



หนังสือชุดเทคนิคการเรียนรู้ชีววิทยา

กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์



การรักษาดุลยภาพ ของร่างกาย มนุษย์และสัตว์

ประกอบด้วย

-  ระบบย่อยอาหาร
-  ระบบหายใจ
-  ระบบหมุนเวียนเลือดและน้ำเหลือง
-  ระบบขับถ่าย
-  ระบบสืบพันธุ์
-  แบบทดสอบการรักษาดุลยภาพของร่างกายมนุษย์และสัตว์

เทคนิคการเรียนชีววิทยา : การรักษาดุลยภาพของร่างกายมนุษย์และสัตว์

เขียนโดย ฝ่ายวิชาการ สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์

ISBN (E-book) 2026-0811-0092-5

จำหน่ายอีบุ๊ก สิงหาคม 2569

ราคา 115 บาท

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ (ฉบับเพิ่มเติม) พ.ศ. 2558

เนื้อหา รูปเล่ม และภาพประกอบในหนังสือเล่มนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์
ห้ามคัดลอก ยกเว้นได้รับอนุญาต

บรรณาธิการ กวียา เนาวประทีป

ปก/รูปเล่ม ฝ่ายศิลปกรรม สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์

จัดทำโดย

ทจก. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์

เลขที่ 45 ซอยจรัญสนิทวงศ์ 40 ถนนจรัญสนิทวงศ์

แขวงบางยี่ขัน เขตบางพลัด กรุงเทพฯ 10700

โทรศัพท์ : 0-2433-7755-7 โทรสาร : 0-2433-7703

จัดจำหน่ายในรูปแบบสิ่งพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์โดย

บริษัท เกรท มีเดีย เอเจนซี จำกัด

85 ซอยบรมราชชนนี 75 แขวงบางระมาด เขตตลิ่งชัน กรุงเทพฯ 10170

โทร. 0-2433-7755-7, 086-330-6425

คำนำ

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า เป้าหมายของการเรียนรู้กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551 นั้นมุ่งให้ผู้เรียนได้เรียนรู้วิทยาศาสตร์ที่เน้นการเชื่อมโยงความรู้กับกระบวนการ มีทักษะสำคัญในการค้นคว้าและสร้างองค์ความรู้โดยใช้กระบวนการในการสืบเสาะหาความรู้และแก้ปัญหาที่หลากหลายให้ผู้เรียนมีส่วนร่วมในการเรียนรู้ทุกขั้นตอน มีการทำกิจกรรมอย่างหลากหลายด้วยการลงมือปฏิบัติจริงที่เหมาะสมกับแต่ละระดับชั้น

วิชาชีววิทยาก็เป็นแขนงหนึ่งของกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ผู้เขียนจึงได้จัดทำหนังสือ **เทคนิคการเรียนรู้ชีววิทยา : การรักษาดุลยภาพของร่างกายมนุษย์และสัตว์** เล่มนี้ขึ้นมา เพื่อให้ผู้เรียนรู้จักเทคนิคในการเรียนชีววิทยาให้เก่งได้ด้วยตนเอง ด้วยการนำไปอ่านและฝึกทำแบบฝึกหัดและแบบทดสอบที่มีอยู่อย่างหลากหลาย เฉพาะเรื่องที่ตนเองสนใจหรือยังไม่เข้าใจอย่างถ่องแท้ให้เข้าใจมากยิ่งขึ้น และยังสามารถนำไปใช้เสริมกับการเรียนกวดวิชาตามสถาบันต่างๆ อีกทั้งครู-อาจารย์ผู้สอนก็สามารถนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอนได้ด้วย

หวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้เรียน ครู-อาจารย์ผู้สอนได้ตามสมควร หากมีข้อบกพร่องหรือผิดพลาดประการใดผู้เขียนต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ด้วยความปรารถนาดี

ฝ่ายวิชาการ สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์

สารบัญ

1. ระบบย่อยอาหาร	5
1.1 การย่อยอาหาร	5
1.2 การสลายสารอาหารระดับเซลล์	15
2. ระบบหายใจ	35
2.1 โครงสร้างที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนแก๊สของสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวและสัตว์	35
2.2 โครงสร้างที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนแก๊สของมนุษย์	37
3. ระบบหมุนเวียนเลือดและน้ำเหลือง	53
3.1 การลำเลียงสารในร่างกายของสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวและสัตว์	53
3.2 การลำเลียงสารในร่างกายมนุษย์	54
3.3 ระบบน้ำเหลือง	61
4. ระบบขับถ่าย	73
4.1 การขับถ่ายของสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวและสัตว์บางชนิด	73
4.2 การขับถ่ายของมนุษย์	74
5. ระบบสืบพันธุ์	86
5.1 การสืบพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวและสัตว์บางชนิด	86
5.2 การสืบพันธุ์ของมนุษย์	89
5.3 การเจริญเติบโตของมนุษย์และสัตว์	97
แบบทดสอบการรักษาดุลยภาพของร่างกายมนุษย์และสัตว์	110

1. ระบบย่อยอาหาร

1.1 การย่อยอาหาร

การย่อยอาหาร (Digestion) เป็นกระบวนการแปรสภาพสารอาหารโมเลกุลใหญ่ให้เล็กลงจนเซลล์สามารถดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้

ก. การย่อยอาหารของจุลินทรีย์

1. **เห็ด รา และแบคทีเรีย** มีการย่อยอาหารภายนอกเซลล์โดยหลั่งเอนไซม์ออกมาภายนอกเซลล์เพื่อย่อยสลายซากสิ่งมีชีวิตให้มีโมเลกุลเล็กแล้วดูดซึมเข้าสู่เซลล์

2. **โพรทิสต์** เป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวจึงไม่มีอวัยวะพิเศษสำหรับย่อยหรือสะสมอาหาร อาหารที่ถูกนำเข้าสู่เซลล์จะสะสมในถุงอาหาร (Food vacuole) ซึ่งจะถูกละลายโดยเอนไซม์จากไลโซโซม แล้วถูกดูดซึมเข้าสู่ไซโทพลาซึมไปทั่วเซลล์ เช่น อะมีบา (Amoeba) มีส่วนของไซโทพลาซึมที่เรียกว่า ชูโดพอดียม (Pseudopodium) ยื่นออกไปโอบอาหาร พารามีเซียม (Paramecium) ใช้ซิเลีย (Cilia) โบกพัดอาหารเข้าสู่ร่องปาก (Oral groove) ยูกลีนาที่มีช่องรับอาหารบริเวณปลายสุดของโคนแฟลเจลลัม เป็นต้น

ข. การย่อยอาหารของสัตว์

1. สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง

1) **ฟองน้ำ** มีเซลล์ปลอกคอหรือโคแอนไซต์ (Choanocyte) ที่มีลักษณะคล้ายแผ่นบางๆ เป็นวงกลมยื่นออกมาจากตัวเซลล์ล้อมรอบส่วนที่เป็นแฟลเจลลัมเอาไว้ พบว่าส่วนที่ยื่นออกมาเหมือนปลอกคองนี้เป็นส่วนที่ยื่นออกของไซโทพลาซึมจำนวนมาก ทำหน้าที่จับอาหารที่ปนมากับน้ำ สร้างเป็นถุงอาหารและถูกย่อยโดยเอนไซม์จากไลโซโซม แล้วดูดซึมเข้าสู่เซลล์ต่อไป

2) **ไฮดรา** มีรูเปิดที่อยู่ตอนกลางบริเวณหนวด (Tentacle) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นทั้งปากและทวารหนัก ไฮดรากินอาหารโดยใช้เข็มพิษ (Nematocyst) แทงสัตว์เล็กๆ ในน้ำแล้วนำเข้าทางปากสู่ช่องกลางลำตัว (Gastrovascular cavity) มีเซลล์ต่อมทำหน้าที่สร้างน้ำย่อยออกมาย่อยอาหารในช่องกลางลำตัวแล้วแพร่ไปยังเซลล์อื่นๆ ที่อยู่ข้างเคียงได้ ส่วนกากอาหารจะถูกขับออกสู่ภายนอกทางเดียวกับที่นำอาหารเข้ามา

3) **ปลานาเรีย** มีช่องทางเดินอาหารที่ไม่สมบูรณ์ ตรงบริเวณช่องเปิดมีลักษณะคล้ายเป็นวงยาวซึ่งมีเซลล์กล้ามเนื้อแข็งแรงมากและสามารถยืดและหดตัวได้ เรียกว่า ฟาริงซ์ (Pharynx) สามารถยืดออกไปจับสิ่งมีชีวิตเล็กๆ มาเป็นอาหาร เมื่ออาหารผ่านเข้าไปในช่องทางเดินอาหารก็จะปล่อยน้ำย่อยออกมาจากเซลล์ต่อมเพื่อย่อยอาหารและดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย ส่วนกากอาหารจะถูกขับออกสู่ภายนอกทางเดียวกับที่นำอาหารเข้ามา

4) พยาธิใบไม้และพยาธิตัวตืด มีอวัยวะที่เกี่ยวข้องกับการย่อยอาหารที่ลดความสำคัญลงไปเพราะไม่ต้องทำงานหนักในการย่อยอาหารเหมือนพวกหาคินนิสระ มีอวัยวะดูดเกาะ (Sucker) พวกพยาธิตัวตืดมีอวัยวะดูดเกาะหลายอันอยู่รอบๆ ส่วนหัว เรียกว่า สโกเล็กซ์ (Scolex) แต่จะไม่มีทางเดินอาหารภายในร่างกายปรากฏให้เห็นเลย

5) ไส้เดือนดิน มีทางเดินอาหารสมบูรณ์ คือ มีปากและทวารหนัก บริเวณที่อยู่ถัดจากปากเป็นคอหอยซึ่งพองออกเล็กน้อย ประกอบด้วยกล้ามเนื้อที่แข็งแรงช่วยในการกลืนอาหารให้ผ่านไปยัง กระเพาะพักอาหารและกระเพาะบดอาหารที่เรียกว่า กิ่น (Gizzard) เซลล์เยื่อบุผนังลำไส้จะปล่อยน้ำย่อยออกมาย่อยอาหารแล้วดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย ส่วนกากอาหารจะถูกกำจัดออกทางทวารหนัก

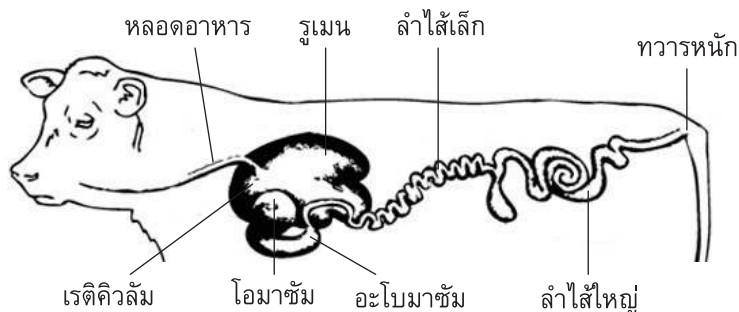
6) แมลง มีทางเดินอาหารสมบูรณ์ มีหลอดอาหาร กระเพาะพักอาหาร กระเพาะอาหาร ลำไส้ และทวารหนัก บริเวณช่วงหลอดอาหารจะมีต่อมน้ำลายและถูกเก็บน้ำลาย และต่อมสร้างน้ำย่อย (Digestive gland) มีลักษณะคล้ายนิ้วมือ 8 คู่ยื่นออกมาโดยรอบ ทำหน้าที่สร้างเอนไซม์ออกมาย่อยอาหารในกระเพาะอาหาร ลำไส้มีขนาดใหญ่และสั้น ทำหน้าที่ขับกากอาหารออกทางทวารหนัก

2. สัตว์มีกระดูกสันหลัง

1) ปลา มีทางเดินอาหารสมบูรณ์ อวัยวะประกอบด้วยปาก กระเพาะอาหาร ตับ ถุงน้ำดี ลำไส้ ทวารหนัก อาหารที่ถูกย่อยจะถูกดูดซึมเข้าสู่หลอดเลือด ส่วนกากอาหารจะถูกขับออกทางทวารหนัก โดยปลาที่กินเนื้อมักมีปากใหญ่ ลำไส้สั้นตรงและมีสีขาว ส่วนปลาที่กินพืชจะมีปากเล็ก ลำไส้ยาว และมีสีดำ

2) สัตว์ปีก มีทางเดินอาหารสมบูรณ์ อวัยวะประกอบด้วยปาก คอหอย หลอดอาหาร ถุงพักอาหาร กระเพาะอาหาร กิ่น (Gizzard) มีกล้ามเนื้อหนาและแข็งแรง ภายในมีเม็ดกรวดทรายช่วยบดอาหารให้ละเอียดยิ่งขึ้น ลำไส้เล็กมีน้ำย่อยจากตับอ่อนและท่อน้ำดีซึ่งหลังสารมาช่วยในการย่อยอาหาร กากอาหารจะถูกลำเลียงไปสู่ลำไส้ใหญ่และขับออกทางทวารหนัก

3) สัตว์เคี้ยวเอื้อง เช่น วัว ควาย ม้า แพะ แกะมีทางเดินอาหารสมบูรณ์ อาหารส่วนใหญ่เป็นหญ้า สัตว์เหล่านี้จึงเคี้ยวอาหารและสามารถสำรอกอาหารออกมาเคี้ยวได้อีกครั้ง กระเพาะอาหารของสัตว์เคี้ยวเอื้องแบ่งเป็น 4 ส่วน ดังนี้



(1) รูเมน (Rumen) หรือผ้าขี้ริ้ว มีผนังยื่นออกมาจำนวนมาก ภายในมีแบคทีเรียและโปรโตซัวช่วยย่อยเซลลูโลสให้เป็นสารอาหารที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

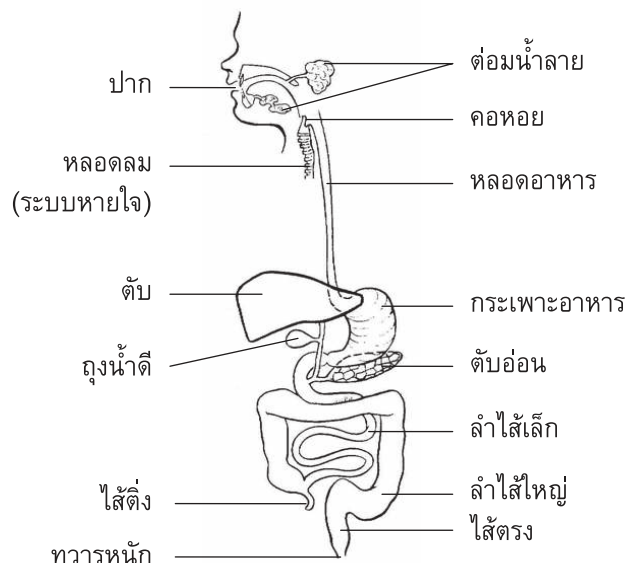
(2) เรติคิวลัม (Reticulum) หรือกระเพาะรังผึ้ง ทำหน้าที่คลุกเคล้าอาหาร และช่วยส่งอาหารกลับไปเคี้ยวที่ปากอีกครั้ง

(3) โอมาซั่ม (Omasum) หรือกระเพาะสามสิบกลีบ ทำหน้าที่บดและคลุกเคล้าอาหารก่อนที่จะส่งไปยังอะโบมาซั่ม

(4) อะโบมาซั่ม (Abomasum) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ย่อยอาหารโดยอาศัย เอนไซม์ที่ผลิตจากกลุ่มเซลล์ที่ผนังกระเพาะอาหาร

การย่อยอาหารของจุลินทรีย์จะเกิดในส่วนของรูเมน เรติคิวลัม และโอมาซั่ม แต่จะไม่เกิดในอะโบมาซั่มเพราะมีสภาพเป็นกรดสูงมาก อาหารจะถูกส่งไปย่อยต่อที่ลำไส้เล็กโดยอาศัยน้ำย่อยจากลำไส้เล็ก ตับอ่อน และน้ำดีจนสามารถดูดซึมเข้าสู่หลอดเลือดได้ ส่วนกากอาหารจะถูกส่งไปยังลำไส้ใหญ่ และขับถ่ายออกนอกร่างกาย

ค. การย่อยอาหารของมนุษย์



1. อวัยวะในระบบทางเดินอาหาร

1) ปากและโพรงปาก

(1) ฟัน (Teeth) เป็นอวัยวะที่แข็งที่สุดในร่างกาย ทำหน้าที่ตัด ฉีก และบดอาหารให้มีขนาดเล็กลง ฟันของคนมี 2 ชุด คือ ฟันชุดแรกหรือฟันน้ำนม (Deciduous teeth) จะเริ่มปรากฏให้เห็นเมื่ออายุประมาณ 6 เดือน และจะค่อยๆ งอกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในอัตราประมาณเดือนละ 1 ซี่จนครบ 20 ซี่ ฟันน้ำนมจะเริ่มหักเมื่ออายุประมาณ 6 ปี และมีฟันแท้ (Permanent teeth) เกิดขึ้นแทนที่ฟันน้ำนม โดยฟันน้ำนมจะหักหมดเมื่ออายุประมาณ 13 ปี ซึ่งฟันแท้ก็จะงอกขึ้นครบในช่วงอายุเดียวกัน ฟันแท้มีทั้งหมด 32 ซี่ แต่บางคนอาจมีแค่ 28 ซี่เนื่องจากฟันกรามซี่สุดท้าย 4 ซี่ไม่งอก ฟันแท้มีรูปร่างและหน้าที่แตกต่างกัน ดังนี้

- **ฟันตัด (Incisor)** มี 8 ซี่ คือ ด้านบน 4 ซี่ และด้านล่าง 4 ซี่ แต่ละซี่มีรากฟัน 1 ราก มีรูปร่างคล้ายจอบ ทำหน้าที่ตัดอาหาร
- **ฟันฉีก (Canine)** หรือที่เรียกกันว่าเขี้ยว มี 4 ซี่ คือ ด้านบน 2 ซี่ และด้านล่าง 2 ซี่ แต่ละซี่มีรากฟัน 1 ราก มีรูปร่างแหลม ทำหน้าที่ฉีกอาหารให้แยกออกจากกัน
- **ฟันกรามหน้า (Premolar)** หรือเรียกว่าฟันกรามน้อย มีทั้งหมด 8 ซี่ คือ ด้านบน 4 ซี่ และด้านล่าง 4 ซี่ มีรากฟัน 1 - 2 ราก ทำหน้าที่บดเคี้ยวอาหาร
- **ฟันกรามหลัง (Molar)** หรือเรียกว่าฟันกรามใหญ่ มีทั้งหมด 12 ซี่ คือ ด้านบน 6 ซี่ และด้านล่าง 6 ซี่ มีรากฟัน 2 - 3 ราก ทำหน้าที่บดอาหารให้ละเอียด

(2) **ลิ้น (Tongue)** มีหน้าที่หลายอย่าง เช่น ดันอาหารให้เคลื่อนที่ขณะเคี้ยว จากช่องปากสู่คอหอย ช่วยบดกรสชาติของอาหารโดยมีต่อมรับรสอยู่บริเวณโคนลิ้น ต่อมรับรสเปรี้ยวอยู่บริเวณข้างลิ้น ต่อมรับรสหวานอยู่บริเวณปลายลิ้น และต่อมรับรสเค็มอยู่บริเวณปลายลิ้นและข้างลิ้น

(3) **ต่อมน้ำลาย (Salivary gland)** ทำหน้าที่สร้างน้ำลาย (Saliva) มี 2 ชนิด คือ น้ำลายชนิดใสกับน้ำลายชนิดเหนียว โดยน้ำลายชนิดใส (Watery) จะสร้างเอนไซม์สำหรับย่อยอาหาร และน้ำลายชนิดเหนียวจะสร้างเมือก (Mucin) ทำให้อาหารลื่นช่วยให้กลืนได้สะดวก ต่อมน้ำลายจะหลั่งน้ำลายออกมาประมาณวันละ 1 - 1.5 ลิตร ต่อมน้ำลายมี 3 คู่ คือ

- **ต่อมน้ำลายใต้ขากรรไกร (Submandibular gland)** อยู่ที่ผิวด้านในทางด้านข้างของกระดูกขากรรไกรล่าง เป็นรูปไข่ สร้างน้ำลายชนิดใสมากกว่าชนิดเหนียว โดยสร้างได้ร้อยละ 69 ของน้ำลายทั้งหมด

- **ต่อมน้ำลายใต้กกหู (Parotid gland)** อยู่บริเวณส่วนหน้าทางด้านล่างของหู (กกหู) สร้างน้ำลายชนิดใส (Watery) ได้ประมาณร้อยละ 26 ของน้ำลายทั้งหมด ถ้าหากมีเชื้อไวรัสเข้าไปที่ต่อมนี้อาจทำให้เกิดโรคคางทูม (Mumps) สำหรับเด็กเพศชายนั้นพบว่าเชื้อคางทูมอาจเข้าไปสู่ถุงอัณฑะได้ด้วย มีผลทำให้หลอดสร้างอสุจิในถุงอัณฑะไม่สามารถสร้างอสุจิได้ตามปกติ และทำให้เป็นหมันได้

- **ต่อมน้ำลายใต้ลิ้น (Sublingual gland)** อยู่ที่ผิวด้านล่างของเยื่อหุ้มเพดานล่างของปาก ต่อมนี้มีท่อเล็กๆ จำนวนมาก สร้างน้ำลายชนิดเหนียวมากกว่าชนิดใส โดยสร้างได้ร้อยละ 5 ของน้ำลายทั้งหมด

2) **คอหอย (Pharynx)** เป็นทางผ่านของอาหารและอากาศ มีต่อมทอนซิล (Tonsil) คอยดักและทำลายจุลินทรีย์ไม่ให้เข้าสู่ร่างกาย ในขณะที่กลืนอาหารเพดานอ่อนจะยกตัวขึ้นปิดช่องหายใจ ฝาปิดกล่องเสียง (Epiglottis) จะปิดหลอดลม เมื่ออาหารผ่านเข้าสู่คอหอย ชูดกล้ามเนื้อบริเวณผนังคอหอยจะบีบตัวดันอาหารให้เคลื่อนสู่หลอดอาหาร

3) **หลอดอาหาร (Esophagus)** เป็นทางผ่านของอาหารจากปากสู่กระเพาะอาหาร โดยกล้ามเนื้อหลอดอาหารทำงานแบบ **เพริสทอลซิส (Peristalsis)** คือ มีการบีบตัวเป็นคลื่นๆ อย่างเป็นจังหวะเพื่อดันให้อาหารเคลื่อนที่ไปตามหลอดอาหารลงสู่กระเพาะอาหารได้ โดยมีน้ำเมือกช่วยหล่อลื่นอาหารให้เคลื่อนที่ได้สะดวก

4) **กระเพาะอาหาร (Stomach)** อยู่ทางด้านซ้ายของช่องท้องถัดจากกะบังลม เป็นส่วนของทางเดินอาหารที่มีขนาดใหญ่ที่สุด โครงสร้างประกอบด้วยคาร์เดีย (Cardia) อยู่ส่วนต้นต่อจากหลอดอาหาร ฟันดัส (Fundus) อยู่ตอนกลางมีขนาดใหญ่ที่สุดเรียกว่า บอดี้ (Body) และไพโลรัส (Pylorus) อยู่ตอนปลายสุดของกระเพาะอาหาร มีกล้ามเนื้อหูรูด เรียกว่า ไพโลริกสฟิงกเตอร์ (Pyloric sphincter) ทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของอาหารจากกระเพาะอาหารสู่ลำไส้เล็ก

ผนังด้านในของกระเพาะอาหารมีลักษณะเป็นรอยพับซ้อนกัน เรียกว่า รูกี้ (Rugae) ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของกระเพาะอาหาร กลุ่มเซลล์ที่ผนังด้านในของกระเพาะอาหารมีหน้าที่ต่างกัน ดังนี้

(1) **มิวคัสเซลล์ (Mucous cell)** ทำหน้าที่สร้างน้ำเมือกให้มีฤทธิ์เป็นด่างไป ฉาบผิวของกระเพาะอาหารเพื่อป้องกันไม่ให้เอนไซม์หรือกรดไฮโดรคลอริก (กรดเกลือ) ทำลายผนังกระเพาะอาหาร

(2) **ชีฟเซลล์ (Chief cell)** หรือไซโกมาติกเซลล์ (Zygomatoc cell) ทำหน้าที่สร้างเอนไซม์เพปซินโนเจน (Pepsinogen) ซึ่งจะแปรสภาพไปเป็นเพปซิน (Pepsin) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริก

(3) **พาริเทัลเซลล์ (Parietal cell)** หรือออกซินติกเซลล์ (Oxyntic cell) ทำหน้าที่สร้างกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (pH 2 – 3) เพื่อช่วยให้เอนไซม์สามารถย่อยอาหารได้ และฆ่าจุลินทรีย์ที่ปนมากับอาหาร

ในสภาวะปกติพบว่าภายในกระเพาะอาหารมีเนื้อที่เพียง 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร เท่านั้น เมื่อมีอาหารเข้าสู่กระเพาะอาหารก็จะสามารถขยายตัวได้อีก 10 – 40 เท่า กระเพาะอาหารมีหน้าที่สำคัญ 3 ประการ คือ สะสมอาหาร ย่อยอาหาร และลำเลียงอาหารเข้าสู่ลำไส้เล็ก

5) **ลำไส้เล็ก (Small intestine)** เป็นหลอดที่ขดไปมาอยู่ในช่องท้อง มีความยาวประมาณ 6 เมตร เป็นส่วนที่มีการดูดซึมสารอาหารมากที่สุด ดังนั้นจึงมีเนื้อเยื่อจำนวนมากยื่นออกมาที่ผนังด้านในเรียกว่า **วิลไล (Villi)** เพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซึมสารอาหาร

ลำไส้เล็กแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

(1) **ดูโอดีนัม (Duodenum)** เป็นส่วนของลำไส้เล็กตอนต้นซึ่งอยู่ต่อจากกระเพาะอาหาร มีความยาวประมาณ 25 เซนติเมตร เริ่มต้นจากกระเพาะอาหารบริเวณส่วนหัวของตับอ่อน ดูโอดีนัมจะโค้งเป็นวงคล้ายรูปตัวยู ท่อน้ำดีจากถุงน้ำดีและน้ำย่อยจากตับอ่อนจะมารวมเปิดเข้าที่ส่วนต้นของดูโอดีนัม สารอาหารทุกชนิดจะถูกดูดซึมที่บริเวณนี้เป็นส่วนใหญ่

(2) **เจจูนัม (Jejunum)** เป็นส่วนที่ต่อจากดูโอดีนัม มีความยาวประมาณ 2.5 เมตร มีการดูดซึมสารอาหารพวกไขมันเป็นส่วนใหญ่

(3) **ไอลีอัม (Ileum)** เป็นส่วนท้ายของลำไส้เล็ก มีความยาวประมาณ 3.5 – 4 เมตร ตอนปลายของไอลีอัมที่ต่อกับลำไส้ใหญ่ วิตามิน B₁₂ และเกลือของน้ำดีจะถูกดูดซึมบริเวณนี้

6) **ลำไส้ใหญ่ (Large intestine)** เป็นส่วนที่รับกากอาหารมาจากลำไส้เล็ก มีความยาวประมาณ 1.5 เมตร เริ่มจากส่วนต้นต่อกับไอลีอัมมาสิ้นสุดที่ทวารหนัก ผนังลำไส้ใหญ่จะเรียบและมีต่อมเมือกหลั่งน้ำเมือกออกมาหล่อลื่นอุจจาระให้เคลื่อนที่ได้สะดวก

ลำไส้ใหญ่แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

(1) **ซีคัม (Caecum)** เป็นส่วนที่ติดต่อระหว่างไอลีียมกับลำไส้ใหญ่ มีความยาวประมาณ 5 - 8 เซนติเมตร แยกออกจากไอลีียมโดยมีกล้ามเนื้อหูรูด เรียกว่า ไอลีโอซีคัลสฟิงกเตอร์ (Ileocaecal sphincter) ทำหน้าที่ควบคุมไม่ให้อาหารเคลื่อนสู่ลำไส้เล็กเร็วจนเกินไป และป้องกันการย้อนกลับของกากอาหาร มีท่อขนาดเล็กปลายตันยื่นออกมา เรียกว่า **ไส้ติ่ง (Appendix)** ซึ่งไม่มีหน้าที่ใดๆ ในระบบย่อยอาหาร เมื่อมีแบคทีเรียเข้าไปเจริญอยู่ในไส้ติ่งอาจเกิดการอักเสบและเป็นอันตรายถึงแก่ชีวิตได้ จึงจำเป็นต้องผ่าตัดเอาออกก่อนที่ไส้ติ่งจะแตก

(2) **โคลอน (Colon)** เป็นส่วนที่ยาวที่สุดของลำไส้ใหญ่ แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ลำไส้ใหญ่ส่วนขึ้น (Ascending colon) ที่ต่อจากซีคัมทอดขึ้นด้านบนทางขวาของช่องท้อง ลำไส้ใหญ่ส่วนขวาง (Transverse colon) ที่ทอดขวางช่องท้องไปทางซ้าย และลำไส้ใหญ่ส่วนลง (Descending colon) ที่ทอดลงมาด้านล่างทางซ้ายของช่องท้อง

(3) **เรกตัม (Rectum)** หรือไส้ตรง มีความยาวประมาณ 12 - 15 เซนติเมตร อยู่ต่อจากโคลอนมาสิ้นสุดที่ทวารหนัก เป็นบริเวณที่มีการสะสมกากอาหารหรืออุจจาระ (Feces) เรกตัมเป็นบริเวณที่มักจะเกิดโรคมะเร็งลำไส้ได้มากกว่าบริเวณอื่นๆ

(4) **ช่องทวารหนัก (Anus canal)** เป็นส่วนสุดท้ายของลำไส้ใหญ่ มีความยาวประมาณ 2.5 - 3.5 เซนติเมตร ปลายสุดไปเปิดออกนอกร่างกาย ประกอบด้วยหูรูดภายใน (Internal sphincter) ซึ่งทำงานนอกเหนืออำนาจจิตใจ และหูรูดภายนอก (External sphincter) ซึ่งทำงานภายใต้อำนาจจิตใจ มีส่วนช่วยให้กลืนอุจจาระได้ชั่วคราว ยกเว้นเมื่อมีอาการท้องเสียอย่างรุนแรงจะไม่สามารถควบคุมการทำงานของหูรูดภายนอกได้

ลำไส้ใหญ่ทำหน้าที่สะสมกากอาหารที่มาจากลำไส้เล็ก ดูดซึมน้ำ เกลือแร่ กลูโคส ที่หลงเหลือออกจากกากอาหารเข้าสู่หลอดเลือด และลำเลียงกากอาหารออกทางทวารหนัก นอกจากนี้แบคทีเรียที่อยู่ในลำไส้ใหญ่สามารถสังเคราะห์วิตามิน B₁₂ และวิตามิน K ซึ่งร่างกายสามารถดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้

2. อวัยวะช่วยย่อยอาหาร

1) **ตับ (Liver)** เป็นอวัยวะที่ใหญ่ที่สุดในร่างกาย อยู่ในช่องท้องถัดจากกะบังลมลงมาด้านล่าง แบ่งออกเป็นพูซ้ายและพูขวา ตับทำหน้าที่สำคัญมากมาย เช่น

(1) สร้างน้ำดี (Bile) แล้วลำเลียงไปสะสมที่ถุงน้ำดี (Gall bladder) เมื่อมีอาหารผ่านลงไปในลำไส้เล็ก ฮอร์โมนที่ผนังดูโอดีนัมจะกระตุ้นให้ถุงน้ำดีบีบตัวปล่อยน้ำดีลงสู่ดูโอดีนัม เพื่อช่วยให้อาหารประเภทไขมันแตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ

(2) สร้างโปรตีนในเลือด ทำลายเซลล์เม็ดเลือดแดงที่มีอายุมาก ทำลายเชื้อโรค และสิ่งแปลกปลอมต่างๆ ที่เข้ามาในเลือด

(3) เปลี่ยนแอมโมเนียซึ่งเป็นผลผลิตของเมแทบอลิซึมของโปรตีนให้เป็นยูเรียที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย

(4) สังเคราะห์ไกลโคเจนจากกลูโคสด้วยกระบวนการไกลโคเจเนซิส (Glycogenesis) และสลายไกลโคเจนให้เป็นกลูโคสด้วยกระบวนการไกลโคเจนไลซิส (Glycogenolysis) เพื่อรักษาระดับน้ำตาลในเลือด

(5) เปลี่ยนโปรตีนให้เป็นคาร์โบไฮเดรตและไขมัน

2) **ตับอ่อน (Pancreas)** เป็นต่อมที่อยู่ติดกับบริเวณส่วนโค้งตอนล่างของกระเพาะอาหาร ทำหน้าที่เป็นทั้งต่อมไร้ท่อและต่อมมีท่อ มีรูปร่างคล้ายใบไม้ มีความยาวประมาณ 20 - 30 เซนติเมตร ตับอ่อนสามารถสร้างของเหลวได้ถึงวันละ 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ คือ โซเดียม-ไบคาร์บอเนตและน้ำย่อยต่างๆ โดยโซเดียมไบคาร์บอเนตมีประโยชน์ทำให้อาหารในกระเพาะอาหารที่มีฤทธิ์เป็นกรดเปลี่ยนไปเป็นกลางเมื่อเข้าสู่ดูโอดีนัม เป็นการป้องกันไม่ให้เนื้อเยื่อส่วนดูโอดีนัมเป็นอันตราย นอกจากนี้ยังช่วยให้มี pH 6 - 7 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมแก่การย่อยอาหารของเอนไซม์จากตับอ่อน ตับอ่อนมีหน้าที่สำคัญคือ

(1) สร้างเอนไซม์หลายชนิด เช่น เอนไซม์ไรโบนิวคลีเอส (Ribonuclease) และดีออกซีไรโบนิวคลีเอส (Deoxyribonuclease) ย่อยกรดนิวคลีอิก เอนไซม์อะไมเลส (Amylase) ย่อยแป้ง และเอนไซม์ไลเปส (Lipase) ย่อยไขมันในลำไส้เล็ก

(2) สร้างทริปซินอินฮิบิเตอร์ (Trypsin inhibitor) เพื่อยับยั้งการเกิดทริปซินและกระตุ้นให้เอนไซม์อื่นๆ ในตับอ่อนทำงาน ถ้าหากท่อของตับอ่อนท่อใดท่อหนึ่งเกิดการอุดตัน ทริปซินอินฮิบิเตอร์จะไม่สามารถยับยั้งการเกิดทริปซิน ทำให้ทริปซินในตับอ่อนมีในปริมาณสูงและกระตุ้นให้เอนไซม์สลายเนื้อเยื่อของตับอ่อนเองทำให้ตับอ่อนอักเสบ และถ้าหากหลอดเลือดในตับอ่อนถูกทำลายก็จะเกิดการตกเลือดในตับอ่อนทำให้เกิดอาการช็อกและเสียชีวิตได้

3. การย่อยอาหาร

การย่อยอาหารมี 2 ขั้นตอน คือ

1) **การย่อยเชิงกล (Mechanical digestion)** เป็นการย่อยอาหารให้มีขนาดเล็กลงและช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำย่อยและอาหารโดยการบดเคี้ยวด้วยฟัน หรือการบีบตัวของกล้ามเนื้อทางเดินอาหาร

2) **การย่อยทางเคมี (Chemical digestion)** เป็นการย่อยสลายโมเลกุลอาหารโดยอาศัยเอนไซม์สำหรับย่อยอาหารให้มีโมเลกุลเล็กที่สุดจนสามารถดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้

การย่อยอาหารในปาก

1) **การย่อยเชิงกล** จะต้องใช้ขากรรไกร ฟัน กล้ามเนื้อ ลิ้น และแก้มประกอบในการเคี้ยวอาหารก้อนใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง

2) **การย่อยทางเคมี** โดยต่อมน้ำลายจะสร้างน้ำย่อยไทาลิน (Ptyalin) ซึ่งเป็นเอนไซม์อะไมเลสชนิดหนึ่ง ทำหน้าที่ย่อยแป้งที่สุกแล้วให้เป็นเดกซ์ทริน (Dextrin) ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่เล็กกว่าแป้ง แต่ใหญ่กว่าน้ำตาลประมาณ 95 - 97% และได้น้ำตาลมอลโทส 3 - 5% นอกจากนี้ต่อมน้ำลายยังสามารถสร้างน้ำย่อยที่ย่อยมอลโทสให้เป็นกลูโคสได้ด้วย

การย่อยแป้งในปากบางครั้งจะเกิดขึ้นที่ส่วนใดของโมเลกุลของแป้งก็ได้แล้วแต่โอกาสของน้ำย่อยว่าจะสลายพันธะที่ตรงไหน ถ้าสลายตรงกลางก็ได้เดกซ์ทริน ถ้าสลายตรงปลายก็ได้น้ำตาลโมเลกุลคู่และน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว

แป้ง $\xrightarrow{\text{ไทาลิน}}$ เดกซ์ทริน (เข้าสู่กระเพาะอาหาร)

แป้ง $\xrightarrow{\text{ไทาลิน}}$ มอลโทส $\xrightarrow{\text{มอลโทส}}$ กลูโคส

การย่อยอาหารในกระเพาะอาหาร

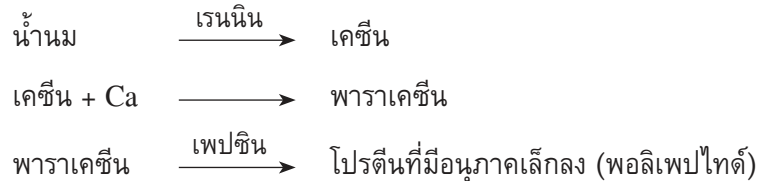
1) **การย่อยเชิงกล** เกิดจากการบีบตัวของผนังกระเพาะอาหารเพื่อให้โมเลกุลของอาหารแตกออกไปผสมกับน้ำย่อยที่สร้างขึ้น

2) **การย่อยทางเคมี** เมื่ออาหารเคลื่อนเข้าสู่กระเพาะอาหารจะกระตุ้นให้ต่อมบริเวณกระเพาะอาหารสร้างสารต่างๆ ขึ้น เรียกว่า น้ำย่อย (Gastric juice) ประกอบด้วยกรดเกลือ (กรดไฮโดรคลอริก) สารเมือก (Mucous secretion) ช่วยในการหล่อลื่น และเอนไซม์ย่อยโปรตีนและลิพิด

(1) **เพปซิโนเจน (Pepsinogen)** ซึ่งยังไม่สามารถทำงานได้ แต่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยกรดเกลือก็จะเปลี่ยนเป็นเพปซิน (Pepsin) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สามารถย่อยโปรตีนให้เป็นพอลิเปปไทด์สายสั้นๆ และกรดอะมิโน



(2) **โพรเรนิน (Prorennin)** จะเปลี่ยนเป็นเรนิน (Rennin) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทำงานได้ดีในกระเพาะอาหารของทารก เมื่อมีกรดเกลืออยู่ด้วยเรนินจะทำหน้าที่แยกเคซีน (Casein) ซึ่งเป็นโปรตีนในนมออกจากนมแล้วรวมกับแคลเซียมได้เป็นพาราเคซีน (Paracasein) ซึ่งเป็นนมที่ตกตะกอนแข็งตัวเป็นลิ่มๆ จากนั้นเพปซินจะย่อยพาราเคซีนให้เล็กลงต่อไป



- **ไลเปส (Lipase)** พบในกระเพาะอาหารน้อยมาก และยังไม่สามารถย่อยไขมันได้ เพราะไลเปสทำงานได้ดีในสภาพที่เป็นเบส แต่ในกระเพาะอาหารมีสภาพเป็นกรด

การย่อยอาหารในลำไส้เล็ก

1) **การย่อยเชิงกล** เกิดจากกล้ามเนื้อเรียบของลำไส้เล็กบีบตัวทำให้อาหารเหลวภายในลำไส้เล็กคลุกเคล้ากับเอนไซม์ได้ดียิ่งขึ้น

2) **การย่อยทางเคมี** เกิดจากเอนไซม์ที่ผลิตจากต่อมของลำไส้เล็ก ตับอ่อน และน้ำดีจากตับทำให้เกิดการย่อยอาหารทั้งประเภทคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน

(1) เอนไซม์ที่ต่อมของลำไส้เล็ก (Intestinal gland)

(1.1) **เอนเทอโรไคเนส (Enterokinase)** เป็นเอนไซม์ที่ช่วยเปลี่ยนเอนไซม์ทริปซิโนเจน (Trypsinogen) ที่ทำงานไม่ได้ให้เปลี่ยนเป็นเอนไซม์ทริปซิน (Trypsin) ที่ทำงานได้

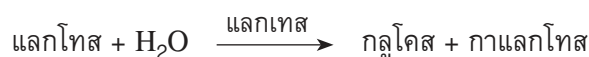


(1.2) **ไดแซ็กคาเรส (Disaccharase)** เป็นเอนไซม์ย่อยคาร์โบไฮเดรต คือ ย่อยน้ำตาลโมเลกุลคู่ (Disaccharide) ให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide) ได้แก่

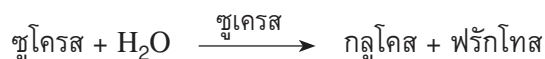
- **มอลเตส (Maltase)** ทำหน้าที่ย่อยน้ำตาลมอลโทส (Maltose) ให้เป็น น้ำตาลกลูโคส (Glucose) 2 โมเลกุล



- **แลกเตส (Lactase)** ทำหน้าที่ย่อยน้ำตาลแลกโทส (Lactose) ให้เป็น น้ำตาลกลูโคส (Glucose) และกาแลกโทส (Galactose)



- **ซูเครส (Sucrase)** ทำหน้าที่ย่อยน้ำตาลซูโครส (Sucrose) ให้เป็น น้ำตาลกลูโคส (Glucose) และฟรุ็กโทส (Fructose)



(1.3) **อะมิโนเปปติเดส (Aminopeptidase)** เป็นเอนไซม์ย่อยโปรตีน พอลิเพปไทด์ (Polypeptide) ให้เป็นเพปไทด์ (Peptide) และกรดอะมิโน (Amino acid)



(1.4) **ไตรเปปติเดส (Tripeptidase)** เป็นเอนไซม์ย่อยโปรตีนไตรเพปไทด์ (Tripeptide) ให้เป็นไดเพปไทด์ (Dipeptide) และกรดอะมิโน (Amino acid)



(1.5) **ไดเพปติเดส (Dipeptidase)** เป็นเอนไซม์ย่อยโปรตีนไดเพปไทด์ (Dipeptide) ให้เป็นกรดอะมิโน (Amino acid) 2 โมเลกุล

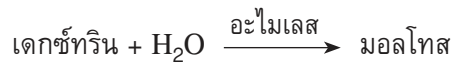


(1.6) **ไลเปส (Lipase)** เป็นเอนไซม์ย่อยไขมัน คือ ย่อยไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ให้เป็นกรดไขมัน (Fatty acid) และกลีเซอรอล (Glycerol)



(2) เอนไซม์ที่ตับอ่อน (Pancreas)

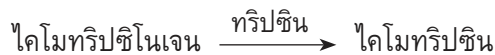
(2.1) อะไมเลส (Amylase) เป็นเอนไซม์ย่อยคาร์โบไฮเดรต คือ แป้ง หรือเดกซ์ทรินที่ผ่านมาจากปากให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลมอลโทส



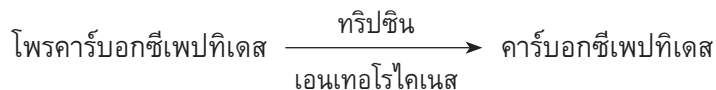
(2.2) ทริปซินโนเจน (Trypsinogen) เป็นเอนไซม์ที่ยังไม่พร้อมจะทำงาน แต่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยเอนไซม์เอนเทอโรไคเนส (Enterokinase) ที่สร้างจากผนังลำไส้เล็ก จะเปลี่ยนเป็น เอนไซม์ทริปซิน (Trypsin) ที่สามารถย่อยโปรตีนได้



(2.3) ไคโมทริปซินโนเจน (Chymotrypsinogen) เป็นเอนไซม์ที่ยังไม่พร้อมจะทำงาน แต่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยเอนไซม์ทริปซิน จะเปลี่ยนเป็นเอนไซม์ไคโมทริปซิน (Chymotrypsin) ที่สามารถย่อยโปรตีนได้คล้ายกับทริปซิน



(2.4) โพรคาร์บอกซีเพปติเดส (Procarboxypeptidase) เป็นเอนไซม์ที่ยังไม่พร้อมจะทำงาน แต่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยเอนไซม์ทริปซินหรือเอนเทอโรไคเนส จะเปลี่ยนเป็นเอนไซม์คาร์บอกซีเพปติเดส (Carboxypeptidase) ที่สามารถย่อยพอลิเปปไทด์ทางด้านหมู่คาร์บอกซิลให้เป็นกรดอะมิโนหลุดออกมา



(2.5) **ไลเปส (Lipase)** เป็นเอนไซม์ย่อยไขมัน คือ ย่อยไตรกลีเซอไรด์ ให้เป็นกรดไขมันและกลีเซอรอล และทำงานได้ดีเมื่อมีน้ำดีที่สร้างจากตับช่วยให้ไขมันแตกตัวเป็นเม็ดเล็กๆ ก่อนที่จะย่อยด้วยเอนไซม์ไลเปส



1.2 การสลายสารอาหารระดับเซลล์

การสลายสารอาหารระดับเซลล์เป็นกระบวนการที่สิ่งมีชีวิตเปลี่ยนพลังงานเคมีที่มีอยู่ในสารประกอบอินทรีย์ให้เป็นพลังงานที่จะนำไปใช้ภายในเซลล์ได้ การสลายสารอาหารควบคุมโดยเอนไซม์ให้สารเริ่มต้นค่อยๆ สลายตัว ทำให้พลังงานถูกปล่อยออกมาทีละน้อย เซลล์จะสามารถนำไปสร้างสารประกอบสะสมไว้ได้ และพลังงานที่ได้จากการสลายสารอาหารนั้นเซลล์จะเก็บไว้ในรูปของสารเคมีที่มีพลังงานสูงคือ ATP จึงไม่ทำให้อุณหภูมิของเซลล์สูงขึ้นจนถึงขั้นเป็นอันตราย

ก. การสลายโมเลกุลของสารอาหารแบบใช้ออกซิเจน

ปฏิกิริยาการสลายสารอาหารจำเป็นต้องอาศัยแหล่งพลังงานของเซลล์ซึ่งก็คือสารอาหารแก๊สออกซิเจน หลังปฏิกิริยาจะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นผลผลิตออกมา นอกจากนี้ยังมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของพลังงานความร้อนและ ATP

1. การสลายกลูโคส

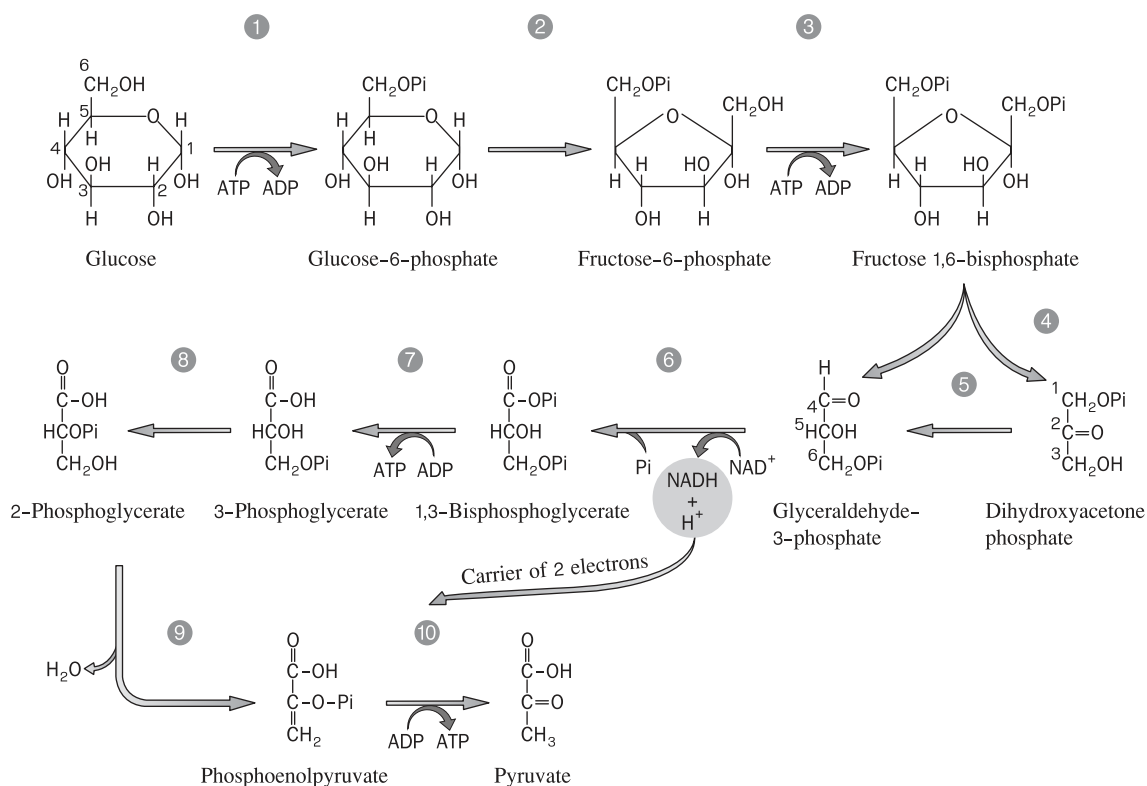
ปฏิกิริยาการสลายกลูโคส (Glucose oxidation) ประกอบด้วยปฏิกิริยาต่างๆ หลายขั้นตอนและเกิดขึ้นต่อเนื่องกันมี 4 ขั้นตอน ดังนี้

1) **ไกลโคไลซิส (Glycolysis)** เป็นปฏิกิริยาการสลายกลูโคสจนกระทั่งถึงกรดไพรูวิก (Pyruvic acid หรือ Pyruvate) มีขั้นตอนดังนี้

(1) กลูโคส (Glucose) 1 โมเลกุลใช้พลังงาน 1 ATP ในการเติมหมู่ฟอสเฟตเพื่อเปลี่ยนกลูโคสให้เป็นกลูโคส-6-ฟอสเฟต (Glucose-6-phosphate) โดยเอนไซม์เฮกโซไคเนส (Hexokinase)

(2) กลูโคส-6-ฟอสเฟตเปลี่ยนไปเป็นฟรุคโทส-6-ฟอสเฟต (Fructose-6-phosphate) โดยเอนไซม์ฟอสโฟกลูโคไอโซเมอเรส (Phosphoglucisomerase)

(3) ใช้พลังงานอีก 1 ATP ในการเติมหมู่ฟอสเฟตเพื่อเปลี่ยนกลูโคส-6-ฟอสเฟตให้เป็นฟรุคโทส 1,6-บิสฟอสเฟต (Fructose 1,6-bisphosphate) โดยเอนไซม์ฟอสโฟฟรุคโทไคเนส (Phosphofructokinase)



(4) ฟรักโทส 1,6-บิสฟอสเฟตแตกตัวเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 3 อะตอม จำนวน 2 โมเลกุล คือ ไดไฮดรอกซีอะซีโตนฟอสเฟต (Dihydroxyacetonephosphate) และกลีเซอรอลดีไฮด์-3-ฟอสเฟต (Glyceraldehyde-3-phosphate) โดยใช้เอนไซม์อัลโดเลส (Aldolase) เข้าร่วมทำปฏิกิริยา ซึ่งน้ำตาล 2 โมเลกุลที่เกิดขึ้นจะเป็นไอโซเมอร์ (Isomer) ซึ่งกันและกัน

(5) ไดไฮดรอกซีอะซีโตนฟอสเฟตจะเปลี่ยนรูปร่างไปเป็น กลีเซอรอลดีไฮด์-3-ฟอสเฟต โดยเอนไซม์ไตรโอสฟอสเฟตไอโซเมอเรส (Triose phosphate isomerase)

(6) เติมหมู่ฟอสเฟตเพื่อเปลี่ยนกลีเซอรอลดีไฮด์-3-ฟอสเฟตไปเป็น 1,3-บิสฟอสโฟกลีเซอเรต (1,3-Bisphosphoglycerate) โดยเอนไซม์กลีเซอรอลดีไฮด์ฟอสเฟตดีไฮโดรจีเนส (Glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase) และได้ NADH + H⁺ หรือ NADH₂

(7) 1,3-บิสฟอสโฟกลีเซอเรตจะถูกเปลี่ยนไปเป็น 3-ฟอสโฟกลีเซอเรต (3-Phosphoglycerate) โดยเอนไซม์ฟอสโฟกลีเซอโรไคเนส (Phosphoglycerokinase) หมู่ฟอสเฟตจะถูกโอนไปยังโมเลกุลของ ADP ได้เป็น ATP

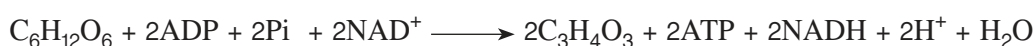
(8) หมู่ฟอสเฟตในโมเลกุลของ 3-ฟอสโฟกลีเซอเรตมีการย้ายตำแหน่ง ได้เป็น 2-ฟอสโฟกลีเซอเรต (2-Phosphoglycerate) โดยเอนไซม์ฟอสโฟกลีเซอโรมิวเตส (Phosphoglyceromutase) ช่วยเร่งปฏิกิริยา

(9) 2-ฟอสโฟกลีเซอเรตจะเสียน้ำ 1 โมเลกุลกลายเป็นฟอสโฟอินอลไพรูเวต (Phosphoenolpyruvate) โดยเอนไซม์อินอลเลส (Enolase) ช่วยเร่งปฏิกิริยา

(10) ฟอสโฟอินอลไพรูเวตจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไพรูเวต (Pyruvate) หรือกรดไพรูวิก (Pyruvic acid) โดยเอนไซม์ไพรูเวตไคเนส (Pyruvate kinase) หมู่ฟอสเฟตจะถูกโอนไปยังโมเลกุลของ ADP ได้เป็น ATP

สรุปปฏิกิริยาช่วงไกลโคไลซิส

(1) ปฏิกิริยาทุกขั้นตอนสรุปเป็นสมการได้ดังนี้



(2) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในไซโทพลาซึมของเซลล์

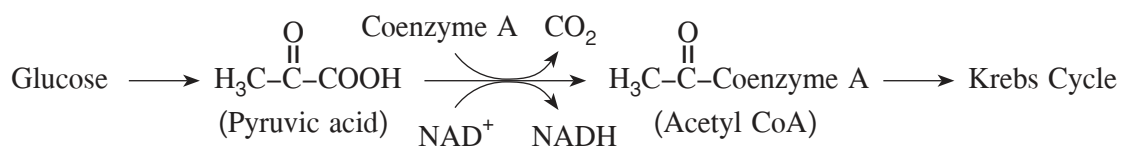
(3) มีเอนไซม์จำเพาะเข้าช่วยในแต่ละปฏิกิริยาในไกลโคไลซิส

(4) เริ่มต้นจากกลูโคส 1 โมเลกุล จะได้ผลลัพธ์เป็นกรดไพรูวิก 2 โมเลกุล

(5) ใช้พลังงานในกระบวนการ 2 ATP และได้พลังงานออกมา 4 ATP เกิด

$2\text{NADH} + 2\text{H}^+$ หรือ $2\text{NADH}_2 = 6 \text{ ATP}$ ($\text{NADH}_2 = 3 \text{ ATP}$) ดังนั้นปฏิกิริยาช่วงไกลโคไลซิสได้พลังงานทั้งสิ้น $6 + 4 - 2 = 8 \text{ ATP}$

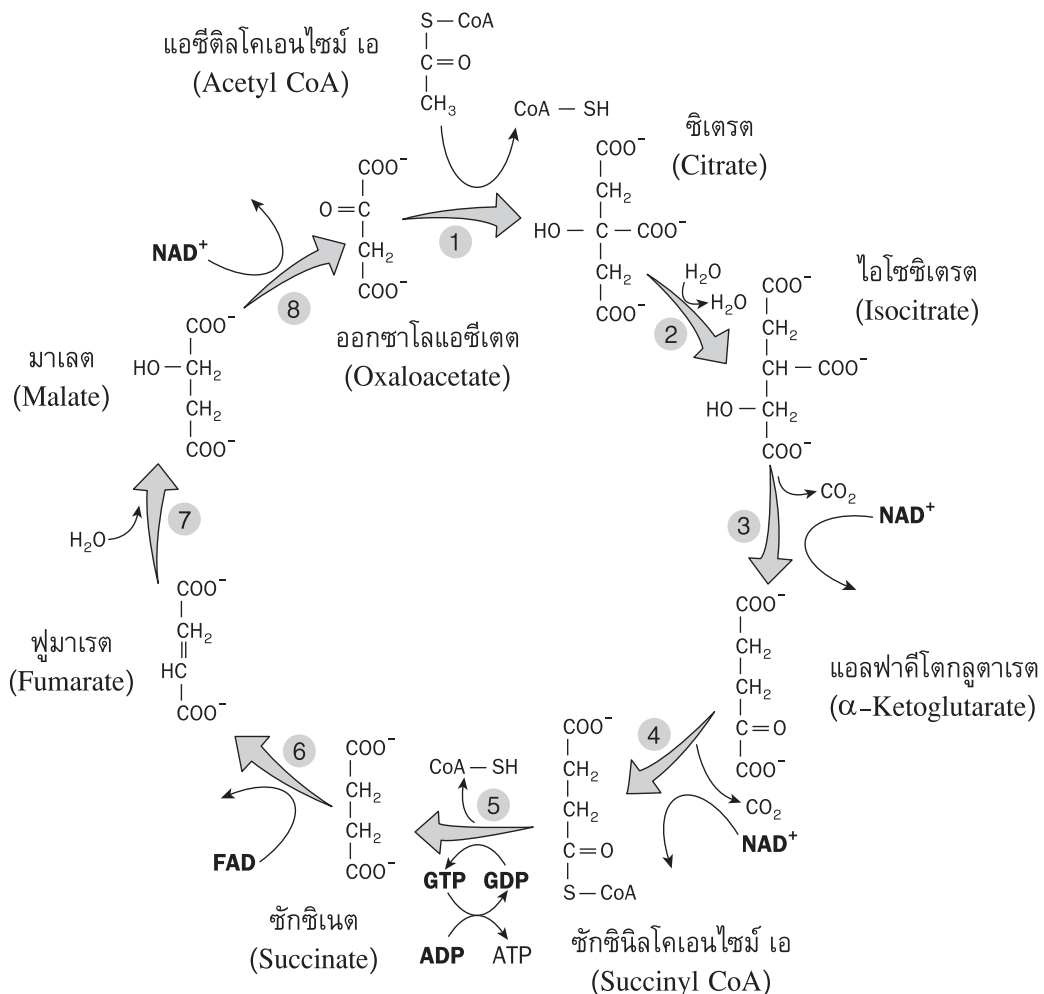
2) การสร้างแอสีติลโคเอนไซม์ เอ (Acetyl Coenzyme A) อยู่ระหว่างจุดเชื่อมต่อระหว่างไกลโคไลซิสกับวัฏจักรเครบส์ เกิดในเนื้อเยื่อชั้นในของไมโทคอนเดรีย โดยกรดไพรูวิกแต่ละโมเลกุลจะทำปฏิกิริยากับโคเอนไซม์ เอ (Coenzyme A หรือ CoA) ได้เป็นแอสีติลโคเอนไซม์ เอ (Acetyl CoA) ซึ่งคาร์บอน 2 อะตอม มีการปลดปล่อย CO_2 1 โมเลกุล และเปลี่ยน NAD^+ เป็น $\text{NADH} + \text{H}^+$



การสลายกลูโคส 1 โมเลกุลในช่วงไกลโคไลซิสได้กรดไพรูวิก 2 โมเลกุล จึงได้แอสีติลโคเอนไซม์ เอ 2 โมเลกุล CO_2 2 โมเลกุล และ 2NADH_2 (ไฮโดรเจน 4 อะตอม) ดังนั้นการสร้างแอสีติลโคเอนไซม์ เอ จะได้พลังงาน $2 \text{ NADH}_2 = 6 \text{ ATP}$ ($\text{NADH}_2 = 3 \text{ ATP}$)

3) วัฏจักรเครบส์ (Krebs cycle) หรือวัฏจักรของกรดซิตริก (Citric acid cycle)

ตั้งตามชื่อผู้ค้นพบ คือ เซอร์ ฮานส์ เครบส์ (Sir Hans Krebs) นักชีววิทยาชาวอังกฤษ มีขั้นตอนดังนี้



(1) คาร์บอน 2 อะตอมของแอซีติลโคเอนไซม์ เอ (Acetyl CoA) รวมตัวกับ ออกซาลิแอซีเตต (Oxaloacetate) โดยใช้เอนไซม์ซิเตรตซินเทส (Citrate synthase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลผลิตเป็นซิเตรต (Citrate) และปล่อย CoA เป็นอิสระ

(2) เอน้ำออกจากซิเตรต 1 โมเลกุลกลายเป็นซิสอะโคนิเตต (Cis-aconitate) ก่อน (ใช้เวลาสั้นมาก) จากนั้นซิสอะโคนิเตตจึงรวมตัวกับน้ำ 1 โมเลกุลเกิดเป็นไอโซซิเตรต (Isocitrate) โดยใช้เอนไซม์อะโคนิเตต (Aconitase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

(3) ไอโซซิเตรตถูกออกซิไดซ์ไปเป็นแอลฟาคีโตกลูตาเรต (α-Ketoglutarate) และให้ CO₂ ออกมาโดยใช้เอนไซม์ไอโซซิเตรตดีไฮโดรจีเนส (Isocitrate dehydrogenase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และมีการให้อิเล็กตรอนกับ NAD⁺ กลายเป็น NADH + H⁺

(4) แอลฟาคีโตกลูตาเรตถูกออกซิไดซ์ ปล่อยหมู่ CO₂ ออกมา และรับโคเอนไซม์ เอเข้าไปแทนตำแหน่ง CO₂ ได้เป็นซักซินิลโคเอนไซม์ เอ (Succinyl CoA) โดยมีเอนไซม์แอลฟาคีโตกลูตาเรต ดีไฮโดรจีเนสคอมเพล็กซ์ (α-Ketoglutarate dehydrogenase complex) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้มีการให้อิเล็กตรอนกับ NAD⁺ กลายเป็น NADH + H⁺

(5) หมู่ CoA ของซัคซินิลโคเอนไซม์ เอ จะถูกแทนที่ด้วยหมู่ฟอสเฟต (Pi) ซึ่งพันธะนี้จะไม่อยู่ตัวโดยจะส่งต่อไปให้ GDP ซึ่งสามารถให้หมู่ฟอสเฟตแก่ ADP เกิดเป็น ATP และซัคซินิลโคเอนไซม์ เอจะเปลี่ยนไปเป็นซัคซิเนต (Succinate) โดยมีเอนไซม์ซัคซินิลโคเอนไซม์เอซินทีเทส (Succinyl CoA synthetase) มาเร่งปฏิกิริยา

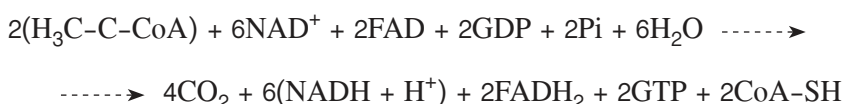
(6) ซัคซิเนตเปลี่ยนไปเป็นฟูมาเรต (Fumarate) โดยเอนไซม์ซัคซิเนตดีไฮโดรจีเนส (Succinate dehydrogenase) ในปฏิกิริยานี้จะให้ไฮโดรเจนให้แก่ FAD เกิดเป็น FADH_2

(7) เติมน้ำ 1 โมเลกุลให้แก่ฟูมาเรตให้เปลี่ยนไปเป็นมาเลต (Malate) โดยมีเอนไซม์ฟูมาเรส (Fumarase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

(8) มาเลตจะถูกออกซิไดซ์ให้เป็นออกซาลอแอซีเตต ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่จะไปรวมกับแอซีติลโคเอนไซม์ เอ ตัวใหม่เพื่อเข้ารอบใหม่ของวัฏจักรเครบส์ต่อไป โดยมีเอนไซม์มาเลตดีไฮโดรจีเนส (Malate dehydrogenase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และมีการให้อิเล็กตรอนกับ NAD^+ กลายเป็น $\text{NADH} + \text{H}^+$

สรุปปฏิกิริยาของวัฏจักรเครบส์

(1) ปฏิกิริยาทุกขั้นตอนสรุปเป็นสมการได้ดังนี้



(2) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดบริเวณเมทริกซ์ (Matrix) ของไมโทคอนเดรีย

(3) มีเอนไซม์จำเพาะเข้าช่วยในแต่ละปฏิกิริยาในวัฏจักรเครบส์

(4) CO_2 ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรจะถูกปลดปล่อยออกมาพร้อมกับลมหายใจออก

(5) ถ้าเริ่มจากการสลายกลูโคส 1 โมเลกุล จะได้แอซีติลโคเอนไซม์ เอ 2 โมเลกุล

จะได้ผลลัพธ์คือ

- เกิด ATP 2 โมเลกุล (วงละ 1 โมเลกุล)

- เกิดไฮโดรเจนที่มีพลังงานสูง 16H^+ (วงละ 8 อะตอม) โดยที่ 12H^+ จะมี

NAD^+ มารับแล้วกลายเป็น $\text{NADH} + \text{H}^+$ จำนวน 6 โมเลกุล อีก 4H^+ จะส่งให้ FAD กลายเป็น FADH_2 จำนวน 2 โมเลกุล

(6) ดังนั้นปฏิกิริยาช่วงวัฏจักรเครบส์จะได้พลังงานทั้งหมด

จาก ATP = 2 ATP

จาก $6(\text{NADH} + \text{H}^+)$ = 18 ATP ($1\text{NADH} + \text{H}^+ = 3 \text{ATP}$)

จาก 2FADH_2 = 4 ATP ($1\text{FADH}_2 = 2 \text{ATP}$)

รวมทั้งหมด = 24 ATP

4) ระบบการถ่ายทอดอิเล็กตรอน (Electron Transport System)

เกิดในเยื่อหุ้มชั้นในของไมโทคอนเดรีย โดยไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการออกซิเดชันของเชื้อเพลิงนั้นมีการลำเลียงต่อไปให้ตัวรับส่งไฮโดรเจน คือ NAD^+ , FAD โคเอนไซม์ (Co-enzyme) ไซโทโครม (Cytochrome) และ O_2 ซึ่งเป็นตัวรับตัวสุดท้าย