เรื่องที่ 6 การสลายอาหารแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic respiration)

สาระที่ 1 สิ่งมีชีวิตกับกระบวนการดำรงชีวิต

มาตรฐานว 1.1 : เข้าใจหน่วยพื้นฐานของสิ่งมีชีวิต ความสัมพันธ์ของโครงสร้างและหน้าที่ของระบบต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตที่ทำงานสัมพันธ์กัน มีกระบวนการสืบเสาะหาความรู้สื่อสารสิ่งที่เรียนรู้ และนำความรู้ไปใช้ในการดำรงชีวิตของตนเองและดูแลสิ่งมีชีวิต

ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง

1. สำรวจตรวจสอบ สืบค้นข้อมูล อภิปรายและสรุปเกี่ยวกับโครงสร้างและการทำงานของระบบย่อยอาหารและการสลายสารอาหารเพื่อให้ได้พลังงานในร่างกายของสัตว์และมนุษย์

จุดประสงค์การเรียนรู้

1. อภิปราย และสรุปปฏิกิริยาการสลายสารอาหารแบบใช้ออกซิเจน

เนื้อหา

การสลายสารอาหารแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic respiration)

แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน

1. ไกลโคลิซีส (Glycolysis)
2. การสร้างอะซิติลโคเอนไซม์ เอ หรือการออกซิเดชัน กรดไพรูวิก (Pyruvate oxidation หรือ Pyruvate dehydrogenase complex pathway)
3. วัฏจักรเครบส์ (Krebs cycle)
4. การถ่ายทอดอิเล็กตรอน (Electron transport system)

การสลายไขมันและโปรตีน

เกม

แบบทดสอบ

เรื่องที่ 6 การสลายสารอาหารแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic respiration)

จุดประสงค์การเรียนรู้

1. อภิปราย และสรุปปฏิกิริยาการสลายสารอาหารแบบใช้ออกซิเจน

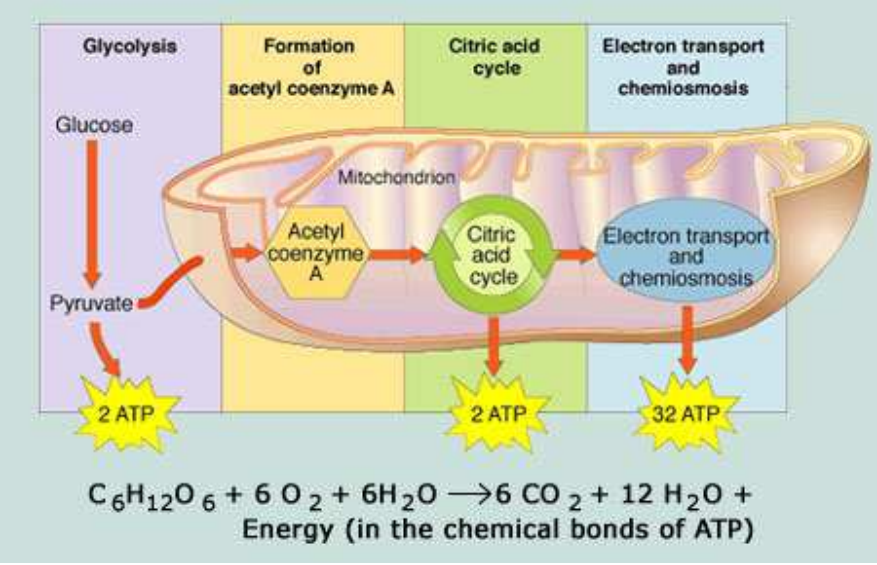
การสลายสารอาหารแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic respiration)

การหายใจ(Respiration) คือกระบวนการสลายสารอาหาร เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมันและโปรตีน โดยอาศัยการควบคุมของเอนไซม์ภายในเซลล์

การหายใจแบบใช้ออกซิเจน เป็นกระบวนการสร้าง ATP จากโมเลกุลของกลูโคสได้มากที่สุดถึง 36 -38 โมเลกุล หรือมากกว่าต่อกลูโคส 1 โมเลกุล

การหายใจแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic respiration) เป็นการสลายสารอาหารโดยใช้ออกซิเจนเข้าร่วมปฏิกิริยา ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ

1. ไกลโคลิซีส (Glycolysis)
2. การสร้างอะซิติลโคเอนไซม์ เอ หรือการออกซิเดชัน กรดไพรูวิก (Pyruvate oxidation หรือ pyruvate dehydrogenase complex pathway)
3. วัฏจักรเครบส์ (Krebs cycle)
4. การถ่ายทอดอิเล็กตรอน (Electron transport system)



ภาพที่ 1.1 แสดงตำแหน่งที่เกิดขั้นตอนทั้ง 4 ขั้นตอนของการสลายสารอาหารระดับเซลล์

ที่มา : www.dwm.ks.edu.tw

1. ไกลโคลิซีส (Glycolysis)

กระบวนการนี้มีชื่อเรียกอีกชื่อว่า EMP Pathway ซึ่งเรียกตามชื่อของผู้ริเริ่มศึกษากระบวนการนี้ 3 คน คือ Emden, Meyerhof, Parnas กระบวนการไกลโคลิซีสเป็นกระบวนการสลายน้ำตาลกลูโคส ($C_6H_{12}O_6$) ซึ่งมีคาร์บอน 6 อะตอมไปเป็นกรดไพรูวิก ($C_3H_4O_3$) ซึ่งมีคาร์บอน 3 อะตอม จำนวน 2 โมเลกุล เกิดที่ไซโทพลาสซึมของเซลล์ที่เรียกว่าไซโทซอล (Cytosol) มีหลายขั้นตอนแต่ละขั้นตอนมีเอนไซม์ต่างชนิดกันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เริ่มต้นด้วยการเติมหมู่ฟอสเฟตให้กลูโคส ทำให้กลูโคสมีค่าพลังงานศักย์สูงขึ้น ในการฟอสโฟรีเลชันกลูโคส 1 โมเลกุล ต้องใช้พลังงาน 2 ATP

ฟอสโฟรีเลชัน หมายถึง การรวมตัวของหมู่ฟอสเฟต (Pi) กับสารแล้วทำให้สารนั้นมีค่าพลังงานศักย์สูงขึ้น เช่น

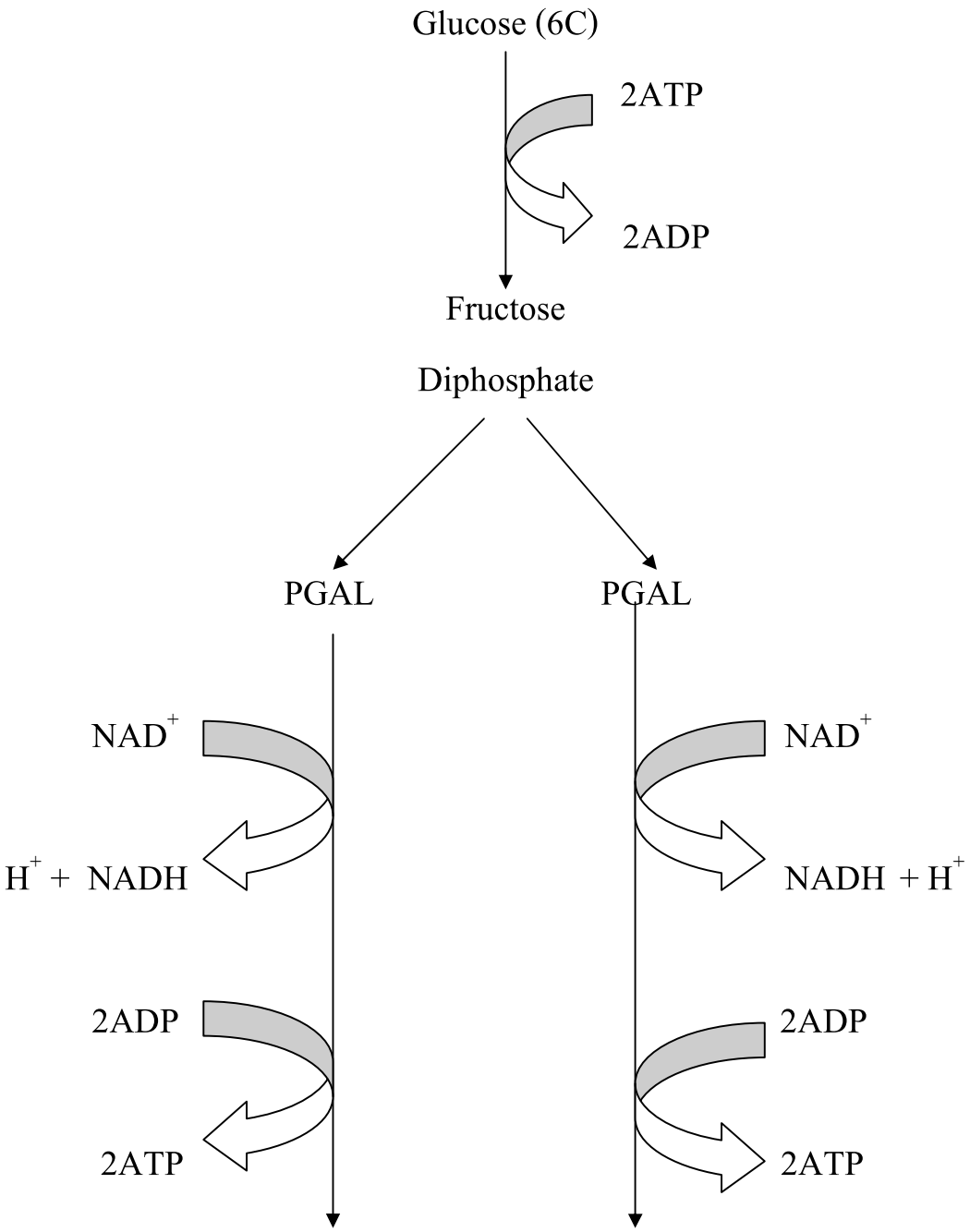
$$ADP + Pi \rightarrow ATP$$

$$\text{กลูโคส} + Pi \rightarrow \text{กลูโคส-}Pi$$

พลังงานที่ปล่อยออกมาจากการสลายกลูโคสไปเป็นกรดไพรูวิก สามารถสังเคราะห์ ATP ได้ 4 โมเลกุล และไฮโดรเจนที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนที่มีค่าพลังงานศักย์สูงอีก 4 อะตอม โดยมี NAD มารับโปรตอนและอิเล็กตรอน เนื่องจากอะตอมของไนโตรเจนมีประจุบวก จึงเขียน NAD^+ โดย 1 โมเลกุลของ NAD^+ รับไฮโดรเจนได้ 2 อะตอม และรับอิเล็กตรอนได้ 2 อะตอม
ดังนี้

$$NAD^+ + 2H^+ + 2e^- \rightarrow NADH + H^+$$

$NADH + H^+$ เป็นสารรีดิวซ์ เพราะได้รับอิเล็กตรอน ถ้าสูญเสียอิเล็กตรอนพร้อมไฮโดรเจน 2 อะตอมจะกลายเป็น NAD^+


Glucose (6C)
2ATP
2ADP
Fructose
Diphosphate
PGAL
PGAL
NAD+
NAD+
H+ + NADH
NADH + H+
2ADP
2ADP
2ATP
2ATP

Pyruvic acid Pyruvic acid

(3C) (3C)

ภาพที่ 1.2 แสดงขั้นตอนการสลายน้ำตาลให้เป็นกรดไพรูวิก

สมการรวบยอดในปฏิกิริยาไกลโคลิซีส

$$C_6H_{12}O_6 + 2\ ADP + 2Pi + 2\ NAD^+ \rightarrow 2\ C_3H_4O_3 + 2ATP + 2NADH + H^+$$

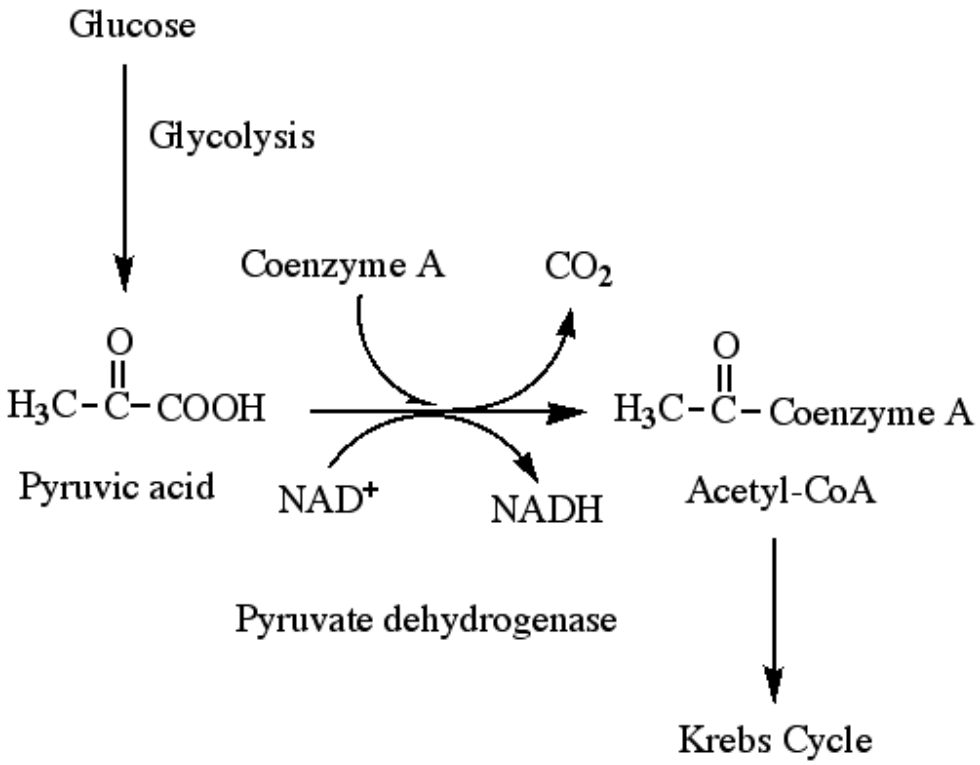
สรุปลักษณะกระบวนการและผลลัพธ์สำคัญของไกลโคลิซีส

1. ไกลโคลิซีสเป็นกระบวนการสลายกลูโคสให้กลายเป็นกรดไพรูวิก (Pyluvic acid: $C_3H_4O_3$) หรือไพรูเวต(Pyluvate) ซึ่งมีคาร์บอน 3 อะตอม 2 โมเลกุล
2. เกิดขึ้นในไซโทพลาสซึมของเซลล์สิ่งมีชีวิตทุกชนิดทุกสภาวะไม่ว่าจะใช้ O_2 หรือไม่ใช้ O_2 หายใจก็ตาม
3. ถ้าเริ่มจากกลูโคส ($C_6H_{12}O_6$) 1 โมเลกุล จะได้ผลลัพธ์ที่สำคัญ คือ
   3.1 ได้กรดไพรูวิก 2 โมเลกุล (2 $C_3H_4O_3$)
   3.2 เกิด ATP จากกระบวนการ 4 ATP ใช้ในการฟอสโฟรีเลชันไป 2 ATP เพราะฉะนั้นจึงได้พลังงานสุทธิ 2 ATP
   3.3 เกิดไฮโดรเจน (H) 4 อะตอม โดยมี NAD^+ มารับ

   $2\ NAD^+ + 4\ H^+ + 2e^- \rightarrow 2\ NADH + H^+$

2. การสร้างอะซิติลโคเอนไซม์ เอ หรือการออกซิเดชันกรดไพรูวิก (Pyruvate oxidation หรือ Pyruvate dehydrogenase complex pathway)

ขั้นตอนนี้เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างไกลโคลิซีสกับวัฏจักรเครบส์ มีกรดไพรูวิกเป็นสารตั้งต้นเกิดขึ้นที่เยื่อชั้นในของไมโทคอนเดรีย โดยกรดไพรูวิกแต่ละโมเลกุลจะทำปฏิกิริยากับโคเอนไซม์ เอ (Co-enzyme A)ได้เป็นอะซิติลโคเอนไซม์ เอ (Acetyl Co A) ซึ่งแต่ละโมเลกุลมีคาร์บอน 2 อะตอม และคาร์บอนไดออกไซด์ 1โมเลกุล และมีการปล่อยไฮโดรเจน 2 อะตอม โดยมี NAD^+ (ตัวนำอิเล็กตรอน) มารับและเปลี่ยนไปเป็น NADH + H^+ แล้วเข้าสู่กระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน



ภาพที่ 1.3 แสดงขั้นตอนกรดไพรูวิกทำปฏิกิริยากับโคเอนไซม์เอได้เป็นแอซีติลโคเอนไซม์เอ

ที่มา : http://www.micro.siu.edu/micr201/images/PyruvateDhase

สมการรวบยอดในปฏิกิริยาขั้นตอนนี้

$$2\ C_3H_4O_3 + 2\ NAD^+ + 2\ \text{Coenzyme A} \rightarrow 2\ C_2H_3O - S - \text{Co A} + 2NADH + H^+ + 2CO_2$$

สรุปลักษณะกระบวนการและผลลัพธ์สำคัญในการสร้างอะซิติลโคเอนไซม์ เอ

1. กรดไพรูวิกแต่ละโมเลกุลจะถูกเปลี่ยนเป็นอะซิติลโคเอนไซม์ เอ โดยกลุ่มของเอนไซม์ Pyruvate dehydrogenase complex
2. ปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไพรูวิกแต่ละโมเลกุล ไปเป็นอะซิติลโคเอนไซม์ เอ นี้ ได้ผลลัพธ์ที่สำคัญ คือ
   1.1 เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุล จากแต่ละปฏิกิริยา กลูโคส 1 โมเลกุล ทำให้ได้กรดไพรูวิก 2 โมเลกุล เพราะฉะนั้นจึงได้ผลลัพธ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์รวมทั้งสิ้น 2 โมเลกุล/ 1 โมเลกุลของกลูโคส

1.2 เกิดไฮโดรเจน 2 อะตอม จากแต่ละปฏิกิริยา ซึ่งรวมกับ NAD^+ กลายเป็น $NADH + H^+$ 1 โมเลกุล เริ่มต้นจากกลูโคส 1 โมเลกุล ได้กรดไพรูวิก 2 โมเลกุล เพราะฉะนั้นจึงได้ไฮโดรเจนทั้งสิ้น 4 อะตอมหรือ $NADH + H^+$ 2 โมเลกุล

3. วัฏจักรเครบส์ (Krebs cycle)

วัฏจักรเครบส์ (Krebs cycle) ตั้งตามชื่อของเซอร์ ฮันส์ เครบส์ (Sir Hans Krebs) นักเคมีชาวอังกฤษเป็นผู้ค้นพบวัฏจักรนี้ในปี ค.ศ. 1934 วัฏจักรนี้ยังมีชื่อเรียกอย่างอื่นอีก เช่น วัฏจักรของกรดซิตริก (Citric acid cycle) หรือวัฏจักรของกรดไทรคาร์บอกซิลิก (Tricarboxylic acid cycle = TCA cycle) ปฏิกิริยาในช่วงนี้มีลักษณะเป็นวัฏจักรเกิดขึ้นบริเวณเมทริกซ์ (Matrix) ของไมโทคอนเดรีย ต้องอาศัยเอนไซม์และโคแฟกเตอร์หลายชนิด ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสารพลังงานสูงให้กับเซลล์จำนวนมาก

เริ่มวัฏจักรเครบส์ดังนี้อะซิติลโคเอนไซม์ เอ 1 โมเลกุล ทำปฏิกิริยากับ H_2O แล้วโคเอนไซม์เอ จะแยกเป็นอิสระ จะเหลือสารที่มีคาร์บอน 2 อะตอม ($C_2H_4O_2$) สารที่มีคาร์บอน 2 อะตอม จะทำปฏิกิริยากับสารที่มีคาร์บอน 4 อะตอม คือกรดออกซาโลอะซิติก (Oxaloacetic acid) ซึ่งมีอยู่แล้วภายในเซลล์ ได้เป็น กรดซิตริก ซึ่งมีคาร์บอน 6 อะตอม

ต่อมากรดซิตริกจะสลายตัวเป็นสารที่มีจำนวนคาร์บอน 5 อะตอมคือกรดแอลฟาคีโตกลูตาริก (α Ketoglultaric acid) โดยให้ CO_2 ออกมา 1 โมเลกุล และให้ไฮโดรเจน ออกมา 2 อะตอม โดยสารที่มารับ H^+ อะตอม คือ NAD^+

$$NAD^+ + 2H^+ + 2e^- \rightarrow NADH + H^+$$

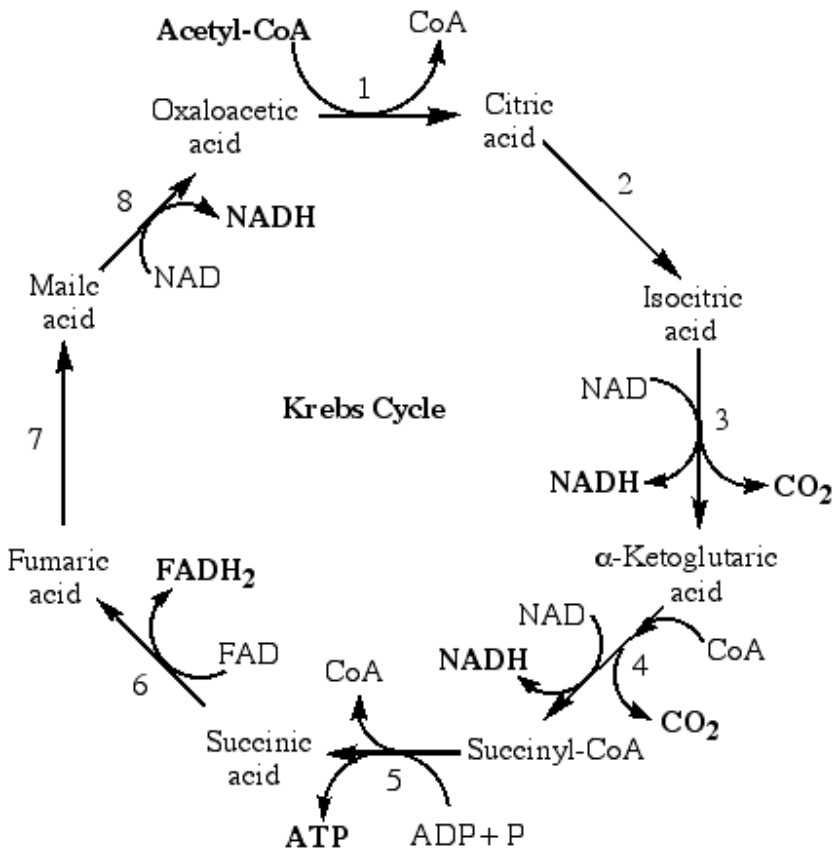
กรดแอลฟาคีโตกลูตาริกทำปฏิกิริยากับน้ำ แล้วสลายตัวให้สารที่มีคาร์บอน 4 อะตอมคือกรดซักซินิก (Succinic acid) โดยให้ CO_2 ออกมา 1 โมเลกุล และให้ไฮโดรเจน ออกมา 2 อะตอม โดยมี NAD^+ มารับ กลายเป็น $NADH + H^+$ มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาสร้าง GTP ได้ 1 โมเลกุล (เทียบเท่ากับ ATP 1 โมเลกุล)

กรดซักซินิก จะเปลี่ยนเป็นกรดฟูมาริก(Fumaric) ให้ไฮโดรเจน ออกมา 2 อะตอม โดยมี FAD มารับ กลายเป็น $FADH_2$

$$FAD + 2H^+ + 2e^- \rightarrow FADH_2$$

กรดฟูมาริกทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้สารที่มีคาร์บอน 4 อะตอม คือ กรดมาลิก(Malic acid)

กรดมาลิกจะเปลี่ยนเป็นกรดออกซาโลอะซิติกโดยปล่อยไฮโดรเจน ออกมา 2 อะตอม และมี NAD^+ มารับ กลายเป็น $NADH + H^+$ ดังวัฏจักรต่อไปนี้



ภาพที่ 1.4 วัฏจักรเครบส์ หรือวัฏจักรของกรดซิตริกแสดงขั้นตอนการเกิดสารต่าง ๆ

ที่มา : http://www.micro.siu.edu/micr201/images/PyruvateDhase

สมการรวบยอดในของวัฏจักรเครบส์

$$2CH_3COSCoA + 6\ NAD^+ + 2FAD + 2GDP + 2Pi + 6H_2O \rightarrow 4\ CO_2 + 6NADH + 6H^+ + 2FADH_2 + 2GTP + 2CoASH$$

สรุปลักษณะกระบวนการและผลลัพธ์สำคัญของวัฏจักรเครบส์

1. เกิดขึ้นที่ของเหลว (Matrix) ในไมโทคอนเดรีย
2. ผลลัพธ์ที่สำคัญของปฏิกิริยามีดังนี้ (เริ่มต้นจากกลูโคส 1โมเลกุลหรืออะซิติลโค เอ 2 โมเลกุล)

   2.1 เกิดพลังงานอิสระเก็บไว้ในรูปของGTP (Guanosine triphosphate) 2 โมเลกุล เมื่อถูก

ไฮโดรลิซีสแล้วจะให้พลังงานออกมาเท่ากับ 1 ATP จึงอาจถือว่าให้พลังงานเท่ากับ 2 ATP ได้

2.2 เกิดไฮโดรเจน 16 อะตอม

โดย H 12 อะตอม มี NAD^+ มารับกลายเป็น 6 $(NADH + H^+)$

และ H 4 อะตอม มี FAD มารับกลายเป็น 2 $FADH_2$

โมเลกุล $NADH + H^+$ และ $FADH_2$ ที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน เพื่อออกซิเดชันให้ได้ ATP ต่อไป

2.3 เกิด CO_2 ทั้งสิ้น 4 โมเลกุล

ตารางที่ 1. 1 สรุปผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในแต่ละขั้นตอน ต่อ Glucose 1 โมเลกุลของเซลล์ตับ

ขั้นตอน / ผลิตภัณฑ์	CO_2	ATP	NADH	$FADH_2$
Glycolysis	0	2	2	0
Acetyl Co A synthesis	2	0	2	0
Krebs cycle	4	2	6	2
สรุปรวมผลิตภัณฑ์ทั้งหมด	**6**	**4**	**10**	**2**

4. การถ่ายทอดอิเล็กตรอน (Electron transport system หรือ ETS)

การถ่ายทอดอิเล็กตรอน หรือลูกโซ่การหายใจเกิดขึ้นที่เยื่อชั้นในของไมโทคอนเดรียหรือคริสตี (Cristae) จะเกิดควบคู่กันไปทุกขั้นตอน คือถ้ามีไฮโดรเจนเกิดขึ้นในทุกกระบวนการไฮโดรเจนจะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนทันที ในการสังเคราะห์ ATP อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากโมเลกุลของสารอาหารจะมีสารมารับอิเล็กตรอน เรียกว่า ตัวนำอิเล็กตรอน (Electron carrier) แล้วถ่ายทอดไปยังตัวนำอิเล็กตรอนตัวอื่นขณะที่มีการถ่ายทอดอิเล็กตรอน จะมีพลังงานปล่อยออกมาจากอิเล็กตรอน พลังงานเหล่านั้นนำไปสังเคราะห์ ATP กระบวนการนี้จึงเกี่ยวข้องกับสาร 2 ประเภท คือ

1. สารที่เป็นตัวนำอิเล็กตรอน
2. สารที่เป็นตัวรับพลังงานจากการถ่ายทอดอิเล็กตรอน

สารที่เป็นตัวนำอิเล็กตรอน

ในการสลายโมเลกุลของสารอาหาร อิเล็กตรอนจะหลุดออกมาจากโมเลกุลของสารอาหาร

พร้อมด้วยโปรตอนในรูปอะตอมของไฮโดรเจน ตัวนำอิเล็กตรอนบางชนิดสามารถรับอิเล็กตรอนพร้อมด้วยโปรตอน แต่ตัวนำอิเล็กตรอนบางชนิดรับเฉพาะอิเล็กตรอน ไม่ว่าจะเป็นการรับในรูปของอะตอมไฮโดรเจนหรือรับเฉพาะอิเล็กตรอนก็ตาม การรับอิเล็กตรอนทำให้ตัวอิเล็กตรอนถูกรีดิวซ์ เช่น สารที่เป็นตัวนำอิเล็กตรอน คือ นิโคตินาไมด์ อะดีนีน ไดนิวคลีโอไทด์ (NAD^+)สามารถรับได้ทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอน ดังสมการ

$$NAD^+ + 2H^+ + 2e^- \rightarrow NADH + H^+$$

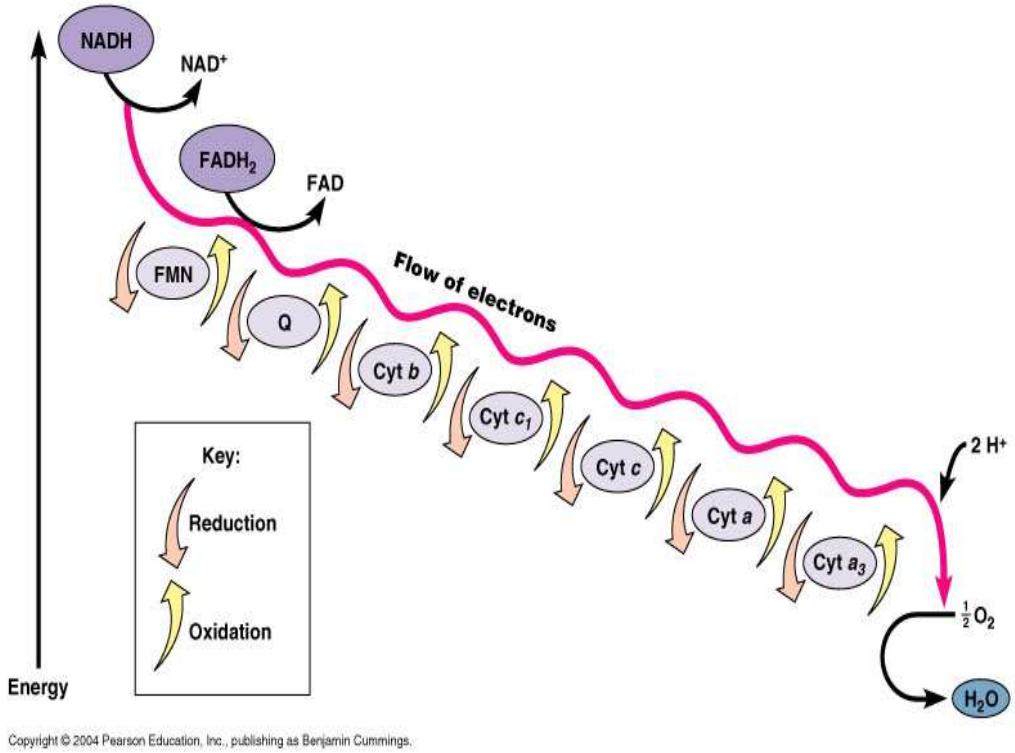
ฟลาวิน อะดีนีน ไดนิวคลีโอไทด์ (FAD) รับได้ทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอน ดังสมการ

$$FAD + 2H^+ + 2e^- \rightarrow FADH_2$$

ระบบไซโตโครม (Cytochrome) ทั้งหมด รับได้เฉพาะอิเล็กตรอน โดยเฉพาะออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายแล้วเกิดเป็นน้ำขึ้น

$$2H^+ + 2e^- + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2O$$

ตัวกลางรับและถ่ายทอดอิเล็กตรอนในกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน เรียงตามลำดับ คือ $NAD^+ \rightarrow$ FAD $\rightarrow$ Cytochrome b $\rightarrow$ Cytochrome c $\rightarrow$ Cytochrome a $\rightarrow$ O_2



าพที่ 1.5 แสดงขั้นตอนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน หรือลูกโซ่การหายใจ

ที่มา : http://www.classes.midlandstech.edu/carterp/Courses/bio2

สารที่เป็นตัวรับพลังงานจากการถ่ายทอดอิเล็กตรอน

สารที่เป็นตัวรับพลังงานจากการถ่ายทอดอิเล็กตรอน คือ ADP +Pi $\rightarrow$ATP

ระบบการถ่ายทอดอิเล็กตรอน (Electron transport system : ETS) หรือลูกโซ่การหายใจ (Respiration chain) NADH + H^+ และ $FADH_2$ ในสภาพรีดิวซ์ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนและไฮโดรเจนจากการสลายกลูโคส ตั้งแต่ขั้นไกลโคลิซีสถึงวัฏจักรเครบส์ NADH + H^+ และ $FADH_2$ จะถ่ายทอดอิเล็กตรอนของไฮโดรเจนไปยังตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่นๆ คือโคเอนไซม์ Q (Co.Q) ไซโตโครม b ไซโตโครม c ไซโตโครม a - a_3 และแก๊สออกซิเจนตามลำดับ ในขณะที่มีการถ่ายทอดอิเล็กตรอนจะมีการปล่อยพลังงานออกมาด้วย ซึ่งพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาถ้าหากเกิน 7.3 กิโลแคลอรี/โมล ก็สามารถสังเคราะห์ ATP จาก ADP และ Pi ได้ จากการศึกษาพบว่าการถ่ายทอดอิเล็กตรอนจาก NADH + H^+ $\rightarrow$ $FADH_2$ จะมีพลังงานออกมา 12.2 กิโลแคลอรี/โมล จึงสร้าง ATP ได้ เช่นเดียวกันการถ่ายทอดอิเล็กตรอนจาก Cytochrome b $\rightarrow$ Cytochrome c มีการปลดปล่อยพลังงานออกมา 9.9 กิโลแคลอรี/โมล และจาก Cytochrome a $\rightarrow$ Cytochrome a_3 ไปยังแก๊สออกซิเจนมีปล่อยพลังงานออกมาถึง 23.8 กิโลแคลอรี/โมล ดังนั้นจึงสามารถสังเคราะห์ ATP จาก ADP และ Pi ได้เช่นกัน พลังงานที่เหลือจากการสังเคราะห์ ATP ก็จะปลดปล่อยออกมาในรูปของพลังงานความร้อน ทำให้ร่างกายอบอุ่นอยู่ตลอดเวลา

การถ่ายทอดอิเล็กตรอนเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน กล่าวคือมีทั้งการให้และการรับอิเล็กตรอนเกิดขึ้น

ถ้าNAD$^+$ เป็นสารตัวแรกที่มารับอิเล็กตรอน เมื่อการถ่ายทอดอิเล็กตรอนสิ้นสุดลงจะสังเคราะห์ ATP ได้ 3 โมเลกุล

ถ้า FAD เป็นสารตัวแรกที่มารับอิเล็กตรอน เมื่อการถ่ายทอดอิเล็กตรอนสิ้นสุดลงจะสังเคราะห์ ATP ได้ 2 โมเลกุล

สมการรวบยอดในการถ่ายทอดอิเล็กตรอน

$$24\ H\ +\ 6\ O_2\ +\ 34\ ADP + 34Pi\ \rightarrow\ 12\ H_2O\ +\ 34\ \ ATP$$

สรุปลักษณะกระบวนการและผลลัพธ์สำคัญของระบบการถ่ายทอดอิเล็กตรอน

1. เกิดขึ้นที่เยื่อหุ้มชั้นในของไมโทคอนเดรียหรือคริสตี โดยเกิดควบคู่กับปฏิกิริยา 3 ขั้นตอนแรก

2. O_2 จะเป็นตัวรับโปรตอนและอิเล็กตรอนเกิดเป็นน้ำ ทั้งสิ้น 12 โมเลกุล/1โมเลกุลของกลูโคส

3. การถ่ายทอดอิเล็กตรอนของตัวนำอิเล็กตรอนไปตามลำดับ ดังนี้

$NADH + H^+ \rightarrow FADH_2 \rightarrow$ Cytochrome b $\rightarrow$ Cytochrome c $\rightarrow$ Cytochrome a $\rightarrow$ Cytochrome $a_3 \rightarrow O_2$

4. ขั้นตอนที่มีพลังงานสูงในการสร้าง ATP คือ

4.1 $NADH + H^+ \rightarrow FADH_2$

4.2 Cytochrome b $\rightarrow$ Cytochrome c

4.3 Cytochrome $a_3 \rightarrow$ แก๊สออกซิเจน

5. จากปฏิกิริยาในขั้นตอนต่าง ๆ จะได้อะตอมของไฮโดรเจนที่ผ่านเข้ามาในกระบวนการถ่านทอดอิเล็กตรอน รวมทั้งสิ้น 24 อะตอม

5.1 จากไกลโคลิซีส 4 อะตอม

5.2 จากการสร้างอะซิทิลโคเอนไซม์ เอ 4 อะตอม

5.3 จากวัฏจักรเครบส์ 16 อะตอม (จาก 6 $NADH_2$ และ 2 $FAD H_2$)

6. $NADH + H^+$ เมื่อผ่านกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนจะได้พลังงาน = 3 ATP

$FADH_2$ เมื่อผ่านกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนจะได้พลังงาน = 2 ATP

7. เป็นขั้นตอนที่มีพลังงานเกิดขึ้นมากที่สุดในเซลล์

7.1 จากไกลโคลิซีส $2\ NADH + H^+ = 2 \times 3 =$ **6 ATP**

7.2 จากการสร้างอะซิทิลโคเอนไซม์ เอ $2\ NADH + H^+ = 2 \times 3 =$ **6 ATP**

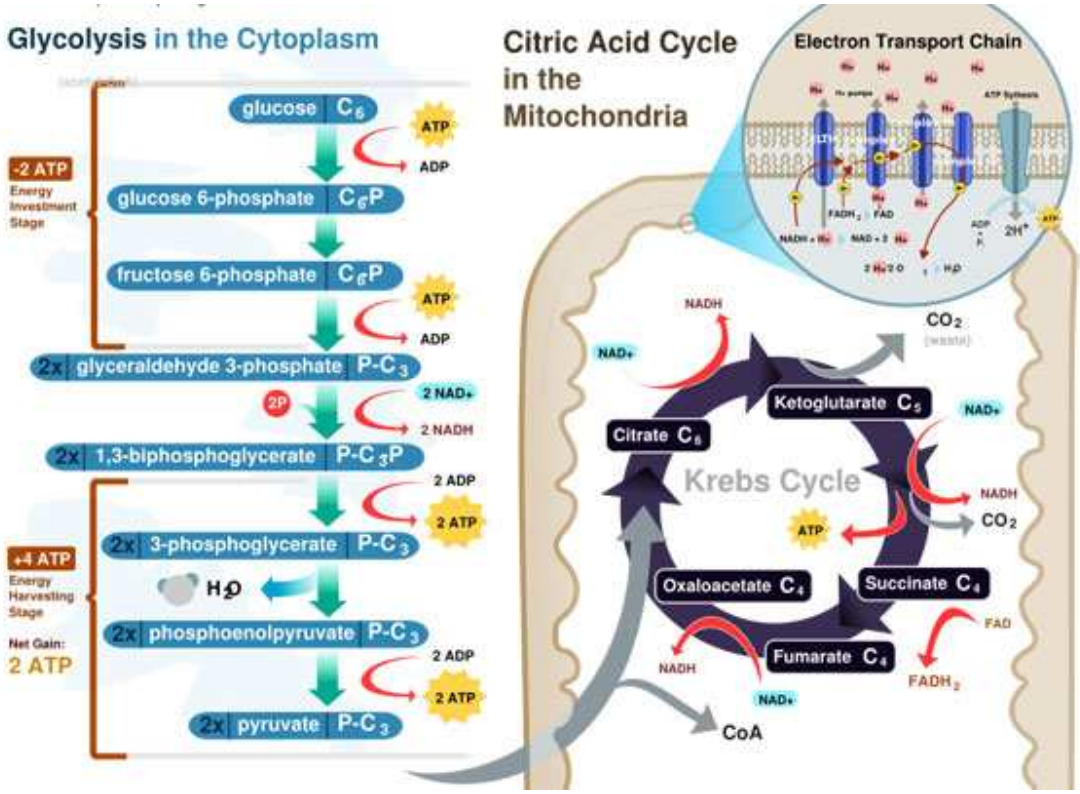
7.3 จากวัฏจักรเครบส์ $6\ NADH + H^+ = 6 \times 3 =$ **18 ATP**

$2\ FAD H_2 = 2 \times 2 =$ **4 ATP**

รวมทั้งสิ้น = **34 ATP**

รวมสมการการหายใจ (สลาย 1 กลูโคส) แบบใช้ออกซิเจน

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 36 - 38\ ADP + 36 - 38\ Pi \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 36 - 38 ATP$$



ภาพที่ 1.6 แผนภาพสรุปการสลายสารอาหารแบบใช้ออกซิเจนทั้ง 4 ขั้นตอน

ที่มา : http://www.

การหายใจทั้ง 4 ขั้นตอน เกิดขึ้นที่บริเวณต่าง ๆ ดังนี้

1. ไกลโคลิซีส เกิดที่ไซโทพลาสซึมของเซลล์
2. การสร้างอะซิทิลโคเอนไซม์ เอ เกิดที่ของเหลวในไมโทคอนเดรีย
3. วัฏจักรเครบส์ เกิดที่เมทริกซ์ของไมโทคอนเดรีย
4. การถ่ายทอดอิเล็กตรอน เกิดที่เยื่อหุ้มชั้นในของไมโทคอนเดรีย(คริสตี)

การสลายไขมันและโปรตีน

การสลายไขมัน ไขมัน(Fat)เป็นสารอาหารชนิดหนึ่งซึ่งสามารถให้พลังงานได้ ไขมันเมื่อรวมตัวกับน้ำดีแล้วจะถูกย่อยโดยเอนไซม์ลิเพสพร้อมด้วยไฮโดรไลซีสได้เป็นสารที่โมเลกุลเล็กลงคือ กรดไขมัน(Fatty acid) และกลีเซอรอล (Glycerol) สารทั้งสองนี้จะมีการสลายตัวต่อไปอีก และเข้าสู่กระบวนการกลูโคสออกซิเดชันคนละทางกัน

กลีเซอรอลเป็นสารประกอบประเภทแอลกอฮอล์ จะถูกเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารตัวกลางในกระบวนการไกลโคลิซีส กลายเป็นสารฟอสโฟกลีเซอรอลดีไฮด์ (Phosphoglyceraldehyde หรือ PGAL) ซึ่งต้องใช้ ATP 1 โมเลกุล และปล่อยไฮโดรเจนออกมา 2 อะตอม โดยมี NAD^+ เป็นตัวมารับดังสมการ

$$NAD^+ \rightarrow NADH + H^+$$

$$\text{Glycerol} \longrightarrow \text{Phosphoglyceraldehyde (PGAL)}$$

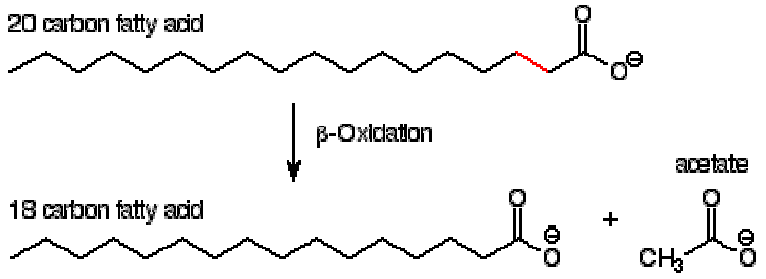
$$ATP \rightarrow ADP$$

PGAL ที่เกิดขึ้นจะถูกสลายเป็นกรดไพรูวิก ผ่านเข้าสู่วัฏจักรเครบส์ต่อไป ส่วน NADH + H^+ จะนำอะตอมของไฮโดรเจนเข้าสู่กระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน จนกระทั่งเกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ได้ CO_2 และ H_2O

สำหรับกรดไขมัน เพื่อให้ได้พลังงานนั้น กรดไขมันที่อยู่ในไซโทพลาสซึมจะต้องถูกนำเข้าไปในไมโทคอนเดรียก่อน โดยกรดไขมันทำปฏิกิริยากับ ATP และ Coenzyme A แล้วเปลี่ยนเป็น Fatty acid Co.A และ Fatty acid Co.A ถูกสลายโดยกระบวนการบีตา – ออกซิเดชัน ต่อไป

Triglycerides ----> Glycerol + Fatty Acids:

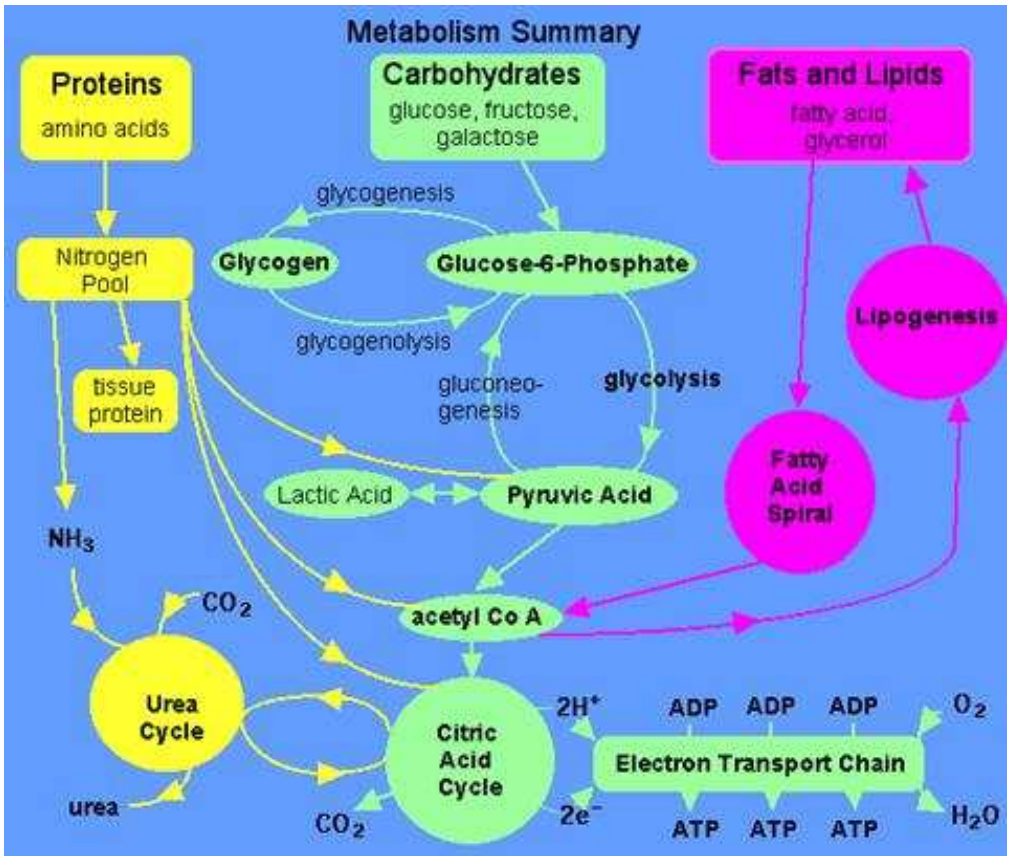
- Glycerol ----> Glyceraldehyde ----> Pyruvic acid ----> Acetyl CoA ----> Kreb's cycle
- Fatty Acids are converted into molecules of Acetyl CoA in a process called BETA OXIDATION.



การสลายโปรตีน โปรตีนที่นำเข้าสู่ร่างกายในรูปของอาหารจะถูกย่อยภายในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็กให้เป็นกรดอะมิโนประมาณ 20 ชนิดก่อน กรดอะมิโนเหล่านี้เมื่ออยู่ในเซลล์ประมาณ ¾ จะถูกนำไปใช้ในการสลายเพื่อให้ได้พลังงาน

กรดอะมิโน อาจถูกเปลี่ยนได้หลายแนวทางด้วยกันตามชนิดของกรดอะมิโน เช่นบางชนิดเปลี่ยนเป็นกรดไพรูวิก บางชนิดเปลี่ยนเป็นอะซิทิลโคเอนไซม์ เอ บางชนิดเปลี่ยนเป็นสารตัวใดตัวหนึ่งในวัฏจักรเครบส์ แต่พบว่าทุกครั้งก่อนที่กรดอะมิโนจะเปลี่ยนเป็นสารประกอบตัวใดก็ตาม ที่กล่าวมาจะต้องมีการตัดหมู่อะมิโน ($-NH_2$) ออกจากโมเลกุลของกรดอะมิโน หมู่อะมิโนที่หลุดออกมานี้จะเปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย (NH_3)จากนั้นตับจะเปลี่ยนให้เป็นยูเรียขับออกทางปัสสาวะ

จะเห็นได้ว่าทั้งการสลายกลูโคส กรดไขมัน และกรดอะมิโนจะให้สารซึ่งเข้าสู่กระบวน การหายใจระดับเซลล์ในขั้นตอนต่าง ๆ ได้ ก็จะมีผลในการสร้างพลังงานให้แก่เซลล์และสิ่งมีชีวิต ดังนั้นคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีนจึงเป็นสารอาหารที่เป็นแหล่งพลังงานของเซลล์ร่างกายสิ่งมีชีวิตทุกชนิด



ภาพที่ 1.6 แผนภาพสรุปการสลายโมเลกุลสารอาหารคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน

ที่มา : www.elmhurst.edu/.../images/590metabolism.gif

.....