

# บทที่ 1

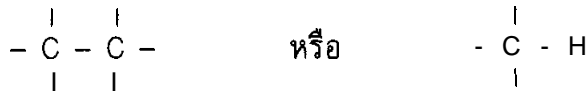
## เคมีของสิ่งมีชีวิต

สุพจน์ ไขทิพย์วงศ์

เซลล์เป็นหน่วยย่อยที่สุดของชีวิต ประกอบด้วยธาตุสำคัญเพียง 4 ชนิด คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ธาตุต่าง ๆ เหล่านี้รวมกันทั้งหมดประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเซลล์ ส่วนอีก 5 เปอร์เซ็นต์ที่เหลือเป็นของธาตุอื่นประมาณ 30 ชนิด ธาตุต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์มักไม่ได้อยู่อย่างโดดเดี่ยวเป็นอิสระ แต่อยู่รวมกันเป็นสารประกอบเคมี (compound) ซึ่งไม่อาจแบ่งแยกได้ง่าย สารประกอบต่าง ๆ ที่มีอยู่ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต อาจแบ่งออกได้ 2 พวก คือ สารอนินทรีย์ (inorganic compound) และสารอินทรีย์ (organic compound)

สารอนินทรีย์ซึ่งพบมากที่สุดในเซลล์และสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตมาก คือ น้ำ เซลล์มีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 5–90 เปอร์เซ็นต์ตามแต่ชนิดของเซลล์ เช่น เซลล์ในร่างกายมีน้ำประมาณ 66 เปอร์เซ็นต์ และเซลล์สมองมีน้ำประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น ส่วนสารอนินทรีย์พวกอื่นอาจอยู่ในสภาพเป็นของแข็งเรียกว่า mineral solid เช่น calcium phosphate ในกระดูก และ calcium carbonate ในเปลือกหอย เป็นต้น และอยู่ในสภาพที่เป็นสารละลายหรือไอออน (ion) ในน้ำ เช่น  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{PO}_4^{+++}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  และ  $\text{Cl}^-$  เป็นต้น ไอออนของโลหะบางชนิดก็อาจรวมอยู่ในโมเลกุลของสารประกอบบางอย่าง สิ่งมีชีวิตมักได้รับแร่ธาตุจากแหล่งต่าง ๆ ตามธรรมชาติ เช่น ดิน น้ำ และมหาสมุทร เป็นต้น

สารอินทรีย์จัดเป็นสารประกอบที่มีความสำคัญมากต่อสิ่งมีชีวิต และเป็นองค์ประกอบสำคัญของโปรโทพลาซึม (protoplasm) สารอินทรีย์ หมายถึง สารประกอบซึ่งมีธาตุคาร์บอนและอะตอมของธาตุคาร์บอนต้องมีการเกาะเกี่ยวกันกับอะตอมของธาตุคาร์บอนด้วยตัวเองหรือกับไฮโดรเจนอย่างน้อยหนึ่งอะตอม ดังรูปที่ 1-1



### รูปที่ 1-1 การเกาะเกี่ยวของธาตุคาร์บอนในสารอินทรีย์

ดังนั้น สารประกอบบางอย่างถึงแม้มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอาจไม่ถูกจัดเป็นสารอินทรีย์ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และสารประกอบคาร์บอเนต (CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>) เป็นต้น ตัวอย่างสารประกอบอินทรีย์ที่ง่ายที่สุด คือ ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ซึ่งมีธาตุคาร์บอน 1 อะตอมเกาะเกี่ยวกับไฮโดรเจน 4 อะตอม

สารอินทรีย์ซึ่งถูกจัดเป็นองค์ประกอบขั้นมูลฐานของสิ่งมีชีวิต คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ลิพิด และกรดนิวคลีอิก เป็นต้น

### คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate)

คาร์โบไฮเดรต หมายถึง สารประกอบซึ่งมีธาตุคาร์บอนเกาะเกี่ยวกับโมเลกุลของน้ำ แต่เป็นความหมายซึ่งไม่สู้ถูกต้องนัก การที่ได้ให้ความหมายไว้เช่นนี้เนื่องจากโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนโดยมีอัตราส่วนจำนวนอะตอมของธาตุไฮโดรเจนต่อออกซิเจนเท่ากับ 2:1 คล้ายกับในโมเลกุลของน้ำ ดังนั้น จึงอาจเขียนสูตรโมเลกุลทั่วไปของคาร์โบไฮเดรตได้เป็น (C H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub> โดย n มีค่าตั้งแต่ 3 ขึ้นไป

คาร์โบไฮเดรตนอกจากเป็นแหล่งพลังงานให้แก่สิ่งมีชีวิตแล้ว ยังมีบทบาทสำคัญในการเป็นโครงสร้างของพืชด้วย คาร์โบไฮเดรต ได้แก่ สารประกอบพวกน้ำตาลและสารประกอบอื่นที่เปลี่ยนแปลงมาจากน้ำตาล คาร์โบไฮเดรตอาจถูกจัดแบ่งออกได้เป็น 4 พวก คือ

1. Monosaccharide (mono = one)
2. Disaccharide (di = two)
3. Oligosaccharide (oligo = few)
4. Polysaccharide (poly = many)

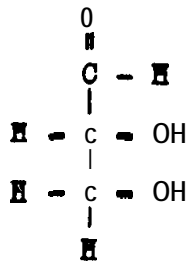
saccharide มาจากคำว่า sakcharon หมายถึง น้ำตาล

**1. Monosaccharide** หมายถึง น้ำตาลอย่างง่าย (simple sugar) ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนตั้งแต่ 3 อะตอมขึ้นไป ลักษณะเป็นผลึก มีรสหวานและละลายน้ำได้ monosaccharide อาจถูกแบ่งออกได้เป็นกลุ่มตามจำนวนอะตอมของธาตุคาร์บอนที่มีอยู่ในโมเลกุลดังนี้ คือ

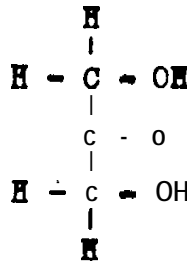
- (1) Triose เป็นน้ำตาลอย่างง่าย ซึ่งมีธาตุคาร์บอน 3 อะตอม

- (2) Tetrose เป็นน้ำตาลอย่างง่าย ซึ่งมีธาตุคาร์บอน 4 อะตอม
  - (3) Pentose เป็นน้ำตาลอย่างง่าย ซึ่งมีธาตุคาร์บอน 5 อะตอม
  - (4) Hexose เป็นน้ำตาลอย่างง่าย ซึ่งมีธาตุคาร์บอน 6 อะตอม
- ose เป็นคำลงท้ายบ่งบอกว่าเป็นน้ำตาล

Monosaccharide ซึ่งมีโครงสร้างอย่างง่ายที่สุด คือ glyceraldehyde และ dihydroxyacetone



Glyceraldehyde

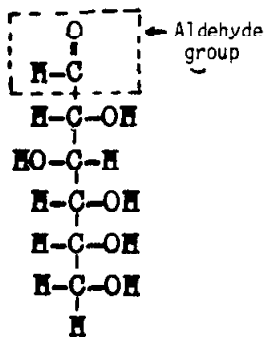


Dihydroxyacetone

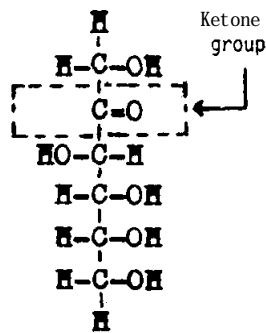
รูปที่ 1-2

นอกจากนี้ยังอาจแบ่ง monosaccharide ออกได้เป็น 2 พวกตามคุณสมบัติทางเคมี คือ (1) พวก aldose sugar และ (2) ketose sugar

Aldose sugar มีคุณสมบัติทางเคมีทั่วไปคล้ายสารประกอบพวกแอลดีไฮด์ (aldehyde) เนื่องจากมีหมู่แอลดีไฮด์อยู่ในโมเลกุล เช่น น้ำตาลกลูโคส เป็นต้น Ketose sugar มีคุณสมบัติทางเคมีทั่วไปคล้ายสารประกอบพวกคีโตน (ketone) เนื่องจากมีหมู่คีโตนอยู่ในโมเลกุล เช่น น้ำตาลฟรุกโทส เป็นต้น



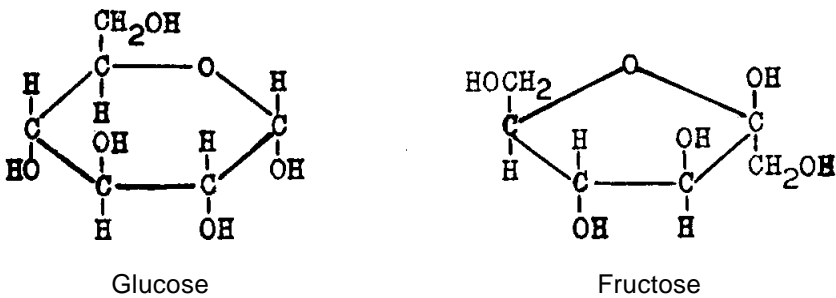
Glucose



Fructose

รูปที่ 1-3

ดังนั้นจึงถือว่าหมู่แอลดีไฮด์และหมู่คีโตนเป็นหมู่ปฏิกิริยา (functional group) ของ monosaccharide การจัดเรียงตัวของหมู่ต่าง ๆ ในโมเลกุลของน้ำตาลมีผลทำให้เกิดน้ำตาลต่าง ๆ ชนิดเดียวกัน เช่น น้ำตาลกลูโคสกับน้ำตาลฟรุกโทส มีสูตรโมเลกุลเหมือนกัน คือ  $C_6H_{12}O_6$  แต่เป็นน้ำตาลต่างชนิดกัน เนื่องจากการจัดเรียงตัวของหมู่ต่าง ๆ ในโมเลกุลเป็นโครงสร้างที่แตกต่างกัน สูตรโครงสร้างของ monosaccharide โดยเฉพาะพวกที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนตั้งแต่ 5 อะตอมขึ้นไป นอกจากเขียนแบบเส้นเปิด (open chain structure) แล้วยังสามารถเขียนแบบวงแหวน (ring structure) ได้อีก มีหลักฐานบางอย่างแสดงว่า monosaccharide เมื่อละลายอยู่ในน้ำมีโครงสร้างแบบวงแหวน เช่น น้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสอาจเขียนสูตรโครงสร้างแบบวงแหวนได้ ดังรูป 1-4



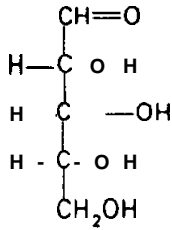
รูปที่ 1-4

โครงสร้างของ monosaccharide ซึ่งประกอบด้วย 6 อะตอมต่อกันเป็นวงแหวนถูกเรียกว่า pyranose ring ส่วนโครงสร้างที่ประกอบด้วย 5 อะตอมต่อกันเป็นวงแหวนถูกเรียกว่า furanose ring

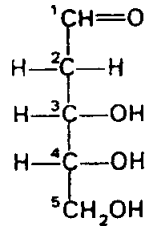
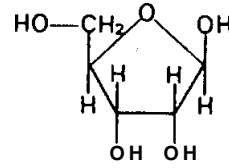
ตัวอย่างของ monosaccharide ซึ่งมักพบอยู่ในสิ่งมีชีวิตนอกจากน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสแล้ว ที่ควรรู้จัก คือ ribose, deoxyribose และ galactose

Glucose เป็น monosaccharide ซึ่งพบมากที่สุดตามธรรมชาติ ใช้เป็นแหล่งพลังงานของสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ Fructose เป็น ketose sugar ซึ่งพบมากในน้ำผลไม้และน้ำผึ้ง Ribose เป็นองค์ประกอบสำคัญของ RNA Deoxyribose เป็นองค์ประกอบของ DNA และ Galactose เป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุลของน้ำตาล lactose พบในน้ำนมเรียกว่า น้ำตาลนม (milk sugar)

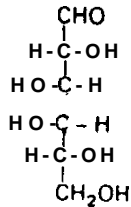
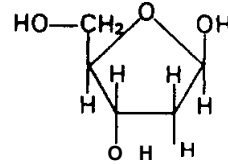
**2. Disaccharide** เป็นน้ำตาลซึ่งประกอบด้วย monosaccharide 2 โมเลกุลเชื่อมต่อกันด้วย glycosidic linkage ลักษณะเป็นผลึก มีรสหวานและละลายน้ำได้ ตัวอย่างเช่น Maltose ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส 2 โมเลกุล



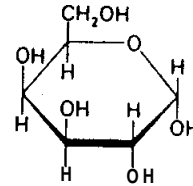
*D-Ribose*



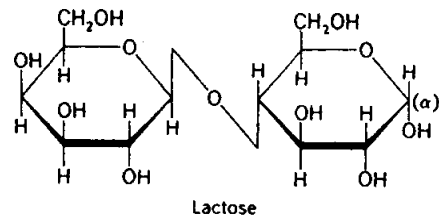
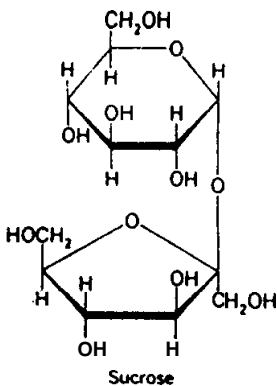
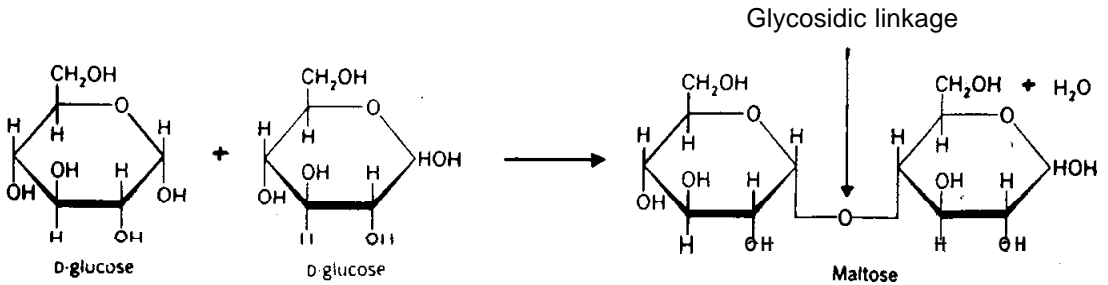
*D-2-Deoxyribose*



*Galactose*



รูปที่ 1-5 ตัวอย่างของ monosaccharide ที่ควรรู้จัก



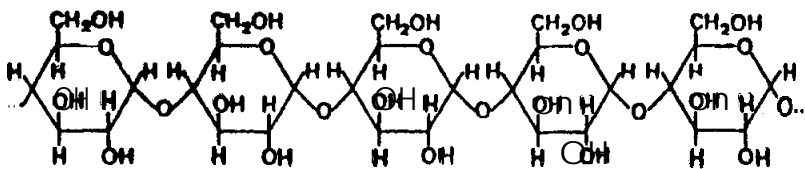
รูปที่ 1-6 Disaccharide

Disaccharide ซึ่งมักพบตามธรรมชาติมีประมาณ 20 ชนิด แต่ที่สำคัญมี 3 ชนิดดังตัวอย่างข้างต้น Maltose ได้จากการย่อยสลายแป้งหรือ glycogen อย่างไม่สมบูรณ์ในลำไส้ Sucrose หรือน้ำตาลทราย ได้จากน้ำอ้อยหรือน้ำหวานจากผลไม้ Lactose พบในน้ำนม เป็นน้ำตาลชนิดเดียวที่ผลิตได้จากร่างกายของสัตว์และไม่พบในพืช

**3. Oligosaccharide** เป็นคาร์โบไฮเดรตซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของ monosaccharide 3–10 โมเลกุลเชื่อมต่อกันด้วย glycosidic linkage Monosaccharide ที่เชื่อมต่อกันเป็นโมเลกุลของ oligosaccharide อาจเป็นชนิดเดียวกันทั้งหมด หรือต่างชนิดกันก็ได้ Oligosaccharide มีลักษณะเป็นผลึกและละลายน้ำได้

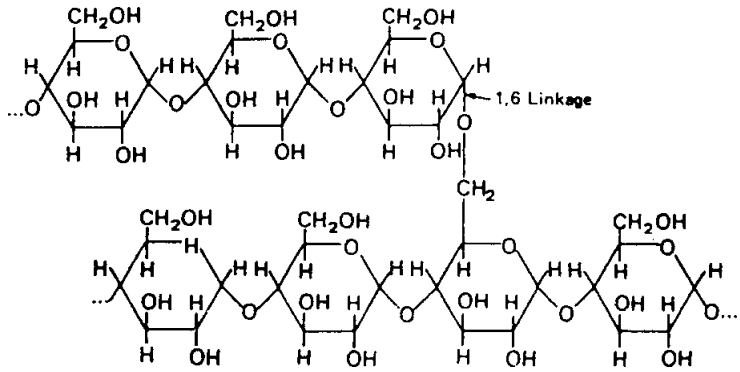
**4. Polysaccharide** เป็นคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วย monosaccharide หลายโมเลกุลเชื่อมต่อกันด้วย glycosidic linkage มีลักษณะเป็นอสัณฐาน ไม่เป็นผลึก ไม่มีรส และไม่ละลายน้ำ Polysaccharide อาจถูกจัดแบ่งออกได้เป็นหลายชนิดตามน้ำหนักโมเลกุล และลักษณะการเกาะเกี่ยวกันของ monosaccharide unit Polysaccharide ส่วนใหญ่ซึ่งรู้จักกันดีเป็น polysaccharide ที่ได้จากน้ำตาลกลูโคสต่อกันด้วย glycosidic linkage ตัวอย่างของ polysaccharide ได้แก่ starch, glycogen, cellulose และ inulin

แป้ง (starch) ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสต่อกันด้วย  $\alpha$ -glycosidic linkage เช่นเดียวกับกับ maltose แบ่งออกได้เป็น 2 พวก คือ amylose และ amylopectin Amylose เป็นแป้งซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสเรียงต่อกันเป็นเส้นยาวไม่มีการแตกแขนง



รูปที่ 1-7 Amylose

Amylopectin เป็นแป้งซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสเรียงต่อกันเป็นเส้นยาว และมีการแตกแขนง



รูปที่ 1-8 Amylopectin

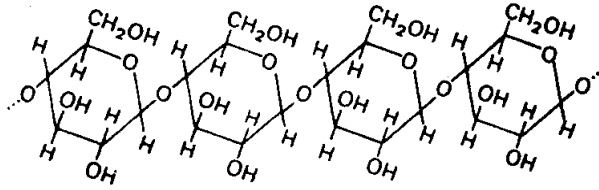
พืชมักสะสมคาร์โบไฮเดรตไว้ในรูปของแป้ง และแป้งยังถูกใช้เป็นอาหารของสิ่งมีชีวิตอื่นด้วย แป้งและ monosaccharide ในพืชอาจถูกเปลี่ยนแปลงไปมาได้ เช่น ต้นข้าวหรือธัญพืชอื่น เมื่อสังเคราะห์น้ำตาลกลูโคสได้แล้ว จะเปลี่ยนเป็นแป้งสะสมอยู่ในเมล็ด และแป้งที่สะสมไว้ในผลไม้ดิบเมื่อแก่สุกจะถูกเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาลกลูโคสหรือฟรุกโทสมีรสหวาน

Glycogen มีโครงสร้างคล้าย amylopectin แต่มีแขนงมากกว่า ปกติมักแตกแขนงทุก ๆ 8-10 หน่วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสที่เรียงต่อกัน Glycogen เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ถูกสะสมไว้ในร่างกายของสัตว์ บางครั้งก็เรียกว่า animal starch พบมากในตับและกล้ามเนื้อถือว่าเป็นแหล่งสะสมพลังงานของร่างกาย ในพืชชั้นต่ำบางชนิด เช่น ยีสต์ และรา เป็นต้น อาจพบว่ามี glycogen อยู่ และหอยนางรมเป็นสัตว์ซึ่งมี glycogen อยู่เป็นจำนวนมาก



รูปที่ 1-9 Glycogen

Cellulose ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสเรียงต่อกันเป็นสายยาวคล้ายแป้งแต่การเกาะเกี่ยวกันของโมเลกุลน้ำตาลกลูโคสใน cellulose เป็นแบบ  $\beta$ -Glycosidic linkage จึงแตกต่างจากแป้ง



รูปที่ 1-10 Cellulose

Cellulose เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในผนังเซลล์ของพืช พืชมักผลิต cellulose ออกมาเป็นจำนวนมากเพื่อทำให้เซลล์มีความแข็งแรง เนื่องจากประชากรของพืชมีเป็นจำนวนมาก ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า cellulose เป็นสารอินทรีย์ที่พบมากที่สุดในโลก cellulose ไม่ได้พบอยู่แต่ในพืชเท่านั้น สัตว์บางชนิด เช่น sea squirt (Subphylum Tunicata) ก็มี cellulose เป็นปลอกหรือเปลือกหุ้ม และร่างกายของคนสูงอายุอาจพบว่ามี cellulose ปนอยู่ในผิวหนังบ้างเล็กน้อย

inulin เป็นคาร์โบไฮเดรตซึ่งมีลักษณะคล้ายแป้งมาก ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลฟรุกโตสเรียงต่อกันด้วย glycosidic linkage เป็นอาหารสะสมของพืชบางชนิด เช่น ต้นรักแร้ เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมี polysaccharide ที่สำคัญพวกอื่นซึ่งมักพบกันมาก ได้แก่ pectin ในผนังเซลล์ของพืชและ chitin ในเปลือกโครงสร้างของสัตว์พวก arthropod เช่น กุ้งและปู เป็นต้น มนุษย์และสัตว์มักใช้คาร์โบไฮเดรตในรูปของแป้งหรือน้ำตาลแล้ว hydrolyse ให้เป็น monosaccharide ต่าง ๆ เช่น กลูโคส ฟรุกโตส และกาแลกโทส เป็นต้น โดยเอนไซม์ในระบบย่อยอาหาร ต่อจากนั้นจึงถูกดูดซึมผ่านผนังลำไส้เข้าสู่เส้นเลือดในร่างกาย

หน้าที่ของคาร์โบไฮเดรตต่อสิ่งมีชีวิตอาจสรุปได้ดังนี้

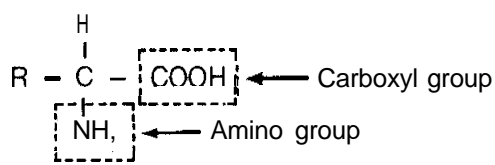
1. เป็นแหล่งพลังงานของเซลล์หรือร่างกาย
2. เป็นอาหารสะสมของพืชหรือสัตว์ในรูปของแป้งหรือ glycogen
3. เป็นส่วนประกอบของ glycoprotein ในผนังเซลล์ของพืช ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการแลกเปลี่ยนสารเข้าออกจากเซลล์
4. อาจถูกเปลี่ยนแปลงให้กลายเป็นลิพิดหรือโปรตีนได้ภายในเซลล์

## โปรตีน (Protein)

โปรตีนเป็นสารอินทรีย์ซึ่งมีองค์ประกอบซับซ้อนมาก ธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของโปรตีน คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน นอกจากนี้ โปรตีนบางชนิดอาจมีธาตุ



กำมะถันและฟอสฟอรัส หรือโลหะบางอย่างประกอบอยู่ด้วย เช่น เหล็กและแมกนีเซียมเป็นต้น โครงสร้างขั้นมูลฐานของโปรตีน คือ กรดแอมิโน (amino acid) ประกอบด้วยธาตุหลักทั้งสิ้น ดังกล่าว มีสูตรโครงสร้างทั่วไปดังรูปที่ 1-11



รูปที่ 1-11 โครงสร้างของกรดแอมิโน

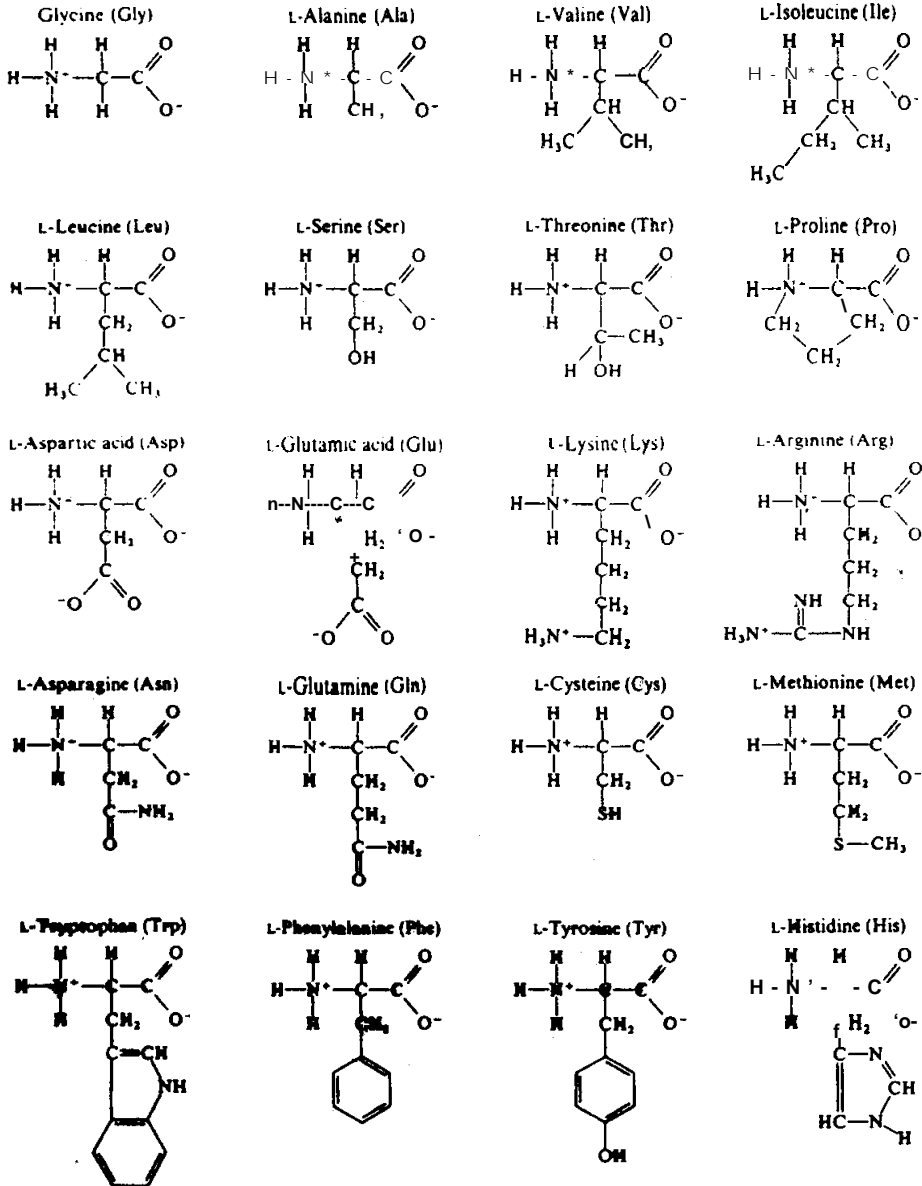
R - อาจเป็นธาตุไฮโดรเจนหรือหมู่ไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ

ในโครงสร้างของกรดแอมิโนมีหมู่ปฏิกิริยาที่สำคัญสองหมู่ คือ Carboxyl group (-COOH) แสดงคุณสมบัติเป็นกรด และ amino group (-NH<sub>2</sub>) แสดงคุณสมบัติเป็นเบสหรือต่าง ดังนั้น กรดแอมิโนจึงแสดงคุณสมบัติเป็นได้ทั้งกรดและด่างในโมเลกุลเดียวกัน สารประกอบซึ่งแสดงคุณสมบัติเป็นได้ทั้งกรดและด่างถูกเรียกว่าพวก amphoteric compound เนื่องจากทำปฏิกิริยาได้ทั้งกับกรดและด่าง กรดแอมิโนที่มีจำนวน carboxyl group เท่ากับจำนวน amino group ถูกจัดเป็นพวก neutral amino acid กรดแอมิโนที่มีจำนวน carboxyl group มากกว่า amino group ถูกจัดเป็นพวก acid amino acid และกรดแอมิโนที่มีจำนวน carboxyl group น้อยกว่า amino group ถูกจัดเป็นพวก basic amino acid กรดแอมิโนบริสุทธิ์มีลักษณะเป็นผลึกสีขาวและละลายน้ำได้ และจะละลายได้ดีในสภาพที่เป็นกรดหรือด่าง

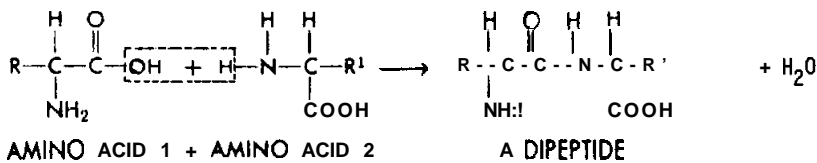
ตัวอย่างของกรดแอมิโนซึ่งมักถูกใช้เป็นส่วนประกอบของโปรตีนมีประมาณ 20 ชนิด ดังในรูปที่ 1-12

สำหรับกรดแอมิโนที่ร่างกายของคนหรือสัตว์ไม่อาจสังเคราะห์ได้อย่างเพียงพอแก่ความต้องการจำเป็นต้องได้รับจากอาหารถูกจัดเป็นกรดแอมิโนที่จำเป็นเรียกว่า essential amino acid เนื่องจากกรดแอมิโนมีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งกรดและด่าง จึงทำให้สามารถทำปฏิกิริยารวมตัวกันเองได้ โดยใช้ carboxyl group ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกรดทำปฏิกิริยารวมตัวกันกับ amino group ของอีกโมเลกุลหนึ่ง ดังสมการแสดงปฏิกิริยาในรูปที่ 1-13

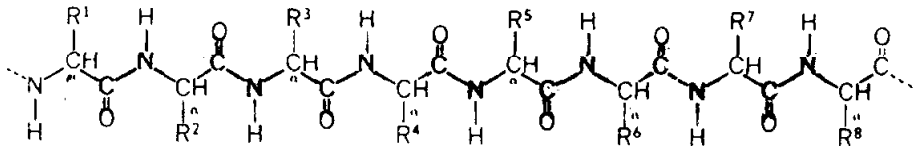
สะพานเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลของกรดแอมิโนซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง functional group ทั้งสองถูกเรียกว่า peptide bond หรือ peptide linkage และถ้ากรดแอมิโนจำนวนหลายโมเลกุลทำปฏิกิริยาเชื่อมต่อกันด้วย peptide linkage จนได้เป็นสารประกอบโมเลกุลใหญ่ (macromolecule) หรือยาวก็เรียกว่า เส้นพอลิเพปไทด์ (polypeptide chain) หรือโปรตีน



รูปที่ 1-12 กรดแอมิโนที่สำคัญต่างๆ



รูปที่ 1-13 Synthesis of a peptide bond by joining two amino acids



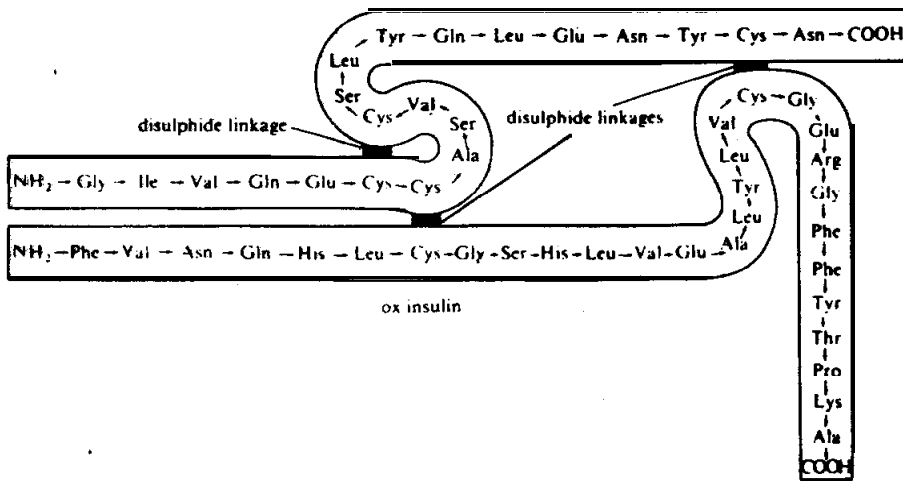
รูปที่ 1 - 1 4 General formula of a polypeptide chain showing the linkage of adjacent amino acid residues through peptide bonds

โมเลกุลของโปรตีนอาจประกอบด้วยกรดแอมิโนตั้งแต่ 100 ถึง 1,000 โมเลกุล และกรดแอมิโนที่เชื่อมต่อกันอาจมีมากมายหลายชนิด หรือเพียงไม่กี่ชนิด หรือชนิดเดียวกันโดยตลอดก็ได้ ลำดับการเรียงตัว (sequence) ของกรดแอมิโนชนิดต่าง ๆ ในเส้นพอลิเพปไทด์ที่สังเคราะห์ขึ้นในสิ่งมีชีวิตจะถูกกำหนดโดยยีน (gene) ในเส้นโครโมโซม (chromosome) ทั้งนี้เพื่อทำให้ได้เส้นพอลิเพปไทด์ซึ่งมีคุณสมบัติและลักษณะตามต้องการ แบบแผนการเรียงตัวของกรดแอมิโนในเส้นพอลิเพปไทด์ก็เช่นเดียวกับกับการเรียงตัวอักษร A-Z ในภาษาอังกฤษ เมื่อนำมาผสมเป็นคำพูดจะได้คำพูดต่าง ๆ มากมาย เช่น ถ้าเอา M ไว้หน้า A ไว้กลาง และ N ต่อท้ายจะได้คำว่า MAN หมายถึง คนผู้ชาย แต่ถ้ามีการสลับกันในระหว่างตัวอักษรที่เรียงต่อกัน หรืออักษรตัวหนึ่งตัวใดขาดหายไป หรือมีอักษรตัวใดตัวหนึ่งหรืออักษรอื่นสอดแทรกต่อเติมเพิ่มเข้ามา จะทำให้ได้คำซึ่งมีความหมายผิดไปหรือไม่มีมีความหมายเลย เช่นเดียวกับกับเส้นพอลิเพปไทด์ จะมีประโยชน์หรือมีความหมายต่อเซลล์หรือไม่ขึ้นอยู่กับ การเรียงตัวของกรดแอมิโน ดังนั้น ยีนจึงถูกใช้ป็นสิ่งกำหนดลำดับการเรียงตัวของกรดแอมิโนเพื่อควบคุมไม่ให้เซลล์เสียเวลา พลังงาน และวัตถุดิบในการสังเคราะห์เส้นพอลิเพปไทด์ที่ใช้การไม่ได้หรือผิดแปลกไปจากเผ่าพันธุ์ของตน และยีนยังถูกใช้ป็นสิ่งกำหนดความยาวของเส้นพอลิเพปไทด์อีกด้วย

โครงสร้างของโปรตีน อาจถูกแบ่งออกได้เป็น 4 ระดับ คือ

1. โครงสร้างในระดับที่หนึ่ง (Primary structure) เป็นโครงสร้างในระดับที่กรดแอมิโนต่าง ๆ เรียงต่อกันเป็นเส้นพอลิเพปไทด์ ตัวอย่างเช่น โครงสร้างในระดับที่หนึ่งของฮอริโมน insulin ในวัวประกอบด้วยเส้นพอลิเพปไทด์ 2 เส้น เส้นหนึ่งมีกรดแอมิโน 21 โมเลกุล และอีกเส้นหนึ่งมีกรดแอมิโน 30 โมเลกุล ลำดับการเรียงตัวของกรดแอมิโนต่าง ๆ ในฮอริโมน insulin ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1-15

ลำดับการเรียงตัวหรือตำแหน่งของกรดแอมิโนต่าง ๆ ในเส้นพอลิเพปไทด์ของโปรตีนแต่ละชนิดมักคงที่ตายตัวและมีความยาวแน่นอน ซึ่งถ้ามีความผิดแปลกไป เช่น ตำแหน่งของ



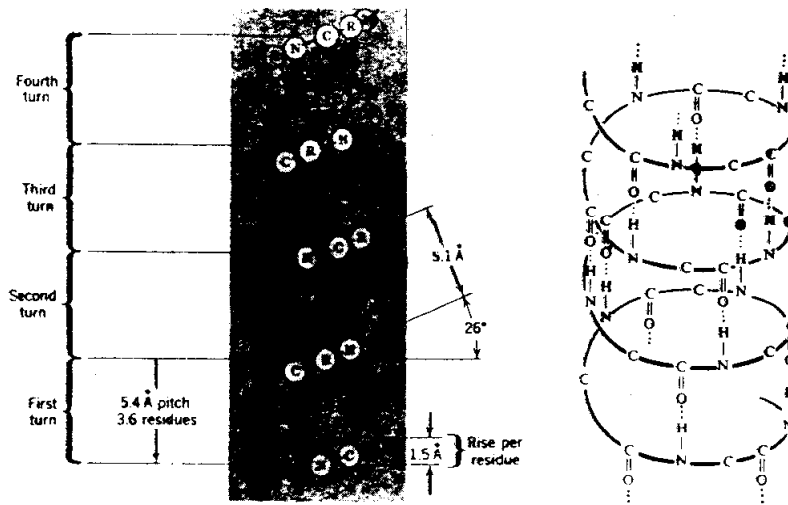
ox insulin

รูปที่ 1-15 The primary structure of insulin. There are slight variations in different species in the amino acid sequence at a fold of one of the polypeptide chains.

กรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ อยู่สลับที่กัน หรือมีกรดอะมิโนบางตัวขาดหายไปหรือเกินเข้ามา ก็จะกลายเป็นโปรตีนซึ่งใช้ทำหน้าที่ไม่ได้ หรือทำหน้าที่ผิดไปดังที่ได้กล่าวมาแล้วในเรื่องการเรียงอักษรให้เป็นคำพูดในภาษาอังกฤษ การศึกษาโครงสร้างของโปรตีนในระดับที่หนึ่งเป็นการศึกษาถึงจำนวนเส้นพอลิเพปไทด์ในโมเลกุลของโปรตีน จำนวนโมเลกุลของกรดอะมิโน และลำดับการเรียงตัวของกรดอะมิโนในเส้นพอลิเพปไทด์

2. โครงสร้างในระดับที่สอง (Secondary structure) เป็นโครงสร้างของโปรตีนในระดับที่เส้นพอลิเพปไทด์บิดพันเป็นเกลียวคล้ายเส้นเชือก ดังนั้นจึงถูกเรียกว่า spiral structure หรือ helical structure ถ้าเส้นพอลิเพปไทด์บิดเป็นเกลียวไปทางขวาก็เรียกว่า  $\alpha$ -helix และถ้าบิดไปทางซ้ายก็เรียกว่า  $\beta$ -helix การบิดพันเป็นเกลียวของเส้นพอลิเพปไทด์เกิดจากการยึดเหนี่ยวกันระหว่างกรดอะมิโนที่อยู่ห่างกันเป็นระยะทุก ๆ 3 โมเลกุลที่เรียงต่อกันด้วยไฮโดรเจนบอนด์ (Hydrogen bond) ดังรูปที่ 1-16

3. โครงสร้างในระดับที่สาม (Tertiary structure) เป็นโครงในระดับที่เส้นพอลิเพปไทด์บิดเป็นเกลียวเข้มนามากจนม้วนตัวเป็นก้อน และมีผลทำให้เกิดโปรตีนชนิดที่เรียกว่า globular protein สำหรับโปรตีนซึ่งเกิดจาก spiral structure ของเส้นพอลิเพปไทด์ที่ยังคงเป็นเส้นเกลียวอยู่ไม่ม้วนตัวเป็นก้อนจะถูกเรียกว่า fibrous protein โครงสร้างในระดับที่สามของโปรตีนเกิดขึ้นเนื่องจาก R-group ของกรดอะมิโนในเส้นพอลิเพปไทด์มีการเชื่อมต่อกันด้วยบอนด์ต่าง ๆ เช่น ไฮโดรเจนบอนด์ ไอออนิกบอนด์ และไดซัลไฟด์บอนด์ เป็นต้น ดังรูปที่ 1-17

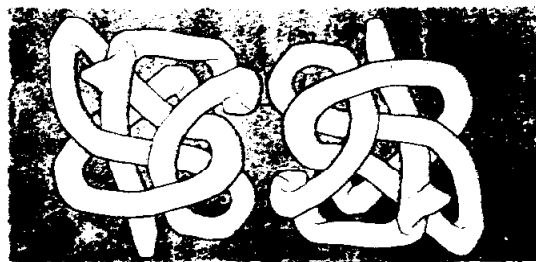


รูปที่ 1-16 Spiral structure of protein



รูปที่ 1-17 Sketch illustrating the complicated folding of a globular protein stabilized by noncovalent bonds.

4. โครงสร้างในระดับที่สี่ (Quaternary structure) เป็นโครงสร้างของโปรตีนที่เกิดจากการรวมตัวกันของเส้นพอลิเพปไทด์หลายเส้นจนกลายเป็นกลุ่มหรือฟอน (bundle) ดังรูปที่ 1-18



รูปที่ 1-18 A protein dimer unit illustrating the quaternary structure of a complex globular protein.

## ประเภทของโปรตีน

โปรตีนอาจถูกจำแนกออกได้เป็น 2 พวก คือ พวกโปรตีนอย่างง่าย (simple protein) และโปรตีนที่มีสารประกอบอื่นรวมอยู่ด้วย (conjugated protein) สารประกอบอื่นที่รวมอยู่กับโปรตีนถูกเรียกว่า prosthetic group ตัวอย่างของโปรตีนที่มีสารประกอบอื่นรวมอยู่ด้วย ได้แก่ Nucleo-protein เป็นโปรตีนที่มีกรดนิวคลีอิกเชื่อมติดอยู่ Glycoprotein เป็นโปรตีนที่มีคาร์โบไฮเดรตเชื่อมติดอยู่ และ Lipoprotein เป็นโปรตีนซึ่งมีลิพิดเชื่อมติดอยู่

ในระบบการย่อยอาหารของร่างกาย โปรตีนจะถูกย่อยสลายให้กลายเป็นกรดแอมิโนแล้วถูกดูดซึมผ่านผนังลำไส้เล็กเข้าสู่กระแสโลหิตไปยังตับและเซลล์ต่าง ๆ โปรตีนที่จำเป็นบางอย่างอาจถูกสังเคราะห์ขึ้นจากกรดแอมิโนที่มีอยู่ภายในเซลล์ของตับ แล้วถูกส่งไปตามกระแสโลหิตในรูปของ plasma protein ยังส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย และเซลล์ต่าง ๆ ของร่างกายก็เช่นเดียวกัน เมื่อรับเอากรดแอมิโนจากกระแสโลหิตไว้แล้ว จะนำไปสังเคราะห์เป็นโปรตีนตามความต้องการของตนได้โดยการควบคุมของจีน

**หน้าที่สำคัญของโปรตีนต่อร่างกาย อาจสรุปได้ดังนี้ คือ**

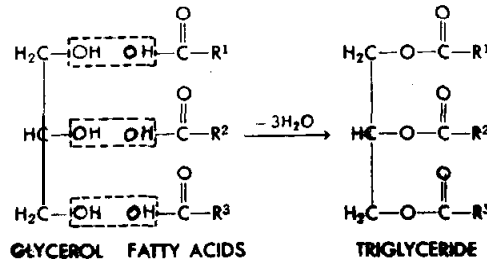
1. เป็นองค์ประกอบของเซลล์หรือร่างกาย
2. อาจถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานของเซลล์ได้
3. ถูกเปลี่ยนแปลงให้เป็นคาร์โบไฮเดรตและไขมันได้
4. ถูกสังเคราะห์ให้เป็นฮอร์โมนและเอนไซม์เพื่อใช้งานภายในเซลล์หรือร่างกาย
5. ถูกสังเคราะห์ให้เป็นสารซึ่งมีความสำคัญต่อระบบทางสรีรวิทยาต่าง ๆ ของร่างกาย

## ลิพิด (Lipid)

ลิพิด หมายถึง ไขมันและน้ำมัน (fat and oil) ที่อุณหภูมิปกติ ไขมันมีสภาพเป็นของแข็ง แต่น้ำมันมีสภาพเป็นของเหลว ธาตุซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของไขมันและน้ำมันคือ ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เช่นเดียวกับกับคาร์โบไฮเดรต แต่อัตราส่วนจำนวนอะตอมของธาตุไฮโดรเจนต่อออกซิเจนไม่ได้เท่ากับ 2:1 เหมือนกับคาร์โบไฮเดรตที่มีจำนวนอะตอมของธาตุคาร์บอนเท่ากัน นอกจากนี้ ลิพิดบางชนิดก็อาจมีธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสประกอบอยู่ด้วย

ไขมันและน้ำมันเป็นสารประกอบโมเลกุลใหญ่ ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในสารละลายไขมัน เช่น อีเทอร์ คลอโรฟอร์ม เบนซีน และแอลกอฮอล์ เป็นต้น ไขมันและน้ำมันจัดเป็นสารประกอบเอสเทอร์ (ester) ของแอลกอฮอล์กับกรดไขมันหรือกรดอินทรีย์ ไขมันและน้ำมันส่วนใหญ่

เกิดจากการรวมตัวกันของกลีเซอรอลซึ่งเป็น polyhydroxy alcohol ที่มี 3 hydroxyl group (–OH) กับกรดไขมัน 3 โมเลกุลด้วย ester linkage จึงมีชื่อเรียกทางเคมีว่า triglyceride



รูปที่ 1-19 Triglyceride formation

คุณสมบัติของ triglyceride ขึ้นอยู่กับ R-group ของกรดไขมัน ถ้า R-group ประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนต่อกันเป็นเส้นยาว และไม่มี double bond จะทำให้ triglyceride มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง และเป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ จึงถูกเรียกว่า ไขมัน แต่ถ้า R-group ประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนต่อกันเป็นเส้นไม่ยาวมากนัก หรือมี double bond เชื่อมต่ออยู่ในระหว่างอะตอมของธาตุคาร์บอนที่เรียงต่อกัน จะทำให้ triglyceride มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ และเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ จึงเรียกว่า น้ำมัน

ไขมันและน้ำมันเป็นสารซึ่งพบมากในร่างกายของสัตว์ แต่ในพืชก็มีอยู่บ้างเล็กน้อย ลิพิดที่พบอยู่ในร่างกายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมส่วนมากเป็นพวก triglyceride โดยมีประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัว ไขมันและน้ำมันเป็นแหล่งพลังงานที่ดีที่สุดในการบรรดาอาหารทั้งหลาย Triglyceride ที่ร่างกายสะสมไว้อาจถูกย่อยสลายให้กลายเป็นกลีเซอรอลกับกรดไขมัน แล้วถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานแก่ร่างกายในกระบวนการเมแทบอลิซึมได้

ลิพิดอาจถูกจำแนกได้ ดังต่อไปนี้

1. ลิพิดอย่างง่าย (Simple lipid) เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์แต่เพียงอย่างเดียว ไม่มีสารประกอบอื่นเจือปน แบ่งออกได้เป็น 3 พวก คือ

- (1) ไขมัน (fat or solid fat) เป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ (20 องศาเซลเซียส)
- (2) น้ำมัน (Oil or liquid fat) เป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ (20 องศาเซลเซียส)
- (3) ขี้ (Wax) เป็นเอสเทอร์ของแอลกอฮอล์กับกรดไขมันโมเลกุลใหญ่ เป็นสารประกอบซึ่งเกือบจะไม่ละลายน้ำเลย พืชมักผลิตขึ้นเพื่อใช้เป็นสารเคลือบผิวป้องกันการสูญเสียน้ำ และอันตรายจากการกัดกินของแมลง และพบอยู่ตามผิวหนังหรือผมของคนหรือสัตว์

2. **ลิพิดประกอบ (Compound lipid)** เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์ และมีสารประกอบอื่นปนอยู่ด้วย เช่น

Phospholipid เป็นลิพิดซึ่งมีฟอสเฟตเกาะติดอยู่กับแอลกอฮอล์ด้วยเอสเทอร์บอนด์ แทนที่กรดไขมันตัวใดตัวหนึ่ง และที่หมู่ฟอสเฟตอาจมีสารประกอบอื่นติดอยู่ด้วยก็ได้

Glycolipid เป็นลิพิดซึ่งมีคาร์โบไฮเดรตประกอบอยู่ ลิพิดพวกนี้บางครั้งก็เรียกว่า cerebroside พบมากในมันสมอง เนื้อเยื่อประสาท และส่วนประกอบของเซลล์โดยทั่วไป ในเมล็ดพืช และเชื้อราบางชนิดอาจมี cerebroside ประกอบอยู่ด้วย

3. **ลิพิดแผลง (Derived lipid)** เป็นสารประกอบซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากลิพิดทั่วไป แต่ถูกจัดเป็นลิพิดเนื่องจากมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์คล้ายกัน เช่น อาจถูกละลายได้ด้วยสารละลายไขมัน ตัวอย่างของลิพิดแผลงที่สำคัญ คือ cholesterol (solid bile) พบมากในมันสมอง ไขสันหลัง เนื้อเยื่อประสาท และเลือด เป็นต้น

**หน้าที่สำคัญของไขมันและน้ำมันต่อร่างกาย มีดังนี้**

1. เป็นฉนวนปกป้องเซลล์และเนื้อเยื่อของร่างกาย
2. ถูกใช้เป็นแหล่งของพลังงาน ไขมันและน้ำมันให้พลังงานได้มากกว่าคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนซึ่งมีน้ำหนักเท่ากัน
3. ถูกเปลี่ยนแปลงให้เป็นสารประกอบอื่นที่ร่างกายต้องการ หรือถูกสะสมไว้ใช้เป็นแหล่งของพลังงาน
4. เป็นเบาะป้องกันการกระทบกระแทกของอวัยวะภายในร่างกาย
5. ถูกเปลี่ยนแปลงให้เป็นมันสมองและเนื้อเยื่อประสาท

## **กรดนิวคลีอิก (Nucleic acid)**

กรดนิวคลีอิกเป็นกรดซึ่งพบอยู่ในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด แบ่งออกได้เป็น 2 พวก คือ Deoxyribonucleic acid (DNA) และ Ribonucleic acid (RNA)

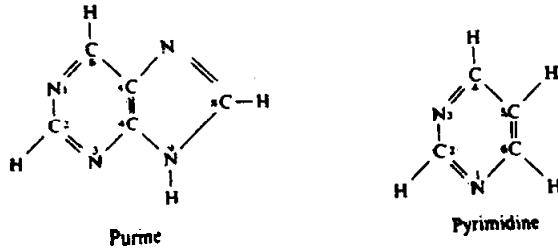
DNA หรือ chromosome จัดเป็นสารพันธุกรรมซึ่งมีหน้าที่กำหนดคุณสมบัติ ลักษณะและความสามารถของสิ่งมีชีวิตให้เป็นไปตามสายพันธุ์ พบอยู่ในนิวเคลียสของเซลล์ และอาจถูกถ่ายทอดไปยังลูกหลานหรือสิ่งมีชีวิตอื่นได้ RNA มีหน้าที่สื่อความหมายทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต โดยเป็นสื่อกลางนำลักษณะและความสามารถทางพันธุกรรมที่กำหนดไว้ในสารพันธุกรรมให้แสดงออกมาในรูปของโปรตีนซึ่งมีหน้าที่และกิจกรรมต่าง ๆ ในกระบวนการของชีวิต แต่สิ่งมีชีวิตบางชนิด เช่น ไวรัส อาจใช้ RNA ทำหน้าที่เป็นสารพันธุกรรม และกำหนดชนิดของโปรตีนให้มี



หน้าที่และกิจกรรมต่าง ๆ ได้โดยตรง

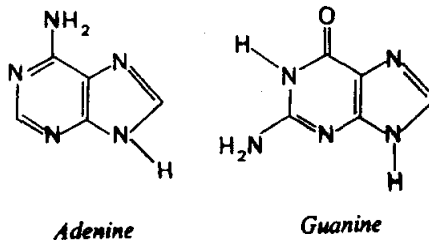
โครงสร้างของกรดนิวคลีอิกทั้ง DNA และ RNA ประกอบด้วยหน่วยย่อย ซึ่งเรียกว่า nucleotide หลายโมเลกุลเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ดังนั้น กรดนิวคลีอิกในบางครั้งจึงถูกเรียกว่า polynucleotide โครงสร้างของ nucleotide ประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือ เบส (base) น้ำตาลและ ฟอสเฟต

1. เบส เป็นสารอินทรีย์ซึ่งมีธาตุไนโตรเจนประกอบอยู่ แบ่งออกได้เป็น 2 พวก คือ พวกที่มีโครงสร้างแบบ purine ring และพวกที่มีโครงสร้างแบบ pyrimidine ring



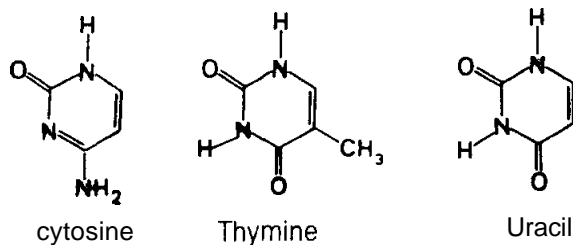
รูปที่ 1-20 Purine and pyrimidine ring

พวกที่มีโครงสร้างแบบ purine ring แบ่งออกเป็น adenine และ guanine



รูปที่ 1-21 Purine bases

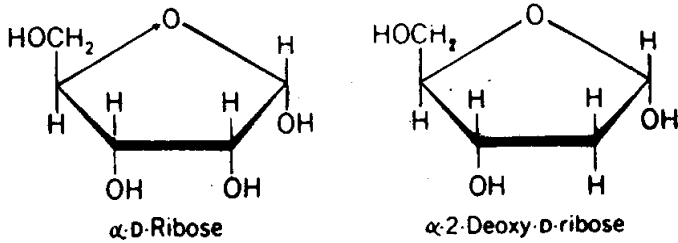
พวกที่มีโครงสร้างแบบ pyrimidine ring แบ่งออกเป็น cytosine, thymine และ uracil



รูปที่ 1-22 Pyrimidine bases

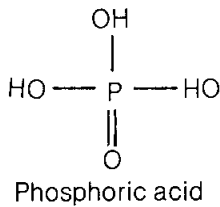
RNA ไม่มี thymine base แต่มี uracil base แทน

2. น้ำตาล แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ribose และ deoxy ribose Ribose เป็น monosaccharide ซึ่งมีธาตุคาร์บอน 5 อะตอมพบใน nucleotide ของ RNA จึงเรียกว่า ribonucleotide Deoxyribose คือ น้ำตาล ribose ซึ่งมีจำนวนอะตอมของธาตุออกซิเจนน้อยกว่าปกติ 1 อะตอมพบใน nucleotide ของ DNA จึงเรียก deoxyribonucleotide



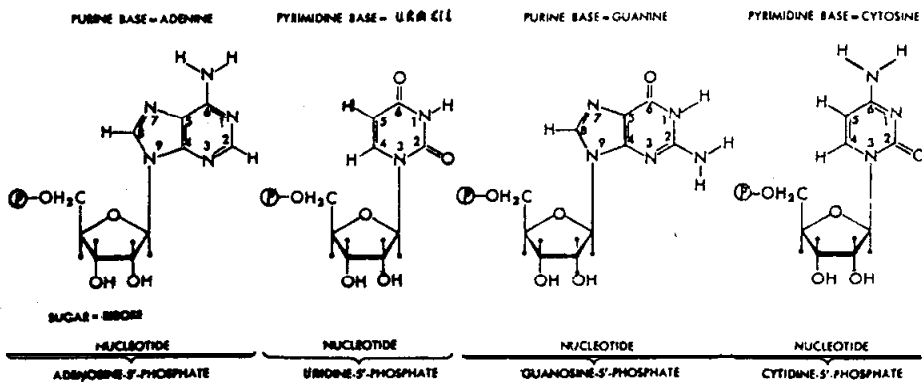
รูปที่ 1-23

3. ฟอสเฟต เป็นอนุมูลของกรดฟอสฟอริกซึ่งเชื่อมต่อกับน้ำตาลในโมเลกุลของ nucleotide ด้วย ester bond

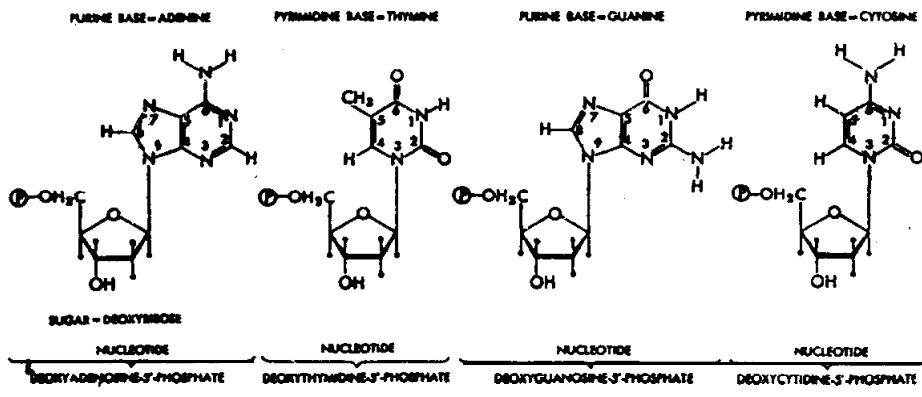


รูปที่ 1-24

องค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนถูกนำมาเชื่อมต่อกันเป็น nucleotide ชนิดต่าง ๆ ดังรูปที่ 1-25 และ 1-26



รูปที่ 1-25 แสดงโครงสร้างของ Ribonucleotide ซึ่งมีเบสต่าง ๆ



รูปที่ 1-26 แสดงโครงสร้างของ deoxyribonucleotide ซึ่งมีเบสต่าง ๆ

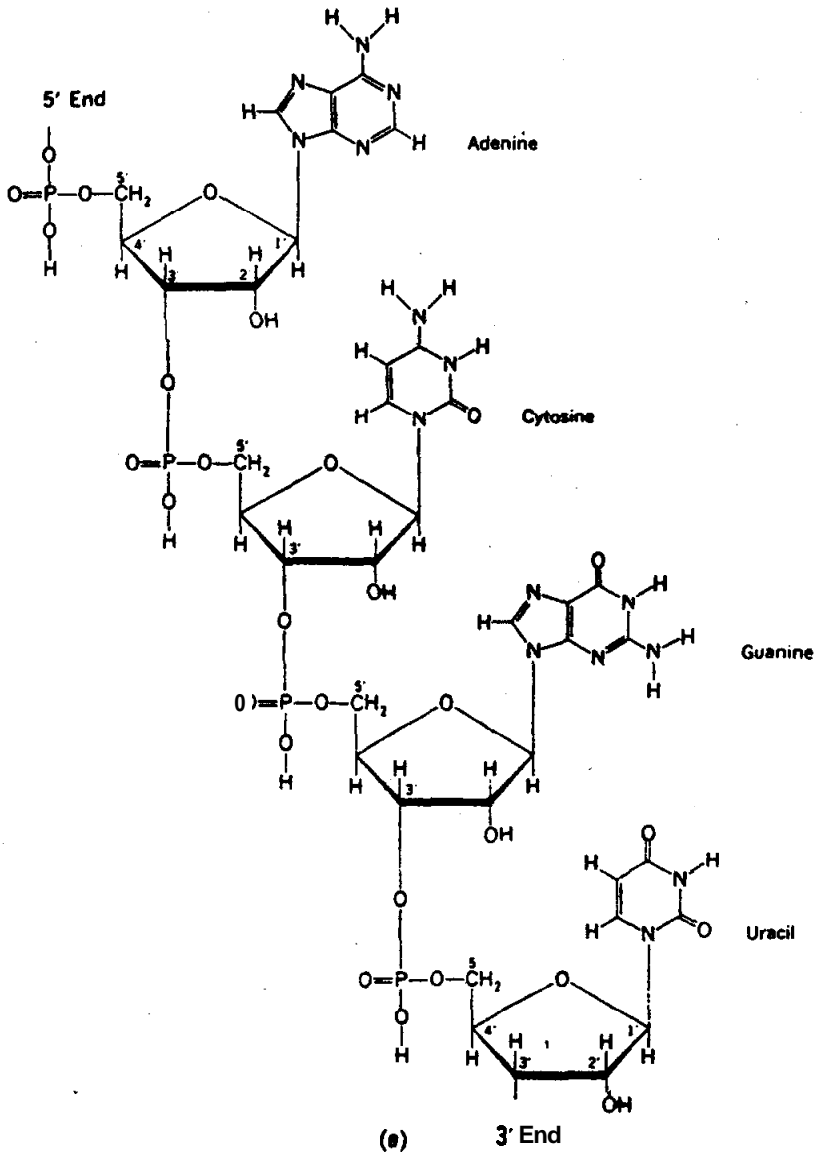
ตารางที่ 1-1 แสดงการเปรียบเทียบส่วนประกอบของ Ribonucleotide ใน RNA และ deoxyribonucleotide ใน DNA

Ultimate hydrolysis products of DNA and RNA

	DNA	RNA
Purine bases	{ Adenine Guanine	{ Adenine Guanine
Pyrimidine bases	{ Cytosine Thymine	{ Cytosine Uracil
Pentose sugar	2-Deoxyribose	Ribose
Inorganic acid	Phosphoric acid	Phosphoric acid

Nucleotide แต่ละหน่วยอาจถูกทำให้เชื่อมต่อกันได้ด้วย ester linkage ระหว่างหมู่ของ ฟอสเฟตกับน้ำตาลที่อยู่ต่างโมเลกุลกัน ทำให้ได้เป็นสารประกอบโมเลกุลใหญ่เรียกว่า poly-nucleotide หรือกรดนิวคลีอิก กรดนิวคลีอิกอาจเป็น DNA หรือ RNA ตามแต่ชนิดของ nucleotide ที่เชื่อมต่อกัน ถ้า deoxyribonucleotide ต่าง ๆ ถูกนำมาเชื่อมต่อกันจะได้กรดนิวคลีอิก ชนิด DNA แต่ถ้า ribonucleotide ถูกนำมาเชื่อมต่อกันจะได้กรดนิวคลีอิกชนิด RNA ดังรูปที่ 1-27 และ 1-28

สิ่งมีชีวิตโดยทั่วไปมี DNA ในลักษณะเป็นเส้นคู่ทาบขนานกันและบิดพันเป็นเกลียว เรียกว่า double stranded helix เส้น DNA ทั้งสองจะถูกยึดเหนี่ยวกันไว้ด้วยไฮโดรเจนบอนด์ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างคู่ของเบสที่เฉพาะต่อกัน คู่ของเบสที่เฉพาะต่อกันและยึดเหนี่ยวกันได้ด้วย ไฮโดรเจนบอนด์มีดังต่อไปนี้ คือ



รูปที่ 1-27 Structure of a polyribonucleotide (RNA)

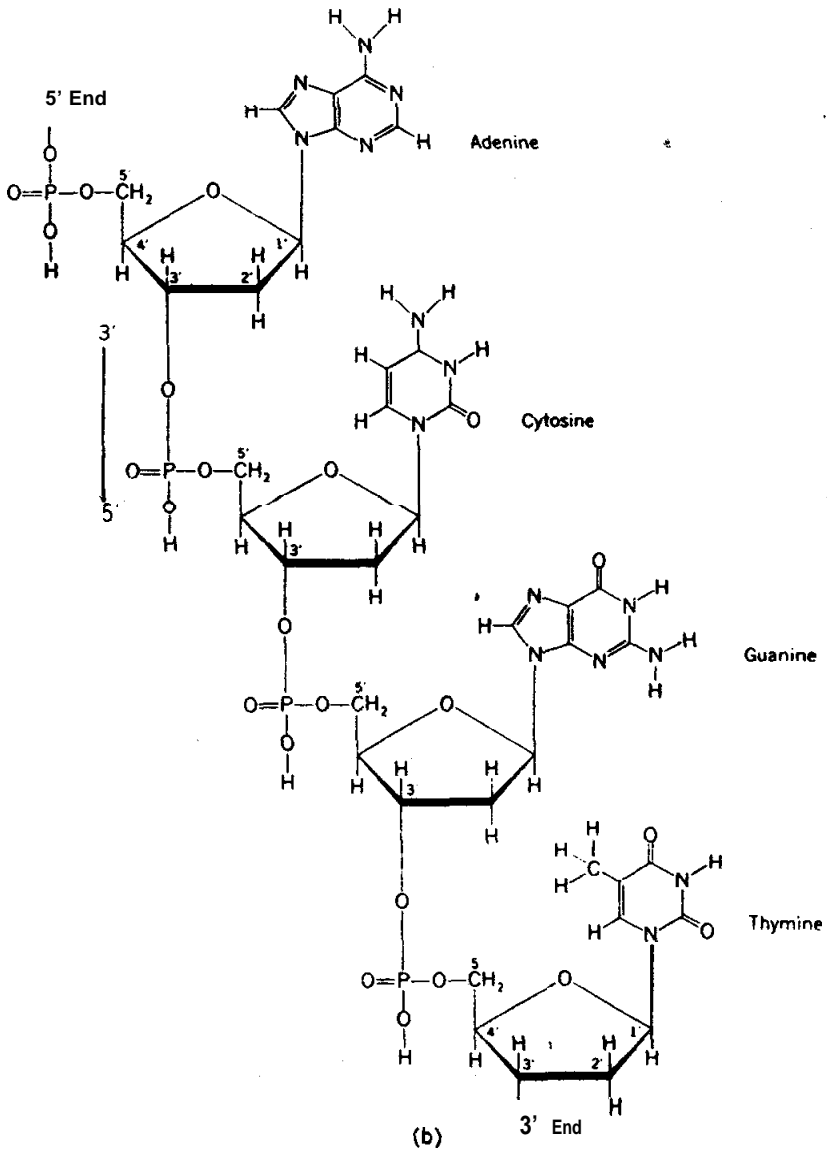


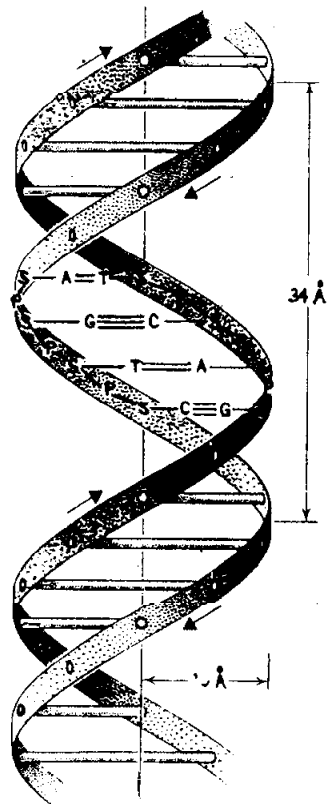
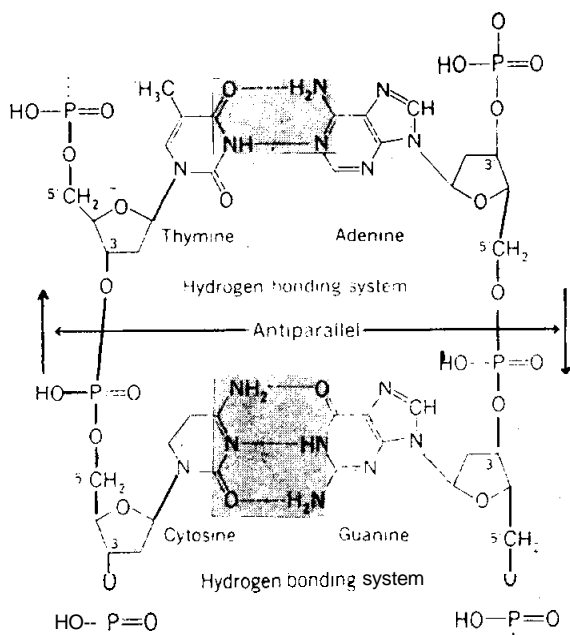
Figure 1-28 Structure of a polydeoxyribonucleotide (DNA)

Adenine (A) : Thymine (T)

Adenine (A) : Uracil (U) ใน RNA

Cytosine (C) : Guanine (G)

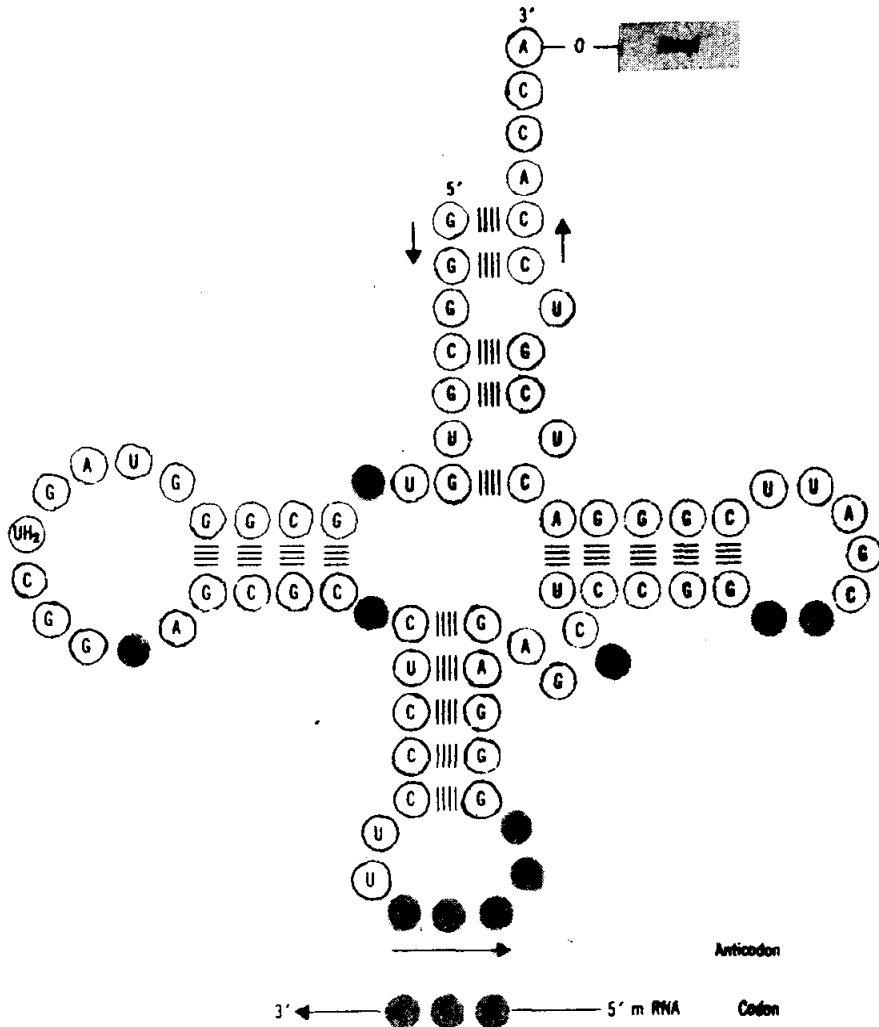
ดังนั้น ลำดับการเรียงตัวของ nucleotide ในเส้น DNA ทั้งสองจึงมีกฎเกณฑ์เป็นไปตามหลักการเข้าคู่ยึดเหนี่ยวกันได้ด้วยไฮโดรเจนบอนด์ ดังรูปที่ 1-29 ถ้าลำดับการเรียงตัวของ nucleotide ใน DNA เส้นหนึ่งเป็น AGTC อีกเส้นหนึ่งซึ่งทาบขนานกันอยู่จะเป็น TCAG ดังนี้ เป็นต้น



รูปที่ 1 - 2 9 Double helix of DNA. Here, P means phosphate diester, S means deoxyribose, A = T is the adenine = thymine pairing, and G ≡ C is the guanine-cytosine pairing.

ลำดับการเรียงตัวของ nucleotide ใน DNA ของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดหรือแต่ละตัวจะแตกต่างกันไป ลำดับการเรียงตัวของ nucleotide ในเส้น DNA ของสิ่งมีชีวิตมักค่อนข้างคงที่แน่นอน จึงมีผลทำให้คุณสมบัติ ลักษณะ และความสามารถหรือพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตค่อนข้างคงที่แน่นอน แต่ถ้ามีเหตุทำให้ลำดับการเรียงตัวของ nucleotide ในเส้น DNA เปลี่ยนแปลงไป จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตนั้นด้วย เนื่องจาก DNA มีหน้าที่กำหนดลำดับการเรียงตัวของกรดอะมิโนในเส้นพอลิเพปไทด์โดยมี RNA เป็นสื่อกลางทำให้ได้โปรตีนซึ่งมีคุณสมบัติ ลักษณะ และความสามารถแสดงออกมาเป็นพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต

สำหรับ RNA ส่วนใหญ่ที่พบในเซลล์มี 3 ชนิด คือ (1) ribosomal RNA (r-RNA) ถูกใช้เป็นองค์ประกอบของ ribosome ทำหน้าที่คล้ายเครื่องจักรในการผลิตโปรตีนให้แก่เซลล์ (2) messenger RNA (m-RNA) มีลักษณะเป็นเส้นยาว ประกอบด้วย nucleotide ซึ่งมีเบสต่าง ๆ เรียงต่อกันเป็นรหัสโดยการควบคุมของ DNA เพื่อใช้กำหนดลำดับการเรียงตัวของกรดแอมิโนในเส้นพอลิเพปไทด์หรือโปรตีนที่เซลล์ต้องการ (3) transfer RNA (t-RNA) มีลักษณะเป็นเส้นคดงอคล้ายไม้กางเขน ทำหน้าที่นำเอากรดแอมิโนต่าง ๆ มาเรียงต่อกันเป็นลำดับตามรหัสที่ถูกกำหนดไว้ในเส้น messenger RNA RNA ทั้ง 3 ชนิด ถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยการควบคุมของ DNA



รูปที่ 1-30 The complete sequence of alanyl tRNA illustrating the possible cloverleaf structure of the transfer ribonucleic acid and the positioning of unusual bases:  $\psi$  pseudouridine; I, inosine;  $UH_2$ , dihydrouridine; T, ribothymidina; GMe, methyl guanosine; and Ime, methyl inosine. The dashed lines indicate hydrogen bonding.