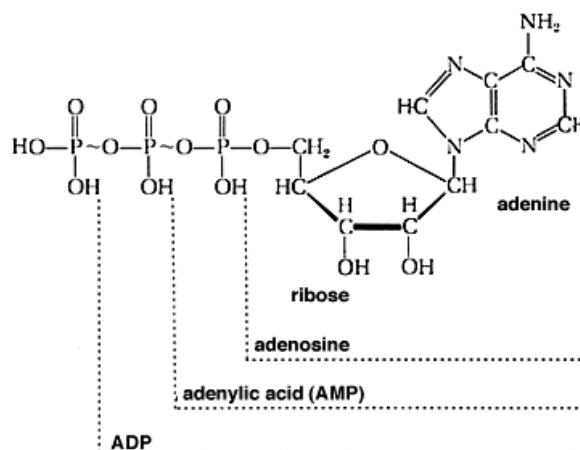


การสลายสารอาหารระดับเซลล์

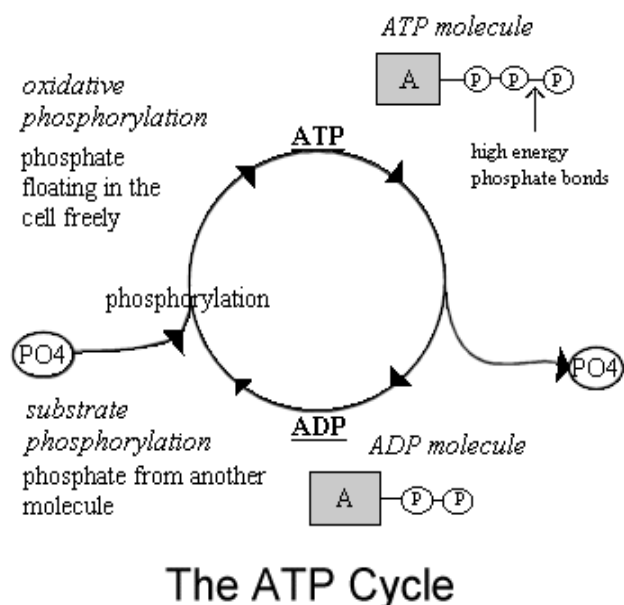
การสลายสารอาหารระดับเซลล์ หรือ การหายใจระดับเซลล์ (cellular respiration) เป็นการผลิตพลังงานจากสารอาหารที่เซลล์ได้รับ พลังงานที่ได้จะสะสมอยู่ใน รูปของพลังงานพันธะ เมื่อเซลล์ต้องการใช้พลังงาน ก็จะสลายพันธะเพื่อปลดปล่อยพลังงานออกมา ใช้ในกิจกรรมต่างๆ ของเซลล์ เช่น การนำสารบางชนิดเข้าสู่เซลล์ การเคลื่อนที่ เป็นต้น

1. สารให้พลังงานในกระบวนการหายใจระดับเซลล์

สารอินทรีย์ที่สามารถสร้างพันธะเพื่อสะสมพลังงานได้มีหลายชนิด แต่สารอินทรีย์ที่สำคัญมากที่สุดที่ใช้ในการสะสมพลังงานในสิ่งมีชีวิตคือ ATP (Adenosine triphosphate) ชื่อของสารอินทรีย์บอกให้เราทราบว่าสารนี้ประกอบด้วย เบสอะดีนีน (adenine) น้ำตาลไรโบส (ribose) และหมู่ฟอสเฟต 3 หมู่ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของ ATP



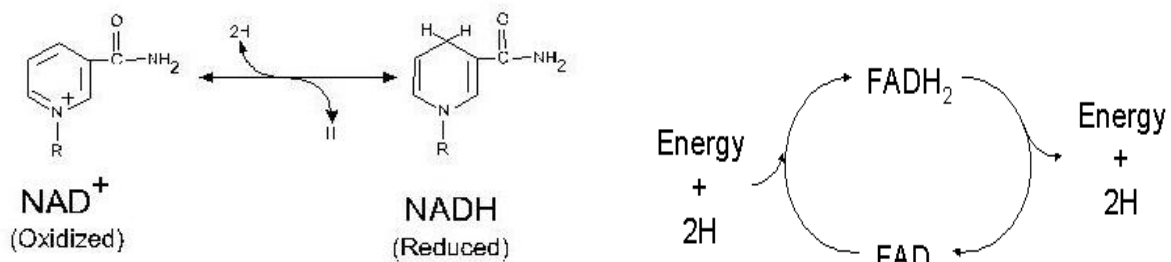
รูปที่ 2 วัฏจักรของ ATP

การเปลี่ยน ATP เป็น ADP จะมีการสลายพันธะระหว่างหมู่ฟอสเฟตจะ สูญเสียฟอสเฟตไป 1 หมู่ สารที่ได้รับฟอสเฟตก็จะมีพลังงานสูงขึ้น เรียกกระบวนการที่สารรวมกับกลุ่มฟอสเฟตว่า **ฟอสโพลีเลชัน (phosphorylation)** การปลดปล่อยพลังงานที่สะสมอยู่ในพันธะออกมา โดย ATP ถูกไฮโดรไลต์ไปเป็น ADP (Adenosine diphosphate) และ ADP ถูกไฮโดรไลต์ไปเป็น AMP (Adenosine monophosphate) จะ ได้พลังงานอิสระอย่างละ 7.3 กิโลแคลอรี/โมล ในทางกลับกันการสร้าง ADP จาก AMP และ ATP จาก ADP

ต้องใช้พลังงาน 7.3 กิโลแคลอรี/โมล เช่นกัน แต่ถ้า AMP ถูกเปลี่ยนไปเป็น Adenosine จะได้พลังงานอิสระเพียง 3.4 กิโลแคลอรี/โมล ดังรูปที่ 2

เนื่องจาก ATP มีความสำคัญมากในการสร้างพลังงานภายในเซลล์ เซลล์จึงต้องสร้าง ATP ขึ้นมาใหม่ตลอดเวลา ถ้าเราให้ร่างกายของคนเราประกอบด้วยเซลล์ประมาณ 20-30 ล้านล้านเซลล์ แต่ละเซลล์ จะต้องสลาย ATP ประมาณ 1-2 พันล้านโมเลกุล ให้เป็น ADP ทุกๆ นาที หรือเทียบเท่ากับน้ำหนัก ถึงประมาณ 40 กิโลกรัมต่อวัน! เพื่อให้เราสามารถดำรงชีวิตได้อย่างปกติสุข ดังนั้นเซลล์จะต้องสร้าง ATP ขึ้นมาใหม่ ADP ที่เป็นผลจากการสลาย ATP จึงจะสามารถสร้าง ATP ได้พร้อมกับความต้องการ

นอกจากนี้ยังมีสารอินทรีย์อีกพวกหนึ่ง สามารถเก็บสะสมพลังงานจากสารอาหารในรูปของอิเล็กตรอน ซึ่งจะสามารถปล่อยพลังงานที่สะสมไว้ออกมา เมื่อมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนไปยังตัวรับอิเล็กตรอนอื่น ๆ พลังงานเหล่านี้จะถูกนำไปใช้สังเคราะห์ ATP เพื่อสะสมพลังงานไว้ใช้ต่อไป สารเหล่านี้ได้แก่ NAD^+ (nicotinamide adenine dinucleotide) และ FAD (flavin adenine dinucleotide) ในการรับอิเล็กตรอนของ NAD^+ และ FAD นั้นมักมีการรับโปรตอน (H^+) มาด้วย ทำให้โมเลกุลของสารทั้งสองตัวที่รับอิเล็กตรอนมาแล้วอยู่ในรูปของ NADH (ดูรูปที่ 3) และ FADH_2 ตามลำดับ

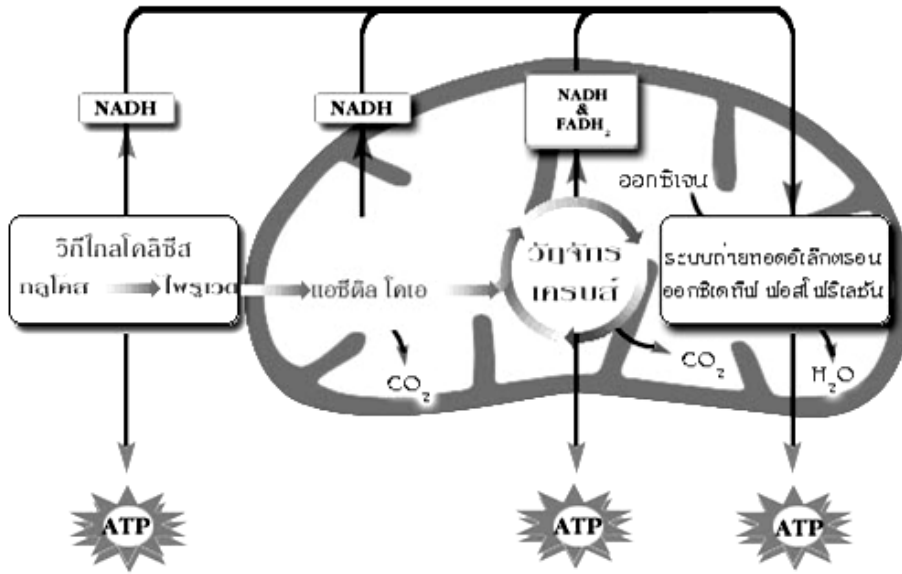


รูปที่ 3 วัฏจักรการสร้าง NADH จาก NAD^+ และ FADH_2 จาก FAD

2. ปฏิกริยาการหายใจระดับเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

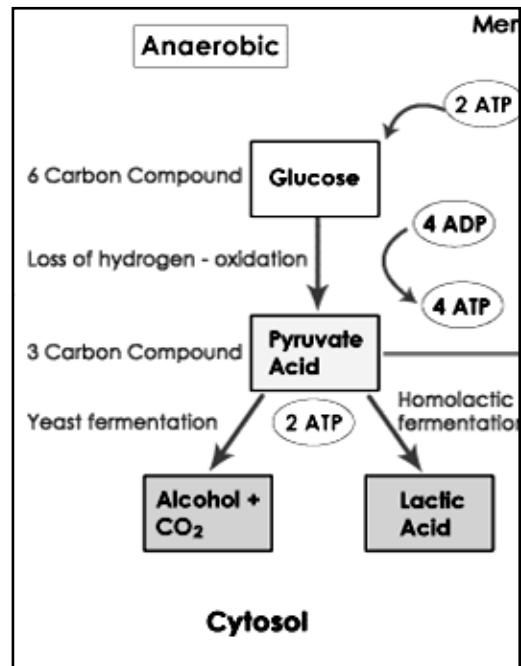
ปฏิกริยาการหายใจภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต มี 2 แบบ คือ การหายใจแบบใช้ออกซิเจน (aerobic respiration) และ การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration)

2.1 การหายใจแบบใช้ออกซิเจน เป็นการสลายสารอาหารได้อย่างสมบูรณ์ ประกอบด้วยขั้นตอน 4 ขั้นตอน คือ ไกลโคลิซิส (glycolysis) การสร้างอะซิติลโคเอนไซม์ เอ (Acetyl Coenzyme A) วัฏจักรเครบส์ (Krebs cycle) และการถ่ายเทอิเล็กตรอน (electron transport system) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการหายใจแบบใช้ออกซิเจน ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน

2.2 การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นการลายสารโมเลกุลอาหารอย่างไม่สมบูรณ์ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ไกลโคไลซิส และการหมัก (fermentation) ดังรูปที่ 5



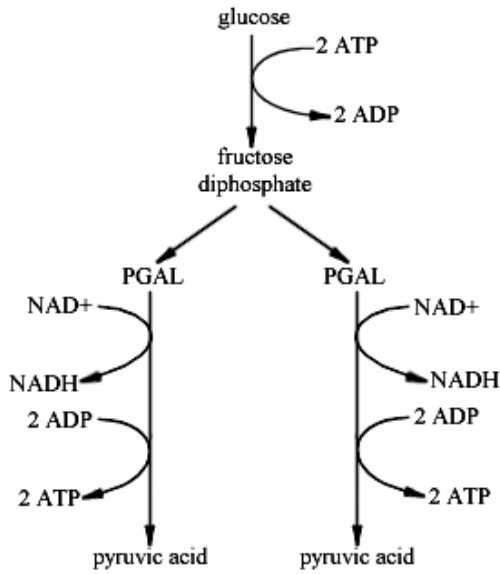
รูปที่ 5 ขั้นตอนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน

3. การสลายสารโมเลกุลของอาหารแบบใช้ออกซิเจน

3.1 ไกลโคไลซิส (glycolysis)

กระบวนการสลายกลูโคส 1 โมเลกุล ได้ กรดไพรูวิก 2 โมเลกุล เกิดที่บริเวณไซโทซอลมีหลายขั้นตอนโดยในแต่ละขั้นตอนจะมีเอนไซม์ต่างๆ มาเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ ได้ดังนี้

Glycolysis



รูปที่ 6 กระบวนการไกลโคลิซิส

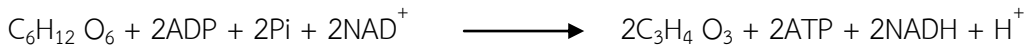
ขั้นตอนที่หนึ่ง เดิมพลังงาน ATP 2 โมเลกุล ให้กับน้ำตาลกลูโคส เพื่อเปลี่ยนไปเป็น ฟรักโทสไดฟอสเฟส (fructose diphosphate)

ขั้นตอนที่สอง เปลี่ยนฟรักโทสไดฟอสเฟสที่มี 6 คาร์บอน ให้เป็น น้ำตาลที่มีคาร์บอน 3 อะตอม หรือที่เรียกว่าไตรโอสฟอสเฟต (triose phosphate) จำนวน 2 ตัว ในที่นี้คือ ฟอสโฟกลีเซอรอลดีไฮด์ (phosphoglyceraldehyde) หรือ PGAL

ขั้นตอนที่สาม เป็นการออกซิเดชันของไตรโอสฟอสเฟตให้เป็น กรดไพรูวิก และได้พลังงาน 4 ATP ดังรูปที่ 6

สรุปผลการสลายกลูโคส (C₆H₁₂ O₆) ในกระบวนการไกลโคลิซิส

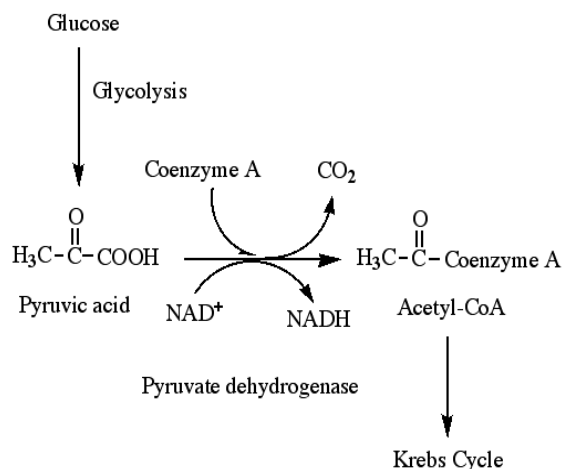
1. ได้กรดไพรูวิก (C₃H₄ O₃) 2 โมเลกุล
2. ใช้พลังงานรวมในกระบวนการ 2 ATP และได้พลังงานจากกระบวนการ 4 ATP
3. เกิดไฮโดรเจน (H) 4 อะตอม
4. สามารถสรุปกระบวนการไกลโคลิซิสได้ดังนี้



3.2 การสร้างอะซิติลโคเอนไซม์ เอ (Acetyl Coenzyme A)

A)

ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นบริเวณเมทริกซ์ซึ่งเป็นของเหลวในไมโทคอนเดรีย โดยกรดไพรูวิกจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก ซึ่งเป็นสารที่มีคาร์บอน 2 อะตอม (2C) ในการเปลี่ยนนี้จะปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และไฮโดรเจน (H) ออกมาด้วย จากนั้น กรดอะซิติกจะรวมตัวกับโคเอนไซม์เอ ซึ่งมีอยู่แล้วในเซลล์ ก็จะเปลี่ยนเป็นอะซิติลโคเอนไซม์ เอ เรียกย่อๆ ว่า “อะซิติลโคเอ” ในขั้นตอนนี้จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น 2 โมเลกุล และไฮโดรเจน 4 อะตอม



รูปที่ 7 ขั้นตอนการสร้างอะซิติลโคเอนไซม์ เอ

3.3 วัฏจักรเครบส์ (Krebs cycle)

การสลายสารแอซิติลโคเอนไซม์ เอ ให้ได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเก็บพลังงานไว้ในรูปของ NADH FADH และ ATP เกิดขึ้นบริเวณเมทริกซ์ซึ่งเป็นของเหลวในไมโทคอนเดรีย มีขั้นตอนโดยละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คาร์บอน 2 อะตอมของแอซิติลโคเอ เข้ามาในวัฏจักรโดยเกิดการรวมของหมู่แอซิติลกับ ออกซาโล- ออกซีเทตโดยใช้เอนไซม์ซีเทรตซินเทส เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลผลิตเป็น ซีเทรต และ CoA

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นแรกเป็นปฏิกิริยาเอาน้ำออกจากซีเทรต 1 โมเลกุล ได้เป็น ซิสอะโคนิเทตก่อนจากนั้น ซิสอะโคนิเทตจึงรวมตัวกับน้ำ 1 โมเลกุล เกิดเป็นไอโซซีเทรต

ขั้นตอนที่ 3 ไอโซซีเทรตจะถูกออกซิไดซ์เป็นแอลฟา-คีโตกลูตาเรต และให้ CO_2 โดยใช้เอนไซม์ไอโซซีเทรต ดีไฮโดรจีเนสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและมี NAD^+ มารับกลายเป็น NADH

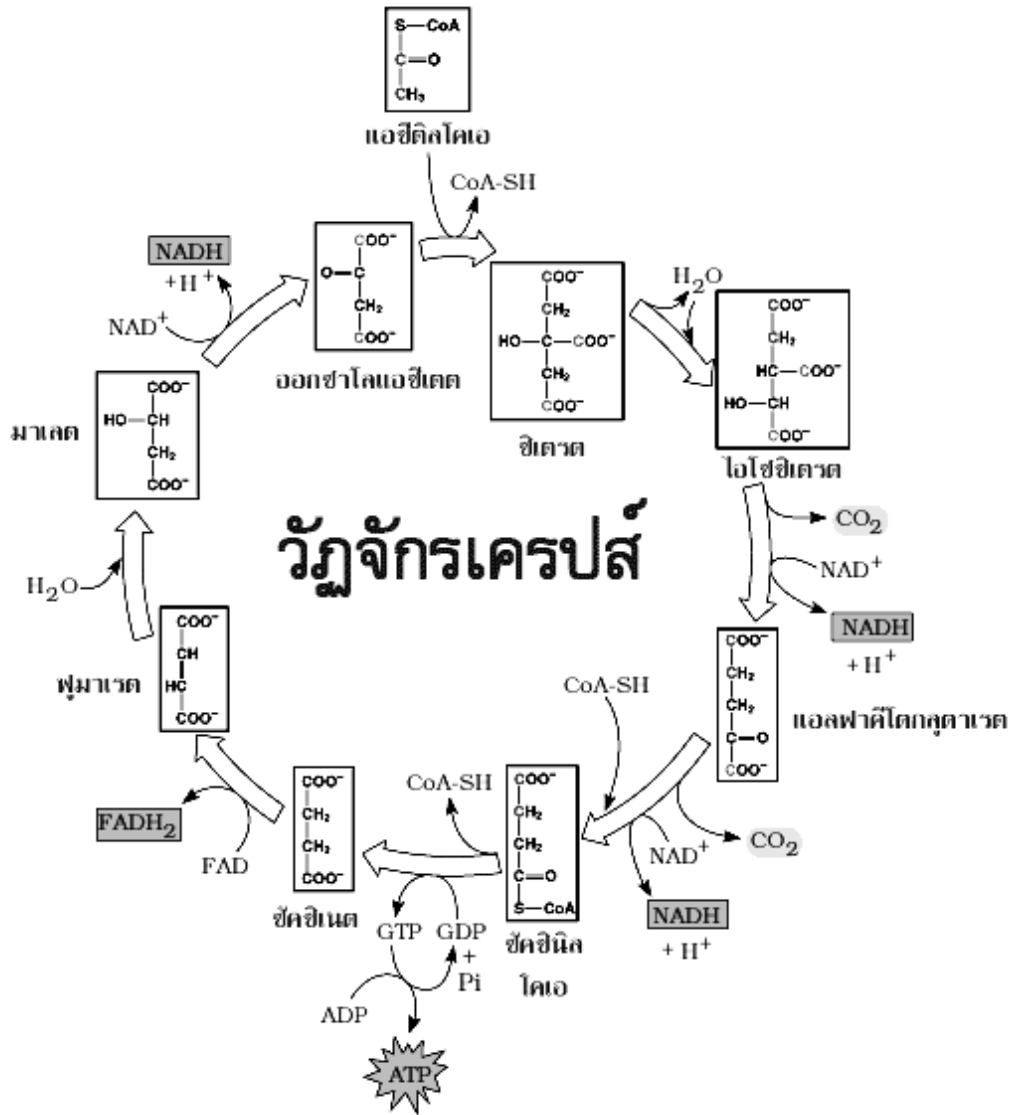
ขั้นตอนที่ 4 แอลฟา-คีโตกลูตาเรตถูกออกซิไดซ์ ปล่อยหมู่ CO_2 ออกมาและโคเอนไซม์ เอเข้าไปแทนตำแหน่ง CO_2 ได้เป็นซักซินิล โคเอ โดยมีเอนไซม์แอลฟา-คีโตกลูตาเรต ดีไฮโดรจีเนสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้มี NAD^+ มารับกลายเป็น NADH

ขั้นตอนที่ 5 หมู่ CoA ของซักซินิล โคเอจะถูกแทนที่โดยหมู่ฟอสเฟต และเปลี่ยนเป็นซักซินเนต โดยมีเอนไซม์ ซักซินิล โคเอ ซินเทส มาเร่งปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 6 เอนไซม์ ซักซินเนต ดีไฮโดรจีเนส จะทำปฏิกิริยากับ ซักซินเนตเปลี่ยนไปเป็น ฟูมาเรตใจ ปฏิกิริยานี้จะสูญเสียไฮโดรเจนแก่ FAD เกิดเป็น FADH_2

ขั้นตอนที่ 7 มีการเติมน้ำ 1 โมเลกุล แก่ฟูมาเรตเปลี่ยนเป็นมาเลต โดยมีเอนไซม์ฟูมาเรสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 8 มาเลตจะถูกออกซิไดซ์ให้เป็น ออกซาโลแอซิติต ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่จะไปรวมกับแอซิติลโคเอ ตัวใหม่ เพื่อเข้ารอบใหม่ของวัฏจักรเครบส์ต่อไป และมีการออกซิเดชันและมีการออกซิเดชัน NAD^+ จะถูกรีดิวซ์ให้เป็น NADH ปฏิกิริยานี้จะมีเอนไซม์มาเลต ดีไฮโดรจีเนสมาช่วยเร่งปฏิกิริยา



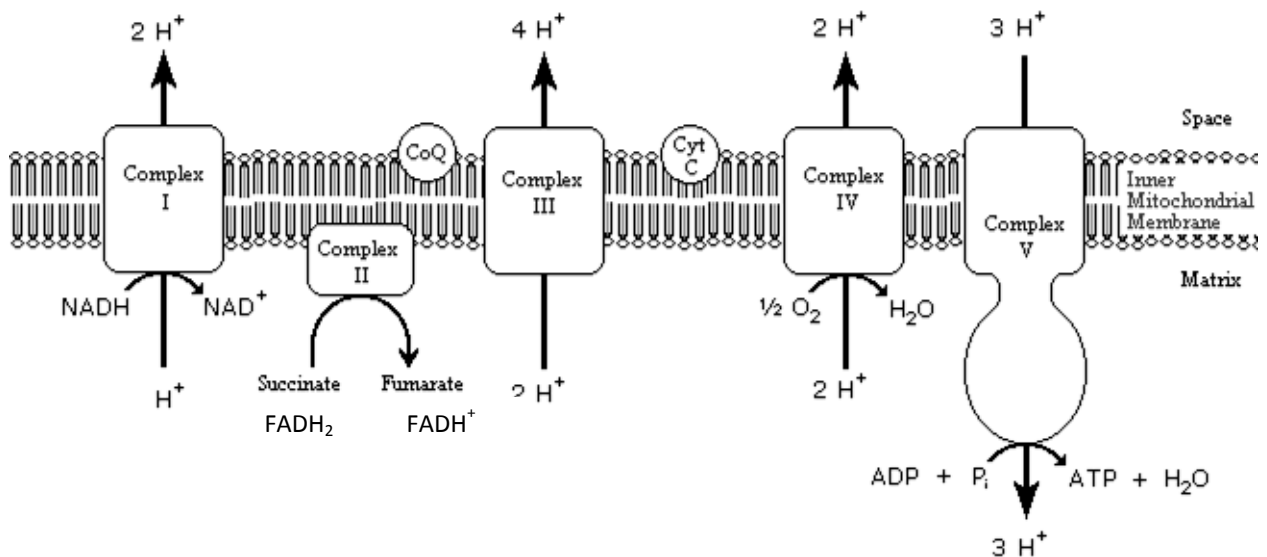
รูปที่ 8 ขั้นตอนการสลายสารแอซิติลโคเอนไซม์ เอ ในวัฏจักรเครปส์

3.4 กระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน (electron transport system)

กระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน เกิดขึ้นในเยื่อหุ้มชั้นในของไมโทคอนเดรีย เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเนื่องจากวัฏจักรเครปส์ แหล่งของอิเล็กตรอนคือ NADH และ FADH₂ ซึ่งเมื่อถูกออกซิไดซ์อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกส่งต่อเป็นทอดๆ ผ่านตัวนำอิเล็กตรอนหลายตัวไปจนถึงปลายสุดของระบบ อิเล็กตรอนจะไปรีดิวซ์ O₂ ให้เป็น H₂O กระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนในการหายใจ (respiration) นี้คล้ายกับที่เกิดขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชในขั้นตอนของปฏิกิริยาที่ใช้แสง ระหว่างการถ่ายทอดอิเล็กตรอนเป็นช่วงๆ จะเกิดพลังงานอิสระซึ่งจะนำไปใช้ในการสร้าง ATP ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า ออกซิเดทีฟ ฟอสโฟริเลชัน (oxidative phosphorylation) การสร้าง ATP ในกระบวนการนี้ไม่ใช่การสร้าง ATP โดยตรงแบบ substrate-level phosphorylation (ย้ายหมู่ฟอสเฟตของซับสเตรต ซึ่งเป็นสารพลังงานสูงให้ ADP) เหมือน

ที่สร้างจากวิถีไกลโคลิซิสและวัฏจักรเครบส์ แต่จะเป็นการสร้างแบบที่ต้องมีการเชื่อมโยงกับการออกซิเดชันในระบบถ่ายเทอิเล็กตรอน ซึ่งทำให้เกิดการปั๊มของโปรตอน (H^+) ผ่านเยื่อหุ้มชั้นในของไมโทคอนเดรีย ซึ่งการถ่ายเทอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นเป็นทอดๆ ผ่านตัวนำอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นกลุ่มของโปรตีน (ซึ่งหลายตัวเป็นเอนไซม์) และมีโคเอนไซม์ และโคแฟกเตอร์ หลายตัวรวมอยู่ด้วยกัน กลุ่มโปรตีนเหล่านี้ ได้แก่ complex I, II, III และ IV ลำดับของการถ่ายเทอิเล็กตรอน นอกจากกลุ่มโปรตีน 4 กลุ่มนี้ ยังมีโคเอนไซม์ Q และ ไซโตโครม c (cytochrome c) ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้เพื่อช่วยในการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างกลุ่มโปรตีน ดังกล่าว

ในแต่ละ complex จะมีการรับและให้อิเล็กตรอน (รีดักชันและออกซิเดชัน) และมีการปั๊มโปรตอนผ่านเยื่อหุ้มชั้นในออกจากด้านเมทริกซ์ไปที่ช่องว่างระหว่างเยื่อหุ้มชั้นนอกและในระบบถ่ายเทอิเล็กตรอน ไม่ได้เป็นตัวสร้าง ATP โดยตรง หน้าที่ของมันคือ นำอิเล็กตรอนที่ได้จากสารอาหาร (ในรูปของ NADH และ $FADH_2$) ไปยัง O_2 ระหว่างการถ่ายเทอิเล็กตรอนในแต่ละช่วงจะเกิดพลังงานอิสระในปริมาณมากพอที่จะนำไปสร้าง ATP เพื่อที่จะให้เข้าใจถึงกลไกนี้ เราจะไปศึกษารายละเอียดของการส่งอิเล็กตรอนในแต่ละองค์ประกอบของระบบถ่ายเทอิเล็กตรอน ดังรูปที่ 9

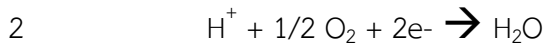


รูปที่ 9 การถ่ายเทอิเล็กตรอน จาก NADH ผ่าน complex I และจาก $FADH_2$ ผ่าน complex II ไปยัง complex III และ complex IV โดยมีโคเอนไซม์ Q และ ไซโตโครม c ซึ่งเคลื่อนที่ได้เป็นตัวช่วยรับอิเล็กตรอนระหว่าง complex

กลไกการถ่ายเทอิเล็กตรอนแบ่งออกเป็น 4 ช่วง คือ

1. NADH ส่งอิเล็กตรอนให้ complex I
2. $FADH_2$ การถ่ายเทอิเล็กตรอนให้ complex II
3. อิเล็กตรอนถูกถ่ายเทจากโคเอนไซม์ Q ผ่าน complex III ไปยังไซโตโครม c
4. อิเล็กตรอนถูกส่งจากไซโตโครม c ไปยัง O_2 ผ่าน complex IV

ในขั้นตอนสุดท้ายของการถ่ายทอดอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่หลุดเป็นอิสระจะรวมกับออกซิเจน (O_2) จากลมหายใจเข้าและรวมกับโปรตอน (H^+) ทำให้เกิดน้ำ ดังสมการ



ลักษณะและผลลัพธ์สำคัญของการถ่ายทอดอิเล็กตรอน มีดังนี้

1. เป็นกระบวนการเปลี่ยน $NADH + H^+$ และ $FADH_2$ ให้ได้พลังงานในรูป ATP
2. เกิดขึ้นเมื่อมี O_2 อิสระ โดย O_2 จะเป็นตัวรับโปรตอนและอิเล็กตรอนเกิดเป็นน้ำ ทั้งสิ้น 12 โมเลกุล ต่อ 1 โมเลกุลของกลูโคส
3. เป็นกระบวนการที่ให้พลังงานในรูป ATP แก่สิ่งมีชีวิตมากที่สุด ถึง 34 ATP/ 1 โมเลกุลของกลูโคส สำหรับในไต ตับ และหัวใจ หรือได้ 32 ATP/ 1 โมเลกุลของกลูโคส สำหรับกล้ามเนื้อลายและสมอง
4. $NADH + H^+$ เมื่อผ่านกระบวนการนี้ จะได้พลังงาน 3 ATP และ $FADH_2$ เมื่อผ่านกระบวนการนี้ จะได้พลังงาน 2 ATP

การเผาผลาญกลูโคส 1 โมเลกุล มีขั้นตอนสำคัญและผลลัพธ์ที่ได้ คือ

1. ขั้นไกลโคลิซิส ใช้ 2 ATP แต่ได้ 4 ATP ดังนั้นได้ ATP สุทธิ 2 ATP นอกจากนี้ยังเกิดไฮโดรเจน (H^+) 4 อะตอม เข้ารวมกับตัวรับไฮโดรเจน คือ NAD^+ กลายเป็น $NADH + H^+$ 2 โมเลกุล
2. ปฏิกิริยาขั้นสร้างอะซิติลโคเอนไซม์ เอ ไม่มี ATP เกิดขึ้นโดยตรง แต่เกิดไฮโดรเจน 4 อะตอม เข้ารวมกับ ตัวรับไฮโดรเจน คือ NAD^+ กลายเป็น $NADH + H^+$ 2 โมเลกุล
3. ปฏิกิริยาในวัฏจักรเครบส์ได้ 2 ATP นอกจากนี้ยังเกิดไฮโดรเจน (H^+) ทั้งหมด 16 อะตอม โดยไฮโดรเจน (H^+) 12 อะตอม เข้ารวมกับตัวรับไฮโดรเจน คือ NAD^+ กลายเป็น $NADH + H^+$ 6 โมเลกุล และไฮโดรเจน (H^+) 4 อะตอม เข้ารวมกับตัวรับไฮโดรเจน คือ FAD กลายเป็น $FADH_2$ 2 โมเลกุล
4. ปฏิกิริยาในระบบการถ่ายทอดอิเล็กตรอนมี ATP เกิดขึ้นมากที่สุด คือ 34 ATP หรือ 32 ATP เกิดจาก $NADH + H^+$ 30 ATP หรือ 28 ATP และเกิดจาก $FADH_2$ 4 ATP
5. พลังงานทั้งหมดที่ได้จากการสลายกลูโคส 1 โมเลกุล แบบใช้ออกซิเจนได้พลังงานทั้งสิ้น 36 หรือ 38 ATP ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตัวรับไฮโดรเจนที่อยู่ในไมโทคอนเดรียของเซลล์แต่ละชนิด กล่าวคือ ไฮโดรเจนของ $NADH + H^+$ จำนวน 2 โมเลกุล ที่เกิดจากกระบวนการไกลโคลิซิสในไซโทพลาสซึม จะถูกส่งเข้าไปยังไมโทคอนเดรียเพื่อเกิดการถ่ายทอดอิเล็กตรอน ก็จะได้ 6 ATP ซึ่งกรณีนี้จะเกิดในเซลล์ของตับ ไต และกล้ามเนื้อหัวใจ แต่ถ้าใน ไมโทคอนเดรียมี FAD มารับไฮโดรเจนจาก $NADH + H^+$ (ที่เกิดจากกระบวนการไกลโคลิซิสในไซโทพลาสซึม) ทำให้ได้ ATP เพียง 4 ATP กรณีนี้เกิดขึ้นในกล้ามเนื้อลายและสมอง

3.5 การสลายลิพิด

การสลายลิพิดจะต้องไฮโดรไลต์ไขมันด้วยเอนไซม์ไลเปส (lipase) ให้เป็นกรดไขมันและกลีเซอรอล จากนั้น กลีเซอรอลถูกเปลี่ยนไปเป็น ฟอสโฟกลีเซอรอลดีไฮด์ (phosphoglyceraldehyde) หรือ PGAL ซึ่งจะถูกรวมเข้าไคโซต์ต่อไปอีก โดยผ่านกระบวนการไกลโคไลซิส และวัฏจักรเครบส์ จนกระทั่งเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ได้ น้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ส่วนกรดไขมัน จะถูกสลายเพื่อให้ได้พลังงาน โดยสายไฮโดรคาร์บอนของกรดไขมันจะถูกตัดออกทีละ 2 คาร์บอนอะตอม และ 2 คาร์บอนอะตอมนี้จะเข้าร่วมกับโคเอนไซม์ เอ กลายเป็นอะซิติลโคเอนไซม์ เอ เรียกกระบวนการนี้ว่า **บีตาออกซิเดชัน (β- oxidation)** อะซิติลโคเอนไซม์ เอ ที่เกิดขึ้นจำถูกนำไปเปลี่ยนแปลงต่อไปในวัฏจักรเครบส์

กระบวนการสลายกรดไขมันในบีตาออกซิเดชัน ซึ่งกรดไขมันส่วนใหญ่มีคาร์บอนอะตอม 10-24 คาร์บอนอะตอม และถูกตัดเป็น อะซิติลโคเอนไซม์ เอ (2C) ในแต่ละรอบของปฏิกิริยา เช่น กรดไขมันที่มีคาร์บอนอะตอม 8 คาร์บอนอะตอม เมื่อผ่านปฏิกิริยาบีตาออกซิเดชัน 3 รอบจะได้ $\text{NADH}^+ + \text{H}^+$ 3 โมเลกุล FADH_2 3 โมเลกุล และ อะซิติลโคเอนไซม์ เอ 4 โมเลกุล

ข้อควรทราบพิเศษ

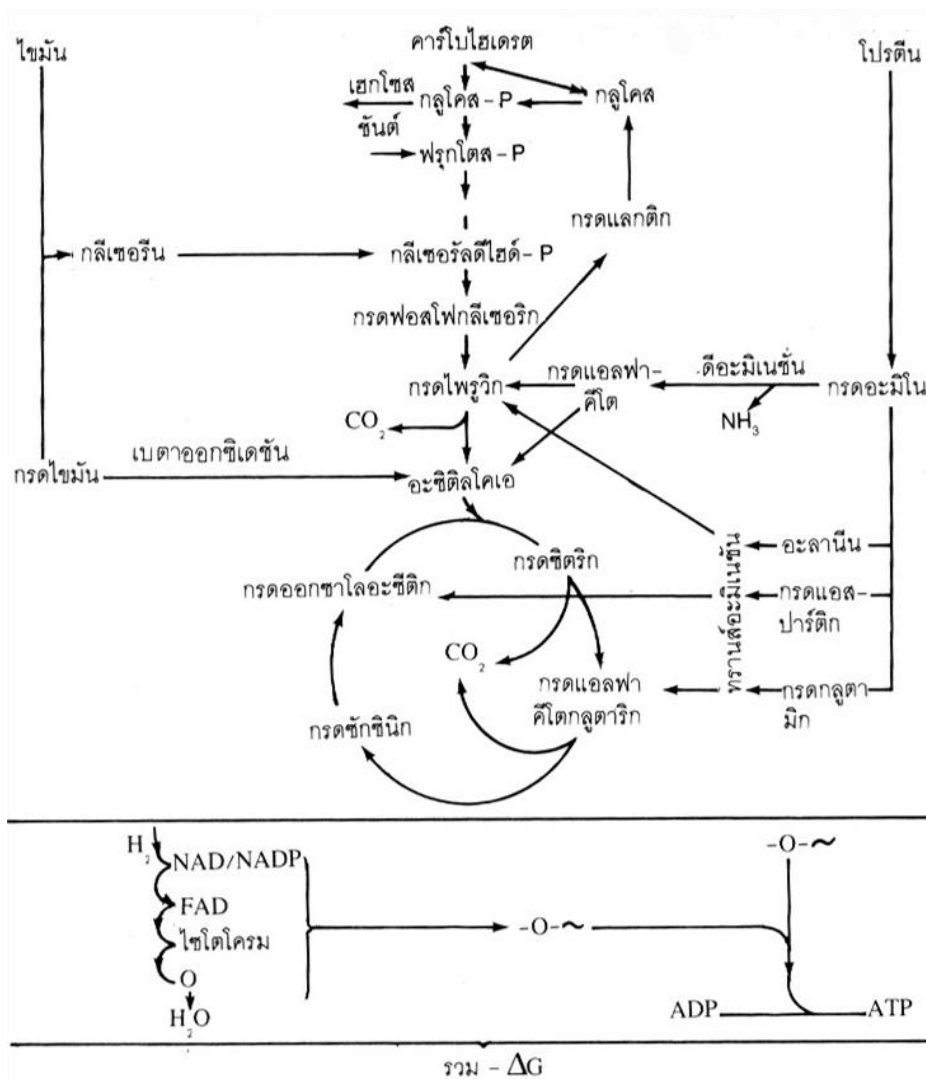
1. อะซิติลโคเอนไซม์ เอ แต่ละโมเลกุล เมื่อถูกเผาผลาญในวัฏจักรเครบส์โดยสมบูรณ์ และผ่านไฮโดรเจนเข้าสู่การถ่ายเทอิเล็กตรอนแล้วจะได้พลังงาน 12 ATP
2. การที่สารอาหารจำพวกไขมันสลายให้พลังงานได้มากกว่าสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนในจำนวนกรัมเท่า ๆ กัน เพราะเหตุว่าสัดส่วนของไฮโดรเจนต่อออกซิเจนมากกว่า 2 ต่อ 1 เป็นสัดส่วนต่างกันอย่างมาก เช่น กรดไขมันสเตียริก ($\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$) พบว่า $\text{H} : \text{O} = 18 : 1$ และอีกประการหนึ่งก็คือ ใน บีตา-ออกซิเดชัน คาร์บอนอินทรีย์ของกรดไขมันจะถูกเปลี่ยนเป็น Acetyl Co A ทั้งหมดไม่มี CO_2 เกิดขึ้น ซึ่งต่างจากคาร์โบไฮเดรตที่คาร์บอนอินทรีย์บางส่วนถูกเปลี่ยนเป็น CO_2 ในการสร้างอะซิติลโคเอนไซม์ เอ

3.6 การสลายโปรตีน

กรดอะมิโน $(\text{NH}_2 - \underset{\text{R}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}} - \overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}} - \text{OH})$ ที่ปรากฏในธรรมชาติทั้ง 20 ชนิด แต่ละ

ชนิดจะมีความแตกต่างกันที่หมู่ R ซึ่งจะเป็นส่วนที่ทำให้การสลายกรดอะมิโนแต่ละชนิดเกิดพลังงานไม่เท่ากัน ในการสลายกรดอะมิโน เพื่อให้ได้พลังงานต้องมีการกำจัดหมู่อะมิโน (NH_2-) ออกจากโมเลกุลเสียก่อน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Deamination ซึ่ง NH_2- จะถูกเปลี่ยนแปลงไปเป็นของเสียไนโตรเจน (N-waste) เช่น NH_3 ยูเรีย กำจัดออกไปพร้อมกับเหงื่อ ปัสสาวะ ลมหายใจ แล้วแต่ชนิดของ N-waste

เมื่อได้ $R - CH_2 - \overset{O}{\parallel} - OH$ แล้วก็จะมีสภาพเป็นสารตัวกลาง (Intermediate) ของไกลโคลิซิส เช่น กรดไพรูวิก หรือของวัฏจักรเครบส์ เช่น α -Ketoglutarate, succinyl Co A, Fumarate, Oxaloacetate รวมทั้ง acetyl Co A ซึ่งเป็นสารที่จะเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงในวัฏจักรเครบส์ ดังนั้นการสลายกรดอะมิโนเพื่อให้ได้ตัวกลางเหล่านี้ ต้องประกอบด้วยปฏิกิริยาที่ (1) กำจัดหมู่อะมิโน ออกจากโมเลกุลของกรดอะมิโนให้เป็นแอมโมเนีย และจะต้องมีปฏิกิริยาที่จะช่วยกำจัดแอมโมเนียซึ่งเป็นพิษต่อเซลล์ต่อไปอีก (2) กำจัดอะตอมกำมะถันหรือไนโตรเจนของกรดอะมิโนบางชนิด (3) เปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เหลือของกรดอะมิโนให้เป็นสารตัวกลางดังกล่าว



จากภาพจะเห็นได้ว่าการสลายคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และลิพิด เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน การที่สารที่ได้จากการสลายสารอาหารชนิดใดจะเข้าสู่ขั้นตอนการสร้างพลังงานในขั้นตอนใดบ้างนั้น จะขึ้นอยู่กับว่าสารที่ได้จากการสลายสารอาหารชนิดนั้นๆ คืออะไร

โดยปกติแล้วเซลล์จะใช้คาร์โบไฮเดรตก่อนแล้วจึงใช้ไขมันหรือโปรตีน ถ้าเซลล์มีคาร์โบไฮเดรตมาก เซลล์จะเปลี่ยนเป็นไขมันสะสมไว้ในร่างกาย ในพืชจะสะสมไว้ในรูปของแป้งหรือไขมัน ขึ้นอยู่กับชนิดของส่วนที่พืชสะสม ถ้าเป็นราก เช่น มันเทศจะสะสมในรูปของแป้ง เมล็ดจะสะสมไว้ในรูปของไขมันหรือน้ำมัน ทั้งพืชและสัตว์จะนำอาหารนี้มาใช้ เมื่อขาดแคลนอาหารเพื่อให้ได้พลังงานมาใช้ต่อไป

4. การสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจน

4.1 ไกลโคลิซิส (glycolysis)

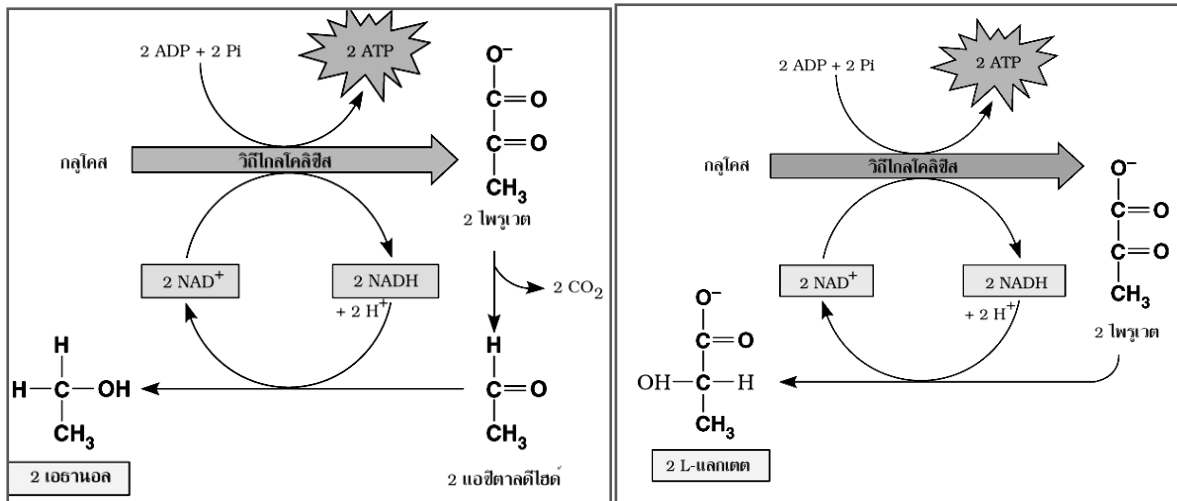
กระบวนการสลายกลูโคส 1 โมเลกุล ได้กรดไพรูเวท 2 โมเลกุล เกิดที่บริเวณไซโทซอลมีหลายขั้นตอน เช่นเดียวกับการสลายอาหารแบบใช้ออกซิเจน

4.2 การหมัก (fermentation)

ในกรณีที่มีออกซิเจนในเซลล์เพียงพอไพรูเวท จะเปลี่ยนไปเป็น อะซีทิลโคเอ แล้วเข้าสู่วัฏจักรเครบส์ และกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน ตามขั้นตอนของกระบวนการหายใจ เพื่อให้ได้ ATP ซึ่งส่วนใหญ่จะถูกสร้างขึ้นโดยวิธีออกซิเดทีฟฟอสโฟรีเลชัน หากในเซลล์ไม่มีออกซิเจน ATP ที่ได้จะมาจากกระบวนการซัปสเตรตฟอสโฟรีเลชันขณะที่กลูโคสเปลี่ยนไปเป็นไพรูเวท จากนั้นผลผลิตสุดท้ายของไกลโคลิซิส คือ ไพรูเวทจะถูกนำไปใช้ต่อในกระบวนการหมัก แต่เนื่องจากว่าเซลล์ต้องการ NAD^+ กลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ในกระบวนการไกลโคลิซิส ในกระบวนการหมักจะมีการโยกย้ายอิเล็กตรอนจาก $NADH$ ไปยัง ไพรูเวทหรืออนุพันธ์ของไพรูเวทที่ชื่อ อะซีทอลดีไฮด์ ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เพื่อจะออกซิไดส์ $NADH$ กลับไปเป็น NAD^+ ซึ่งสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ ผลผลิตสุดท้ายซึ่งถือว่าเป็นของเสียจากกระบวนการหมักอาจเป็นแอลกอฮอล์ หรือกรดแลกติก เช่น

ในยีสต์และพืช หากไม่มีออกซิเจน กรดไพรูวิกจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้เป็นเอทิลแอลกอฮอล์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 11

ในเซลล์กล้ามเนื้อลาย พยาธิตัวตืด และแบคทีเรียบางชนิด กรดไพรูวิกจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้กรดแลกติก ดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 กระบวนการหมักแอลกอฮอล์ รูปที่ 12

กระบวนการหมักกรดแลคติก

สรุปความแตกต่างการสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจนระหว่างยีสต์และพืช กับเซลล์กล้ามเนื้อละลายและแบคทีเรียบางชนิด

1. การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนอินทรีย์ในกลูโคส สำหรับในเซลล์ยีสต์และพืชพบว่า 2 ใน 3 ของคาร์บอนในโมเลกุลของกลูโคสจะเปลี่ยนเป็นเอทิลแอลกอฮอล์ ส่วนอีก 1 ใน 3 จะกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แต่สำหรับในกล้ามเนื้อละลายและแบคทีเรียบางชนิดนั้น คาร์บอนทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนในกรดแลคติกทั้งหมด ซึ่งไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น
2. แต่ละปฏิกิริยาไม่ว่าในยีสต์และพืช หรือกล้ามเนื้อละลายและแบคทีเรียบางชนิด ต่างได้พลังงาน 2 ATP เท่ากัน เมื่อเริ่มจากน้ำตาลกลูโคส 1 โมเลกุล

ที่มา:

ประคอง ตั้งประพจน์กุล. 2548. **ชีววิทยา: สัตววิทยา1**. ด้านสุขภาพการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ประสงค์ หล้าสะอาด และจิตเกษม หล้าสะอาด. 2548. **คู่มือการเรียนรู้พื้นฐานและเพิ่มเติม ชีววิทยา ม.4 เล่ม 2**. พ.ศ. พัฒนา จำกัด. กรุงเทพฯ.

สมาน แก้วไวยุทธ. 2544. **ชีววิทยา ม. 4 เล่ม 2**. ไฮเอ็ดพับลิชชิ่ง, กรุงเทพฯ

Campbell, N.A. and Reec, J.B. 2002. **Biology 6th education**. Benjamin/Cummings Pubrishing Company, Inc. San Francisco.

http://www.il.mahidol.ac.th/course/respiration/Lesson4_menu.html



ชื่อ ชั้น เลขที่ วันที่

คำชี้แจง ให้นักเรียนเติมข้อความลงในช่องว่างให้สมบูรณ์

1. cellular respiration คือ
2. พลังงานที่ได้จากการหายใจระดับเซลล์สะสมอยู่ที่ใด
3. สารใดที่ทำหน้าที่สะสมพลังงานในสิ่งมีชีวิต
4. ATP มีชื่อเต็มว่า
5. ATP ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ คือ
6. องค์ประกอบของ ADP ต่างจาก ATP อย่างไร
7. การสลาย ATP เป็น ADP ได้พลังงานเท่าใด.....
8. การสลาย ADP เป็น AMP ได้พลังงานเท่าใด.....
9. การสลาย AMP เป็น adenosine ได้พลังงานเท่าใด.....
10. การสร้าง AMP จาก adenosine ใช้พลังงานเท่าใด
11. การสร้าง ADP จาก AMP ใช้พลังงานเท่าใด
12. การสร้าง ATP จาก ADP ใช้พลังงานเท่าใด
13. ส่วนใหญ่ร่างกายสร้าง ATP มาจาก
14. หากต้องการให้ร่างกายทำงานอย่างปกติ ต้องสลาย ATP เพื่อให้ได้พลังงาน คิดเป็นน้ำหนักเท่าใด
15. ATP เก็บสะสมพลังงานไว้ที่ใด
16. NADH กับ FADH₂ มีความสำคัญต่อการสร้าง ATP อย่างไร
17. การหายใจระดับเซลล์แบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่
18. aerobic respiration ประกอบด้วยขั้นตอน ขั้นตอน ได้แก่
19. anaerobic respiration ประกอบด้วยขั้นตอน ขั้นตอน ได้แก่
20. glycolysis เกิดขึ้นที่ใด.....
21. การสร้าง Acetyl Coenzyme A เกิดขึ้นที่ใด.....
22. Krebs cycle เกิดขึ้นที่ใด.....
23. electron transport system เกิดขึ้นที่ใด.....
24. เขียนสมการสรุป glycolysis จากการสลายกลูโคส 1 โมเลกุล

25. เขียนสมการสรุปขั้นตอนการสร้าง Acetyl Coenzyme A จากการสลายกลูโคส 1 โมเลกุล
.....
26. สารตั้งต้นของ glycolysis คือ สารผลิตภัณฑ์ของ glycolysis คือ
27. สารตั้งต้นของกระบวนการสร้าง Acetyl Coenzyme A คือ
28. สารผลิตภัณฑ์ของกระบวนการสร้าง Acetyl Coenzyme A คือ
29. ขั้นตอนใดของ aerobic respiration ที่มีการสร้าง CO₂
30. ขั้นตอนใดของ aerobic respiration ที่มีการสร้าง NADH
31. ขั้นตอนใดของ aerobic respiration ที่มีการสร้าง FADH₂
32. ขั้นตอนใดของ aerobic respiration ที่ได้ ATP
33. ในการสลายกลูโคส 1 โมเลกุล หากนำ NADH ที่ได้จาก glycolysis ทั้งหมด ไปถ่ายทอดอิเล็กตรอนจะได้พลังงานเท่าใด
34. ในการสลายกลูโคส 1 โมเลกุล หากนำ NADH ที่ได้กระบวนการสร้าง Acetyl Coenzyme A ทั้งหมด ไปถ่ายทอดอิเล็กตรอนจะได้พลังงานเท่าใด
35. ในการสลายกลูโคส 1 โมเลกุล หากนำ NADH ที่ได้ Krebs cycle ทั้งหมด ไปถ่ายทอดอิเล็กตรอนจะได้พลังงานเท่าใด
36. นำ FADH₂ ทั้งหมดจากการสลายกลูโคส 1 โมเลกุล ไปถ่ายทอดอิเล็กตรอนจะได้พลังงานเท่าใด
37. O₂ มีบทบาทอย่างไรในกระบวนการสลายสารอาหาร
.....
38. เหตุใดการถ่ายทอดอิเล็กตรอนจึงเกิดที่เนื้อเยื่อชั้นในของไมโทคอนเดรีย
.....
.....
39. ขณะที่มีการถ่ายทอดอิเล็กตรอนจะพบว่า มี H⁺ มากในส่วนใดของไมโทคอนเดรีย
.....
40. การสลายกลูโคส 1 โมเลกุลแบบใช้ออกซิเจน จะได้พลังงาน 36 หรือ 38 ATP ขึ้นอยู่กับปัจจัยใดบ้าง จงอธิบาย
.....
.....
.....
41. เรียกกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนต่อกันเป็นช่วงๆ ว่า
42. ยกตัวอย่างเนื้อเยื่อที่สลายกลูโคส 1 โมเลกุล แล้วได้พลังงาน 36 ATP
43. ยกตัวอย่างเนื้อเยื่อที่สลายกลูโคส 1 โมเลกุล แล้วได้พลังงาน 38 ATP
44. เอนไซม์ที่ย่อยลิพิด คือ

45. ลิพิดหลังจากถูกเอนไซม์ย่อยจะได้
46. กลีเซอรอลจะถูกเปลี่ยนเป็นสารใดก่อนเข้าสู่การสลายเพื่อให้ได้พลังงาน
47. กลีเซอรอล 1 โมเลกุล หลังจากเข้าสู่กระบวนการสลายสารอาหารเพื่อให้ได้พลังงาน จะได้พลังงาน
48. β -oxidation คือ
49. กรดไขมันที่ผ่านกระบวนการ β -oxidation จะเปลี่ยนเป็นสารใดก่อนเข้าสู่การสลายเพื่อให้ได้พลังงาน
50. การเกิด β -oxidation 1 ครั้ง จะได้ NADH โมเลกุล และ $FADH_2$ โมเลกุล
51. กรดไขมันที่มีคาร์บอน 12 อะตอม เกิด β -oxidation ครั้ง จะได้ NADH โมเลกุล และ $FADH_2$ โมเลกุล
52. นำ แอซิetyl โคเอ ทั้งหมดที่เกิดจาก กรดไขมันที่มีคาร์บอน 12 อะตอม ที่ผ่าน β -oxidation เข้าสู่การสลายสารอาหารเพื่อให้ได้พลังงาน จะได้พลังงาน
53. deamination คือ
54. หมู่อะมิโนจาก deamination จะถูกเปลี่ยนเป็น ขับออกนอกร่างกายทาง
55. เรียงลำดับก่อนหลังในการสลายสารอาหารประเภทต่างๆ เพื่อให้ได้พลังงาน
56. ระหว่างกล้ามเนื้อหัวใจ กับยีสต์ที่มี **anaerobic respiration** กลูโคส 1 โมเลกุล ได้พลังงานต่างกันเท่าใด
57. ในเซลล์กล้ามเนื้อลาย ระหว่าง **aerobic respiration** กับ **anaerobic respiration** กลูโคส 1 โมเลกุล ได้พลังงานต่างกันเท่าใด
58. fermentation แบ่งเป็น แบบ คือ
59. การหมักกรดแลคติก สารตั้งต้น คือ สารผลิตภัณฑ์ คือ
60. การหมักแอลกอฮอล์ สารตั้งต้น คือ สารผลิตภัณฑ์ คือ
61. สารที่ได้จาก **anaerobic respiration** กลูโคส 1 โมเลกุล ที่มีการหมักกรดแลคติก ได้แก่
62. สารที่ได้จาก **anaerobic respiration** กลูโคส 1 โมเลกุล ที่มีการหมักแอลกอฮอล์ ได้แก่
63. สิ่งมีชีวิต/เนื้อเยื่อใดที่เกิด **anaerobic respiration** กลูโคส 1 โมเลกุล ที่มีการหมักกรดแลคติก
64. สิ่งมีชีวิต/เนื้อเยื่อใดที่เกิด **anaerobic respiration** กลูโคส 1 โมเลกุล ที่มีการหมักแอลกอฮอล์
65. **anaerobic respiration** ที่มีการหมักกรดแลคติก ได้พลังงานเท่าใด
66. **anaerobic respiration** ที่มีการหมักแอลกอฮอล์ ได้พลังงานเท่าใด
67. **anaerobic respiration** เกิดขึ้นที่ใด