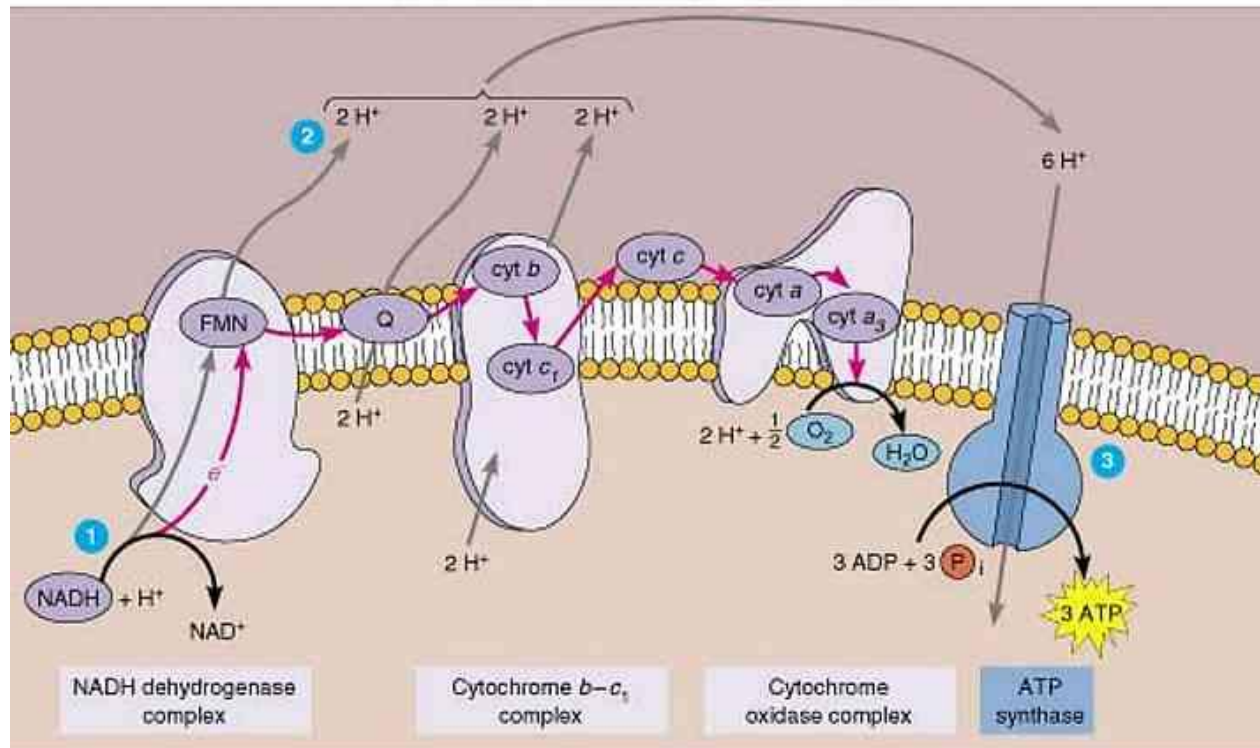


การส่งอิเล็กตรอนจาก
 NADH ไปตามลูกโซ่
 หายใจโดยมีออกซิเจน
 เป็นตัวรับอิเล็กตรอน
 ตัวสุดท้าย และได้น้ำ
 เป็นผลิตภัณฑ์

หลักการรับส่งอิเล็กตรอนในลูกโซ่หายใจ

Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings.

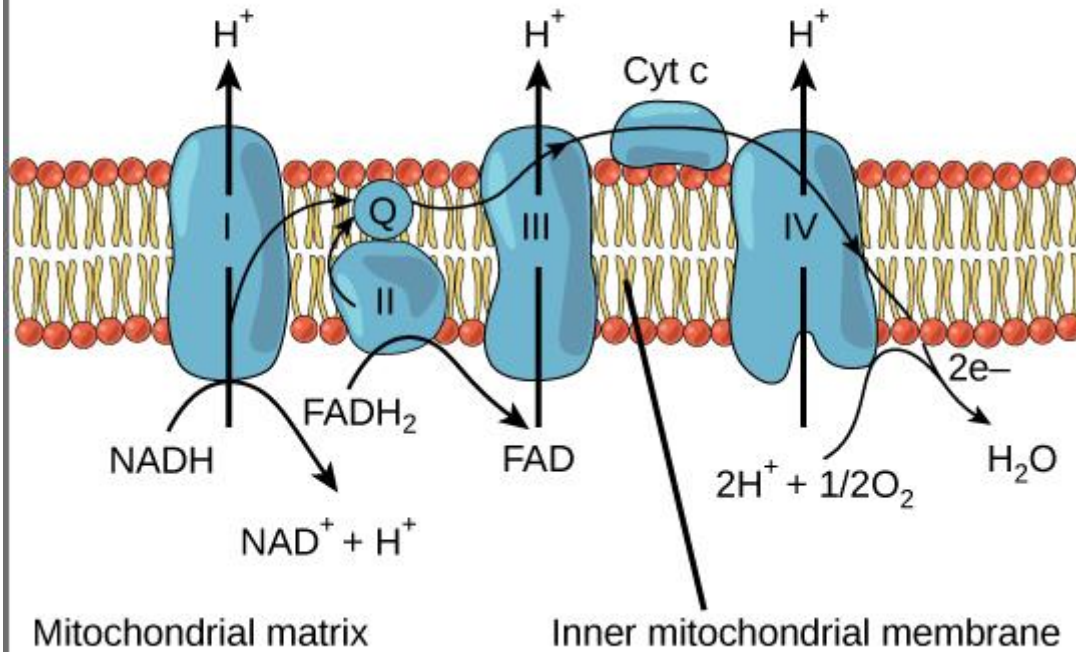
ELECTRON TRANSPORT CHAIN

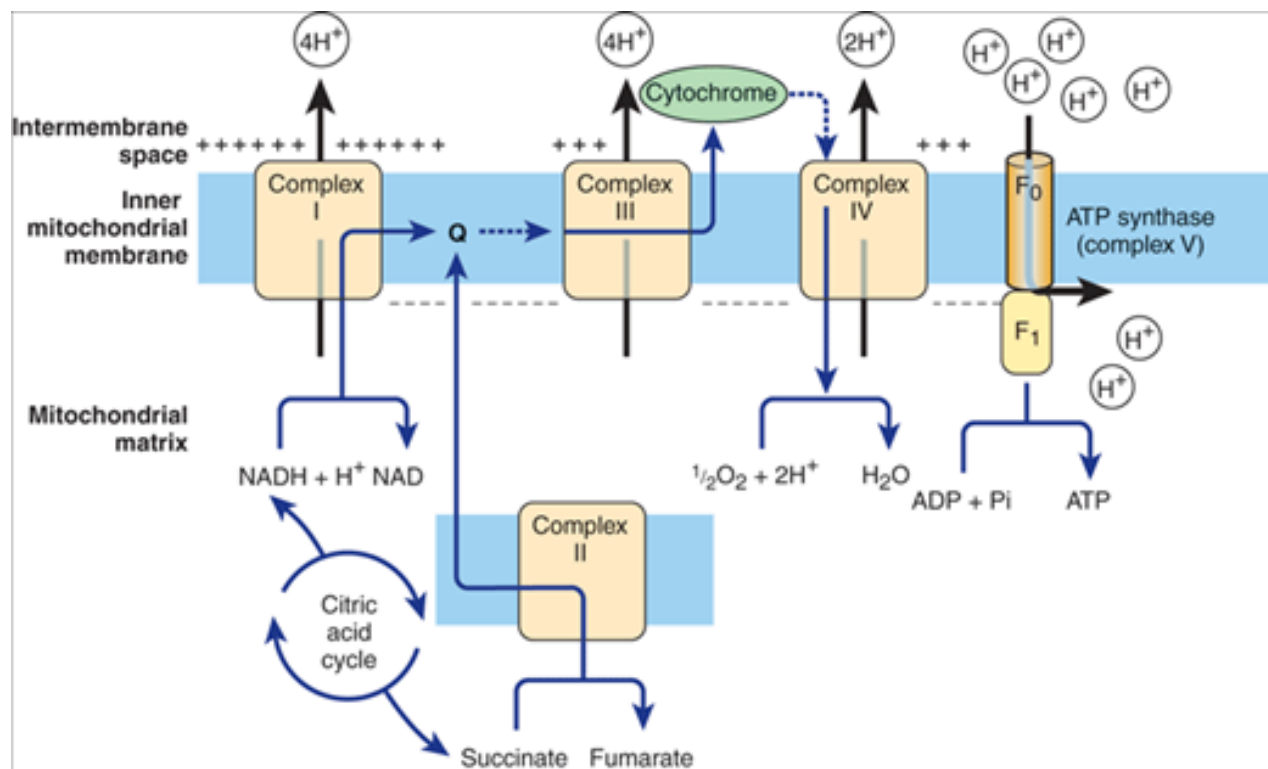


Copyright © 2001 Benjamin Cummings, an imprint of Addison Wesley Longman, Inc.

Electron Transport Chain

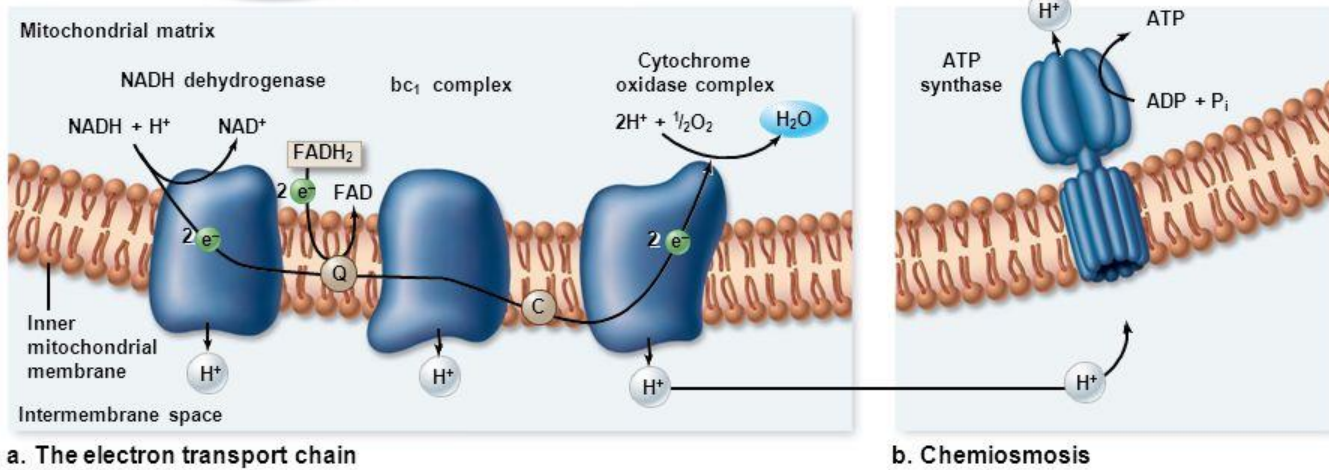
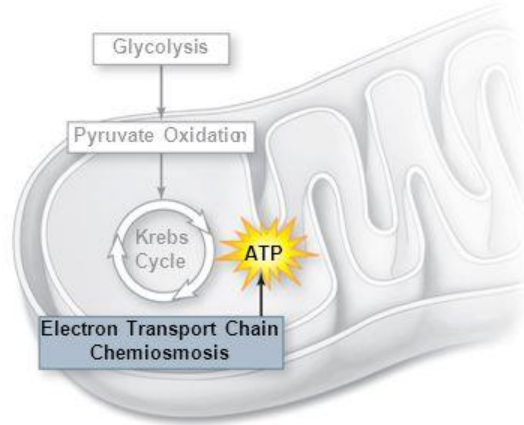
Intermembrane space

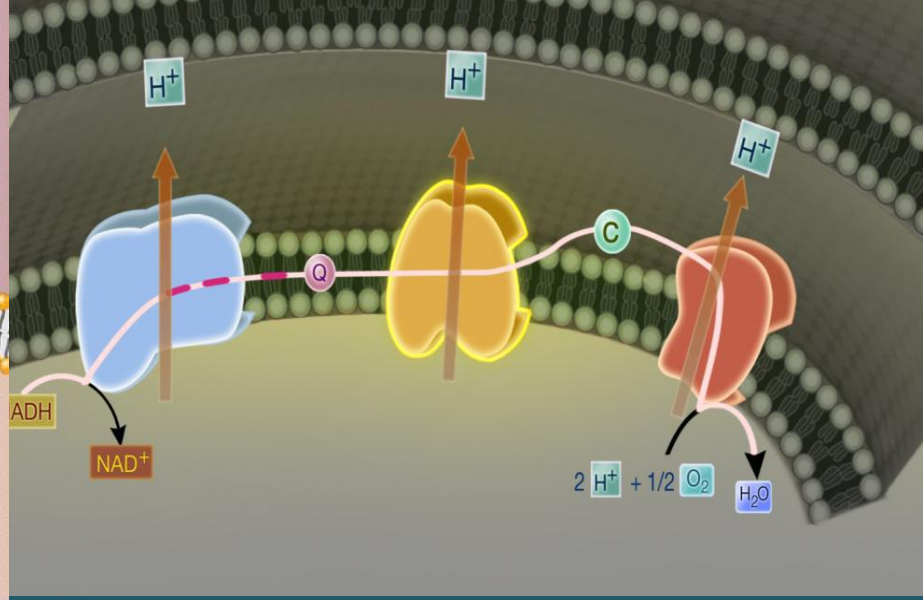
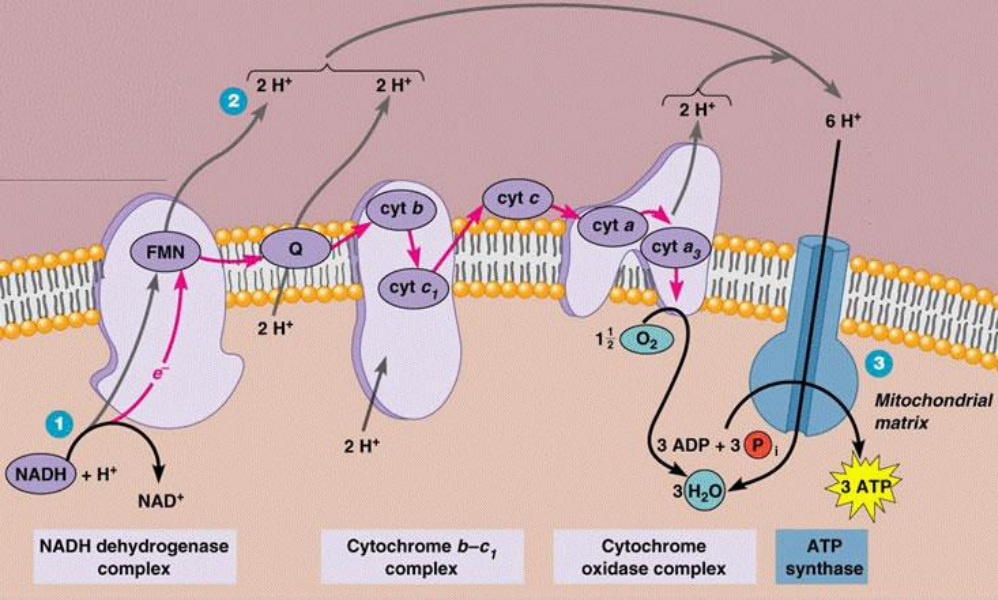




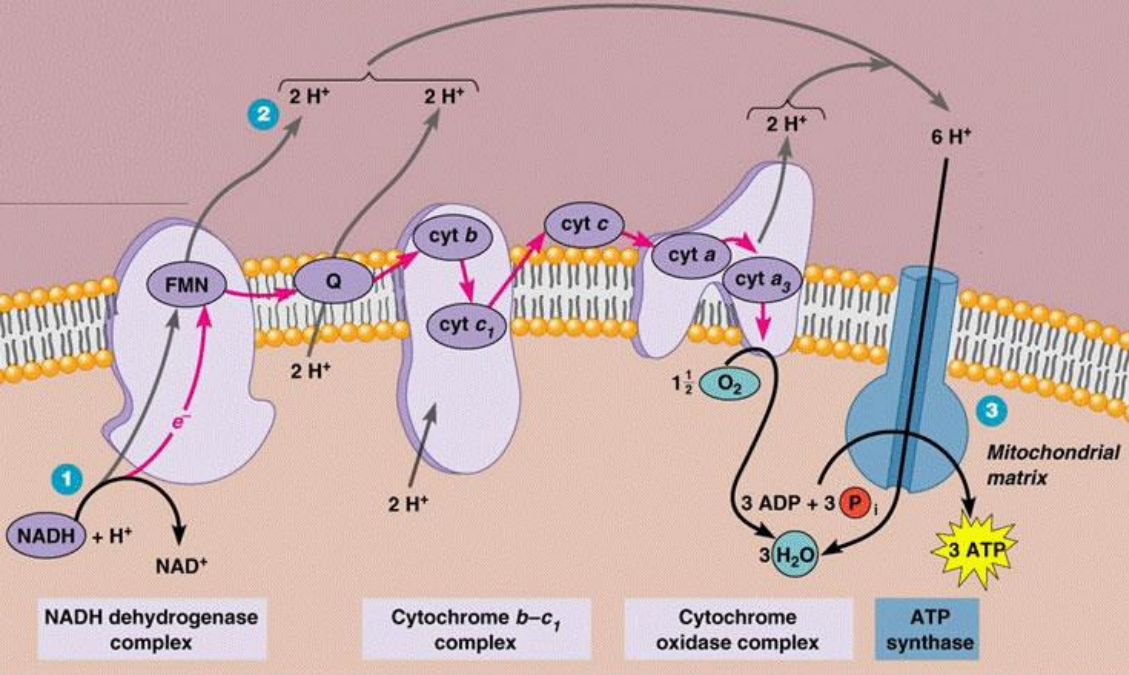
Source: Janson LW, Tischler ME: *The Big Picture: Medical Biochemistry*: www.accessmedicine.com

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved.





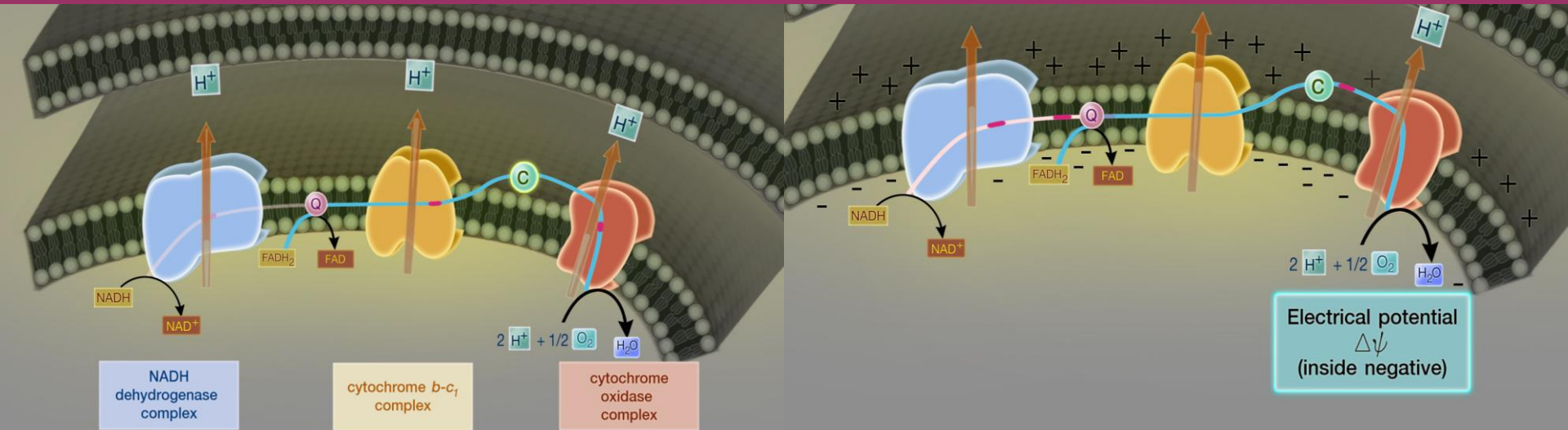
ในระหว่างมีการรับส่งอิเล็กตรอนไปตามโมเลกุลต่างๆ ของลูกโซ่ หายใจในไมโทคอนเดรีย จะมีการผลักโปรตอนจาก matrix ไปยัง intermembrane space ที่โปรตีนเชิงซ้อน 3 กลุ่ม



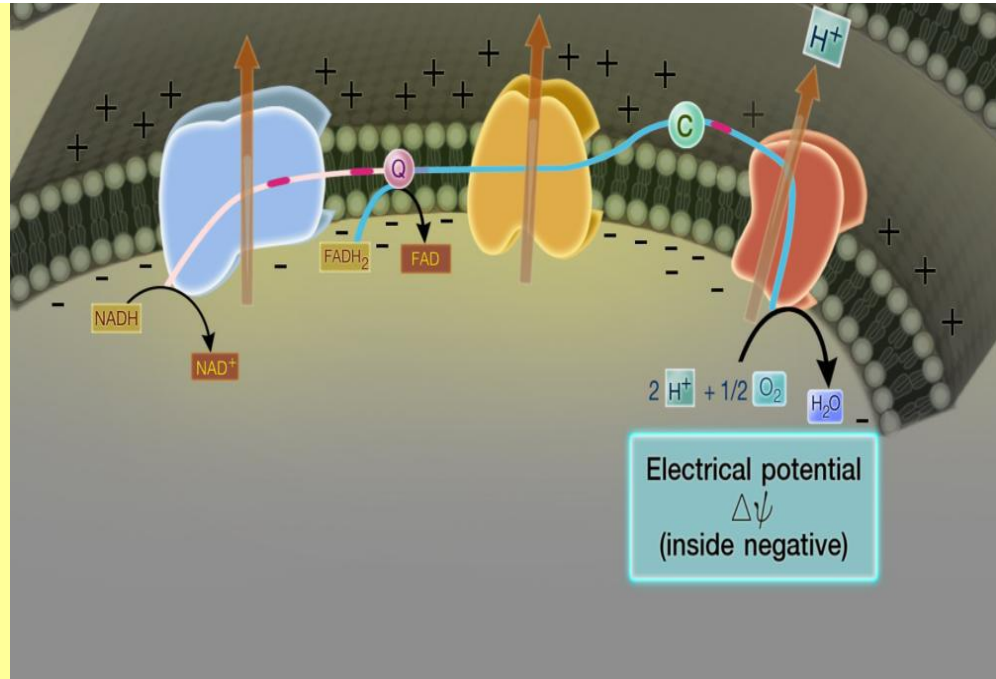
FADH₂ จะไม่สามารถส่งให้กับ NADH dehydrogenase complex ได้ เพราะ FADH₂ มีความสามารถรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่า NADH dehydrogenase complex

การส่งอิเล็กตรอนจาก FADH₂ จึงมีการผลักโปรตอนจากเมทริกซ์ ไปยัง intermembrane space ของไมโทคอนเดรีย ผ่านโปรตีนเชิงซ้อนเพียง 2 กลุ่ม คือ cytochrome b-c₁ complex และ cytochrome oxidase complex

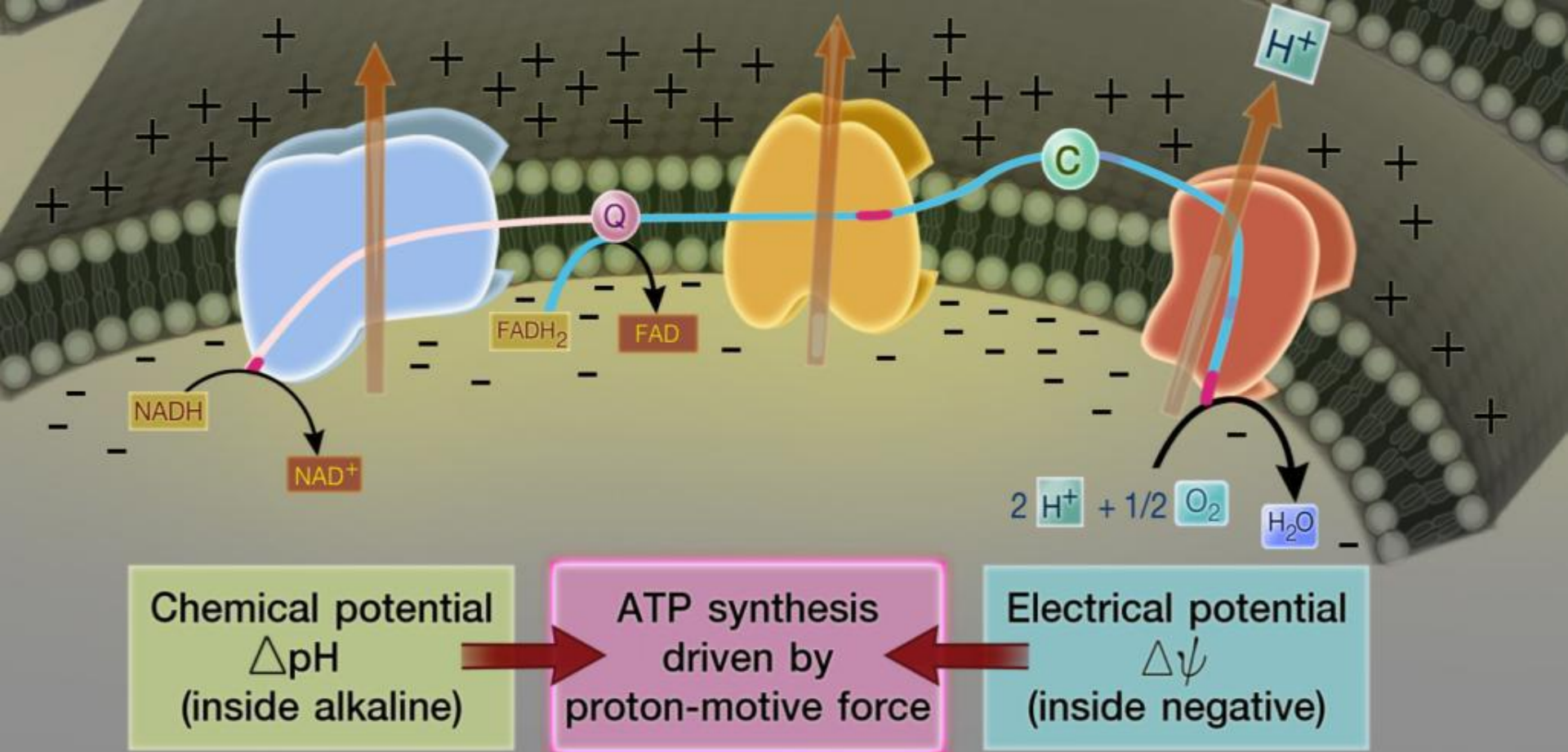
การผลักโปรตอนผ่านเยื่อหุ้มชั้นในของไมโทคอนเดรีย ต้องใช้พลังงาน เพราะเยื่อหุ้มชั้นในของไมโทคอนเดรียไม่ยอมให้โมเลกุลใดๆ แพร่ผ่านอย่างอิสระได้ แม้แต่โปรตอนซึ่งมีขนาดเล็ก



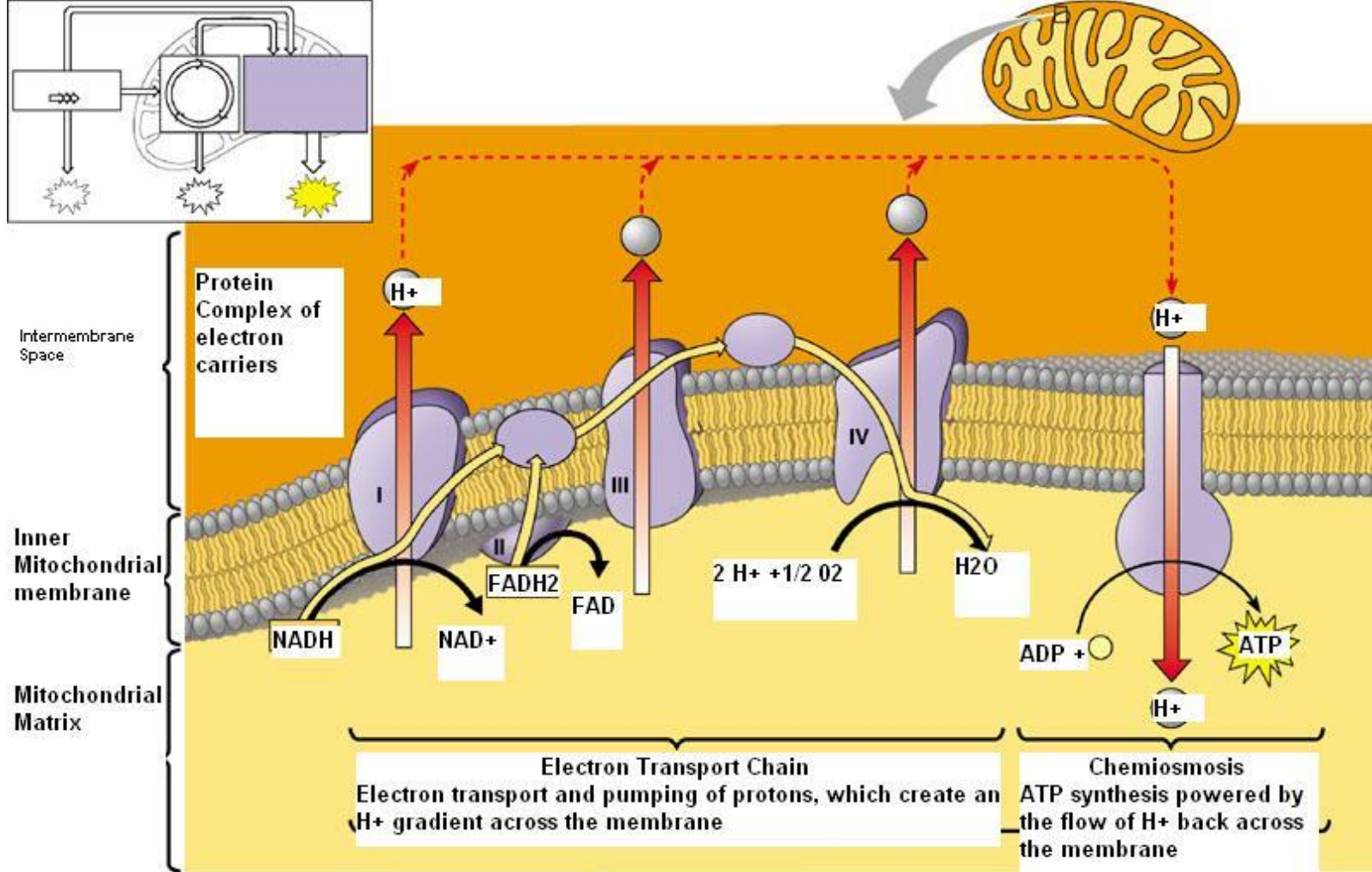
ความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นเมื่อโปรตอนถูกผลักออกไปจากเมทริกซ์ไปสะสมอยู่ใน intermembrane space ทำให้เมทริกซ์มีประจุเป็นลบ ในขณะที่ intermembrane space มีประจุเป็นบวก

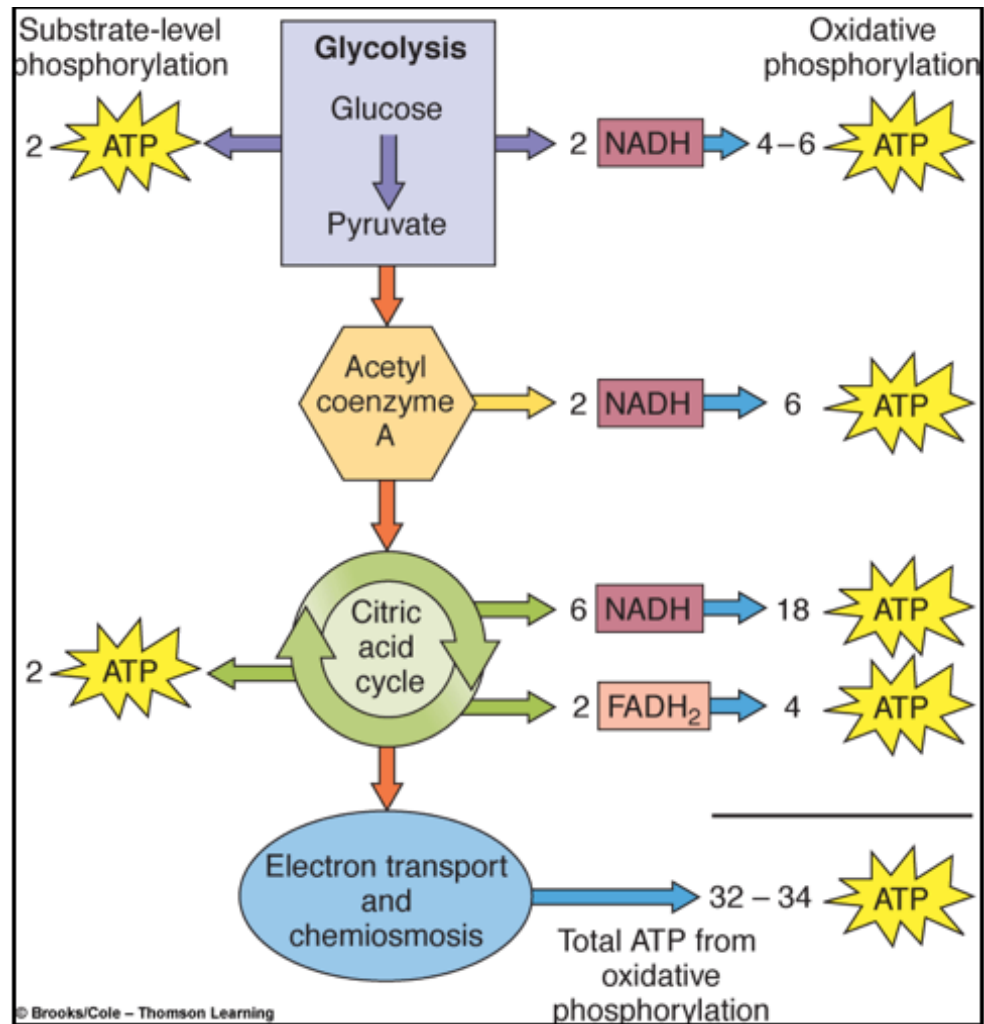
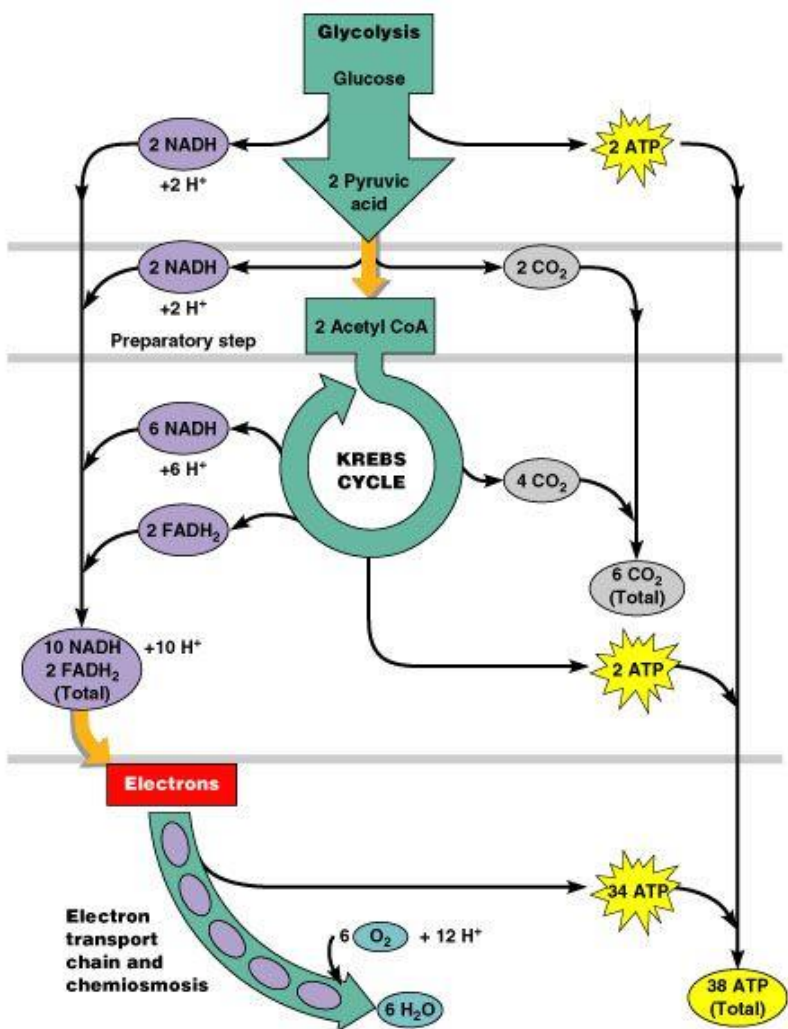


นอกจากนั้น ในขณะที่มีโปรตอนสะสมอยู่ใน intermembrane space ทำให้ใน intermembrane space มี pH ต่ำกว่าในเมทริกซ์ ทำให้เกิดความต่างศักย์เคมี



proton motive force เซลล์สามารถนำไปใช้ในกิจกรรมต่างๆได้ เช่น ใช้ในการสังเคราะห์ ATP

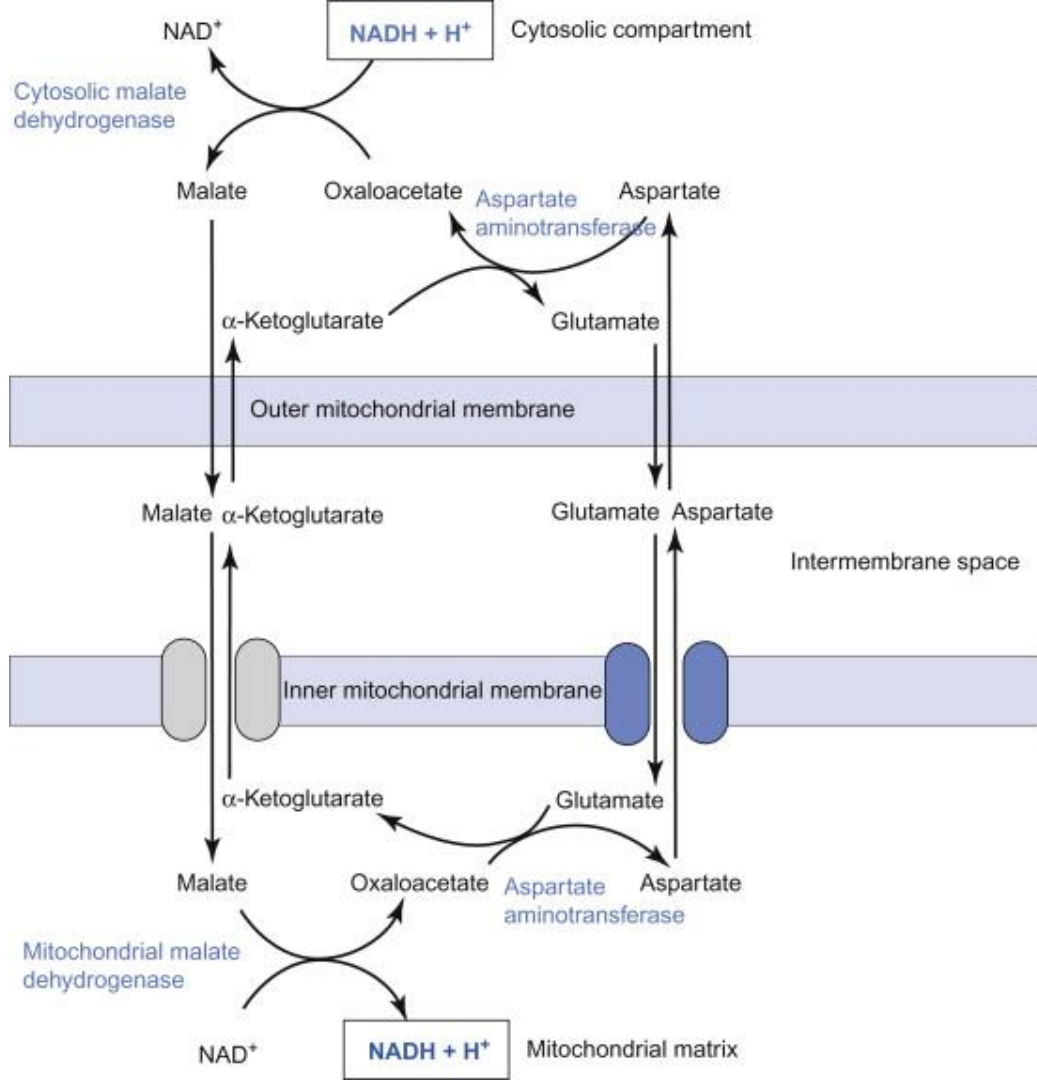




การส่ง $\text{NADH} + \text{H}^+$ ผ่านเข้าเยื่อหุ้มไมโทคอนเดรีย



- ออกซิเดทีฟฟอสโฟรีเลชันและมาเลต-แอสพาเทตชั้ตเทิล (malate-aspartate shuttle) พบในเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ ตับ ไต และในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม **ได้พลังงานออกมา 3 ATP**
- กลีเซอรอลฟอสเฟตชั้ตเทิล (glycerol phosphate shuttle) พบในเซลล์กล้ามเนื้อ เซลล์กล้ามเนื้อสมอง และเซลล์กล้ามเนื้อที่เกี่ยวข้องกับการบินของแมลง **ได้พลังงานออกมา 2 ATP**



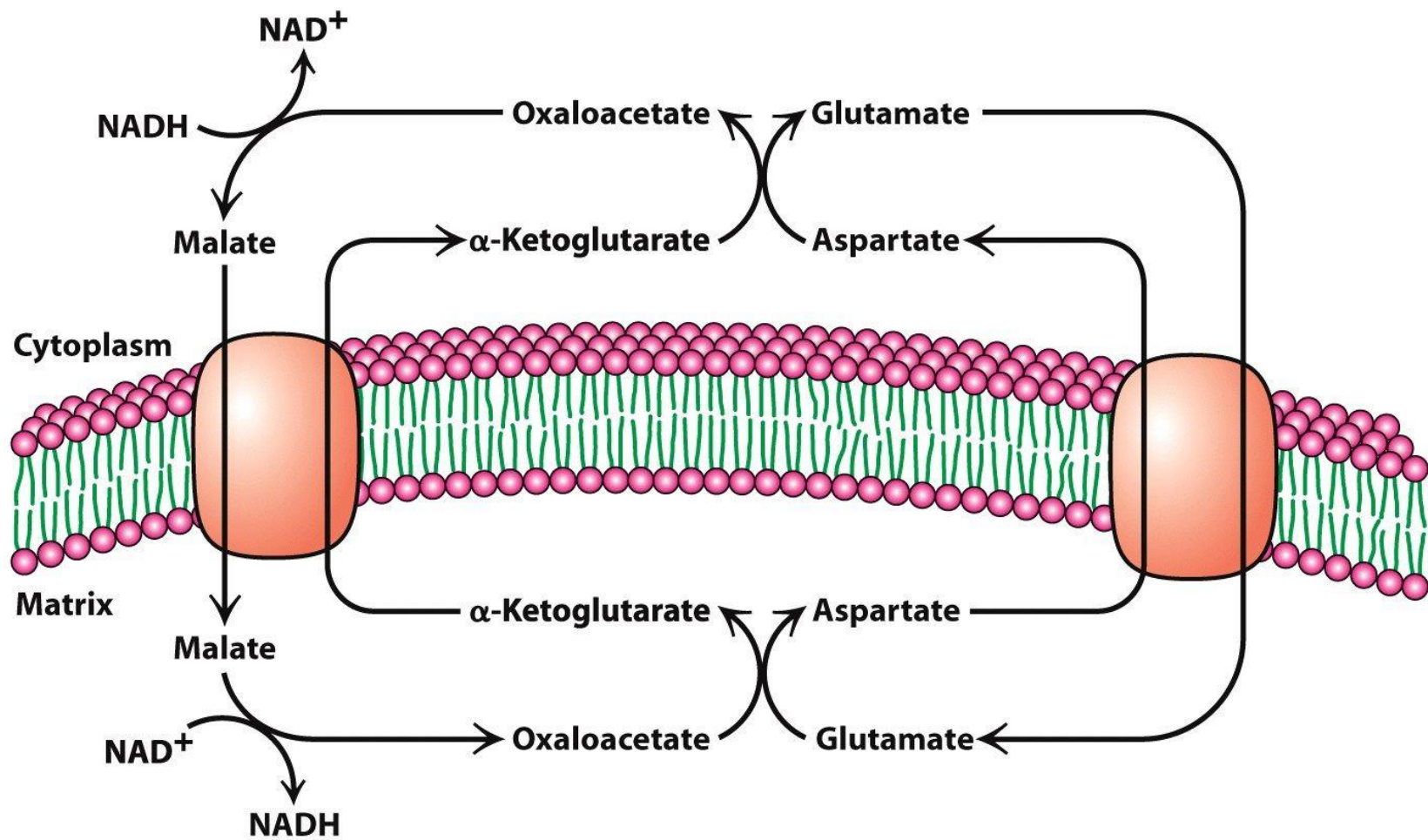
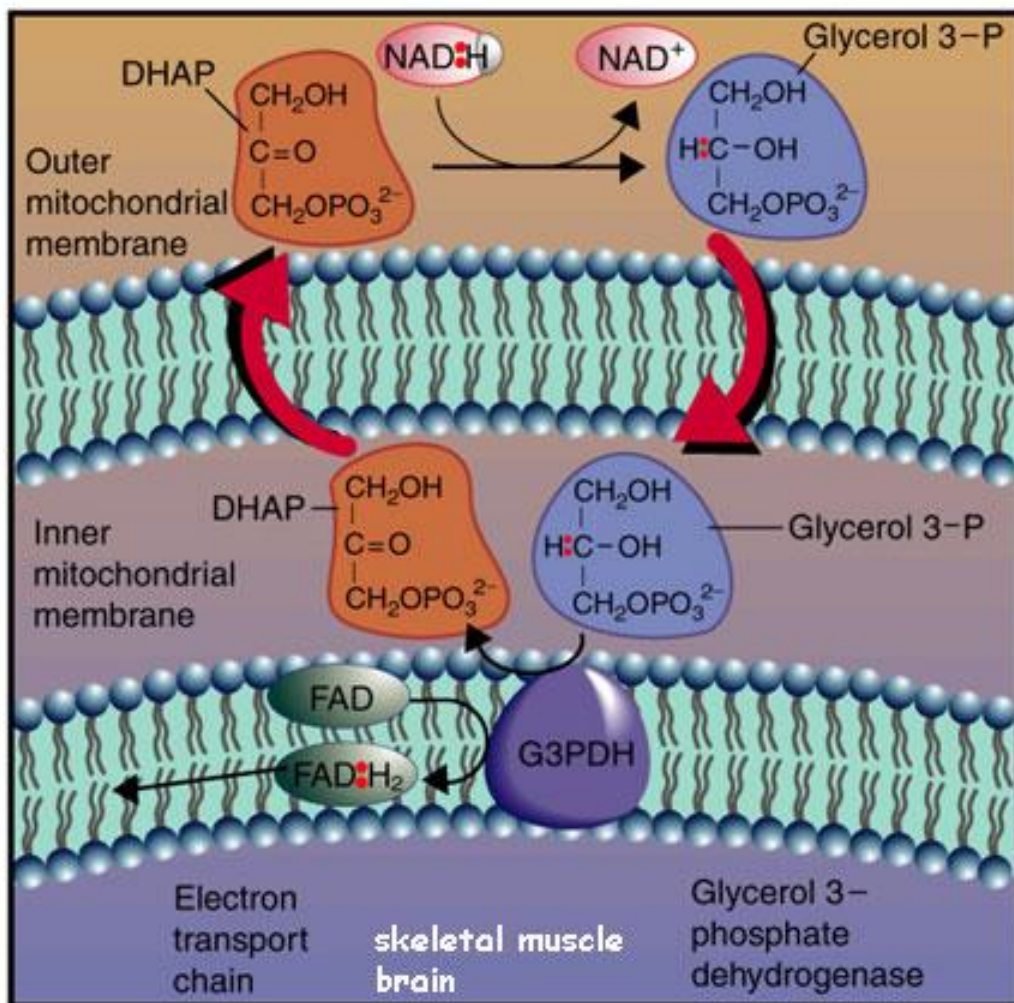


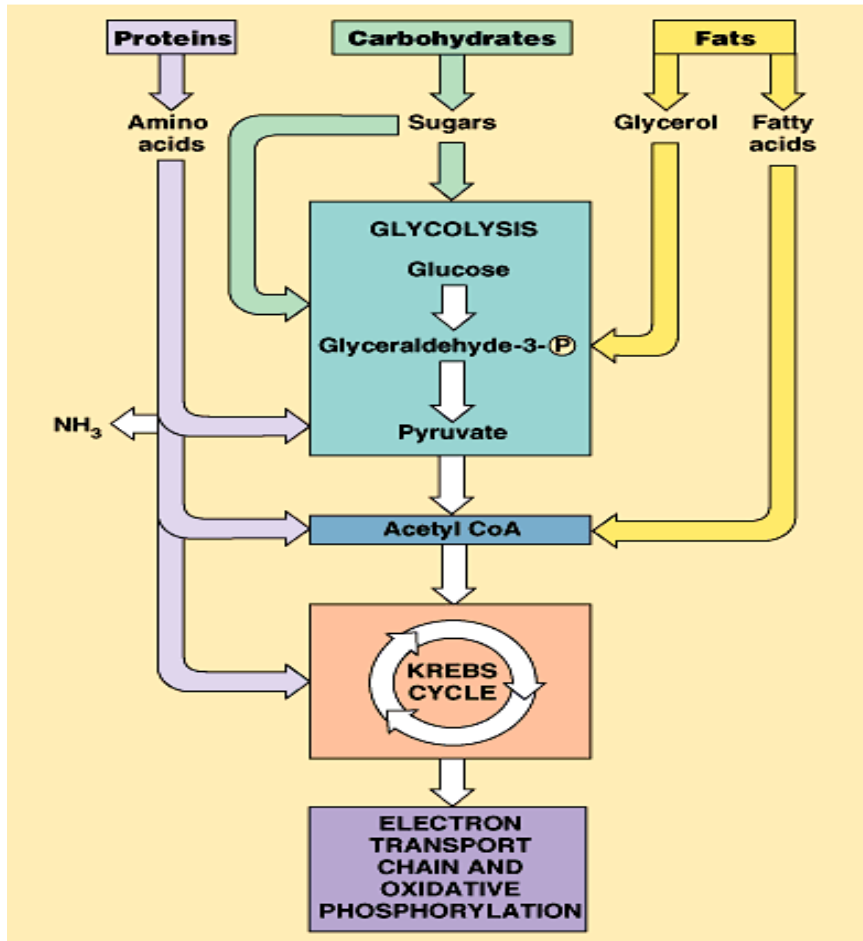
Figure 18.35

Biochemistry, Seventh Edition

© 2012 W. H. Freeman and Company

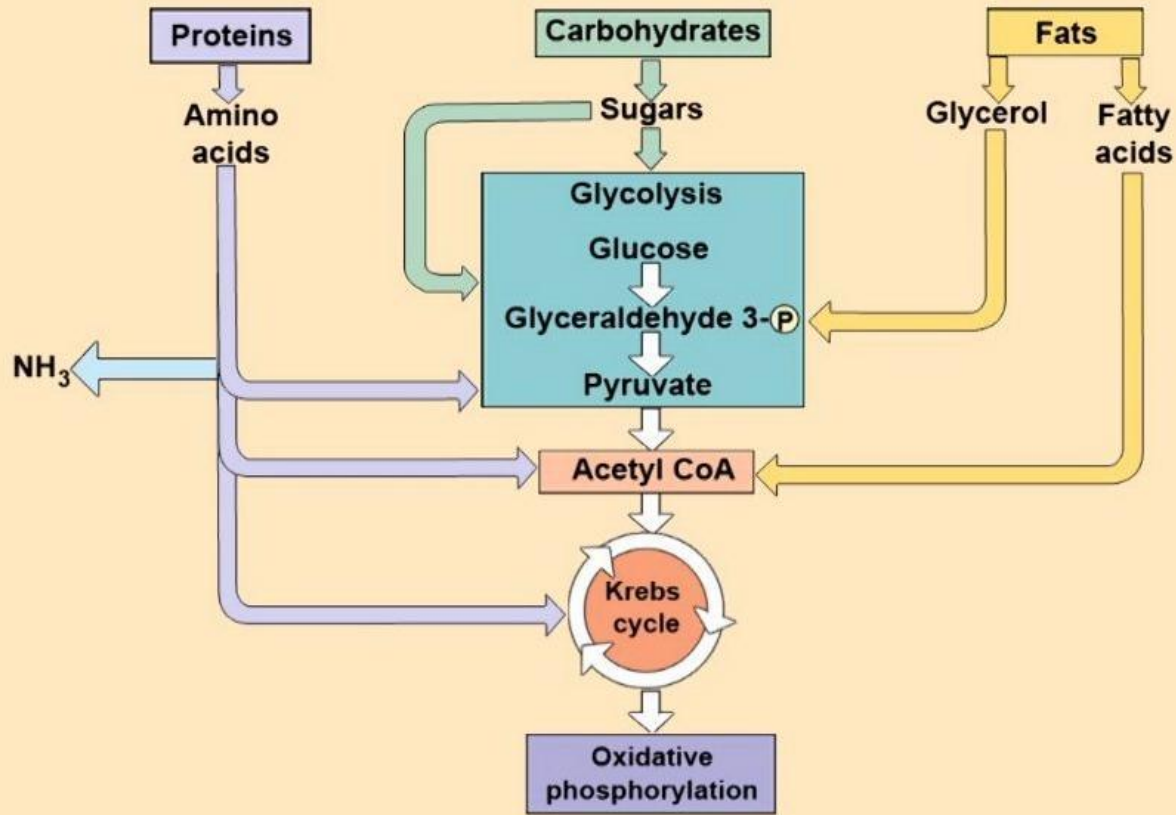


The catabolism of various food molecules



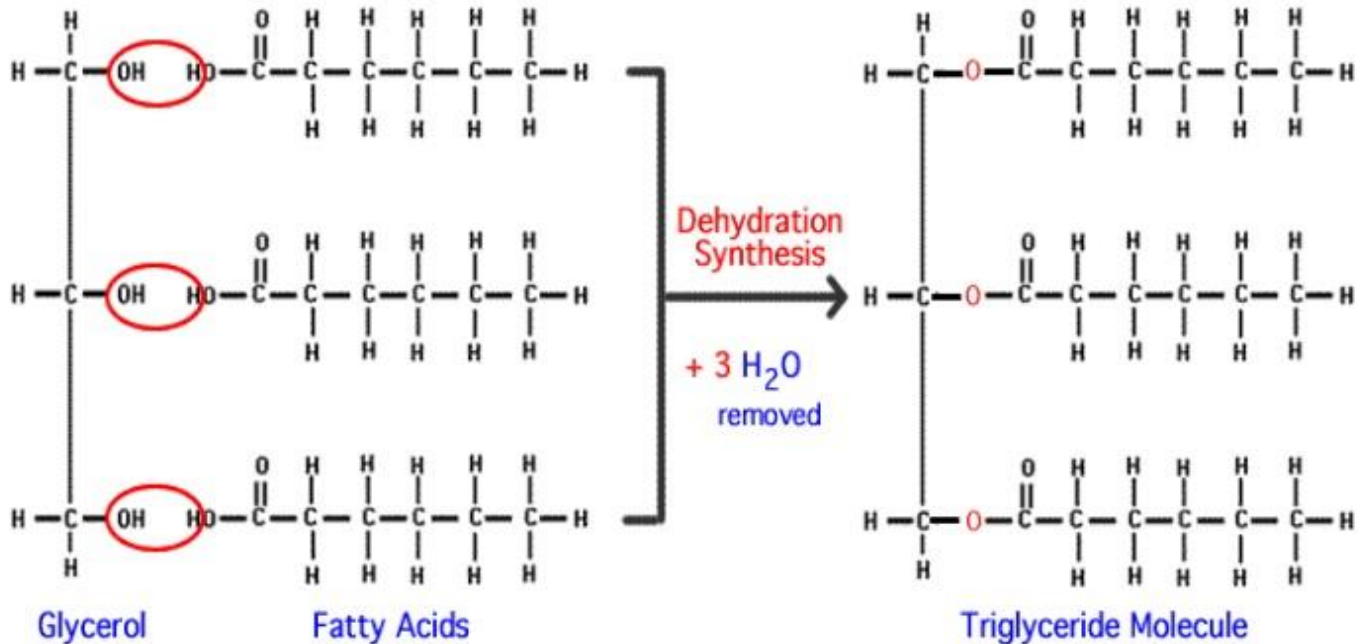
ร่างกายของเราได้พลังงานจาก
carbohydrates, fats, proteins
โมเลกุลเหล่านี้ถูกย่อยให้เป็น
โมเลกุลที่เล็กลงด้วย enzymes

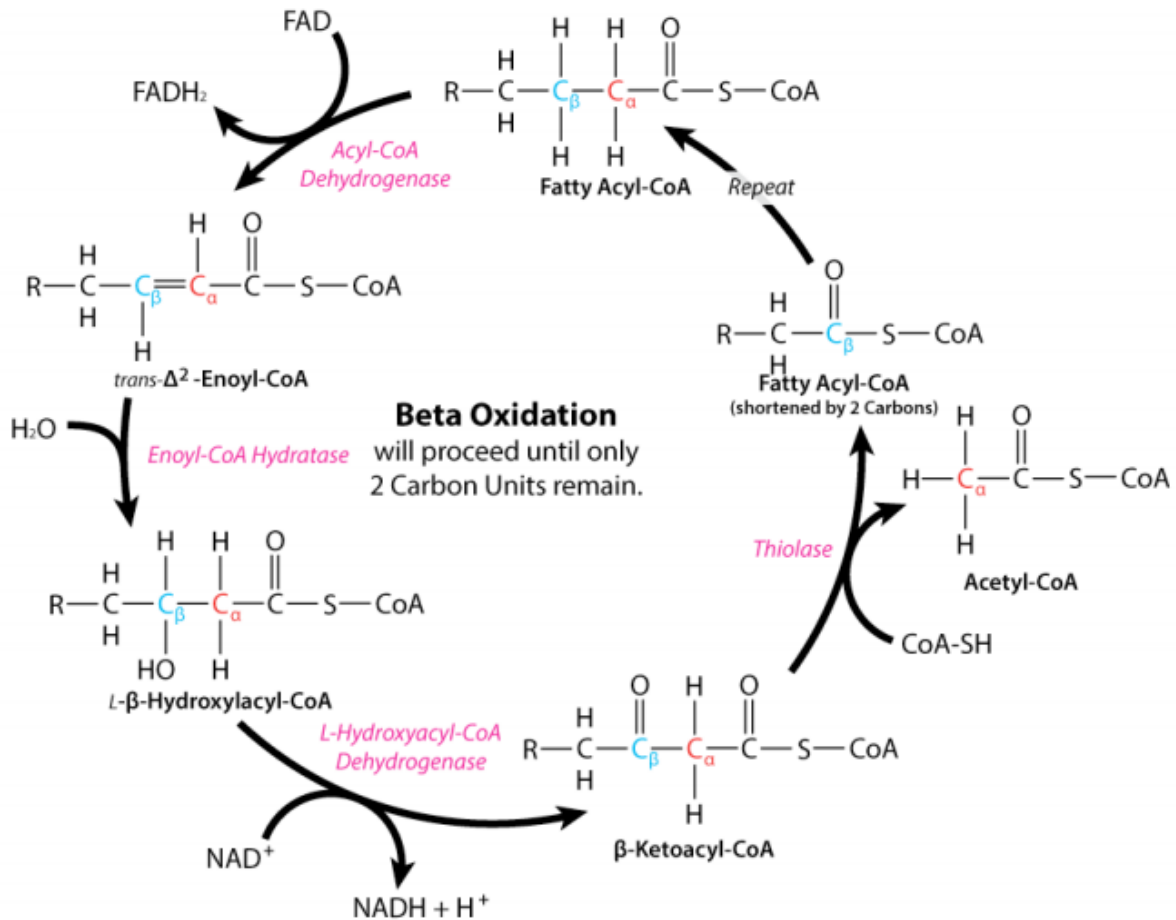
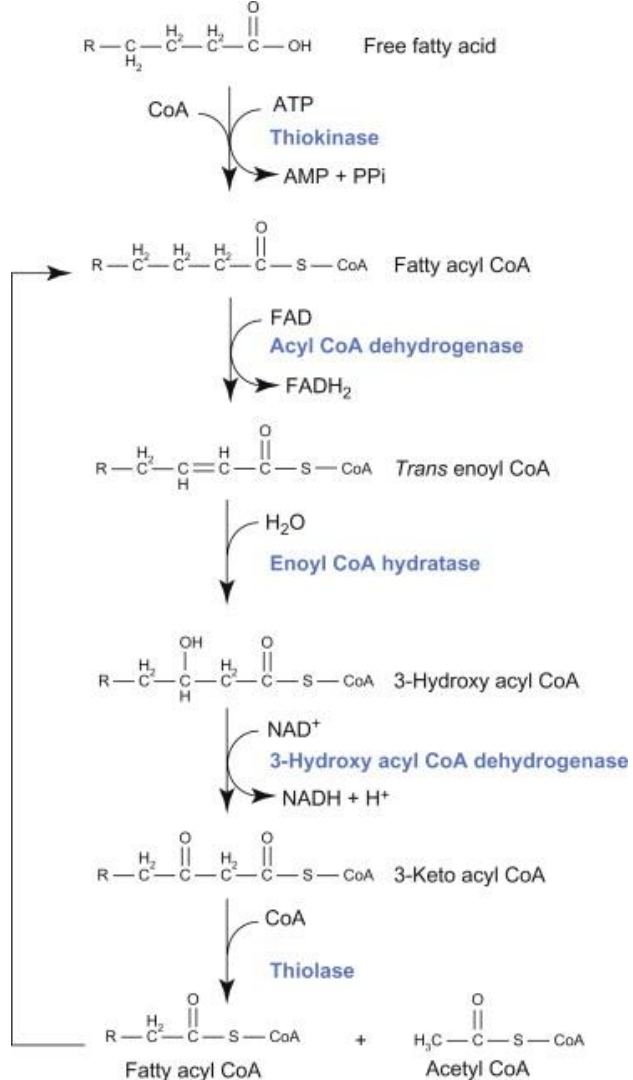
สารอาหารต่างๆจะสามารถเข้าสู่
กระบวนการ glycolysis, Acetyl
CoA และ Krebs cycle เพื่อ
เปลี่ยนเป็นพลังงานในรูป ATP

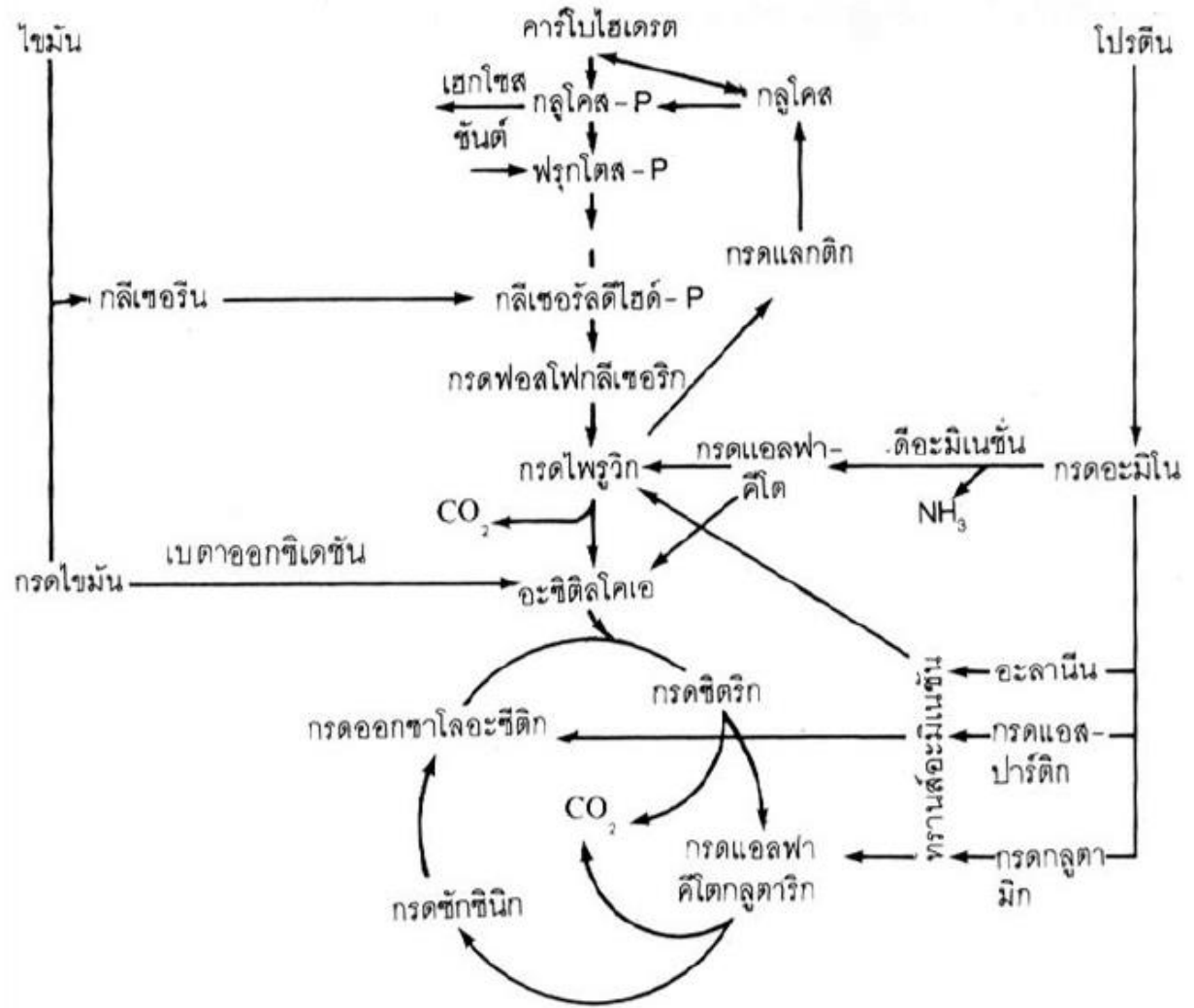


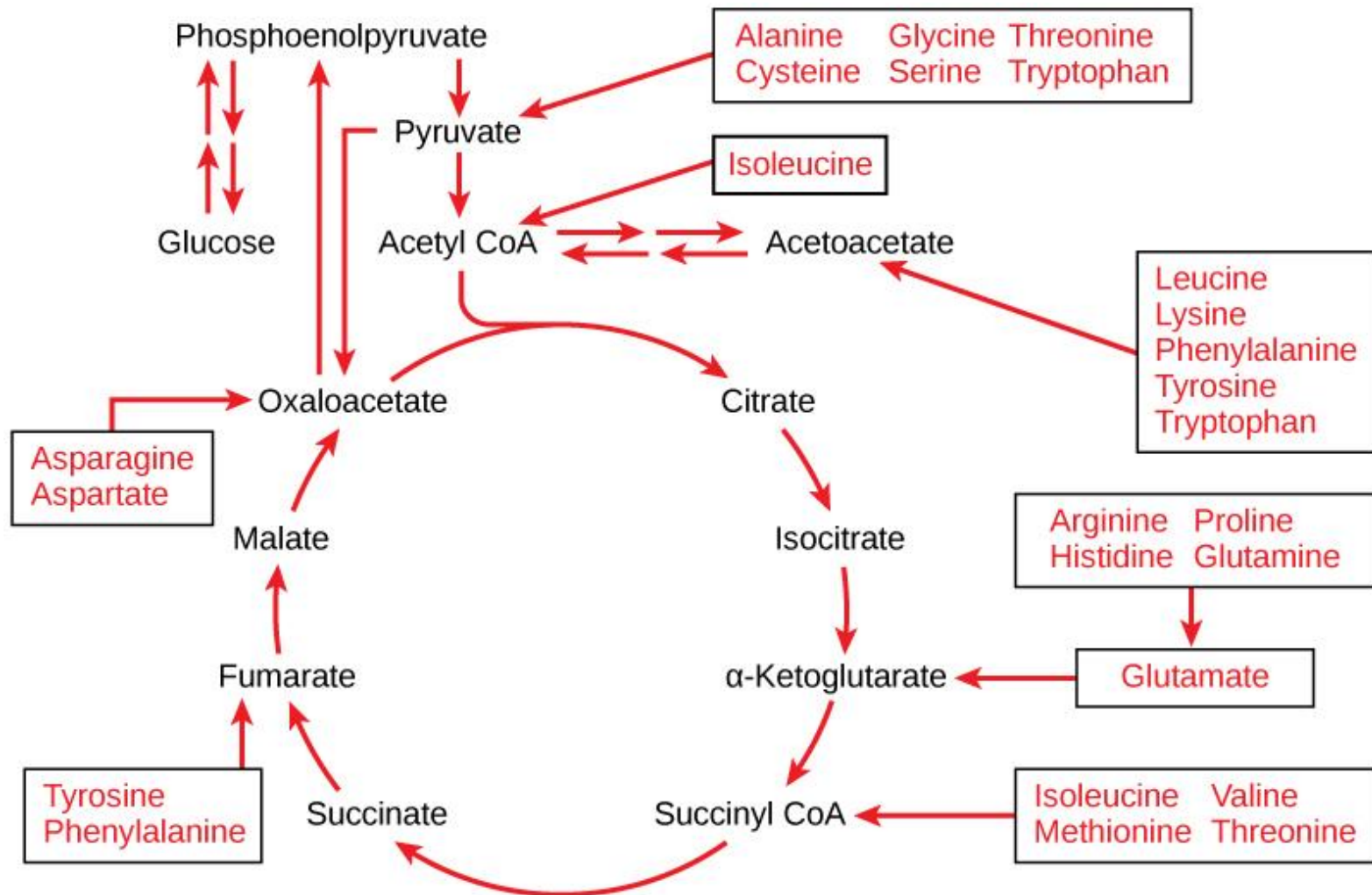
การเปลี่ยนแปลงพลังงานพันธะของโมเลกุลอื่นๆ นอกเหนือการกลูโคส

Formation of TRIGLYCERIDE



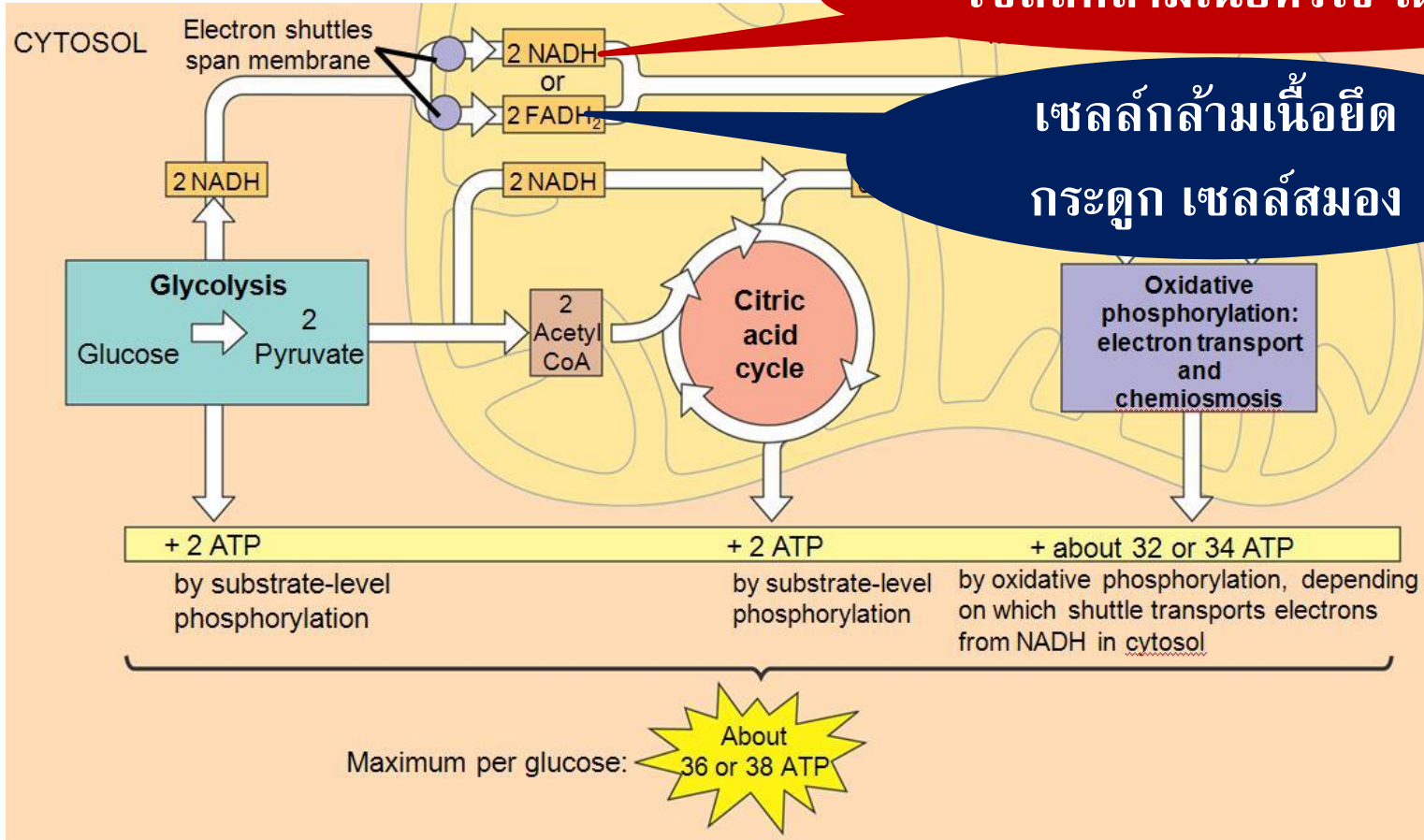






เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ ไต ตับ

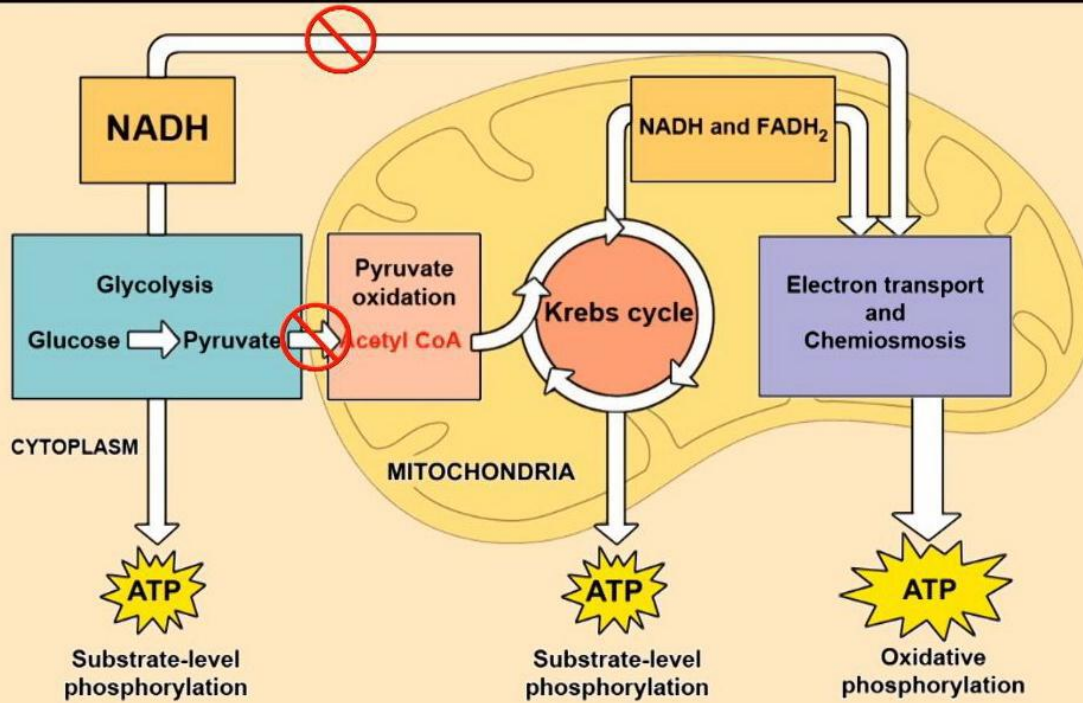
เซลล์กล้ามเนื้อ
กระดูก เซลล์สมอง





Anaerobic respiration

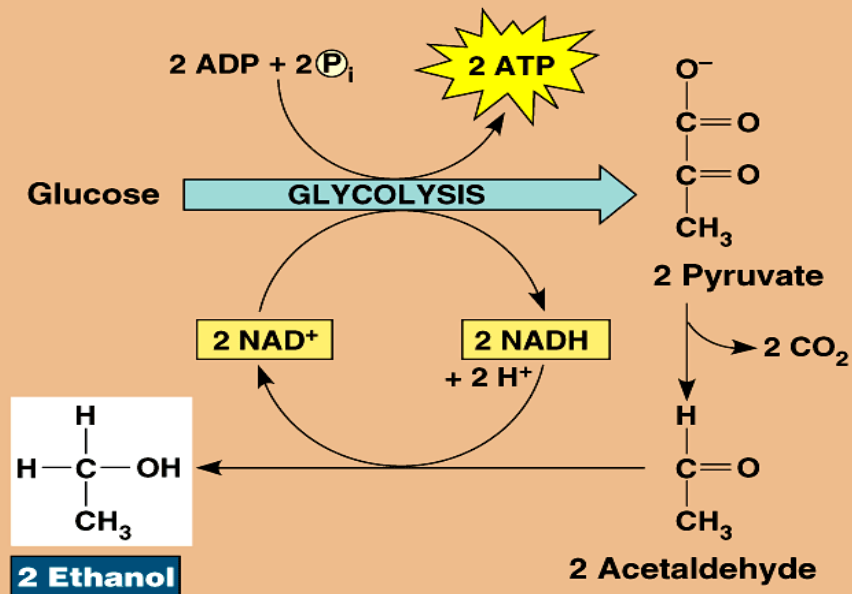
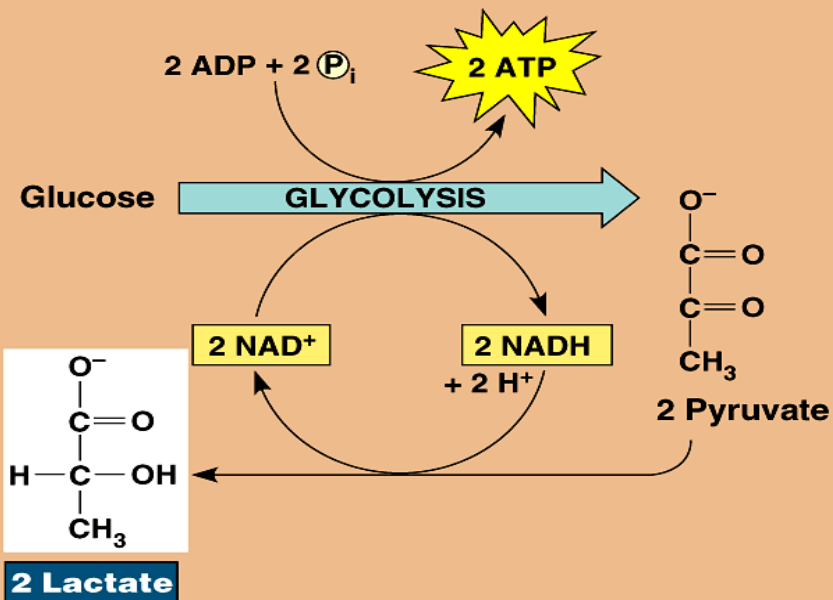




ในสถานะที่ไม่มี O_2
 ไพรูเวตและ NADH
 จะไม่ถูกส่งเข้าไปในไม
 โทคอนเดรีย

เซลล์จะมีการสลายไพรูเวตโดยกระบวนการหมัก (fermentation) คือ การหมักกรดแลคติก (lactic acid fermentation) และการหมักแอลกอฮอล์ (alcohol fermentation)

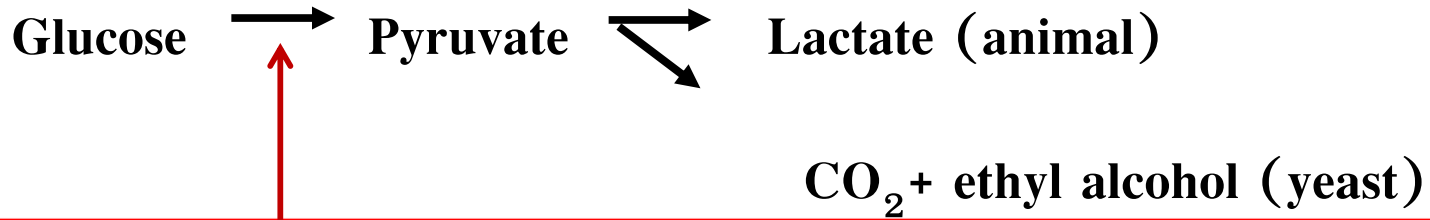
เซลล์จะมีกระบวนการผันกลับให้ NADH กลับไปเป็น NAD^+ เพื่อให้กระบวนการไกลโคไลซิสไม่หยุดชะงักและสร้าง ATP ต่อไปด้วยกระบวนการหมัก (Fermentation)



Fermentation

- ❑ กระบวนการหมัก เป็น anaerobic process
- ❑ เป็นกระบวนการย่อยสลายอาหาร เพื่อให้ได้ ATP โดยมี organic compounds เป็นตัวรับ e^-
- ❑ เป็นการย่อยสลาย glucose ผลที่ได้คือ lactate (animal cell) หรือ $\text{CO}_2 + \text{alcohol}$ (yeast)

Fermentation



- ❖ ผลของ fermentation จะได้ 2ATP
- ❖ NADH ที่ได้จาก fermentation จะถูกเปลี่ยนเป็น NAD⁺ เพื่อใช้ใน glycolysis

Alcohol fermentation occurs in yeast.

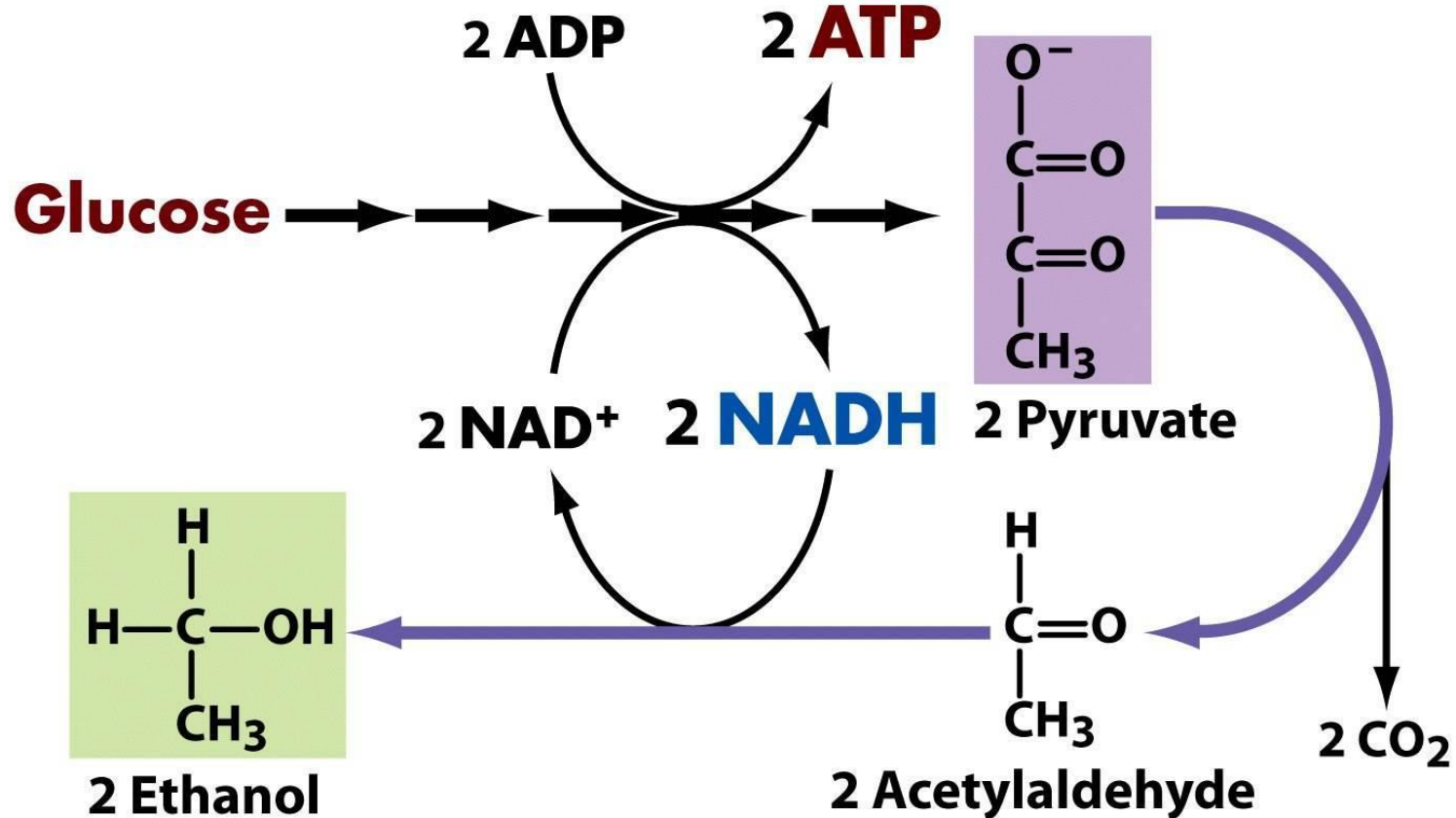


Figure 9-22c Biological Science, 2/e

(a) Lactic acid fermentation occurs in humans.

