

ตอนที่ 1

ชีววิทยาของเซลล์

บทที่ 2

ชีวโมเลกุลของสิ่งมีชีวิต

เค้าโครงเรื่อง

- 2.1 เคมีที่เป็นพื้นฐานของสิ่งมีชีวิต
 - 2.1.1 สารเคมีและปฏิกิริยาเคมี
 - 2.1.2 พันธะเคมีและพันธะอื่น
 - 2.1.3 น้ำและคุณสมบัติของน้ำ
 - 2.1.4 คำศัพท์ที่เกี่ยวข้องทางชีววิทยา
- 2.2 การสังเคราะห์โมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์
 - 2.2.1 หมู่ปฏิกิริยา
 - 2.2.2 พอลิเมอร์
- 2.3 ชีวโมเลกุลชนิดหลัก
 - 2.3.1 คาร์โบไฮเดรต
 - 2.3.2 ลิพิด
 - 2.3.3 โปรตีน
 - 2.3.4 กรดนิวคลีอิก

สิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ ในโลกประกอบด้วยอะตอมและ โมเลกุลของธาตุและสารประกอบ เช่นเดียวกับกับสิ่ง ไม่มีชีวิต แต่มีความพิเศษเพิ่มขึ้น ในแง่ที่ว่าอะตอมและ โมเลกุลมีอัตราปฏิกิริยาต่อกันอย่างถูกต้องเหมาะสมเพื่อที่จะทำให้มีการถ่ายทอพลังงานซึ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิตได้อย่างต่อเนื่อง มุมมองของชีววิทยาที่ทันสมัยในปัจจุบัน ได้พิจารณาสิ่งมีชีวิตว่าเป็นการผสมผสานกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ จึงจำเป็นที่จะต้องมีความรู้พื้นฐานทาง เคมีและฟิสิกส์เป็นอย่างดี

โดยเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับกลไกทางชีววิทยา

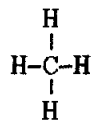
2.1 เคมีที่เป็นพื้นฐานของสิ่งมีชีวิต

สิ่งมีชีวิตถึงแม้ว่าจะมีความหลากหลายดังได้กล่าวแล้วในข้อ 1.2 แต่ในความหลากหลายนั้น มีสิ่งที่คล้ายคลึงกันคือกระบวนการเมแทบอลิซึม จึงเป็นเหตุผลที่ให้นักชีววิทยานิยมทำการทดลองเพื่อศึกษาหาข้อมูลและความรู้จากกลไกทางชีววิทยาจากแบคทีเรียและ โปรโตซัวซึ่งเป็นตัวแทนของโพรแคริโอท และยูแคริโอท เพื่อนำข้อมูลมาประยุกต์ใช้ในสิ่งมีชีวิตอื่นในระดับสูงขึ้นมา รวมถึงมนุษย์ด้วยและเพื่อให้เข้าใจกลไกทางเคมีและฟิสิกส์ที่ควบคุมการทำงานของสิ่งมีชีวิต จึงควรทราบหลักเคมีที่เกี่ยวข้องกับชีววิทยา ดังนี้

2.1.1 สารเคมีและปฏิกิริยาเคมี เมื่อนำสารเคมีจากสิ่งมีชีวิตมาวิเคราะห์จะพบว่าร้อยละ 98 ของมวลสิ่งมีชีวิตประกอบด้วยธาตุหลัก 6 ธาตุคือ คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน แคลเซียม และฟอสฟอรัส ธาตุอื่น ๆ ที่เป็นส่วนประกอบรองมีอยู่ประมาณ 14 ธาตุ เช่น ซัลเฟอร์ ไอโอดีน ทองแดง เหล็ก รวมเรียกว่า ธาตุที่พบน้อย (trace element) ธาตุต่าง ๆ เหล่านี้รวมกันโดยมีพันธะหลายรูปแบบ ประกอบกันเป็นโมเลกุลต่าง ๆ ของสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งหมายถึงสารประกอบที่พบในสิ่งมีชีวิตและมีอะตอมของธาตุคาร์บอนเป็นแกน สำหรับการมีพันธะกับอะตอมของธาตุคาร์บอนด้วยตัวเอง และอะตอมของธาตุอื่น ธาตุที่ประกอบกันเป็นสารอินทรีย์มีปริมาณน้อย เช่น NaCl , HCl , H_3PO_4 ส่วนใหญ่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ รักษาแรงดันออสโมซิส ควบคุม pH และระบบบัฟเฟอร์

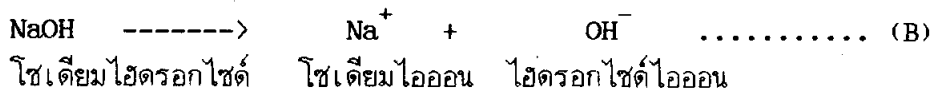
หลักการเขียนสูตรสารเคมีมี 2 แบบ คือ (1) สูตรเคมีทั่วไป เช่น น้ำเขียนว่า

H_2O (2) สูตรโครงสร้าง เช่น มีเทน ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ง่ายที่สุด เขียนได้ดังนี้



การเขียนสูตรโครงสร้างเป็นที่นิยมใช้สำหรับสารอินทรีย์เพื่อให้ทราบถึงพันธะที่อยู่ระหว่างอะตอม ตลอดจนหมู่ปฏิกิริยาที่มีอยู่ในสารอินทรีย์แต่ละสาร

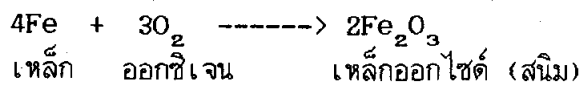
ปฏิกิริยาเคมี คือปฏิกิริยาที่มีการเกิดพันธะหรือการคลายพันธะเคมีที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารประกอบ เช่น ก๊าซมีเทนซึ่งเกิดจากกระบวนการย่อยสลายตามธรรมชาติของสารอินทรีย์



กรดไฮโดรคลอริกเป็นกรดแก่เมื่อแตกตัวเป็น H^+ และ Cl^- ในสภาพสารละลาย อีเล็กตรอนของ ไฮโดรเจนมีพันธะกับคลอรีนอะตอมจึงทำให้คลอรีนอะตอมมีประจุเป็นลบมากขึ้น ในทำนองเดียวกัน โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเบสแก่ เมื่ออยู่ในสภาพสารละลายจะแตกตัวเป็น Na^+ และ OH^- ไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถพันธะอีเล็กตรอนจากอะตอมของ โซเดียมได้ดี จึงทำให้โซเดียมอะตอมมีประจุเป็นบวกมากขึ้น เมื่อนำสารละลายกรดและเบสมารวมกัน (A)+(B) จะได้เกลือโซเดียมคลอไรด์และน้ำดังสมการ



(2) **ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน** คือปฏิกิริยาเคมีที่มีความสำคัญในลำดับต้นของสิ่งมีชีวิต กล่าวคือ อะตอมในโมเลกุลของสารประกอบจะเสียอีเล็กตรอนตั้งแต่หนึ่งอีเล็กตรอนขึ้นไป เรียกว่ามีปฏิกิริยาออกซิเดชัน เมื่อมีการเสียอีเล็กตรอนย่อมจะต้องมีสารมารับอีเล็กตรอนนั้น เรียกปฏิกิริยานี้ว่า รีดักชัน ในช่วงแรกของการค้นพบ เชื่อว่าเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการกระทำของออกซิเจนเพียงอย่างเดียว เช่นในกรณีการเกิดสนิมของเหล็ก

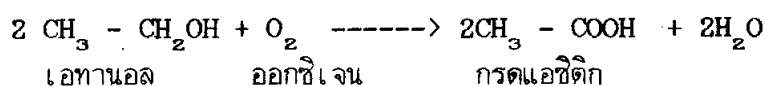


เหล็กเสียอีเล็กตรอน เรียกว่า ถูกออกซิไดส์ ออกซิเจนรับอีเล็กตรอนเรียกว่า ถูกรีดิวซ์ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันจึงมักเกิดควบคู่กันไปอาจรวมเรียกว่า **ปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction)**

โดยทั่วไป อีเล็กตรอนไม่สามารถหลุดออกไปได้ง่ายจากสารประกอบที่มีพันธะเป็นแบบโคเวเลนต์ (**covalent bond**) ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ปฏิกิริยาออกซิเดชันมักเกี่ยวข้องกับการดึงเอาไฮโดรเจนอะตอมออกจากสารประกอบ ในทำนองตรงกันข้ามปฏิกิริยารีดักชันเป็นการรับไฮโดรเจนอะตอมเพิ่มเข้ามาในสารประกอบ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการสลายและการใช้พลังงาน และจะกล่าวถึงในบทที่ 6

จากความรู้ที่ทราบอยู่ในปัจจุบันพอสรุปได้ว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้น 3 รูปแบบคือ

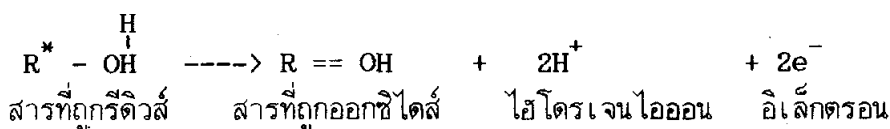
(ก) การเติมออกซิเจน เช่น ปฏิกิริยาการเผาไหม้



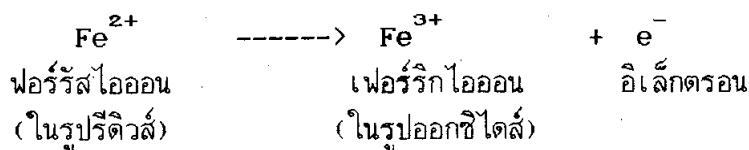
แอลกอฮอล์ที่ได้จากการหมัก (เหล้าอ่อน) ถูกเปลี่ยนเป็นน้ำส้มสายชู

(กรดแอซิดิก) ที่มีรสเปรี้ยว

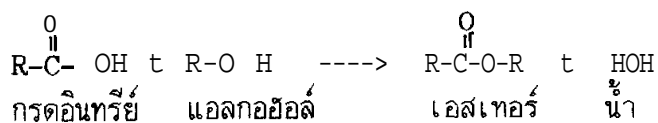
(ข) การดึงไฮโดรเจนอะตอมออกจากสารประกอบ ตามทฤษฎีเกิดขึ้นดังนี้



(ค) การดึงอิเล็กตรอนออกจากสารโดยตรง



(3) ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน-ไฮโดรไลซิส เป็นปฏิกิริยาแบบที่ 3 ที่พบบ่อยในสิ่งมีชีวิต และสามารถเกิดย้อนกลับได้ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (dehydration) คือการดึงน้ำออกจากสารประกอบอย่างน้อย 2 โมเลกุลขึ้นไป ทำให้ได้สารประกอบชนิดใหม่ที่รวมกัน โดยมีพันธะโคเวเลนต์



ไฮโดรเจนอะตอมที่มีพันธะกันเป็นน้ำมาจาก กรดและแอลกอฮอล์ สารประกอบใหม่ที่ได้เรียก เอสเทอร์ (ester) ซึ่งหลายชนิดพบในผลไม้ที่มีกลิ่นหอม

* R คือสัญลักษณ์ที่ใช้ในวิชาเคมี แทนส่วนหนึ่งของโมเลกุลที่ไม่ใช่หมู่ปฏิกิริยา เช่น หมู่ acetyl C_2H_5 หรืออาจเป็นพวกอะโรเมติกก็ได้

เอสเทอร์เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับโดยการถูกย่อยสลายด้วยน้ำ (hydrolysis)

ดั่งสมการ



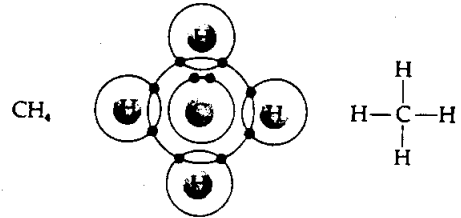
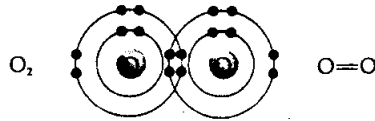
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก็เช่นเดียวกันกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่ให้ผลผลิตและให้พลังงานออกมาด้วย ซึ่งจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบ

2.1.2 พันธะเคมีและพันธะอื่น อะตอมของธาตุมักไม่อยู่โดดเดี่ยวแต่จะรวมกันเป็นโมเลกุลโดยการทำให้อิเล็กตรอนวงนอกของอะตอมมีจำนวนครบด้วยการอาศัยอิเล็กตรอนวงนอก ร่วมกัน เกิดพันธะที่เรียกว่า พันธะโคเวเลนต์ (covalent bond)

รูป 2-1 โมเลกุลของธาตุและสารประกอบที่มีพันธะกันแบบโคเวเลนต์

ก. โมเลกุลของออกซิเจน

ข. โมเลกุลของมีเทน



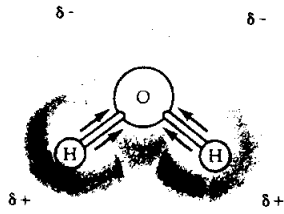
จาก Campbell, Neil A. 1990

การที่อะตอมดึงดูดมีพันธะกันได้เรียกว่ามีพันธะเคมี (chemical bond) พันธะเคมีที่เสถียรที่สุดคือพันธะโคเวเลนต์ รองลงมาคือ พันธะไอออนิก (ionic bond) โดยทั่วไปโมเลกุลของธาตุทั้งที่อยู่ในสถานะแก๊ส โลหะ หรืออะโลหะ มีอะตอมที่รวมกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ โมเลกุลของสารประกอบมีอะตอมที่รวมกันด้วยพันธะไอออนิก

(1) พันธะโคเวเลนต์แบบมีขั้วและไม่มีขั้ว การที่อิเล็กตรอนของอะตอมดึงดูดซึ่งกันและกันจนเกิดพันธะโคเวเลนต์ขึ้นก็เนื่องจากศักยภาพไฟฟ้าลบ (electronegativity) ซึ่งถ้ามีศักยภาพไฟฟ้าลบสูง จะทำให้ให้อิเล็กตรอนดึงดูดกันได้ดี ออกซิเจนเป็นธาตุที่มีศักยภาพไฟฟ้าสูงสุดในจำนวนธาตุที่มีอยู่ 92 ธาตุ เมื่อให้อิเล็กตรอนร่วมกับไฮโดรเจนอะตอมในโมเลกุลของน้ำ ทำให้ความเร็วของอิเล็กตรอนที่หมุนรอบอะตอมของออกซิเจนเร็วกว่าที่หมุนรอบอะตอมของไฮโดรเจน (รูป 2-2) เป็นผลให้โมเลกุลของน้ำพันธะโคเวเลนต์แบบมีขั้ว (polar covalent

bond) ถ้าในกรณีที่ศักย์ไฟฟ้าของอะตอมเท่ากัน อิเล็กตรอนที่หมุนรอบอะตอมของธาตุที่รวมกัน เป็นโมเลกุลก็จะหมุนด้วยความเร็วเท่ากัน จึงทำให้โมเลกุลของสารมีพันธะ โคนวเลนต์แบบไม่มีขั้ว (nonpolar covalent bond) เช่น โมเลกุลของแก๊สมีเทน

รูป 2-2 พันธะ โคนวเลนต์แบบมีขั้วในโมเลกุลของน้ำ

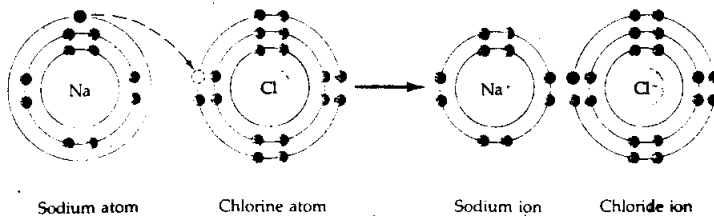


จาก Campbell, Neil A. 1990

(2) พันธะ ไอออนิก คือ พันธะที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของธาตุที่มีแรงดึงดูดของอิเล็กตรอนที่แสดงประจุต่างกัน เช่น ในกรณีของ NaCl โซเดียมมีเวเลนซ์ 1 เพราะอิเล็กตรอนวงนอกสุด (วงที่สาม) มีเพียง 1 คลอรีนอะตอมมีอิเล็กตรอนวงนอกสุดเป็น 7 เมื่อรวมเป็นสารประกอบ อิเล็กตรอนจากอะตอมของโซเดียมจะเข้าไปรวมหมุนอยู่ในวงของอะตอมของคลอรีน(รูป 2-3) เป็นผลให้ โซเดียมอะตอมมีประจุเป็น + เรียกว่า **cation** ในทางตรงกันข้าม คลอรีนอะตอมได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น จึงมีประจุเป็น - เรียกว่า **anion** ประจุบวกและประจุลบเกิดเป็นพันธะที่เรียกว่า ionic bond สารประกอบที่เกิดจากพันธะไอออนิก พบได้ทั่วไปในโลก ส่วนใหญ่เมื่อละลายน้ำหรือสารละลายอื่น จะแตกตัวเป็นไอออนได้

รูป 2-3 พันธะ ไอออนิกที่เกิดจากการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนของโซเดียมอะตอม

ไปยังคลอรีนอะตอม (ดูเส้นประมีลูกศร)



โซเดียมอะตอม คลอรีนอะตอม โซเดียมไอออน คลอไรด์ไอออน

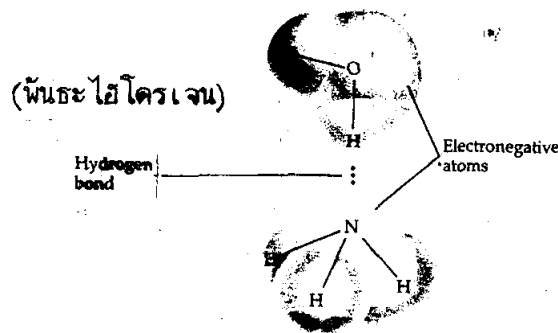
จาก Campbell, Neil A. 1990

Sodium chloride - NaCl

(3) ไฮโดรเจน (hydrogen bond) เป็นพันธะที่อ่อนเมื่อเทียบกับสองพันธะแรก เกิดจากไฮโดรเจนอะตอม ไปมีพันธะกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีศักย์ไฟฟ้าลบด้วยพันธะ โคนวเลนต์

แบบมีขั้ว (รูป 2-4) เป็นการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำและแอมโมเนีย เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเป็นโมเลกุลที่มีพันธะโคเวเลนต์แบบมีขั้ว โดยออกซิเจนอะตอมมีประจุเป็นลบเล็กน้อย และไฮโดรเจนอะตอมมีประจุเป็นบวกเล็กน้อย ในทำนองเดียวกันในโมเลกุลของแอมโมเนีย จะมีศักย์ไฟฟ้าลบเล็กน้อย เนื่องจากไนโตรเจนอะตอมต้องใช้อิเล็กตรอนร่วมกับไฮโดรเจนอะตอมถึง 3 อะตอม จึงเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นระหว่างไฮโดรเจนอะตอมในโมเลกุลของน้ำและไนโตรเจนอะตอมในโมเลกุลของแอมโมเนีย

รูป 2-4 พันธะไฮโดรเจน ระหว่างโมเลกุลของน้ำและแอมโมเนีย



จาก Campbell, Neil A. 1990

ในเซลล์สิ่งมีชีวิต พันธะไฮโดรเจนพบได้บ่อย เช่นการเกิดโครงสร้างที่สองของโปรตีน

(4) อันตรกิริยา แวน เดอร์ วาลส์ (Van der Waals interaction) โมเลกุลของสารประกอบที่มีพันธะโคเวเลนต์แบบไม่มีขั้ว ย่อมมีประจุอยู่ที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของโมเลกุล ทั้งนี้เนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา และไม่ได้กระจายอย่างสม่ำเสมอ อาจไปสะสมอยู่ที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของโมเลกุล จึงทำให้เกิดประจุได้ทั้งบวกและลบ ทำให้โมเลกุลสามารถรวมกันได้แต่ไม่แน่น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า อันตรกิริยา แวน เดอร์ วาลส์

(5) อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก (hydrophobic interaction) หมายถึงความสามารถดึงดูดกันระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ สารบางอย่างเช่น น้ำมัน เมื่อผสมกับน้ำจะมีสภาพเป็นหยดเล็ก ๆ กระจายอยู่ในน้ำแล้วจะรวมตัวกันเป็นน้ำมันอีกครั้งด้วยการส่งเสริมของอันตรกิริยา แวน เดอร์ วาลส์ R-group ในโมเลกุลของโปรตีนสามารถมีอันตรกิริยากัน ทำให้

โปรตีนบางชนิด ไม่ละลายน้ำและเกิดเป็น โปรตีน โครงสร้างที่สามและ โครงสร้างที่สี่ขึ้นได้

2.1.3 **น้ำและคุณสมบัติของน้ำ** มวลของสิ่งมีชีวิตมีน้ำเป็นส่วนประกอบหลัก ในคนมีประมาณร้อยละ 20 (ในกระดูก) ไปจนถึงร้อยละ 85 (ในเซลล์สมอง) ในเซลล์ของตัวอ่อนจะมีน้ำมากกว่าเซลล์ของตัวเต็มวัย ปริมาณของน้ำในสิ่งมีชีวิตมากน้อยต่างกัน เช่น ในแมงกะพรุนมีน้ำถึงร้อยละ 95 น้ำมีบทบาทสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตทั้งในแง่ของสรีรวิทยา และเป็นตัวกลางหรือสภาพแวดล้อม

น้ำสามารถละลายสารประกอบได้มากชนิด เพราะมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดีที่สุด ประกอบกับสารมากชนิดสามารถแตกตัวเป็นไอออนในน้ำได้ และมีบทบาทสำคัญในการช่วยเสริมให้ปฏิกิริยาเคมีดำเนินไปตามปกติ เพราะเข้าไปมีส่วนทำปฏิกิริยาหรือไม่ก็เป็นผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยา ซึ่งจะพบได้ง่ายในปฏิกิริยาของกระบวนการเมแทบอลิซึมในสิ่งมีชีวิต ยิ่งไปกว่านั้น น้ำยังเป็นแหล่งให้ออกซิเจนกลับคืนสู่บรรยากาศโดยผ่านกระบวนการเมแทบอลิซึม (สังเคราะห์ด้วยแสง) ของพืช ในสัตว์ น้ำทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นเพื่อป้องกันมิให้ส่วนของอวัยวะเสียดสีกัน โดยเฉพาะบริเวณข้อของกระดูก และยังทำหน้าที่ลำเลียงสารต่าง ๆ ไปสู่เซลล์โดยผ่านทางระบบหมุนเวียนของเลือด ขณะเดียวกันก็ช่วยนำของเสียออกจากเซลล์โดยผ่านทางระบบขับถ่าย

คุณสมบัติของน้ำที่มีบทบาทเกี่ยวข้องกับสรีรวิทยาของสิ่งมีชีวิตที่ควรพิจารณาเป็นพิเศษคือ

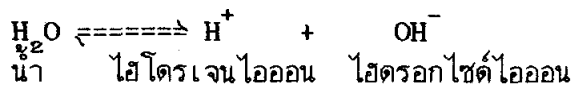
(1) **แรงเชื่อมแน่นและแรงยึดติด** ถึงแม้ว่าน้ำจะเป็นของเหลวที่ไหลไปมาได้ แต่โมเลกุลของน้ำก็เกาะติดกันตลอดเวลาเมื่อโมเลกุลมาอยู่ใกล้กัน โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในภาชนะหรือในระบบท่อลำเลียงของพืช เรียกการเกาะติดกันระหว่างโมเลกุลของน้ำว่ามี**แรงเชื่อมแน่น (cohesive force)** ยิ่งไปกว่านั้น โมเลกุลของน้ำยังสามารถเกาะกับโมเลกุลของสารอื่นได้ โดยเฉพาะสารที่พื้นผิวมีอะตอมหรือมีโมเลกุลที่มีประจุไฟฟ้า เรียกการยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของน้ำและสารอื่นว่ามี**แรงยึดติด (adhesive force)** จึงทำให้น้ำมีคุณสมบัติของความตึงผิว (**surface tension**) คุณสมบัติทั้งหมดของน้ำดังกล่าวอำนวยความสะดวกให้น้ำเกิดการซึมผ่านรูเล็ก (**capillary action**) โดยซึมผ่านช่องว่างของรากขนอ่อนเข้าสู่ท่อลำเลียงน้ำ (**xylem**) ของระบบท่อลำเลียงจากรากขึ้นไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืชจนถึงใบและยอด

(2) **รักษาระดับอุณหภูมิในคงที่** น้ำมีความร้อนจำเพาะ (**specific heat**) สูง

เนื่องจากโมเลกุลของน้ำจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน การเปลี่ยนสถานะของน้ำจำเป็นต้องให้พลังงานสูงเพื่อหักพันธะไฮโดรเจน จึงต้องมีการนำเข้าพลังงานหรือได้พลังงานออกมาจากการเปลี่ยนสถานะเสมอ ซึ่งในแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีการเปลี่ยนสถานะก็เฉพาะบริเวณผิวเท่านั้น ในแหล่งน้ำขนาดใหญ่ เช่น ทะเลสาบ ทะเล และมหาสมุทร อุณหภูมิของน้ำจึงค่อนข้างคงที่ สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในแหล่งน้ำจึงมีน้ำเป็นตัวช่วยรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่เพื่อให้กระบวนการเมแทบอลิซึม โดยเฉพาะกลไกการทำงานของเอนไซม์ดำเนินไปตามปกติ เพราะการทำงานของเอนไซม์มีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมค่อนข้างแคบ คือ เปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน 10 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปอุณหภูมิของน้ำมักเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 15-25 องศาเซลเซียส จึงเหมาะสำหรับสิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิด

(3) ความหนาแน่นของน้ำ น้ำมีความหนาแน่นมากที่สุดเมื่ออุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แล้วจะเริ่มหนาแน่นน้อยลง เมื่ออุณหภูมิลดลง ซึ่งต่างกับสารอื่นที่เมื่ออุณหภูมิลดลงมักมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น การที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากคุณสมบัติอีกประการหนึ่งของพันธะไฮโดรเจนที่จับโมเลกุลของน้ำไว้ด้วยกัน เพราะอุณหภูมิที่จุดเยือกแข็งจะทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำถูกดันให้ห่างจากกัน ความหนาแน่นจะลดลงประมาณร้อยละ 10 จึงทำให้ก้อนน้ำแข็งลอยอยู่บนผิวน้ำ คุณสมบัตินี้ช่วยให้สิ่งมีชีวิตสามารถมีชีวิตรอดอยู่ภายใต้ก้อนน้ำแข็งในทะเลสาบ ทะเล และมหาสมุทร ซึ่งน้ำส่วนใหญ่ของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

(4) การแตกตัวเป็นไอออน น้ำสามารถแตกตัวเป็นไอออนได้เล็กน้อย ดังสมการ

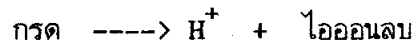


ความสามารถในการแตกตัวเป็นไอออนแล้วกลับคืนเป็นน้ำดั้งเดิมของน้ำบริสุทธิ์มีอัตราที่ใกล้เคียงกันจึงทำให้น้ำมีคุณสมบัติเป็นกลาง การแตกตัวเป็นไอออนของน้ำมีประมาณ 10^{-7} โมเลกุล/น้ำ 1 ลิตร ความเป็นกลางของน้ำช่วยดำรงสภาพของความเป็นกรดเป็นเบส pH และบัฟเฟอร์ ของสารละลายให้ดำเนินไปตามปกติ

2.1.4 คำศัพท์เคมีที่เกี่ยวข้องทางชีววิทยา กลไกการทำงานของสิ่งมีชีวิตเป็นกลไกการทำงานของปฏิกิริยาชีวเคมี โดยมีเอนไซม์ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเนื่องจากปัจจัยหลายประการ จึงควรทราบความหมายของศัพท์ทางเคมีที่เกี่ยวข้องดังนี้

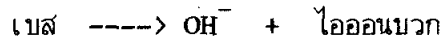
(1) กรดและเบส

กรด คือ สารที่แตกตัวในสารละลายได้ไฮโดรเจนและไอออนลบ



กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ กรดเป็นตัวให้โปรตอน (ไฮโดรเจนไอออนคือโปรตอน)

เบส คือ สารที่แตกตัวในสารละลายได้ไฮดรอกไซด์ไอออน และไอออนบวก



กล่าวอีกนัยหนึ่งคือเบสเป็นตัวรับโปรตอน

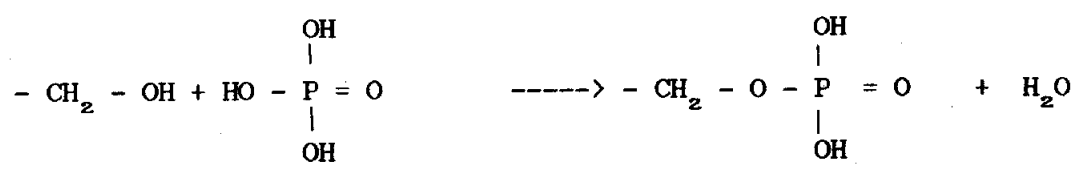
ทั้งกรดและเบสเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็น H^+ และ OH^- ตามลำดับ ถ้าความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายมากกว่า 10^{-7} โมลาร์ สารละลายนั้นจะมีฤทธิ์เป็นกรด ในทำนองเดียวกัน ถ้าความเข้มข้นของ OH^- ในสารละลายมากกว่า 10^{-7} สารละลายนั้นจะมีฤทธิ์เป็นเบส กรดอินทรีย์ที่พบตามธรรมชาติได้บ่อยคือ กรดมด (formic acid HCOOH) กรดน้ำส้ม (acetic acid, CH_3COOH) เบสอินทรีย์ที่พบเป็นส่วนประกอบของสารในสิ่งมีชีวิตคือ พิวรีนและไพริมิดีนเบส (purine and pyrimidine base) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของกรดนิวคลีอิก

(2) pH ไฮโดรเจนไอออนที่มีอยู่ในของเหลวของสิ่งมีชีวิต มีความเข้มข้นต่ำ จึงนิยมแสดงตัวเลขออกมาเป็นตัวเต็มของเลขแสดงกำลังผกผันของความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน เรียกว่า pH เช่น น้ำบริสุทธิ์ที่มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนเป็น 10^{-7} โมลาร์ ซึ่งเท่ากับ logarithm ของ $1/10^{-7}$ เลขตัวเต็มของเลขแสดงกำลังผกผันคือ 7.0 เรียกว่า มี pH 7.0 เป็นตัวเลขที่แสดง pH เป็นกลาง มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนเท่ากับของไฮดรอกไซด์ไอออน ตัวเลขที่ต่ำกว่า 7 ลงไป แสดงถึงความเป็นกรด ตัวเลขที่สูงกว่า 7 ขึ้นมาแสดงถึงความเป็นเบส โดยมีช่วงตัวเลขจาก 0 \rightarrow 14 คือจากความเป็นกรดมาก \rightarrow ความเป็นกลาง \rightarrow ความเป็นเบสมาก

(3) บัฟเฟอร์ (buffer) คือสารหรือกลุ่มของสารที่ทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าของ pH เมื่อสารละลายได้รับการเพิ่มความเป็นกรดหรือเบส ปกติสารที่ทำหน้าที่บัฟเฟอร์ มีคุณสมบัติรับหรือให้ไฮโดรเจนไอออน ซึ่งก็คือสารประกอบของกรดอ่อนที่สลับคู่กับเบส หรือสารประกอบของเบสอ่อนที่สลับคู่กับกรด สารที่ทำหน้าที่บัฟเฟอร์ในร่างกายของคน โดยเฉพาะในน้ำ

กระบวนการเกิดเอสเทอร์นี้เรียกว่า **esterification** ซึ่งเป็นคุณสมบัติของกรดอะมิโนทุกชนิด พันธะที่ทำให้เกิดสารประกอบเอสเทอร์เรียก พันธะเอสเทอร์

การเกิดเอสเทอร์อาจเกิดจากการดออินทรีย์มีพันธะเอสเทอร์กับหมู่ปฏิกิริยาแอลดีไฮด์ของน้ำตาลโมโนแซ็กคาไรด์ก็ได้ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า **phosphorylation**



หมู่ปฏิกิริยาของกลูโคส กรดฟอสฟอริก หมู่ปฏิกิริยาของกลูโคส 6 - ฟอสเฟต น้ำ

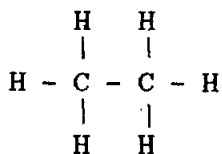
เมื่อนำเกลือ กรด หรือเบส มาละลายน้ำ และสามารถแตกตัวเป็นไอออนได้ ก็มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ จึงเรียกว่าเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ถ้าไม่สามารถนำไฟฟ้าได้เรียกว่า nonelectrolyte ซึ่งได้แก่ น้ำตาล แอลกอฮอล์ เอสเทอร์และสารอื่น

2.2 การสังเคราะห์โมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์

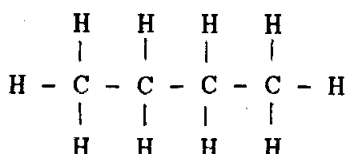
สารประกอบที่มีอะตอมของธาตุคาร์บอนเป็นส่วนประกอบเรียกว่าสารอินทรีย์ ปัจจุบันมีสารอินทรีย์ที่เป็นที่รู้จักแล้วประมาณกว่า 2 ล้านสาร และมีการศึกษาค้นพบอย่างต่อเนื่อง สารอินทรีย์เริ่มจากอย่างง่าย เช่น มีเทน (CH₄) มีคาร์บอนเพียงหนึ่งอะตอม เรื่อยไปจนถึงนับพันอะตอม และมีน้ำหนักโมเลกุลเกินกว่า 100,000 ดัลตัน (dalton) ธาตุที่เป็นส่วนประกอบของสารอินทรีย์ในสิ่งมีชีวิตแต่ละกลุ่มมีสัดส่วนต่างกัน แต่จะใกล้เคียงกันในหมู่ชนิดของกลุ่มเดียวกัน การที่เป็นเช่นนั้นเนื่องมาจากวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตที่สามารถสังเคราะห์สารต่าง ๆ ขึ้นมาเพื่อประโยชน์ไว้ใช้ในกลไกอันสลับซับซ้อนของการดำรงชีวิต โดยมีธาตุคาร์บอนเป็นแกนหลัก คาร์บอนอะตอมอาจมีพันธะเดี่ยวเป็นเส้นยาว (-C-C-C-) หรืออาจมีพันธะคู่ (-C=C-) หรือพันธะสาม (-C≡C-) ธาตุที่มาเสริมแกนหลักของคาร์บอนอะตอมคือไฮโดรเจน ดังนั้นธาตุหลักของสารอินทรีย์จึงเรียกว่า ไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) เมื่อสารประกอบซับซ้อนมากขึ้น อาจมีการแตกแขนง หรือรวมจับเป็นวง (รูป 2-5)

รูป 2-5 แผนภาพแสดงแบบต่าง ๆ ของการมีพันธะในสารประกอบอินทรีย์ ให้สังเกต
ว่าคาร์บอนอะตอมมี 4 พันธะ โคแวลเลนต์

ก. พันธะเดี่ยวแบบเส้นสั้นและเส้นยาว

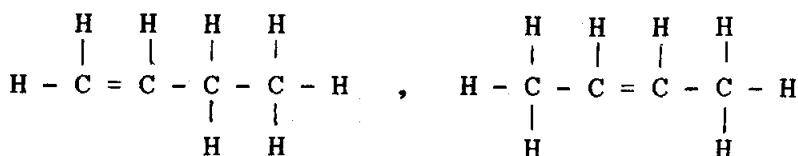


ethane



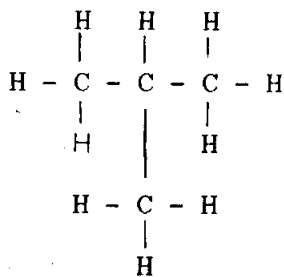
butane

ข. พันธะคู่



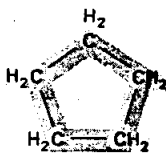
butene

ค. มีการแตกแขนง

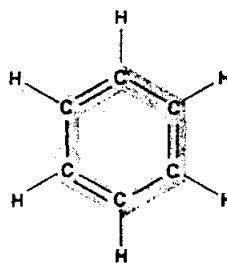


isopentane

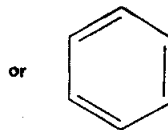
ง. แบบเป็นวง



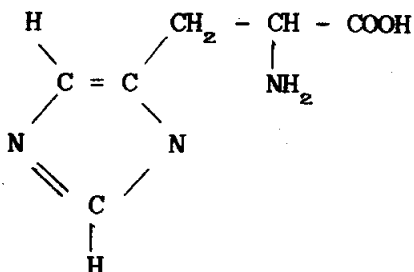
cyclopentane



benzene



จ. แบบวงผสมเส้น



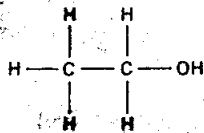
histidine (กรดอะมิโนชนิดหนึ่ง)

สารประกอบบางชนิดมีสูตรโมเลกุลเหมือนกัน แต่มีสูตรโครงสร้างต่างกัน ทำให้มีคุณสมบัติต่างกันไปด้วย เรียกสารที่มีสูตรโมเลกุลเหมือนกันว่า ไอโซเมอร์ (isomer) มี 3 ชนิด คือ ก. **structural isomer** ต่างกันที่การจัดตัวของพันธะโคเวเลนต์ระหว่างอะตอม (รูป 2-6 ก) ข. **geometric isomer** ต่างกันที่หมู่หรืออะตอมที่ปลายด้านหนึ่งของพันธะคู่กลับข้างกัน (รูป 2-6 ข) และ ค. **enantiomer** ต่างกันที่ทั้งโครงสร้างกลับข้างเหมือนภาพในกระจกเงา (รูป 2-6 ค) นิยมเรียกว่า D หรือ L isomer โดยยึดสูตรโครงสร้างของ glyceraldehyde ที่มี 3 คาร์บอนอะตอมเป็นหลัก สารประกอบที่เป็น D-isomer คือสารที่อสมมาตรคาร์บอนอะตอมตัวสุดท้ายจัดตัวแบบเดียวกับ D-glyceraldehyde ถ้าจัดตัวแบบ L-glyceraldehyde ก็เป็น L-isomer

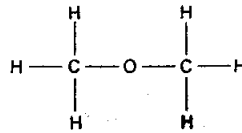
ในเซลล์สิ่งมีชีวิต สามารถสังเคราะห์ได้เพียงไอโซเมอร์เดียวเท่านั้น เช่น น้ำตาลกลูโคส อยู่ในรูปของ D-isomer เซลล์สามารถแยกแยะนำไปใช้ในปฏิกิริยาได้เพียง D-isomer เท่านั้น น้ำตาลที่อยู่ในรูป L-isomer สามารถสังเคราะห์ขึ้นในห้องปฏิบัติการได้

รูป 2-6 แผนภาพแสดงไอโซเมอร์แบบต่าง ๆ

ก. structural isomer

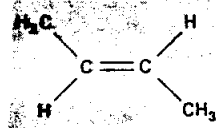


ethanol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$)

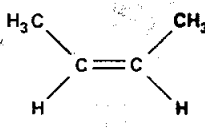


diethyl ether ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$)

ข. geometric isomer



trans -2- butane



cis -2- butane

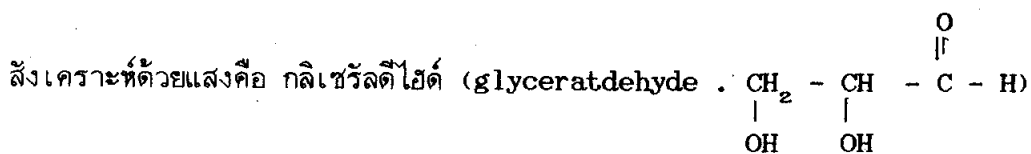
2.2.1 หมู่ปฏิกิริยา สารประกอบอินทรีย์ไม่สามารถสังเคราะห์ขึ้นมาได้เองจากแก๊นไฮโดรคาร์บอนของสาร ไฮโดรเจนอะตอมตั้งแต่หนึ่งอะตอมขึ้นไปต้องถูกแทนที่ด้วยกลุ่มอะตอมก่อน จึงจะสามารถมีปฏิกิริยาได้ เรียกกลุ่มอะตอมนี้ว่า **หมู่ปฏิกิริยา (functional group)** หมู่ปฏิกิริยานี้จะ ไม่มีพันธะไอออนิก หรือพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของสารประกอบอื่น เพื่อการสังเคราะห์เป็นสารใหม่ขึ้นมาได้

หมู่ปฏิกิริยาที่มีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยาเคมีของสิ่งมีชีวิตมี 6 หมู่ คือ

(1) **หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group)** คือ $-OH$ ซึ่งมีพันธะอยู่กับไฮโดรคาร์บอนของสารอินทรีย์ (การเขียนเช่นนี้เพื่อความสะดวกโดยการลดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจนอะตอมจึงไม่ควรเข้าใจผิดว่าเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน) เป็นหมู่ที่มีขั้วไฟฟ้าคือศักย์ไฟฟ้าลบที่ออกซิเจนอะตอมจะดึงอิเล็กตรอนเข้าหาตัว โมเลกุลของน้ำจะถูกดูดด้วยหมู่ไฮดรอกซิล จึงทำให้ช่วยในการละลาย เช่น น้ำตาลมีหมู่ไฮดรอกซิลจึงละลายน้ำได้ สารอินทรีย์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเรียกว่า **แอลกอฮอล์** การเรียกชื่อลงท้ายด้วยคำว่า **อล (-ol)** ดูตาราง

2-1

(2) **หมู่คาร์บอนิล (carbonyl group)** คือ $-CO$ ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมมีพันธะคู่กับออกซิเจนอะตอม ถ้าหมู่นี้อยู่ที่ปลายแก๊นไฮโดรคาร์บอน เรียกว่าสารอินทรีย์นั้นว่า **แอลดีไฮด์ (aldehyde)** และถ้าแทรกอยู่ระหว่างแก๊นไฮโดรคาร์บอน เรียกว่า **คีโตน (ketone)** ดังนั้น สารอินทรีย์ที่มีหมู่คาร์บอนิลจึงต้องมีแก๊นคาร์บอนอะตอมอย่างน้อยที่สุด 3 อะตอม เช่น โพรพานัล (propanal) และอะซีโตน (acetone) ดูตาราง 2-1 สารทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติต่างกัน และมีไอโซเมอร์ได้หลายแบบ น้ำตาลโมเลกุลเล็กที่สุดที่สังเคราะห์โดยกระบวนการ



(3) **หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group)** คือ $-COOH$ ประกอบด้วยออกซิเจนอะตอมมีพันธะคู่กับคาร์บอนอะตอมที่มีพันธะเดี่ยวอยู่กับหมู่ไฮดรอกซิล เรียกสารอินทรีย์ที่มีหมู่นี้ว่า **กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid)** สารอินทรีย์อย่างง่ายที่พบในธรรมชาติคือ กรดนมหรือกรดฟอร์มิก (formic acid) กรดแอสซิติค (ดูตาราง 2-1) และกรดคาร์บอกซิลิก การ

ที่หมู่คาร์บอกซิลมีคุณสมบัติเป็นกรดเพราะเป็นแหล่งให้ไฮโดรเจนไอออน โดยที่ออกซิเจนอะตอม ทั้ง 2 อะตอมมีศักย์ไฟฟ้าลบดึงอิเล็กตรอนเข้าหาตัว

(4) **หมู่เอมิโน (amino group)** คือ $-NH_2$ ประกอบด้วยไนโตรเจนอะตอม พันธะเดียวกับไฮโดรเจน 2 อะตอม แล้วไปมีพันธะกับแกนไฮโดรคาร์บอน เรียกสารประกอบที่มีหมู่นี้ว่า **เอมีน (amine)** หมู่เอมิโนทำหน้าที่เป็นเบส สารอินทรีย์อย่างง่ายที่มีหมู่นี้คือเมทิลามีน (methylamine) ดูตาราง 2-1

สารประกอบสำคัญของสิ่งมีชีวิตคือ **กรดอะมิโน (amino acid)** มีทั้งหมู่คาร์บอกซิล และหมู่เอมิโนในโมเลกุลเดียวกัน รายละเอียดจะกล่าวถึงในข้อ 2.3.3

(5) **หมู่ซัลไฟไฮดริล (sulfhydryl group)** คือ $-SH$ ประกอบด้วย ซัลเฟอร์อะตอมพันธะเดียวกับไฮโดรเจนอะตอม ทำนองเดียวกับหมู่ไฮดรอกซิล สารประกอบที่มีหมู่นี้มีชื่อเรียกกลางๆว่า **ไทออล (thiol)** โดยทั่วไปมีกลิ่นเหมือนไข่เน่า เช่น เมอร์แคปโทเอทานอล (ดูตาราง 2-1) บทบาทสำคัญของหมู่นี้คือ เชื่อมต่อเส้นพอลิเพปไทด์ เพื่อให้เกิดโปรตีนชนิดต่าง ๆ (ข้อ 2.3.3)

(6) **หมู่ฟอสเฟต (phosphate group)** คือ $-PO_4$ ประกอบด้วยฟอสฟอรัสอะตอมพันธะอยู่กับ 4 ออกซิเจนอะตอม โดยที่ ออกซิเจนอะตอมหนึ่งไปมีพันธะกับแกนไฮโดรคาร์บอน ดูตาราง 2-1 โดยทั่วไป อินทรีย์ฟอสเฟตสะสมพลังงานไว้ในโมเลกุล และสามารถถ่ายทอดไปสู่โมเลกุลอื่นได้ด้วยการถ่ายโอนหมู่ฟอสเฟต สารอินทรีย์ที่สำคัญต่อสิ่งมีชีวิตที่ทำหน้าที่ถ่ายโอนพลังงานคือ adenosine triphosphate (ATP) ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 6

2.2.2 พอลิเมอร์ สารอินทรีย์ที่สำคัญของสิ่งมีชีวิต เช่น โปรตีน และกรดนิวคลีอิก ซึ่งมีโมเลกุลใหญ่ ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาจากโมเลกุลเล็กด้วยการนำโมเลกุลเล็กเรียกว่าโมโนเมอร์ (monomer) มาต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ ทำให้เกิดการ**ควบแน่น (condensation)** เป็นโมเลกุลใหญ่ หรือ **พอลิเมอร์ (polymers)** การสังเคราะห์ เรียกได้ว่าเป็นกระบวนการ**การดึงน้ำออก (dehydration)**

สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดมีเอกลักษณ์ของตนเอง เนื่องจากมีลำดับการเรียงตัวของโมโนเมอร์ภายใน DNA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์และเป็นส่วนประกอบของยีนที่เฉพาะ พอลิเพปไทด์ (โปรตีน) ที่เป็นส่วนประกอบของเซลล์ในเนื้อเยื่อแต่ละประเภทจะมีลำดับการเรียงตัวของ

กรดอะมิโน โครงสร้างของโปรตีน ตลอดจนน้ำหนักโมเลกุล สัดส่วนชนิดของโปรตีนที่แตกต่างกัน ความซับซ้อนของชนิดและสัดส่วนของพอลิเมอร์จะมีมากขึ้น ในสิ่งมีชีวิตที่มีวิวัฒนาการสูงขึ้น

ตารางที่ 2-1 หมู่ปฏิกิริยาที่สำคัญของสารประกอบอินทรีย์

หมู่ปฏิกิริยา	สูตร	ชื่อกลุ่มสารอินทรีย์	ตัวอย่างชื่อสารอินทรีย์
Hydroxyl	$R-OH$	Alcohols	$\begin{array}{c} H & H \\ & \\ H-C & -C-OH \\ & \\ H & H \end{array}$ Ethanol
Carbonyl	$\begin{array}{c} O \\ \\ R-C \\ \\ H \end{array}$	Aldehydes	$\begin{array}{c} H & H & O \\ & & \\ H-C & -C & -C-H \\ & & \\ H & H & H \end{array}$ Propanal
	$\begin{array}{c} O \\ \\ R-C-R \end{array}$	Ketones	$\begin{array}{c} H & O & H \\ & & \\ H-C & -C & -C-H \\ & & \\ H & & H \end{array}$ Acetone
Carboxyl	$\begin{array}{c} O \\ \\ R-C \\ \\ OH \end{array}$	Carboxylic acids	$\begin{array}{c} H & O \\ & \\ H-C & -C \\ & \\ H & OH \end{array}$ Acetic Acid
Amino	$\begin{array}{c} H \\ \\ R-N \\ \\ H \end{array}$	Amines	$\begin{array}{c} H & H \\ & \\ H-C & -N \\ & \\ H & H \end{array}$ Methylamine
Sulphydryl	$R-SH$	Thiols	$\begin{array}{c} H & H \\ & \\ H-C & -C-SH \\ & \\ H & H \end{array}$ Mercaptoethanol
Phosphate	$\begin{array}{c} O \\ \\ R-O-P-O^- \\ \\ O^- \end{array}$	Organic phosphates	$\begin{array}{c} OH & OH & H & O \\ & & & \\ H-C & -C & -C & -O-P-O^- \\ & & & \\ H & H & H & O^- \end{array}$ Glycerol phosphate

*In all cases R symbolizes the carbon skeleton to which the functional group is attached

จาก Campbell, Neil A. 1990

พอลิเมอร์ถูกทำให้เป็นโมโนเมอร์ได้ด้วยกระบวนการสลายด้วยน้ำ (hydrolysis) ตัวอย่างปฏิกิริยา และชนิดของพอลิเมอร์ ดูจากข้อ 2.3 และบทที่ 6