บทที่ 3
เมแทบอลิซึม
(Metabolism)

สุพจน์ ใช้เทียมวงศ์

เมแทบอลิซึม หมายถึง กระบวนการทางเคมีทั้งหมดที่เกิดขึ้นในสิ่งมีชีวิต หรือหมายถึง การเปลี่ยนแปลงทางเคมีต่าง ๆ ทั้งหมดที่สิ่งมีชีวิตทำให้เกิดขึ้นเพื่อรักษาไว้ซึ่งกิจกรรมของชีวิต เมแทบอลิซึมอาจถูกแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ คือ (1) คะตะบอลิซึม (catabolism) เป็นกระบวนการที่ทำให้ร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้รับพลังงานเอาไว้ใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ และ (2) อะนะบอลิซึม (anabolism) เป็นกระบวนการใช้พลังงานในร่างกายของสิ่งมีชีวิต

การสร้างพลังงาน

สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดมีวิธีการสร้างพลังงานแตกต่างกัน แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงสิ่งมีชีวิตพวก heterotroph ซึ่งได้รับพลังงานมาจากอาหารที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ สารอาหารเมื่อผ่านเข้าไปในเซลล์จะตกอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ประกอบด้วยเอนไซม์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นเครื่องมือของกระบวนการเมแทบอลิซึม คะตะบอลิซึมเป็นกระบวนการซึ่งใช้ในการเปลี่ยนแปลงสารอาหารให้เป็นพลังงานที่เซลล์นำมาใช้ได้ เมื่อการเชื่อมต่อของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบบางอย่างถูกทำให้ขาดหลุดออกจากกัน จะมีพลังงานถูกปลดปล่อยออกมาเรียกว่า พลังงานอิสระ (free energy) พลังงานอิสระในกระบวนการเมแทบอลิซึมมักไม่ถูกปลดปล่อยให้หลุดออกไปสู่สิ่งแวดล้อม แต่จะถูกเก็บรักษาไว้ในบอนด์พิเศษของสารประกอบใหม่ที่ถูกจัดสร้างขึ้นมาเรียกว่า บอนด์พลังงาน (bond energy) พลังงานบอนด์จัดเป็นพลังงานศักย์ (potential energy) ซึ่งถูกเก็บรักษาไว้ และอาจถูกทำให้ปลดปล่อยออกมาได้ พลังงานส่วนใหญ่ที่เซลล์ได้รับมักได้จากปฏิกิริยา oxidation-reduction ออกซิเดชัน คือ กระบวนการกำจัดอิเล็กตรอนออกไป ส่วนรีดักชัน คือ กระบวนการรับอิเล็กตรอนเข้ามา (ออกซิเดชันไม่ได้มีความหมายเพียงแค่การใช้ออกซิเจนเท่านั้น) ออกซิเดชันและรีดักชัน

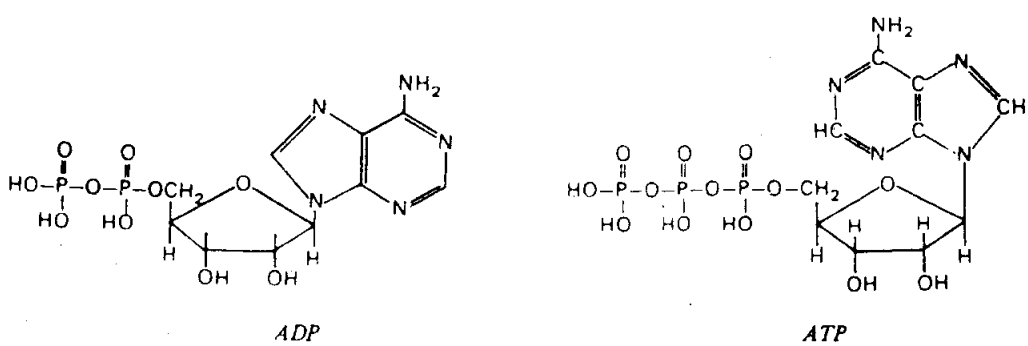
เป็นกระบวนการซึ่งเกิดควบคู่กันเนื่องจากมีการถ่ายอิเล็กตรอนจากที่หนึ่งไปสู่อีกที่หนึ่ง การโยกย้ายอิเล็กตรอนมีผลทำให้พลังงานถูกถ่ายทอดไปด้วย และพลังงานส่วนเกินอาจถูกนำมาใช้ทำให้เกิดบอนด์ใหม่ได้สารซึ่งเป็น reducing agent ที่แรงสามารถให้อิเล็กตรอนแก่สารอื่นได้ง่าย และสารซึ่งเป็น oxidizing agent ที่แรงสามารถรับอิเล็กตรอนไว้ได้ง่าย กระบวนการออกซิเดชันที่ง่ายที่สุด คือ กระบวนการกำจัดไฮโดรเจน (dehydrogenation) ดังสมการ

$$AH_2 + B \rightleftharpoons A + BH_2$$

AH_2 เป็น reductant ซึ่งถูกออกซิไดส์โดย B เมื่อสาร B รับอิเล็กตรอนจาก AH_2 ทำให้โปรตรอนซึ่งเป็นนิวเคลียสของไฮโดรเจนถูกดึงออกมาด้วย ดังนั้น ไฮโดรเจนซึ่งประกอบด้วยโปรตรอนกับอิเล็กตรอนจึงเข้ารวมตัวกับสาร B และถ้าปฏิกิริยานี้สามารถย้อนกลับไปมาได้ก็อาจเริ่มต้นปฏิกิริยาด้วยสารเคมีทางขวามือได้เช่นกัน ในกรณีหลังนี้ BH_2 จะกลายเป็น reductant และ A เป็น oxidant ปกติเมื่ออิเล็กตรอนกับโปรตรอนไหลออกมาจาก reducing system ไปยัง oxidizing system จะมีพลังงานถูกปลดปล่อยออกมา

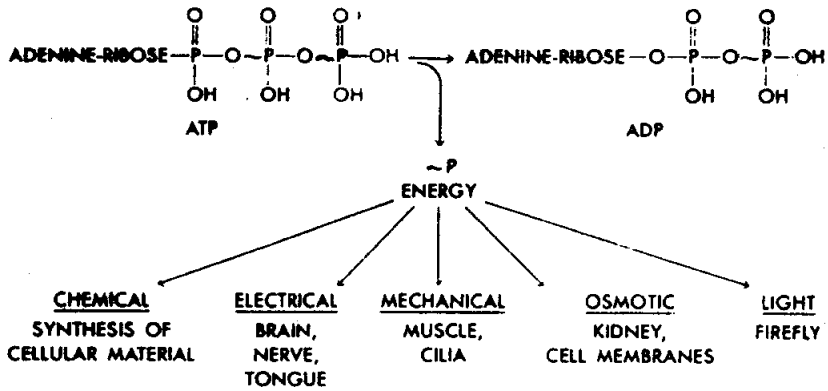
พลังงานส่วนใหญ่ที่เกิดจากกระบวนการต่าง ๆ ภายในเซลล์มักถูกถ่ายทอดให้กับโมเลกุลของ adenosine diphoshate (ADP) และกรดฟอสฟอริกเพื่อทำให้เกิดบอนด์พลังงานเชื่อมต่อกัน แล้วกลายเป็นสารประกอบที่เรียกว่า adenosine triphosphate (ATP)

$$ADP + H_3PO_4 \xrightarrow{\text{Energy}} ATP$$



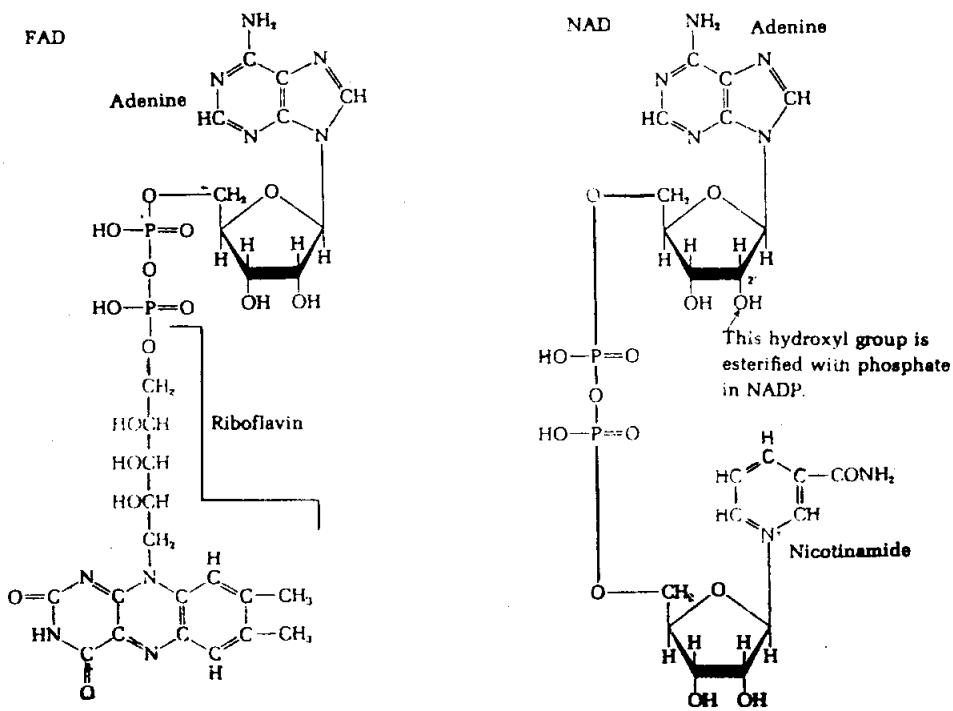
รูปที่ 3—1 The structures of ADP and ATP

บอนด์พลังงานระหว่าง ADP กับกรดฟอสฟอริกใน ATP อาจถูกทำให้แตกตัวปล่อยพลังงานออกมาเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาในกระบวนการอื่นได้ ดังแผนภูมิในรูปที่ 3—2



รูปที่ 3—2 The bond energy of ATP

สำหรับกระบวนการ dehydrogenation ในเซลล์ส่วนมากมักใช้ nicotinamide adenine dinucleotide (NAD) หรือ flavin adenine dinucleotide (FAD)



รูปที่ 3—3 The structures of FAD and NAD

เป็นตัวรับไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอน แต่ FAD ถูกใช้รับไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงานต่ำกว่าไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนที่ NAD รับไว้ ทั้ง NAD และ FAD ถูกจัดเป็น coenzyme ของเอนไซม์ dehydrogenase ไฮโดรเจนที่ coenzyme ทั้งสองได้รับไว้อาจถูกถ่ายทอดให้กับระบบ

อื่นต่อไปได้ ในโครงสร้างของ NAD มีวิตามิน niacin (nicotinic acid) เป็นองค์ประกอบแต่ในโครงสร้างของ FAD มีวิตามิน riboflavin เป็นองค์ประกอบ

การสร้างพลังงานจากคาร์โบไฮเดรต

สิ่งมีชีวิตพวก heterotroph ส่วนมากได้พลังงานจากการออกซิไดส์คาร์โบไฮเดรต หรือสารประกอบที่ใกล้เคียงอื่น ๆ คาร์โบไฮเดรตอาจถูกออกซิไดส์ได้ทั้งในสภาพที่มีออกซิเจน (aerobic) และไม่มีออกซิเจน (anaerobic) การออกซิเดชันของคาร์โบไฮเดรตจะเกิดขึ้นหลังจากถูกย่อยสลายให้กลายเป็น monosaccharide แล้ว น้ำตาลกลูโคสเป็น monosaccharide ที่เซลล์มักนำมาใช้ในการ oxidation ให้เกิดพลังงาน

การสร้างพลังงานภายใต้สภาพที่มีออกซิเจน (การหายใจโดยใช้ออกซิเจน)

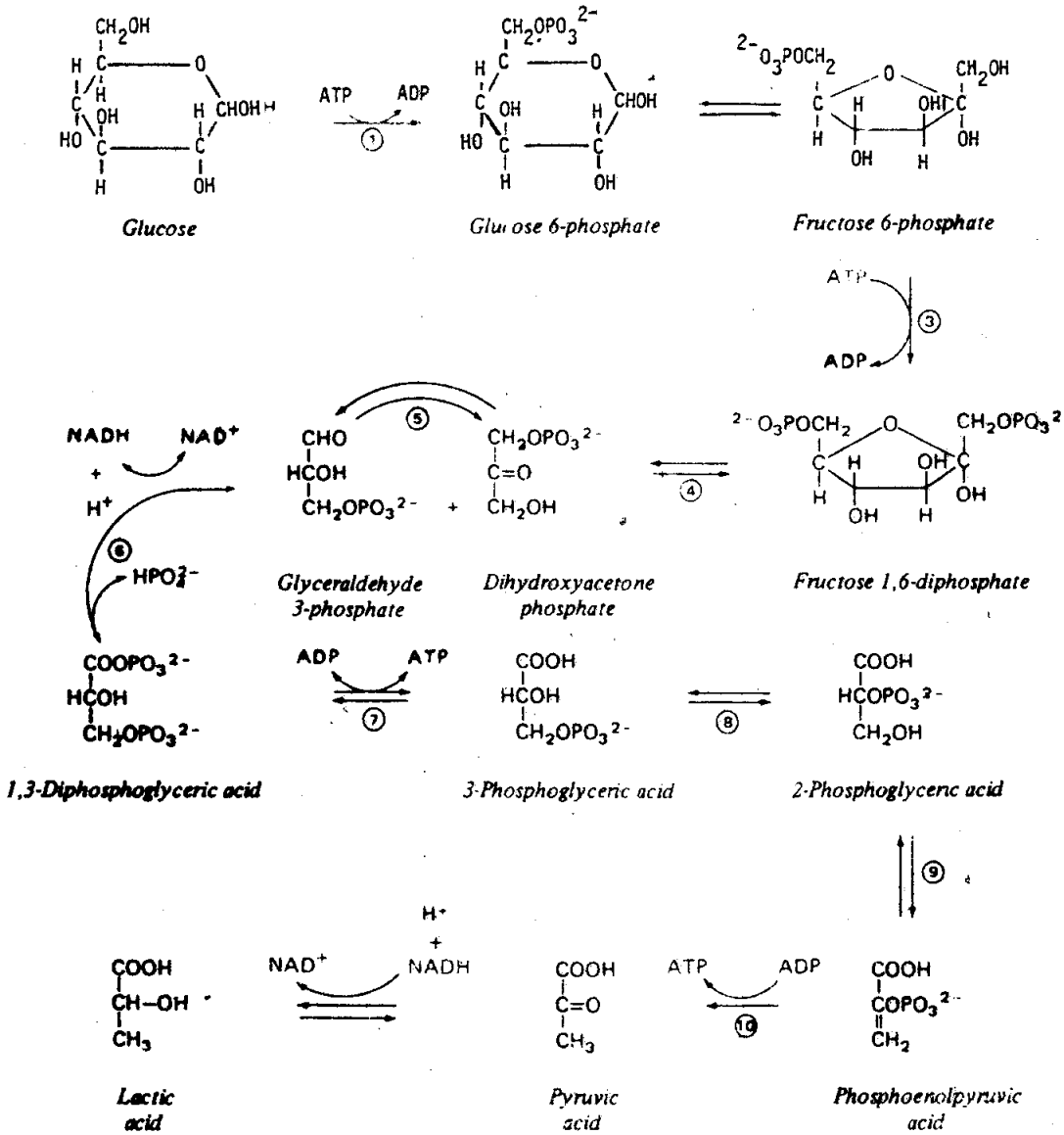
น้ำตาลกลูโคสเมื่อถูกนำไปใช้ในการสร้างพลังงานโดยใช้ก๊าซออกซิเจนของสิ่งมีชีวิตพวก heterotroph จะถูกทำให้แตกตัวและออกซิไดส์ด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. Glycolysis โมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส (มี 6 อะตอมของธาตุคาร์บอน) ถูกทำให้สลายตัวโดยเอนไซม์ต่าง ๆ เป็นลำดับจนได้กรด pyruvic 2 โมเลกุล (มี 3 อะตอมของธาตุคาร์บอน) ในขั้นสุดท้าย ดังรูปที่ 3–4 Glycolysis เกิดขึ้นที่ไซโทพลาซึมของเซลล์

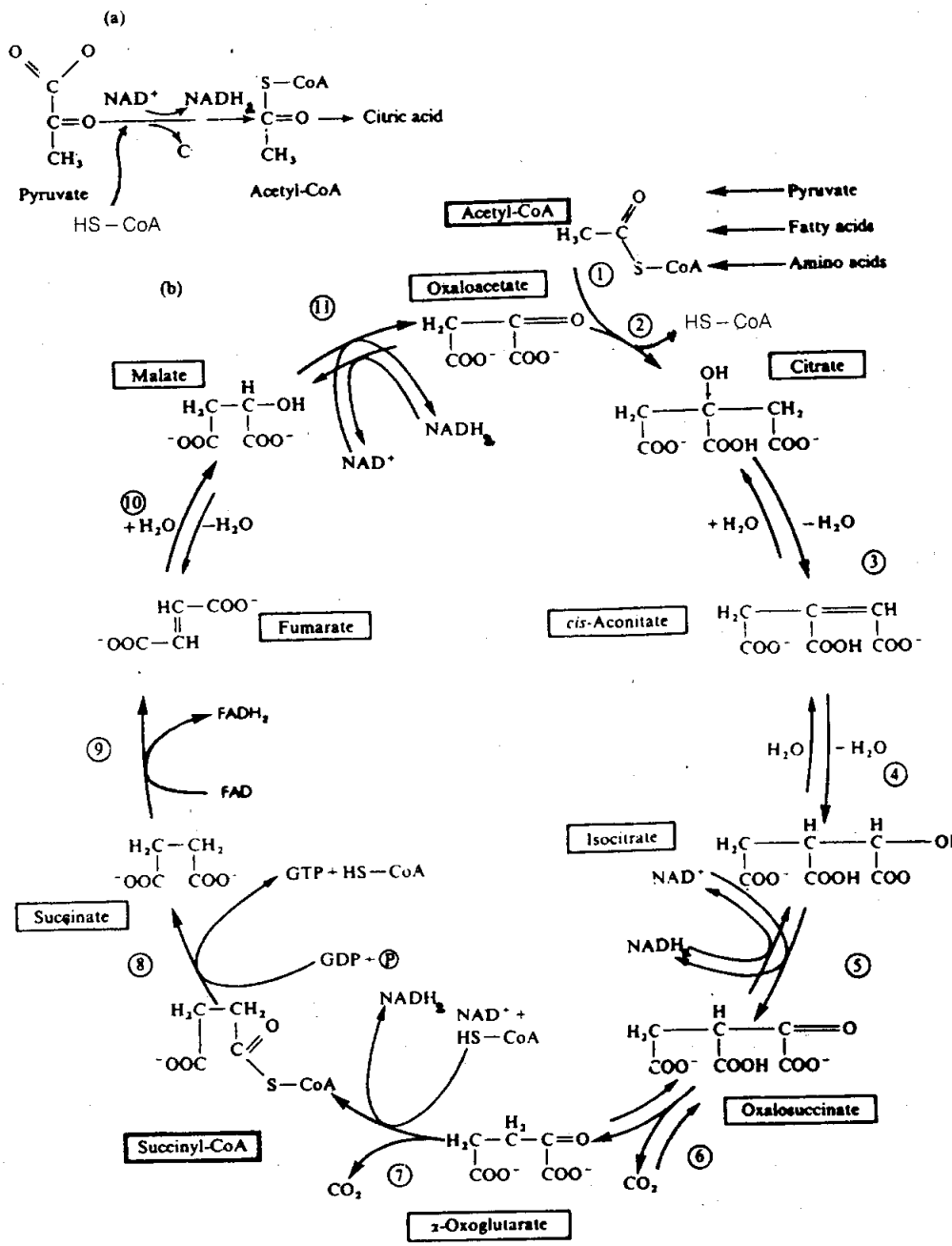
ที่ขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการ glycolysis คือ การออกซิเดชันของ glyceraldehyde-3-phosphate จะมีอิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนคู่หนึ่งถูกกำจัดออกมาและถูกรับไว้ด้วย NAD เพื่อนำส่งไปยัง respiratory chain ซึ่งจะกล่าวถึงในตอนต่อไป หรือถูกนำไปใช้ในการรีดิวซ์สารประกอบอื่นได้

2. Tricarboxylic Acid Cycle (Citric Acid Cycle or Krebs Cycle) เกิดขึ้นใน mitochondria กรด pyruvic ที่เกิดจากกระบวนการ glycolysis จะถูกออกซิไดส์ได้เป็น acetylcoenzyme A แล้วเข้าสู่วงจรของ Krebs เพื่อทำให้สลายตัวด้วยเอนไซม์ต่าง ๆ ทุกโมเลกุลของ acetyl-coenzyme A ที่เข้าสู่วงจรจะถูกทำให้ปล่อยอิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนออกมาเป็นจำนวน 4 คู่ คู่หนึ่งเป็นอิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนซึ่งมีระดับพลังงานต่ำจึงถูกรับไว้ด้วย FAD ส่วนไฮโดรเจนอีก 3 คู่ที่เหลือมีระดับพลังงานสูงจึงถูกรับไว้ด้วย NAD

ในบางขั้นตอนของกระบวนการ glycolysis และ Krebs cycle ก็มีการปลดปล่อยพลังงานอิสระออกมาทำให้เกิดบอนด์พลังงานระหว่าง ADP กับกรดฟอสฟอริกได้เป็น ATP ซึ่งเซลล์สามารถเก็บไว้ใช้ได้สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะถูกปลดปล่อยออกไปนอกเซลล์

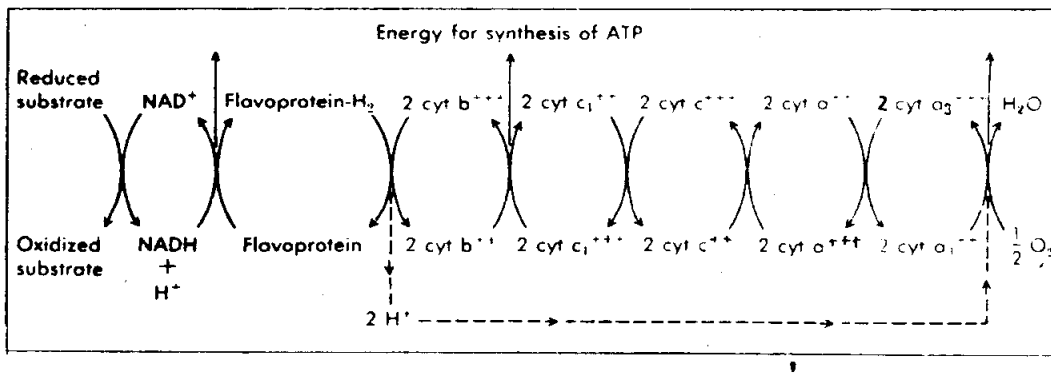


รูปที่ 3—4 **The Embden-Meyerhof pathway of glycolysis**



รูปที่ 3—5 (a) Pyruvate is converted to acetyl-CoA and then to citrate or citric acid (*indicates), the nominal starting point of the cycle. (b) The citric acid, or Krebs cycle

3. Respiratory Chain (Cytochrome System or Electron-transport Chain) เป็นระบบซึ่งมีกระบวนการ oxidation-reduction อย่างต่อเนื่องเป็นลำดับ



รูปที่ 3—6 The respiratory chain, showing sequential oxidation steps and points where sufficient energy is liberated to permit synthesis of ATP

Respiratory chain จะเริ่มทำงานเมื่อได้รับไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนจาก $NAD.H_2$ หรือ $FAD.H_2$ แล้วส่งต่อไปยังสารประกอบพวก cytochrome ต่าง ๆ เป็นลำดับ จนถึงขั้นสุดจึงได้นำออกซิเจนเข้ามารับและรวมตัวกันเป็นน้ำ ดังนั้น กระบวนการแบบนี้จึงถูกเรียกว่ากระบวนการหายใจแบบใช้ออกซิเจน เนื่องจากใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนในขั้นสุดท้าย

$NAD.H_2$ และ $FAD.H_2$ เมื่อปล่อยอิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนให้หลุดออกไปแล้ว ก็จะกลายเป็น NAD และ FAD ตามเดิม และเซลล์สามารถนำกลับไปใช้รับอิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนใหม่ได้อีก

Cytochrome จัดเป็น oxidative enzyme และมี coenzyme เป็นสารประกอบพวก heme ซึ่งมีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบ Cytochrome อาจถูกแบ่งออกได้เป็น 3 พวก คือ cytochrome a, cytochrome b และ cytochrome c Cytochrome แต่ละพวกอาจถูกแบ่งย่อยออกไปได้อีก เช่น cytochrome a และ cytochrome a_3 เป็นต้น Cytochrome แต่ละพวกอาจมีสถานภาพเป็นได้ทั้ง oxidized และ reduced form ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธาตุเหล็กที่เป็นองค์ประกอบ

$$\underset{\text{Ferric}}{\text{Cyt.b} - Fe^{3+}} + e^- \rightleftharpoons \underset{\text{Ferrous}}{\text{Cyt.b} - Fe^{2+}}$$

อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากโมเลกุลของ $NAD.H_2$ หรือ $FAD.H_2$ เป็นอิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงานสูง เมื่อวิ่งผ่านลูกโซ่ของ cytochrome จะถูกดูดซับพลังงานไว้เพื่อใช้ในการสังเคราะห์

ATP จาก ADP และกรดฟอสฟอริก อิเล็กตรอนเมื่อมีพลังงานต่ำลงจะถูกรับไว้ด้วยออกซิเจนในขั้นสุดท้าย การทำงานของ respiratory chain เป็นเครื่องชี้บอกว่าเป็นการสร้างพลังงานโดยกระบวนการหายใจ ถ้าใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนในขั้นสุดท้ายก็เรียกว่าเป็นการหายใจแบบใช้ออกซิเจน (aerobic respiration) แต่ถ้าใช้สารหรือสิ่งอื่นเป็นตัวรับไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนในขั้นสุดท้ายแทนออกซิเจนก็เรียกว่าเป็นการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration) ถ้าเป็นการสร้างพลังงานโดยกระบวนการอื่นก็จะไม่มีการทำงานของ respiratory chain

กระบวนการสลายตัวของน้ำตาลกลูโคสรวมทั้ง respiratory chain ดังกล่าว มีผลทำให้น้ำตาลกลูโคสถูกออกซิไดส์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจนหมด ดังสมการ

$$C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \longrightarrow 6\,CO_2 + H_2O + \text{energy}$$

ในทางทฤษฎี น้ำตาลกลูโคสหนึ่งโมเลกุลจะทำให้เซลล์ได้รับพลังงานจากการหายใจโดยใช้ก๊าซออกซิเจนเพื่อสังเคราะห์ ATP จาก ADP ได้เป็นจำนวน 34–38 ATP

การสร้างพลังงานภายใต้สภาพที่ปราศจากก๊าซออกซิเจน

ตัวอย่างการสร้างพลังงานโดยไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนที่สำคัญคือ กระบวนการหมัก (fermentation) การหมัก หมายถึง กระบวนการใช้สารอินทรีย์เป็นตัวรับไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนในขั้นสุดท้ายแทนออกซิเจน

การหมักให้เกิดกรดแลกติก เป็นการหมักซึ่งพบได้ในเซลล์กล้ามเนื้อและแบคทีเรียบางชนิด เมื่อเซลล์กล้ามเนื้อต้องการพลังงานมากในขณะออกกำลังกาย เซลล์กล้ามเนื้อจำเป็นต้องทำให้น้ำตาลกลูโคสสลายตัวด้วยขบวนการออกซิเดชันต่าง ๆ ดังกล่าวเป็นจำนวนมาก แต่เนื่องจากร่างกายหายใจเอาออกซิเจนเข้าไปได้ในอัตราจำกัดจึงไม่เพียงพอกับความต้องการทำให้ $NAD.H_2$ ที่เกิดจากกระบวนการออกซิเดชันต่าง ๆ ซึ่งจะต้องถ่ายอิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนให้กับ respiratory chain เป็นจำนวนมากตกค้างอยู่ไม่อาจหมุนเวียนได้ทันกับความต้องการ แต่เซลล์กล้ามเนื้อมีเอนไซม์ซึ่งทำให้ $NAD.H_2$ ถ่ายไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนให้กับกรด pyruvic ได้จึงทำให้มีกรด lactic เกิดขึ้น ดังในรูปที่ 3–4 โดยวิธีการเช่นนี้ทำให้เซลล์มี NAD หมุนเวียนกลับมาใช้งานได้ทันกับความต้องการ และกรด pyruvic ซึ่งเป็นผลผลิตของกระบวนการ glycolysis จะถูกใช้ไปในอัตราเพิ่มขึ้นเนื่องจากเซลล์ใช้กรด pyruvic ได้ทั้งในกระบวนการหมักและการหายใจพร้อมกัน ดังนั้นเซลล์จึงสามารถใช้น้ำตาลกลูโคสมาทำให้สลายตัวในกระบวนการ glycolysis เพื่อสร้างพลังงานเก็บไว้ในรูปของ ATP ได้เพิ่มมากขึ้นด้วย

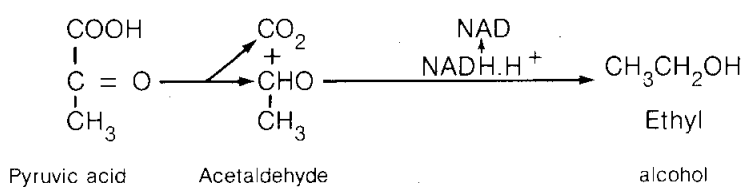
กรด lactic จากกระบวนการหมักเมื่อสะสมอยู่ในเซลล์มากขึ้นขณะออกกำลังกาย เป็นสาเหตุทำให้เกิดอาการปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ แต่เมื่อร่างกายได้รับการพักผ่อน กรด lactic ก็จะถูกเปลี่ยนกลับไปเป็นกรด pyruvic ตามเดิม โดยถ่ายไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนให้แก่ NAD ได้เป็น $NAD.H_2$ เข้าสู่กระบวนการหายใจตามปกติต่อไป

การหมักแอลกอฮอล์ เป็นการหมักของยีสต์ที่เจริญเติบโตอยู่ในน้ำตาลกลูโคสภายใต้สภาพที่ปราศจากออกซิเจน น้ำตาลกลูโคสเมื่อเข้าไปอยู่ในเซลล์ของยีสต์จะถูกทำให้สลายตัวโดยกระบวนการ glycolysis จนได้กรด pyruvic และไฮโดรเจนซึ่งถูกรับไว้ด้วย NAD เนื่องจากภายใต้สภาพที่ปราศจากออกซิเจน respiratory chain ไม่อาจรับไฮโดรเจนจาก $NAD.H_2$ ไปส่งให้กับออกซิเจนได้ แต่ยีสต์เซลล์มีเอนไซม์ทำให้กรด pyruvic สลายตัวเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับ acetaldehyde แล้วใช้ acetaldehyde รับอิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนจาก $NAD.H_2$ ได้เป็น ethyl alcohol ดังในรูปที่ 3–7 ดังนั้น เซลล์จึงมี NAD อิสระไว้ใช้หมุนเวียนรับอิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนได้เช่นเดียวกันกับการหายใจโดยใช้ก๊าซออกซิเจน กระบวนการหมักให้เกิดแอลกอฮอล์ของยีสต์อาจสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$\underset{\text{Glucose}}{C_6H_{12}O_6} + 2ADP + 2H_3PO_4 \longrightarrow \underset{\text{Ethyl alcohol}}{2CH_3CH_2OH} + 2CO_2 + 2ATP$$

การหมักของยีสต์ทำให้ยีสต์เซลล์ได้รับพลังงานน้อยกว่าการหายใจเป็นอย่างมาก เมื่อใช้น้ำตาลกลูโคสในปริมาณเท่ากัน

นอกจากนี้ยังมีกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนเรียกว่า anaerobic respiration ซึ่งพบได้ในจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียบางชนิดโดยใช้สารอื่นที่เป็น oxidizing agent รับไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนจาก respiratory chain หรือ cytochrome system ในขั้นสุดท้าย



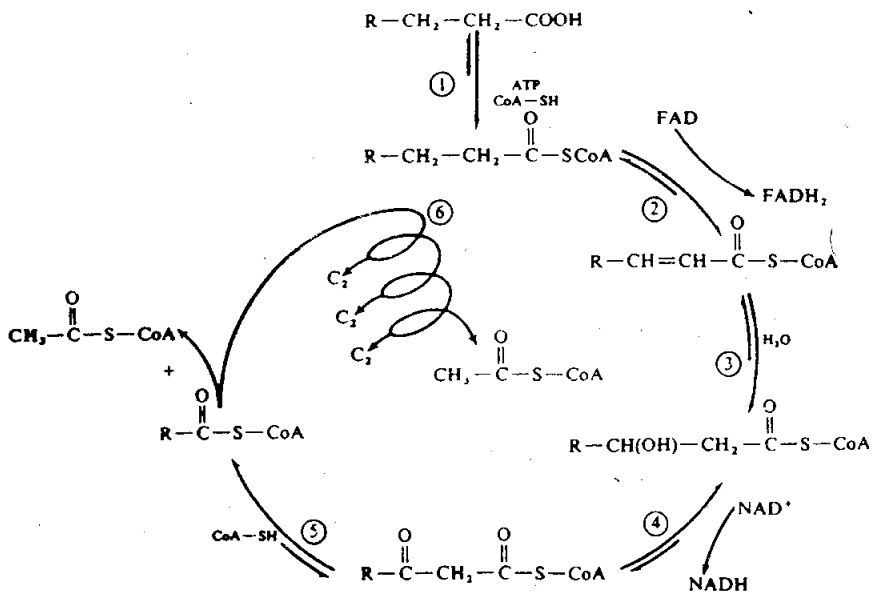
รูปที่ 3—7 Alcoholic fermentation

การสร้างพลังงานจากไขมัน

ไขมันและน้ำมันส่วนใหญ่ถูกเซลล์นำไปใช้ในการสร้างพลังงาน ไขมันพวก triglyceride ถูกย่อยสลายเป็นกลีเซอรอลกับกรดไขมันแล้วถูกดูดซึมเข้าไปในเซลล์ กลีเซอรอลอาจถูก

phosphorylation และ dehydrogenation เป็น dihydroxy acetone phosphate ดังรูปที่ 3—4 แล้วเข้าสู่กระบวนการ glycolysis เพื่อการออกซิเดชั่นเช่นเดียวกันกับน้ำตาลกลูโคส สำหรับกรดไขมันจะถูกออกซิไดส์ใน mitochondria จนได้ acetyl-coenzyme A จำนวนมาก ดังรูปที่ 3—8 แล้วเข้าสู่ tricarboxylic acid cycle ดังกล่าวมาแล้ว กรดไขมันที่มีธาตุคาร์บอนจำนวนหลายอะตอมจะทำให้เซลล์ได้รับพลังงานเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ ATP ได้มาก และกรดไขมันที่มีจำนวนอะตอมของธาตุคาร์บอนเท่ากับคาร์โบไฮเดรตก็สามารถให้พลังงานได้มากกว่าคาร์โบไฮเดรต เนื่องจากมีจำนวนอะตอมของธาตุไฮโดรเจนที่จะปล่อยออกมาได้มากกว่า

คาร์โบไฮเดรตและกรดไขมันหรือไขมันก็ตาม อาจถูกเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่างกันได้โดยปฏิกิริยาย้อนกลับของ acetyl-coenzyme A

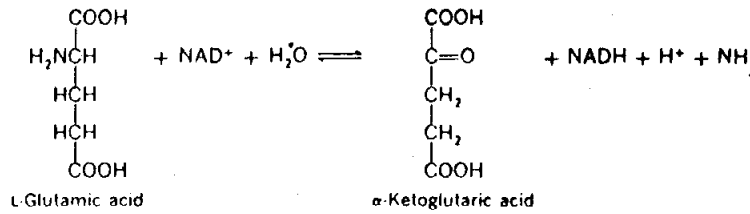


รูปที่ 3—8 The β-oxidation helical scheme for the utilization of fatty acids. The enzymes involved are: (1) fatty acid thiokinases: (2) fatty acyl-CoA dehydrogenases; (3) enoyl hydrase; (4) β-hydroxyacyl dehydrogenase; (5) β-oxoacyl thiolase

การสร้างพลังงานจากกรดแอมิโน

กรดแอมิโนเมื่อมีอยู่ภายในเซลล์เป็นจำนวนมากอย่างเหลือเฟือออาจถูกเปลี่ยนแปลงให้เป็นไขมันและคาร์โบไฮเดรตได้หรืออาจถูกออกซิไดส์ให้ปล่อยพลังงานออกมาได้โดยตรง ตัวอย่างเช่น glutamic acid อาจถูกออกซิไดส์ให้กลายเป็น α-ketoglutaric acid หรือเรียกว่า α -oxoglutaric acid แล้วเข้าสู่ tricarboxylic acid cycle ได้ ดังในรูปที่ 3—5 (α -ketoglutaric acid เป็นส่วนหนึ่งของ tricarboxylic acid cycle)

จาก tricarboxylic acid cycle อาจถูกออกซิไดส์ต่อไปจนได้พลังงาน หรืออาจย้อนกลับจนกลายเป็น acetylcoenzyme A เพื่อเปลี่ยนแปลงเป็นคาร์โบไฮเดรตและไขมันได้ ในทำนองเดียวกัน คาร์โบไฮเดรตและไขมันอาจถูกเปลี่ยนแปลงให้เป็นกรดแอมิโนได้เช่นเดียวกันโดยการย้อนกลับของปฏิกิริยาดังสมการในรูปที่ 3–9



รูปที่ 3–9 Oxidative deamination of glutamic acid

การสังเคราะห์แสง

การสังเคราะห์แสง (photosynthesis) เป็นกระบวนการเมแทบอลิซึมที่สำคัญของพืชซึ่งมีคลอโรฟีลล์ (chlorophyll) โดยใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน พืชส่วนใหญ่มีคลอโรฟีลล์บรรจุอยู่ในคลอโรพลาสต์ (chloroplast) เพื่อการสังเคราะห์แสงโดยเฉพาะ และมีสารซึ่งมีสีชนิดอื่นเช่น carotene สีแดงหรือสีเหลือง และ xantophyll บรรจุอยู่ด้วย ในคลอโรพลาสต์นอกจากมีคลอโรฟีลล์และสารมีสีต่าง ๆ แล้วยังมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสงและ DNA ซึ่งเป็นสารพันธุกรรมก็ถูกพบว่ามีอยู่ในคลอโรพลาสต์ด้วย จึงทำให้เข้าใจว่าคลอโรพลาสต์เป็นเซลล์ของสิ่งมีชีวิตอีกชนิดหนึ่งที่อาศัยอยู่ในเซลล์ของพืช พืชสีเขียวโดยทั่วไปมีคลอโรฟีลล์อยู่ 2 ชนิด คือ คลอโรฟีลล์เอและคลอโรฟีลล์บี แต่คลอโรฟีลล์ชนิดอื่นอาจพบได้ในสาหร่ายหรือแบคทีเรียบางชนิดซึ่งสามารถสังเคราะห์แสงได้

กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. **Photolysis (light reaction)** เป็นขั้นตอนที่คลอโรฟีลล์ดูดซับพลังงานจากแสงแดดแล้วเก็บไว้ในโมเลกุลของ ATP ซึ่งเป็นสารพลังงาน และทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวจนได้ไฮโดรเจนเก็บไว้ใช้ แต่ก๊าซออกซิเจนจะถูกปลดปล่อยออกมา

2. **Carbon dioxide fixation (Dark reaction)** เป็นขั้นตอนที่พืชนำไฮโดรเจนที่ได้จากน้ำไปทำปฏิกิริยารวมตัวกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้พลังงานจากการสลายตัวของ ATP แล้วได้คาร์โบไฮเดรตเก็บไว้ใช้

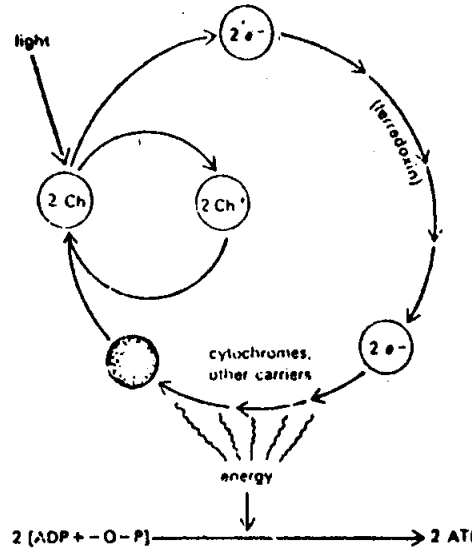
PHOTOLYSIS (LIGHT REACTION)

เมื่อแสงสว่างส่องกระทบกับโมเลกุลของคลอโรฟีลล์ พลังงานจากแสงบางส่วนจะถูกดูดซับไว้ทำให้โมเลกุลของคลอโรฟีลล์ถูกกระตุ้น (excite) มีระดับพลังงานสูงขึ้น และปล่อยอิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงานสูงเรียกว่า อิเล็กตรอนร้อน อิเล็กตรอนมีประจุลบเมื่อหลุดออกจากโมเลกุลของคลอโรฟีลล์จะทำให้คลอโรฟีลล์มีประจุบวก กระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคลอโรฟีลล์โดยการกระตุ้นด้วยแสงถูกเรียกว่า กระบวนการ photoionization ทำให้พืชได้รับพลังงานเพื่อการสังเคราะห์ต่าง ๆ ทั้งหมด อิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงานสูง เมื่อหลุดออกจากโมเลกุลของคลอโรฟีลล์จะถูกรับและส่งผ่านไปในโมเลกุลของสารต่าง ๆ เรียกว่า carrier อิเล็กตรอนเมื่อถูกส่งผ่านไปในโมเลกุลของสารบางอย่าง เช่น cytochrome จะถูกดูดซับพลังงานไว้เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ ATP พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกจากอิเล็กตรอน ถ้าไม่มีกระบวนการจัดเก็บพลังงานไว้ ก็จะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของความร้อนหรือแสงสว่าง ดังนั้น ในบางครั้งก็อาจพบเห็นการเรืองแสงของคลอโรฟีลล์

กระบวนการส่งผ่านอิเล็กตรอนจากคลอโรฟีลล์ไปในโมเลกุลของสารต่าง ๆ อาจแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

1. การส่งผ่านแบบครบวงจร (Cyclic transfer)
2. การส่งผ่านแบบไม่ครบวงจร (Noncyclic transfer)

1. **การส่งผ่านอิเล็กตรอนแบบครบวงจร** อิเล็กตรอนร้อนเมื่อหลุดออกจากโมเลกุลของคลอโรฟีลล์จะวิ่งผ่านไปในโมเลกุลของสารต่าง ๆ ซึ่งเท่าที่ทราบในปัจจุบัน คือ สารประกอบพวก ferredoxin และ cytochrome ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น coenzyme Cytochrome จะดูดซับพลังงานจากอิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านไปเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ ATP จาก ADP และกรดฟอสฟอริก ทำให้อิเล็กตรอนร้อนมีพลังงานลดลง กลายเป็นอิเล็กตรอนเย็นแล้ววิ่งกลับเข้าไปรวมอยู่ในโมเลกุลของคลอโรฟีลล์ตามเดิม ดังนั้น ผลิตผลที่ได้จากการส่งผ่านอิเล็กตรอนแบบครบวงจรจึงมีแต่ ATP อย่างเดียว กระบวนการแบบนี้อาจเรียกว่า cyclic photophosphorylation



รูปที่ 3—10 cyclic photophosphorylation

2. การส่งผ่านอิเล็กตรอนแบบไม่ครบวงจร อิเล็กตรอนร้อนเมื่อหลุดออกจากโมเลกุลของคลอโรฟีลล์จะวิ่งผ่านไปในโมเลกุลของ ferredoxin แล้วเข้ารวมตัวอยู่กับโมเลกุลของ NADP (nicotinamide-adenine dinucleotide phosphate) ทำให้โมเลกุลของ NADP มีประจุลบ และสามารถรวมตัวกับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ซึ่งมีประจุบวกที่แตกตัวออกจากโมเลกุลน้ำได้เป็น NADP H_2 โมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นของเหลวตามธรรมชาติจะแตกตัวเป็นไอออนดังสมการ

$$2\,H_2O \rightleftharpoons \underset{\text{Hydrogen ion}}{2\,H^+} + \underset{\text{Hydroxyl ion}}{2\,OH^-}$$

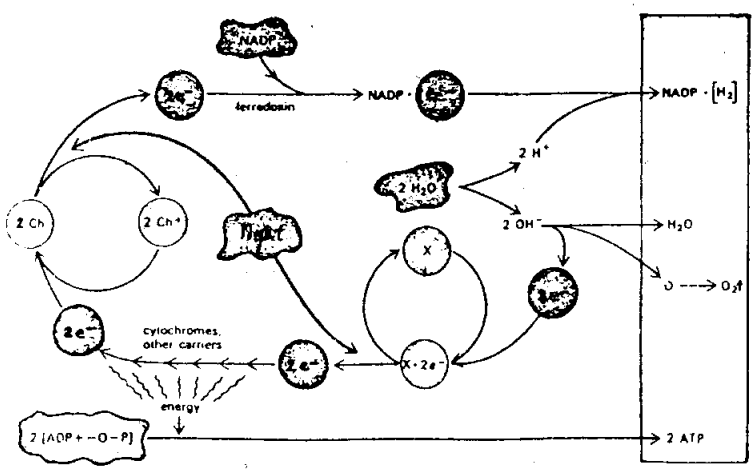
ไฮโดรเจนไอออนเมื่อถูกกำจัดออกไปจะทำให้ไฮดรอกซิลไอออนคงอยู่ไม่ได้ ต้องมีการเปลี่ยนแปลงรวมตัวกันใหม่ได้เป็นโมเลกุลของน้ำและก๊าซออกซิเจนพร้อมทั้งปล่อยอิเล็กตรอนให้หลุดออกมาเป็นอิสระดังสมการ

$$2\,OH^- \longrightarrow H_2O + O + 2\,e^-$$

ออกซิเจนจะถูกปล่อยออกมาในรูปของก๊าซ แต่อิเล็กตรอนจะถูกเก็บไว้ในโมเลกุลของสารมีสีอย่างหนึ่ง (pigment) ซึ่งยังไม่ทราบว่าเป็นสารประกอบพวกใด นักวิทยาศาสตร์บางท่านก็กล่าวว่าเป็นคลอโรฟีลล์บี แต่ยังไม่มีการยืนยันแน่นอน เมื่อโมเลกุลของสีได้รับแสงสว่างอิเล็กตรอนที่รวมอยู่ในโมเลกุลจะถูกปลดปล่อยออกมาเป็นอิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงานสูง แล้ววิ่ง

ผ่านไปในโมเลกุลของ cytochrome ทำให้พืชได้รับพลังงานอยู่ในรูปของ ATP อิเล็กตรอนเมื่อหลุดออกมาจาก cytochrome จะมีพลังงานลดลง กลายเป็นอิเล็กตรอนเย็นวิ่งเข้าสู่โมเลกุลคลอโรฟิลล์ซึ่งมีประจุบวกกลายเป็นคลอโรฟิลล์ที่มีสถานภาพเป็นกลางตามเดิม ดังนั้น ผลผลิตที่ได้รับจากการส่งผ่านอิเล็กตรอนแบบไม่ครบวงจรจึงมีทั้ง $NADP.H_2$ ATP และก๊าซออกซิเจน กระบวนการแบบนี้อาจเรียกว่า noncyclic photophosphorylation.

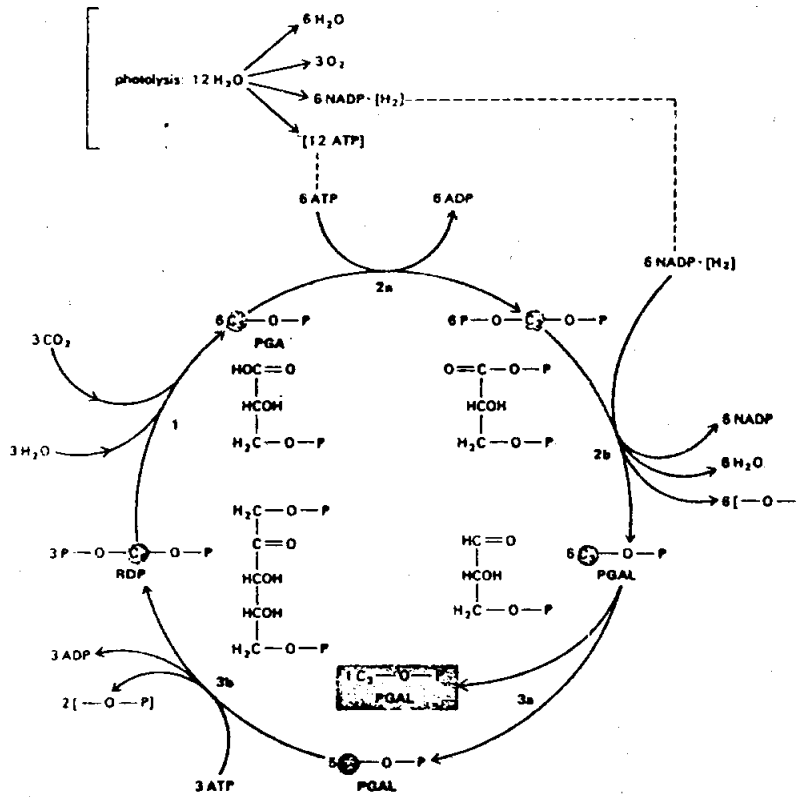
จะเห็นว่าปฏิกิริยาการส่งผ่านอิเล็กตรอนแบบไม่ครบวงจร อิเล็กตรอนที่ปล่อยออกจากโมเลกุลของคลอโรฟิลล์เป็นอิเล็กตรอนคนละตัวกันกับอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าสู่โมเลกุลของคลอโรฟิลล์



รูปที่ 3—11 Noncyclic photophosphorylation

CARBON DIOXIDE FIXATION (DARK REACTION)

คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกพืชสีเขียวนำเข้าไปรวมตัวกับไฮโดรเจนจาก $NADP.H_2$ โดยใช้พลังงานจากการแตกตัวของ ATP ซึ่งได้จาก light reaction เพื่อการสังเคราะห์เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ปฏิกิริยานี้ถูกเรียกว่า dark reaction เนื่องจากไม่ได้เกี่ยวข้องกับแสงโดยตรง ปฏิกิริยาจะเริ่มขึ้นเมื่อ ATP 6 โมเลกุลแตกตัวปล่อยพลังงานและฟอสเฟตให้ไปรวมตัวอยู่กับโมเลกุลของ 3-phosphoglyceric acid (PGA) 6 โมเลกุล ได้เป็น 6 โมเลกุลของ 1, 3-diphosphoglyceric acid แล้วรวมตัวกับไฮโดรเจนจาก $NADP.H_2$ 6 โมเลกุลกลายเป็น 6 โมเลกุลของ 3-phosphoglyceraldehyde (PGAL) แต่ 3-phosphoglyceraldehyde 5 โมเลกุลจะถูกทำให้รวมตัวกันด้วยพลังงานจากการแตกตัวของ ATP ได้เป็น 3 โมเลกุลของ 1, 5-ribulose diphosphate (RDP) ซึ่งสามารถรวมตัวกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำกลายเป็น 3-phosphoglyceric acid 6 โมเลกุลกลับคืนตามเดิม วนเวียนเป็นวัฏจักรดังในรูปที่ 3—12 ส่วน 3-phosphoglyceraldehyde ที่เหลืออยู่หนึ่งโมเลกุล ก็คือคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นผลผลิตของวงจรและพืชอาจนำไปใช้สังเคราะห์เป็น



รูปที่ 3—12 Carbon dioxide fixation

คาร์โบไฮเดรตพวกอื่น เช่น แป้งและน้ำตาลกลูโคสได้ หรือนำไปใช้เป็นอาหารของเซลล์ต่าง ๆ ได้โดยตรง กระบวนการจับยึดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อาจสรุปได้ดังนี้

$$3\,CO_2 + 9\,ATP + 6\,(H_2) \longrightarrow \text{Phosphoglyceraldehyde} + 3\,H_2O + 9\,ADP + 8\,P$$

การใช้พลังงาน

ดังกล่าวมาแล้วว่าพลังงานส่วนใหญ่ในสิ่งมีชีวิตมักถูกนำมาใช้เพื่อการสังเคราะห์สารประกอบโมเลกุลใหญ่ต่าง ๆ ให้กลายเป็นองค์ประกอบของเซลล์ ตัวอย่างการสังเคราะห์สารประกอบโมเลกุลใหญ่ภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตที่น่าสนใจ คือ การสังเคราะห์โปรตีนและกรดนิวคลีอิกต่าง ๆ เป็นต้น

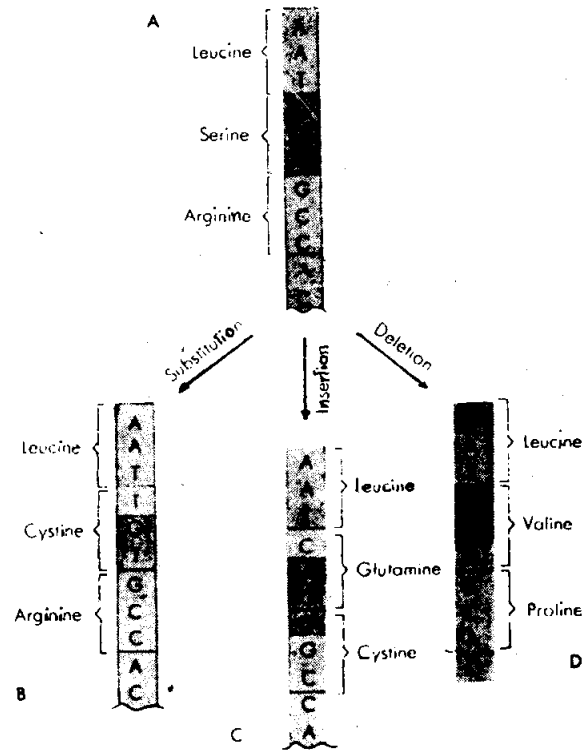
การสังเคราะห์โปรตีน

เนื่องจากคุณสมบัติลักษณะและความสามารถของสิ่งมีชีวิตถูกแสดงออกโดยโปรตีนต่าง ๆ ที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตนั้น เช่น เอนไซม์ ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ และโปรตีนซึ่งทำหน้าที่

เป็นโครงสร้างของร่างกาย เป็นต้น ไม่มีสิ่งมีชีวิตใดดำรงชีพอยู่ได้โดยปราศจากโปรตีน เป็นที่ทราบกันแล้วว่า โปรตีนประกอบด้วยกรดแอมิโนชนิดต่าง ๆ เรียงต่อกันอย่างมีระเบียบและลำดับแน่นอน โดยการควบคุมของจีน (gene) หรือ DNA ช่วงหนึ่งในเส้นโครโมโซม DNA ช่วงที่ใช้ในการกำหนดลำดับการเรียงตัวของกรดแอมิโนให้เป็นเส้นพอลิเพปไทด์ที่สมบูรณ์ได้หนึ่งเส้นจะถูกถือว่าเป็นหนึ่งจีน

ลำดับการเรียงตัวของกรดแอมิโนในเส้นพอลิเพปไทด์ถูกกำหนดโดยลักษณะการเรียงตัวของ nucleotide ซึ่งทำหน้าที่เป็นรหัสอยู่ในจีน แต่เนื่องจาก nucleotide ของ DNA มีเพียง 4 ชนิด คือ nucleotide ซึ่งมีเบสเป็น adenine (A), thymine (T), cytosine (C) และ guanine (G) จึงไม่เพียงพอที่เซลล์จะใช้ nucleotide แต่ละชนิดเป็นรหัสกำหนดสำหรับกรดแอมิโนตัวใดตัวหนึ่งได้โดยเฉพาะ เนื่องจากกรดแอมิโนที่สำคัญมีถึงประมาณ 20 ชนิด อย่างเช่นถ้า nucleotide ชนิดหนึ่งถูกใช้เป็นรหัสกำหนดสำหรับกรดแอมิโนอย่างหนึ่ง จีนก็จะสามารถควบคุมลำดับการเรียงตัวของกรดแอมิโนได้เพียง 4 ชนิดเท่านั้น แต่ถ้ากำหนดให้ nucleotide ที่เรียงต่อกันอยู่ในเส้น DNA ทุก ๆ สองโมเลกุลเป็นรหัสสำหรับกรดแอมิโนชนิดหนึ่ง จะทำให้ nucleotide ทั้ง 4 ชนิดมีโอกาสเรียงต่อกันเป็นรหัสได้ 16 แบบ ซึ่งก็ไม่เพียงพอที่จะเป็นรหัสสำหรับกรดแอมิโนได้ทั้ง 20 ชนิด ดังนั้น เซลล์จึงกำหนดให้ nucleotide ที่เรียงต่อกันอยู่ในเส้น DNA ทุก ๆ สามโมเลกุลเป็นรหัสสำหรับกรดแอมิโนชนิดหนึ่ง ๆ จะทำให้ได้รหัสถึง 64 แบบ ซึ่งมากเกินพอสำหรับกรดแอมิโนทั้ง 20 ชนิด แต่กรดแอมิโนส่วนมากมักมีรหัสมากกว่าหนึ่งรหัส และการเรียงต่อกันบางแบบของ nucleotide 3 โมเลกุล ก็อาจไม่ถูกใช้เป็นรหัสสำหรับกรดแอมิโน แต่มีความหมายเป็นอย่างอื่น ดังนั้น จีนที่ใช้ในการควบคุมการสังเคราะห์เส้นพอลิเพปไทด์เส้นหนึ่งจึงมีจำนวนโมเลกุลของ nucleotide มากกว่าจำนวนโมเลกุลของกรดแอมิโนในเส้นพอลิเพปไทด์เส้นหนึ่ง ที่จะถูกสังเคราะห์ขึ้นอย่างน้อย 3 เท่า เช่นถ้าเส้นพอลิเพปไทด์เส้นหนึ่งมีกรดแอมิโนประกอบอยู่ 200 โมเลกุล จีนที่ใช้ควบคุมการสังเคราะห์เส้นพอลิเพ็ปไทด์นี้จะต้องประกอบด้วย nucleotide อย่างน้อย 600 โมเลกุล เนื่องจากรหัสสำหรับกรดแอมิโนประกอบด้วย nucleotide 3 โมเลกุล ดังนั้น จึงเรียกรหัสแบบนี้ว่า triplet code ลำดับการเรียงตัวของ triplet code เป็นสิ่งกำหนดลำดับการเรียงตัวของกรดแอมิโนในเส้นพอลิเพปไทด์ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงลำดับการเรียงตัวของ nucleotide หรือของ triplet code ในเส้น DNA อย่างเช่น กรณีที่เกิดการผ่าเหล่า (mutation) ขึ้นในสิ่งมีชีวิต ดังแสดงเป็นแผนภูมิในรูปที่ 3–13 ก็อาจทำให้ลำดับการเรียงตัวของกรดแอมิโนในเส้นพอลิเพปไทด์ที่จะสังเคราะห์ขึ้นโดยจีนหรือ DNA ช่วงนี้เปลี่ยนแปลงไปได้ จึงทำให้ได้โปรตีนซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติและลักษณะของสิ่งมีชีวิตเปลี่ยนแปลงไปจากเผ่าพันธุ์เดิม

A schematic illustration of DNA base changes resulting in mutations. (A) The sequences of bases in three codons and the corresponding amino acid; (B) substitution of thymine (T) for adenine (A) at the fourth position may occur by replication error, the result being a change in the second amino acid in the sequence; i.e., cystine replaces serine; (C) insertion of an additional nucleotide between the third and fourth bases results in a frame shift in reading the codons so that all the codons following the insertion are altered and all amino acids changed; (D) loss or deletion of a nucleotideide likewise results in a frame shift in reading the codons by creating a new series of triplets, altering the sequence of amino acids.

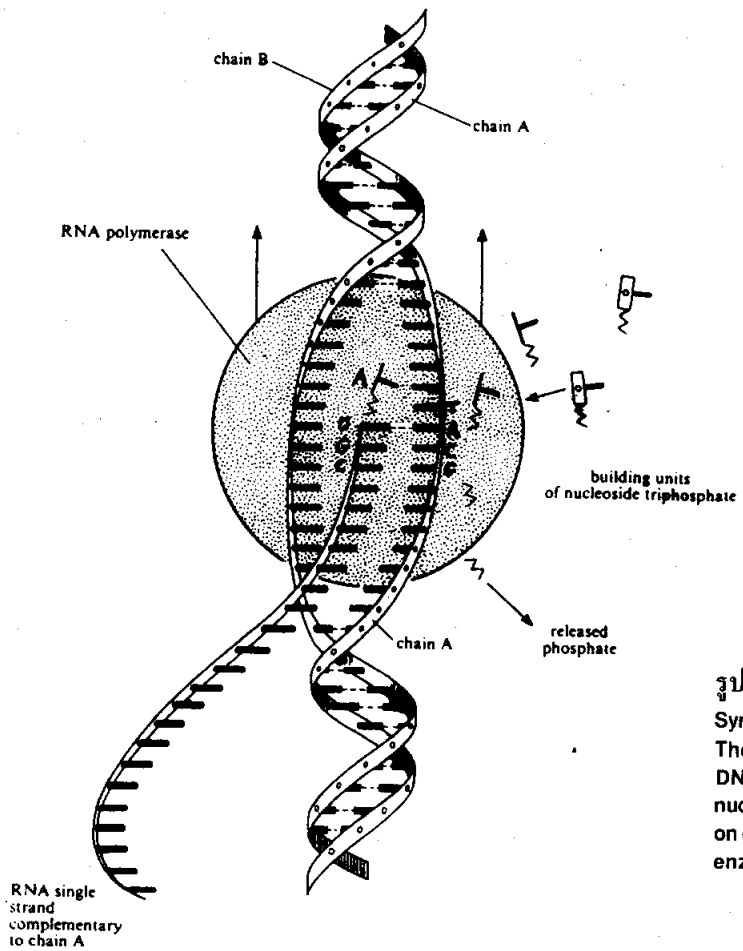


รูปที่ 3—13 แผนภูมิแสดงลำดับการเรียงตัวของ triplet code ในเส้น DNA สำหรับกำหนดลำดับการเรียงตัวของกรดแอมิโนในเส้นพอลิเพปไทด์

กระบวนการสังเคราะห์โปรตีนภายในเซลล์จะเริ่มต้นด้วยขั้นตอนของการคัดลอกรหัส ซึ่งเรียกว่า transciption เป็นขั้นตอนซึ่งเซลล์ใช้เส้น DNA หรือโครโมโซมในนิวเคลียสเป็นแม่พิมพ์ (template) เพื่อการสังเคราะห์ mRNA เนื่องจากเส้น DNA ในโครโมโซมขดพันกันเป็นเกลียวเส้นคู่และยึดเหนี่ยวกันด้วยไฮโดรเจนบอนด์ระหว่างเบสของเส้น DNA ทั้งสอง ดังนั้นเซลล์จึงทำให้ไฮโดรเจนบอนด์ที่ยึดอยู่ระหว่างเส้น DNA ทั้งสองหลุดออกจากกัน แล้วถ่างออกคล้ายกับการแหกเกลียวเชือกตรงบริเวณที่มียีนซึ่งต้องการ ดังรูปที่ 3—14

ช่วงหนึ่งของ DNA เส้นหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นจีนควบคุมการสังเคราะห์เส้นพอลิเพบไทด์ที่ต้องการจะถูกใช้เป็นแม่พิมพ์สังเคราะห์ mRNA เพื่อนำรหัสไปกำหนดลำดับการเรียงตัวของกรดแอมิโนในเส้นพอลิเพปไทด์ที่จะถูกสังเคราะห์ขึ้นในไซโทพลาซึม (cytoplasm) ของเซลล์ ในการสังเคราะห์ mRNA เซลล์จะนำเอา ribonucleotide อิสระซึ่งอยู่ในรูปของ nucleoside triphosphase เช่น ATP, CTP, GTP และ UTP ซึ่งเป็นสารประกอบที่พลังงานสูง มาเรียงต่อกันเป็นเส้นขนานกับ DNA โดยที่เบสของกรด nucleic ทั้งสองซึ่งอยู่ตรงข้ามสามารถยึดเหนี่ยวกันได้ด้วยไฮโดรเจนบอนด์ ตามกฎของการเข้าคู่เฉพาะต่อกัน คือ G คู่กับ C, A คู่กับ T หรือ U ดังนั้น จึง

กล่าวได้ว่าลำดับการเรียงตัวของ nucleotide ในเส้น DNA เป็นสิ่งกำหนดลำดับการเรียงตัวของ nucleotide ในเส้น RNA ทำให้ mRNA สามารถนำรหัสจากจีนไปกำหนดลำดับการเรียงตัวของกรดแอมิโนและความยาวของเส้นพอลิเพปไทด์ได้ Triplet code ซึ่งเป็นรหัสเรียงต่อกันอยู่ในเส้น mRNA จะถูกเรียกว่า codon (code + on) การสังเคราะห์ RNA พวกอื่น เช่น t-RNA และ r-RNA ก็กระทำในทำนองเดียวกัน การเชื่อมต่อกันของ nucleotide เพื่อให้ได้เส้น RNA หรือ DNA จำเป็นต้องใช้พลังงานซึ่งได้จากการแตกตัวของฟอสเฟตออกจากโมเลกุลของ nucleoside triphosphase



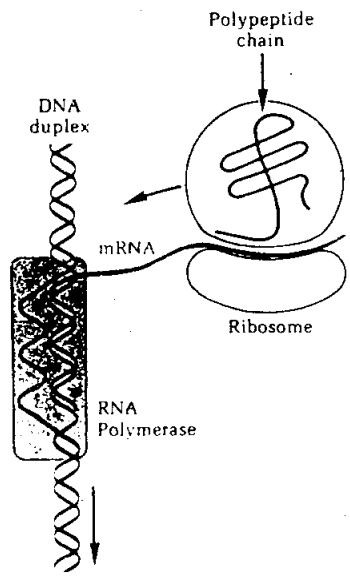
รูปที่ 3—14

Synthesis of RNA on DNA as a template. The double helix again unwinds as in DNA synthesis and a chain of ribonucleotide building units is synthesized on one of the DNA strands. The specific enzyme RNA polymerase is required

เมื่อเส้น mRNA ถูกสังเคราะห์ขึ้นภายในนิวเคลียสแล้วจะถูกส่งออกมาอยู่ในไซโทพลาซึมเพื่อใช้ในการสังเคราะห์เส้นพอลิเพบไทด์ ขั้นตอนนี้ถูกเรียกว่าขั้นตอนของการแปลรหัส (translation) mRNA จะถูกสอดเข้าไปใน ribosome เพื่อทำให้เหยียดตรงเป็นช่วง ๆ คล้ายเส้นเทปบันทึกเสียง ในช่วงที่ทาบผ่านหัวแม่เหล็ก t-RNA จะอ่านรหัสได้ถูกต้องเมื่อเส้น mRNA เหยียดตรง เมื่อ ribosome เคลื่อนที่ไปตามเส้น mRNA จากปลายข้างหนึ่งได้เป็นระยะทางทุก ๆ

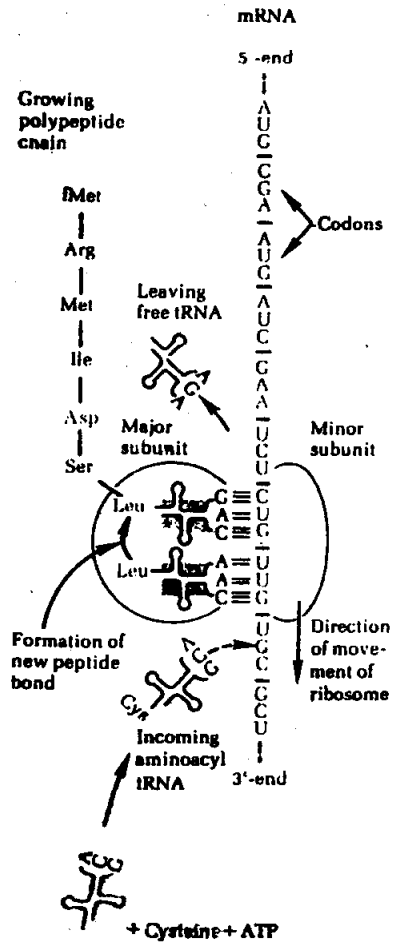
3 nucleotide หรือ 1 codon t-RNA ซึ่งมี anticodon เป็น triplet code เข้าคู่เฉพาะยึดเหนี่ยวกันได้ด้วยไฮโดรเจนบอนด์กับ codon นั้น จะนำเอากรดแอมิโนมาเรียงต่อกันเป็นลำดับตามที่ถูกกำหนดไว้ด้วย codon บน mRNA

t-RNA ในเซลล์ส่วนมากมักอยู่ในสภาพที่ถูกเกาะเกี่ยวไว้ด้วยกรดแอมิโนในลักษณะเป็นสารประกอบซับซ้อนเรียกว่า aminoacyl t-RNA ปฏิกิริยาเชื่อมต่อกันระหว่าง t-RNA กับกรดแอมิโนต้องใช้พลังงานจากการแตกตัวของ ATP กรดแอมิโนแต่ละชนิดจะเกาะติดได้กับ t-RNA ซึ่งมี anticodon เฉพาะอย่างเท่านั้น เช่น กรดแอมิโน cysteine ในเซลล์แบคทีเรีย *Escherichia coli* จะเกาะติดได้กับ t-RNA ซึ่งมี anticodon เป็น ACG หรือ ACA เท่านั้น ดังนั้น จึงเป็นเหตุทำให้ลำดับการเรียงตัวของกรดแอมิโนถูกบังคับได้ด้วยลำดับการเรียงตัวของ codon บน mRNA



รูปที่ 3—15 Functional complex of DNA duplex, mRNA, RNA polymerase, and ribosome in bacterial cell

เมื่อ t-RNA นำกรดแอมิโนมาเรียงชิดติดกันอยู่ใน ribosome ดังแสดงในรูปที่ 3—16 กรดแอมิโนจะถูกทำให้เชื่อมต่อกันเป็นเส้นพอลิเพบไทด์ด้วยเอนไซม์แล้ว t-RNA จะถูกปลดปล่อยให้เป็นอิสระเพื่อไปเกาะเกี่ยวกับกรดแอมิโนที่เฉพาะต่อกันใหม่ได้อีก เมื่อ ribosome ถูกทำให้เคลื่อนที่ต่อไปจนตลอดเส้น mRNA ด้วยพลังงานจากการแตกตัวของ ATP จะทำให้มีการสังเคราะห์เป็นเส้นพอลิเพบไทด์ได้อย่างสมบูรณ์ โดยมีลำดับการเรียงตัวและจำนวนโมเลกุลของกรดแอมิโนหรือความยาวของเส้นพอลิเพบไทด์ตามที่จีนกำหนดไว้ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า



รูปที่ 3—16 Major steps in protein synthesis

จีนเป็นสิ่งกำหนดโครงสร้างในระดับที่หนึ่ง (primary structure) ของโปรตีน เส้นพอลิเพบไทด์หรือโครงสร้างในระดับที่หนึ่งของโปรตีนที่สังเคราะห์ได้ต่อมาอาจจัดรูปแบบตัวเองเป็นโครงสร้างในระดับต่าง ๆ คือ โครงสร้างในระดับที่สอง ระดับที่สาม และระดับที่สี่ ได้ตามลำดับแล้วแต่กรณี โดยการเหนี่ยวนำของโครงสร้างในระดับที่หนึ่งซึ่งจีนได้กำหนดไว้แล้วแต่แรก

เนื่องจากจีนเป็นสิ่งกำหนดลำดับการเรียงตัวของกรดแอมิโนและความยาวของเส้นพอลิเพบไทด์ดังกล่าวมาแล้ว ดังนั้น จีนจึงเป็นสิ่งกำหนดพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต เพราะลักษณะคุณสมบัติและความสามารถของสิ่งมีชีวิตถูกแสดงออกมาได้ด้วยโปรตีน เช่น เป็นเอนไซม์ใช้สังเคราะห์หรือย่อยสลายสิ่งต่าง ๆ และเป็นโครงสร้างของร่างกาย เป็นต้น ถ้าสิ่งมีชีวิตไม่มีจีนเป็นรหัสเพื่อการสังเคราะห์โปรตีนหรือเอนไซม์ชนิดใด สิ่งมีชีวิตก็ไม่อาจสร้างโปรตีนหรือเอนไซม์ชนิดนั้นได้ ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงจีนหรือ DNA ซึ่งไม่ได้เกิดขึ้นเนื่องจากการ

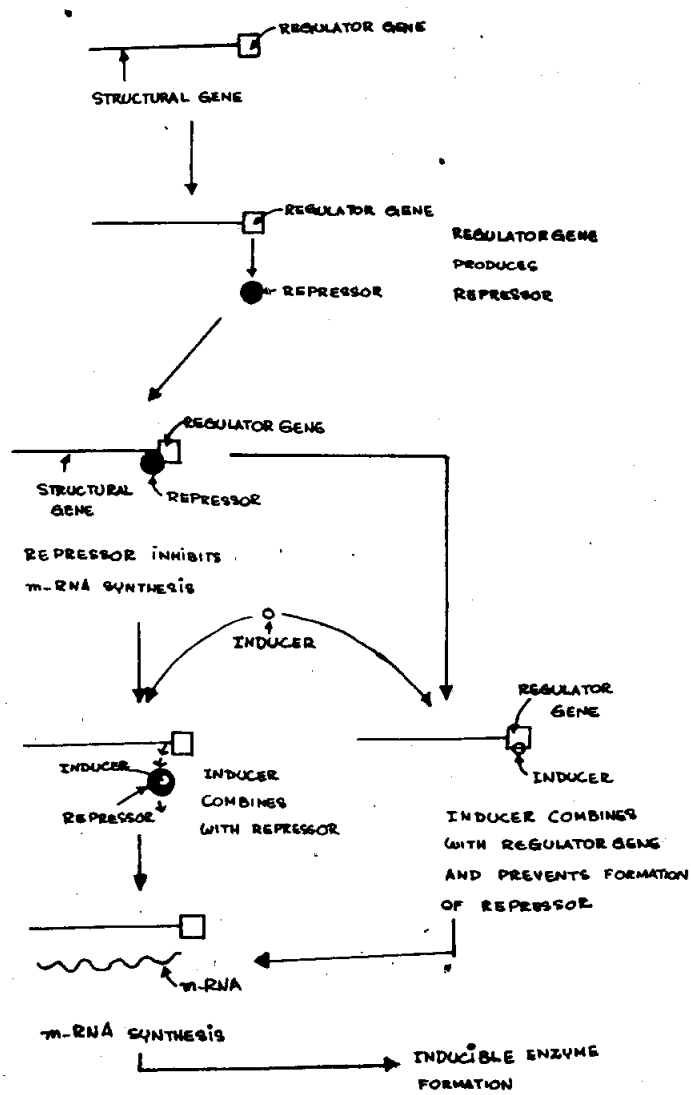
ผสมพันธุ์กัน ทั้งในแง่ของลำดับการเรียงตัว หรือความเสียหายจนใช้การไม่ได้ หรือการขาดหายไปและมากเกินของ nucleotide จะทำให้ mRNA ได้รหัสที่ผิดปกติ จึงเกิดการสังเคราะห์โปรตีนหรือเส้นพอลิเพปไทด์ที่มีโครงสร้างและการทำงานผิดแปลกไป หรือใช้การไม่ได้ เป็นเหตุทำให้ลักษณะคุณสมบัติและความสามารถของสิ่งมีชีวิตผิดแปลกไปจากเผ่าพันธุ์เดิม ปรากฏการณ์เช่นนี้ถูกเรียกว่า การผ่าเหล่า (mutation)

การควบคุมการทำงานของจีน

ถึงแม้ว่าเซลล์มีจีนเพื่อใช้ในการสังเคราะห์โปรตีนต่าง ๆ มากมาย แต่จีนบางอย่างก็ไม่ได้มีการทำงานอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากเซลล์อาจมีโปรตีนตามต้องการเพียงพอแล้ว หรือเอนไซม์บางอย่างอาจมีความจำเป็นต่อเซลล์ในบางขณะหรือบางหน้าที่เท่านั้น ทั้งที่เซลล์ทุกเซลล์ในร่างกายมีจีนเพื่อการสังเคราะห์โปรตีนหรือเอนไซม์ต่าง ๆ เหมือนกัน แต่เซลล์ในแต่ละส่วนของร่างกายอาจมีหน้าที่แตกต่างกัน เช่น เซลล์กล้ามเนื้อกับเซลล์ของกระเพาะลำไส้ต่างก็มีจีนเพื่อการสังเคราะห์เอนไซม์ในการย่อยอาหาร แต่จีนเดียวกันนี้ในเซลล์กล้ามเนื้อกลับไม่ทำงานเนื่องจากการย่อยอาหารไม่ใช่หน้าที่ของเซลล์กล้ามเนื้อ แสดงว่าเซลล์ต้องมีกลไกบางอย่างเพื่อควบคุมการทำงานของจีน

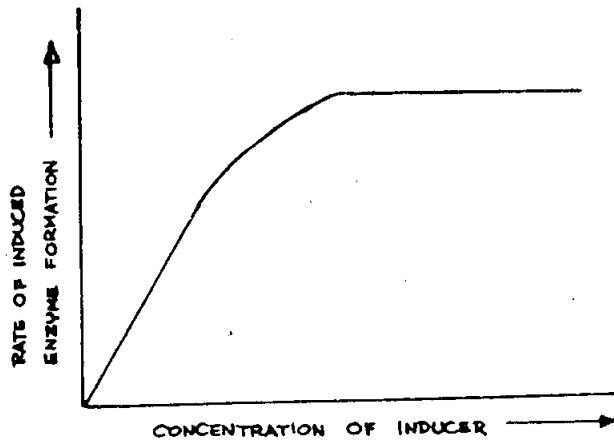
จากการศึกษาแบคทีเรียบางชนิดซึ่งเจริญเติบโตได้ทั้งในน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลแลกโทส พบว่าเมื่อนำแบคทีเรียซึ่งเคยเจริญเติบโตในอาหารที่มีแต่น้ำตาลกลูโคสมาเลี้ยงในอาหารที่มีแต่น้ำตาลแลกโทส แบคทีเรียจะหยุดชะงักการเจริญเติบโตไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง แล้วจึงเจริญเติบโตต่อไปตามปกติ ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่แบคทีเรียเจริญเติบโตอยู่ในอาหารซึ่งมีแต่น้ำตาลกลูโคส แบคทีเรียจะไม่สร้างเอนไซม์สำหรับย่อยสลายน้ำตาลแลกโทส ต่อมาเมื่อย้ายมาเพาะเลี้ยงในอาหารซึ่งมีแต่น้ำตาลแลกโทสจึงหยุดชะงักการเจริญเติบโตไว้ชั่วระยะเวลาหนึ่ง เพื่อรอให้เซลล์สร้างเอนไซม์สำหรับย่อยสลายน้ำตาลแลกโทสได้เสียก่อน แบคทีเรียจึงสามารถใช้น้ำตาลแลกโทสเพื่อการเจริญเติบโตต่อไปได้ แสดงว่าทั้งที่แบคทีเรียมีจีนเพื่อสร้างเอนไซม์ย่อยสลายน้ำตาลแลกโทส แต่ขณะที่แบคทีเรียเจริญเติบโตอยู่ในอาหารซึ่งไม่มีน้ำตาลแลกโทส จีนสำหรับสร้างเอนไซม์ย่อยสลายน้ำตาลแลกโทสไม่อาจทำงานได้ แต่เมื่อย้ายแบคทีเรียมาเลี้ยงในอาหารซึ่งมีน้ำตาลแลกโทส น้ำตาลแลกโทสจะกระตุ้นให้จีนสร้างเอนไซม์สำหรับย่อยน้ำตาลแลกโทสได้ ดังนั้น น้ำตาลแลกโทสจึงถูกจัดเป็นตัวกระตุ้น (inducer) ให้มีการสร้างเอนไซม์ เอนไซม์ที่อาจถูกกระตุ้นให้มีการสังเคราะห์ขึ้นมาได้เป็นครั้งคราวจะถูกเรียกว่า inducible enzyme

เชื่อกันว่าปรากฏการณ์การเกิด inducible enzyme เกี่ยวข้องกับจีน 2 ส่วน คือ จีนส่วนแรกทำหน้าที่ในการสังเคราะห์ mRNA เพื่อสร้างเอนไซม์โดยตรง จึงถูกเรียกว่า จีนโครงสร้าง (structural gene) และจีนอีกส่วนหนึ่งทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของจีนโครงสร้าง เรียกว่าจีนควบคุม (regulator gene) จีนควบคุมจะสร้างสารยับยั้งเรียกว่า repressor เป็นสารประกอบพวกโปรตีนเพื่อยับยั้งการทำงานของจีนโครงสร้าง เมื่อน้ำตาลแลกโทสซึ่งเป็นตัวกระตุ้นเข้าไปในเซลล์จะรวมตัวกับจีนควบคุม ทำให้จีนควบคุมไม่สามารถสร้างสารยับยั้งได้ และน้ำตาลแลกโทสยังรวมตัวกับสารยับยั้งโดยตรงทำให้ไม่อาจยับยั้งการทำงานของจีนโครงสร้างได้ จีนโครงสร้างจึงสามารถสร้าง mRNA เพื่อสังเคราะห์โปรตีนหรือเอนไซม์ได้



รูปที่ 3—17 การควบคุมการทำงานของจีน

อัตราการสร้าง inducible enzyme ยังขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของสารที่เป็นตัวกระตุ้น ถ้ามีสารซึ่งเป็นตัวกระตุ้นอยู่มาก เอนไซม์ก็จะถูกสร้างขึ้นมาเป็นจำนวนมากตามไปด้วย แต่ก็อยู่ในขอบเขตจำกัด คือ เมื่อมีความเข้มข้นของสารซึ่งเป็นตัวกระตุ้นอยู่มากถึงระดับหนึ่งแล้ว ก็ไม่อาจเพิ่มอัตราการสร้างเอนไซม์ให้สูงมากขึ้นไปอีกได้โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารที่เป็นตัวกระตุ้น

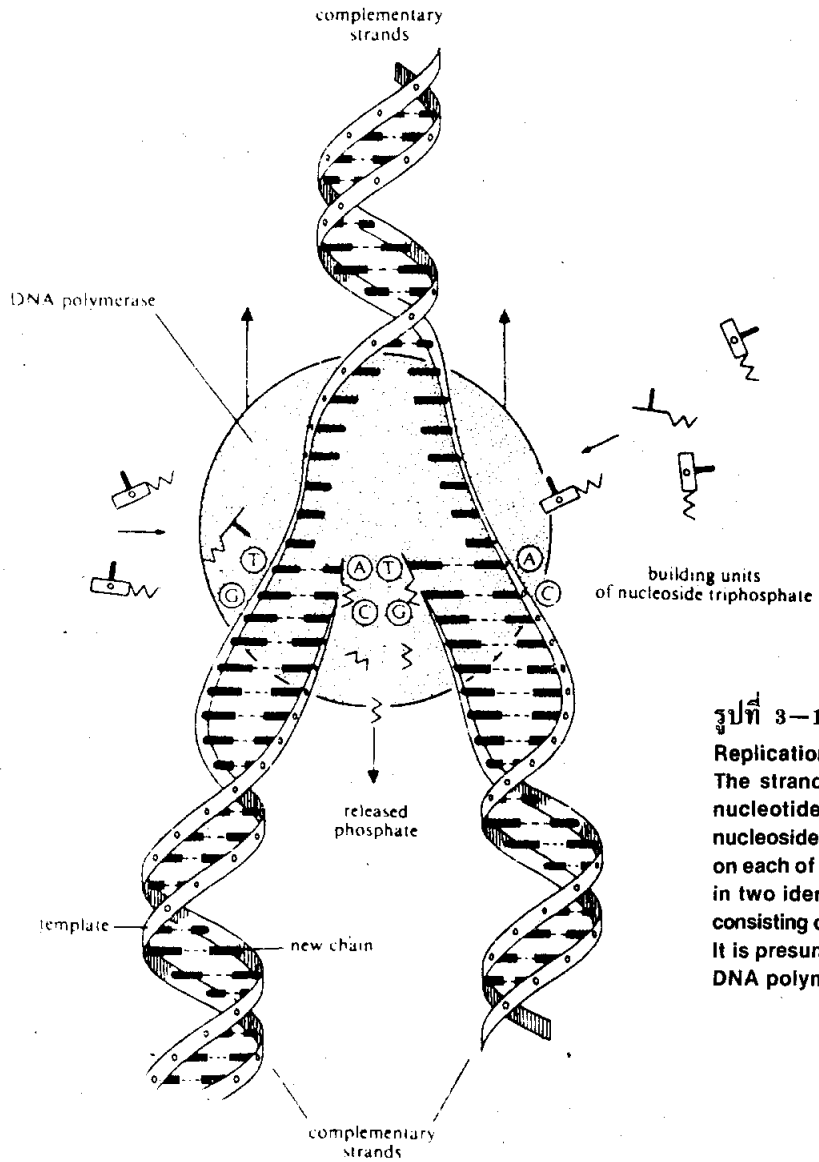


รูปที่ 3—18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกระตุ้นกับอัตราการสร้างเอนไซม์

สารที่เป็นตัวกระตุ้นให้สร้างเอนไซม์จะมีความเฉพาะเจาะจงต่อเอนไซม์ที่ถูกสร้างขึ้นเป็นอย่างมาก คือ เอนไซม์หนึ่งอาจถูกกระตุ้นให้สร้างขึ้นมาได้ด้วยสารที่เป็นตัวกระตุ้นเฉพาะชนิดใดชนิดหนึ่งหรือสารที่ใกล้เคียงกันมากเท่านั้น ทั้งที่สารซึ่งเป็นตัวกระตุ้นอาจไม่ถูกทำให้มีการเปลี่ยนแปลงหรือย่อยสลายไปได้ด้วยเอนไซม์ที่ตนเองกระตุ้นขึ้นมา การสร้าง inducible enzyme เป็นตัวอย่างอันหนึ่งที่แสดงให้เห็นว่าเซลล์จะต้องมีวิธีการควบคุมการทำงานของจีน

การสังเคราะห์ DNA

การสังเคราะห์ DNA หรือโครโมโซมภายในเซลล์ก็เช่นเดียวกันกับการสังเคราะห์ RNA แต่ nucleotide ที่นำมาเรียงต่อกันนั้นเป็น nucleotide พวก deoxyribonucleotide และใช้ thymine base แทน uracil สิ่งมีชีวิตจะสังเคราะห์ DNA เมื่อเริ่มมีการแบ่งเซลล์เพื่อถ่ายทอดไปยังเซลล์ลูกหลาน ทำให้มีคุณสมบัติลักษณะและความสามารถเหมือนกับเซลล์พ่อแม่ ในการสังเคราะห์ DNA ซึ่งเป็นเส้นคู่ เซลล์จำเป็นต้องแยกเส้น DNA ทั้งสองให้แยกห่างออกจากกันแล้วใช้แต่ละเส้นเป็นแม่พิมพ์กำหนดลำดับการเรียงตัวของ nucleotide ในเส้น DNA ที่จะถูกสร้างขึ้นมาใหม่ โดยเริ่มจากปลายข้างหนึ่ง nucletide อิสระซึ่งอยู่ในรูปของ nucleoside tri-



รูปที่ 3—19

Replication of the DNA double helix. The strands unwind and a new polynucleotide chain is built up from nucleoside triphosphate building units on each of the old chains. This results in two identical double helices, each consisting of one old and one new chain. It is presumed that a specific enzyme, DNA polymerase, is involved

phosphate จะถูกนำมาเรียงต่อกันเป็นเส้นขนานกับ DNA เส้นเดิม ตามกฎของการเข้าคู่กันด้วยไฮโดรเจนบอนด์ของเบส ดังนั้นจึงทำให้ DNA เส้นใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นมีลำดับการเรียงตัวของ nucleotide เหมือนกันกับ DNA เส้นเดิมที่ถูกแยกออกไปและเคยเป็นเส้นคู่ขนานกับ DNA เส้นที่ใช้เป็นแม่พิมพ์ เมื่อ DNA เส้นใหม่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจนสมบูรณ์แล้ว จะทำให้เซลล์มีโครโมโซม 2 ชุดซึ่งเหมือนกัน และมี DNA เป็นเส้นคู่ ดังรูปที่ 3—19

เมื่อเซลล์มีโครโมโซมเป็น 2 ชุด เซลล์ก็จะเริ่มทำการแบ่งตัวได้ลูกหลานซึ่งมีโครโมโซมเหมือนกัน