

## 2.3 ชีวโมเลกุลชนิดหลัก

สิ่งมีชีวิตจำเป็นต้องกินอาหาร มีสารอาหารเพื่อให้มีพลังงานอันเป็นกลไกก่อให้เกิดการดำรงสภาพของสิ่งมีชีวิต และต้องมีการควบคุมการทำงานการถ่ายทอดทางพันธุกรรมด้วย สารที่จำเป็นต่อการสร้างพลังงานคือ คาร์โบไฮเดรต ลิพิด และโปรตีน สารที่ควบคุมการทำงานของกระบวนการเมแทบอลิซึมและการถ่ายทอดทางพันธุกรรมคือ กรดนิวคลีอิก ดังนั้น สารทั้ง 4 ประเภทดังกล่าวถึงถือเป็นสารหลักของสิ่งมีชีวิต

**2.3.1 คาร์โบไฮเดรต** สารประกอบคาร์โบไฮเดรตมีความหมายว่า น้ำของคาร์บอนประกอบด้วยธาตุ C H และ O มีสูตรทั่วไปคือ  $(CH_2O)_n$  หน่วยย่อยที่สุดคือโมโนแซ็กคาไรด์ (monosaccharide) ถือว่าเป็นโมโนเมอร์ ไดแซ็กคาไรด์ (disaccharide) ถือว่าเป็นไดเมอร์ และหลายหน่วยต่อกันเป็นโมเลกุลใหญ่คือพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ถือเป็นพอลิเมอร์ การเรียกชื่อลงท้ายด้วยคำว่า โอส (-ose)

(1) **โมโนแซ็กคาไรด์** คือ น้ำตาลอย่างง่าย โมเลกุลที่เล็กที่สุด ประกอบด้วย 3 คาร์บอนอะตอม เรียกว่า **ไตรโอส (triose)** เช่น กลีเซรัลดีไฮด์ และไดไฮดรอกซีอะซีโตน ถ้ามี 4 คาร์บอนอะตอมเรียกว่า **เตโตรส (tetrose)** เช่น อิริโทรส (erythrose) 5 คาร์บอนอะตอม เรียกว่า **เพนโทส (pentose)** เช่น ไรโบส และไรโบไวโลส ไปจนถึง 6 คาร์บอนอะตอมเรียก **เฮกโซส (hexose)** เช่น กลูโคส แกลกโทส ฟรุคโตส หมู่ปฏิกิริยาประกอบด้วย แอลดีไฮด์ และคีโตน ดูรูป 2-7

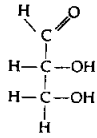
น้ำตาลไรโบสและดีออกซีไรโบสเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของกรดนิวคลีอิก กลูโคส ถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการสร้างพลังงานของสิ่งมีชีวิต ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 6

**รูป 2-7** ชนิดและโครงสร้างของน้ำตาลอย่างง่ายที่พบในสิ่งมีชีวิต ให้สังเกตหมู่ปฏิกิริยาแอลดีไฮด์และคีโตน (เส้นไขปลา) และตำแหน่งอสมมาตรคาร์บอนอะตอมในน้ำตาลกลูโคสและแกลกโทส

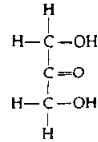
หมู่ปฏิกิริยาแอลดีไฮด์

หมู่ปฏิกิริยาคีโตน

น้ำตาลไตรโอส ( $C_3H_6O_3$ )

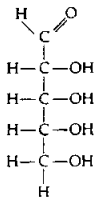


Glyceraldehyde

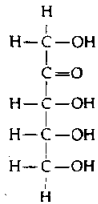


Dihydroxyacetone

น้ำตาลเพนโทส ( $C_5H_{10}O_5$ )

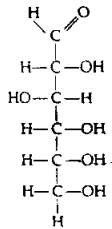


Ribose

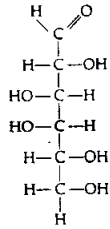


Ribulose

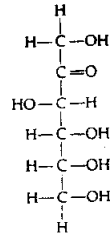
น้ำตาลเฮกโซส ( $C_6H_{12}O_6$ ) ทั้ง 3 ชนิดเป็นไอโซเมอร์กัน



Glucose



Galactose

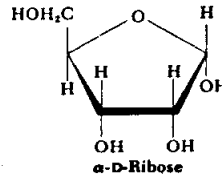
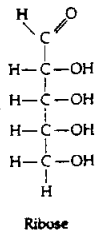


Fructose

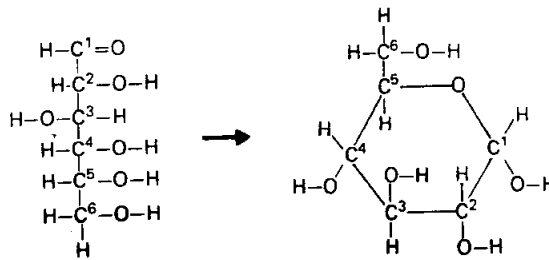
โมโนแซ็กคาไรด์ เมื่ออยู่ในสถานะสารละลาย มักไม่อยู่ในรูปของเส้นยาว แต่จะอยู่ในลักษณะเป็นวงด้วยแรงดึงดูดของพันธะโคเวเลนต์ระหว่างคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 กับออกซิเจนอะตอมที่อยู่กับคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 4 หรือที่ 5 (รูป 2-8) ถ้าในวงมี 5 อะตอม เรียกว่าวงฟิวราโนส (furanose ring) ถ้าในวงมี 6 อะตอม เรียกว่า วงไพราโนส (pyranose ring) เมื่อโมเลกุลของกลูโคสอยู่ในลักษณะเป็นวง การจัดตัวของหมู่ -OH ที่ตำแหน่งของคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 ทำให้ได้เป็น 2 ไอโซเมอร์ กล่าวคือ ถ้า -OH อยู่ต่ำกว่าระนาบของวง เรียกแอลฟากลูโคส ( $\alpha$ -glucose) ถ้า -OH อยู่เหนือระนาบของวง เรียก เบตากลูโคส ( $\beta$ -glucose) (รูป 2-8 ง)

รูป 2-8 การจัดตัวเป็นวงและไอโซเมอร์ของโมโนแซ็กคาไรด์

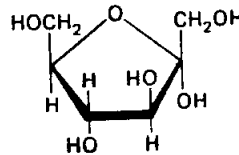
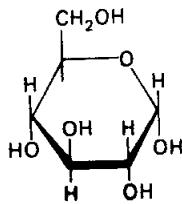
ก. โครงสร้างเป็นเส้นและเป็นวงของไรโบส (วงไพราโนส)



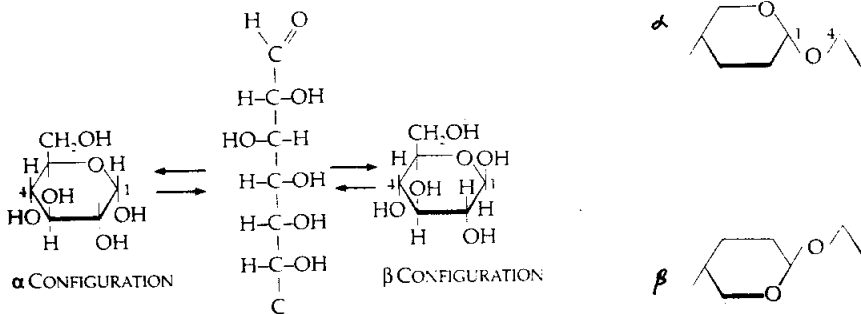
ข. โครงสร้างเป็นเส้น และเป็นวงของกลูโคส (วงไพราโนส)



ค. โครงสร้างเป็นวงเขียนแบบย่อของกลูโคสและฟรุกโตส



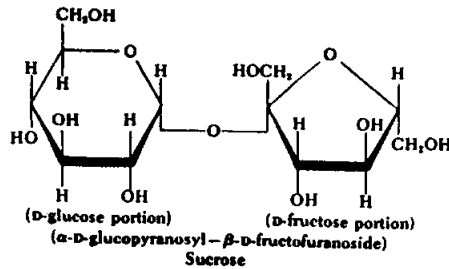
ง. โครงสร้างเป็นวงเขียนแบบย่อของแอลฟาและเบตากลูโคส



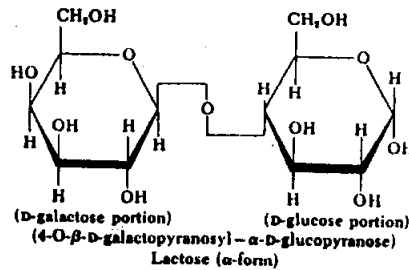
(2) ไนแซกคาไรด์ คือ น้ำตาลโมโนแซกคาไรด์สองโมเลกุลมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 4 ของแต่ละโมเลกุล พันธะนี้มีชื่อเฉพาะว่า พันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond or linkage) ไนแซกคาไรด์ที่พบตามธรรมชาติคือ น้ำตาล ซูโครส (sucrose) ที่มีอยู่ในอ้อย บีทรูท และพืชที่มีรสหวานอื่น อีกชนิดหนึ่งคือ แลกโทส (lactose) ที่มีอยู่ในน้ำนมของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (รูป 2-9) ซูโครสถูกย่อยสลายได้ง่ายด้วยเอนไซม์ซูเครสได้กลูโคส และฟรุกโตส แลกโทสถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์แลกเทส (ดู 5.3.1) ได้กลูโคสและแกแลกโทส

รูป 2-9 สูตรโครงสร้างไนแซกคาไรด์ที่พบตามธรรมชาติ

ก. ซูโครส



ข. แลกโทส



ไนแซกคาไรด์สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ด้วยการดัดน้ำออกจากสองโมเลกุลของโมโนแซกคาไรด์ หรือได้จากการไฮโดรไลซิสแป้งด้วยเอนไซม์ เช่น มัลโทส (maltose) ที่มีอยู่ในข้าวมอลท์ได้จากการไฮโดรไลซิสแป้งข้าวบาร์เลย์ด้วยเอนไซม์จากเอมบริโอที่มีอยู่ในเมล็ดข้าว (ซึ่งเป็นผลไม่ใช่เมล็ด) และเมื่อถูกย่อยสลายต่อไปด้วยเอนไซม์มัลเทสจะได้ 2 โมเลกุลของกลูโคส

เอนไซม์            มัลเทส  
แป้ง ----> มัลโทส ----> กลูโคส + กลูโคส

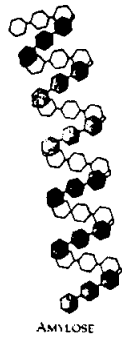
ไดแซ็กคาไรด์ที่สร้างขึ้นโดยสิ่งมีชีวิตจะถูกส่งลำเลียงไปยังส่วนต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น ซูโครสในพืชจะเก็บไว้ในลำต้น (อ้อย) ดอกหรือผล แลกโทสจะถูกเก็บไว้ในน้ำนม เทรฮาโลส (trehalose) ถูกส่งไปยังเซลล์ผ่านทางเลือดของสัตว์พวกแมลง

ในขั้นตอนการสังเคราะห์โมโนแซ็กคาไรด์ให้เป็นพอลิเมอร์ หรือในขั้นตอนการไฮโดรไลส พอลิแซ็กคาไรด์ให้เป็นไดแซ็กคาไรด์ หรือโมโนแซ็กคาไรด์ มีสารที่เป็นพอลิเมอร์สั้น ๆ มีจำนวนโมเลกุลของโมโนแซ็กคาไรด์ต่อกันประมาณ 10 โมเลกุล เรียกว่า **โอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide)** ในธรรมชาติโอลิโกแซ็กคาไรด์มักสังยุคเป็นสารประกอบเชิงซ้อน อยู่กับลิพิด หรือกับโปรตีน เรียกว่า **ไกลโคลิพิด (glycolipid)** หรือ **ไกลโคโปรตีน (glycoprotein)** ซึ่งจะพบสารประกอบเชิงซ้อนทั้ง 2 ประเภทนี้ได้ที่เซลล์เมมเบรน (ดูข้อ 3.3)

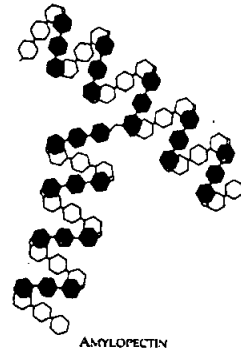
(3) **พอลิแซ็กคาไรด์** คือ พอลิเมอร์ของโมโนแซ็กคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก โดยทั่วไปหน่วยย่อย (โมโนเมอร์) คือน้ำตาลกลูโคส พอลิแซ็กคาไรด์ถือเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทสะสม สิ่งมีชีวิตมักจะสะสมไว้ที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของโครงสร้างหรืออวัยวะ เช่น พืชเก็บแป้งไว้ในผล (เมล็ดข้าว) หัวที่เป็นลำต้น (มันฝรั่ง) หัวที่เป็นราก (แครอท) **เซลลูโลส (cellulose)** พืชสะสมไว้ที่ผนังเซลล์ **ไกลโคเจน (glycogen)** ซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบในสัตว์จะถูกสะสมไว้ในเซลล์ตับและกล้ามเนื้อ แป้ง เซลลูโลส และไกลโคเจน ต่างก็มีโมโนเมอร์เป็นกลูโคส แต่มีคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ต่างกันเพราะมีน้ำหนักโมเลกุลและการจัดตัวของแต่ละเส้นพอลิเมอร์ต่างกัน โดยทั่วไป แป้งแบ่งได้ 2 กลุ่มคือ **กลุ่มเอมิโลส (amylose)** เส้นพอลิแซ็กคาไรด์ไม่มีการแตกแขนง (รูป 2-10 ก) เช่น แป้งข้าวเจ้า อีกกลุ่มหนึ่งคือ **เอมิโลเพกเทน (amylopecten)** มีการแตกแขนง อาจมีแขนงได้ตั้งแต่ 24-30 แขนง (รูป 2-10 ข) เช่น แป้งข้าวเหนียว ไกลโคเจนก็มีการแตกแขนง จำนวนแขนงจะมากกว่าแป้งพวกเอมิโลเพกเทน (รูป 2-10 ค)

รูป 2-10 โครงสร้างโมเลกุลบิดเป็นเกลียวของพอลิแซ็กคาไรด์รูปหกเหลี่ยม แทน  
 หนึ่งโมเลกุลของกลูโคส สีทึบและสีจางแสดงถึงตำแหน่งต่างระนาบของเกลียว

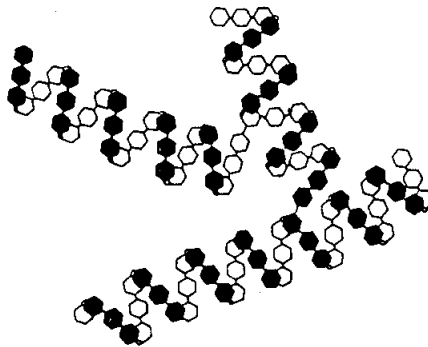
ก. แบ่งในกลุ่มเอมิโลส



ข. แบ่งในกลุ่มเอมิโลเพกเทน



ค. ไกลโคเจน



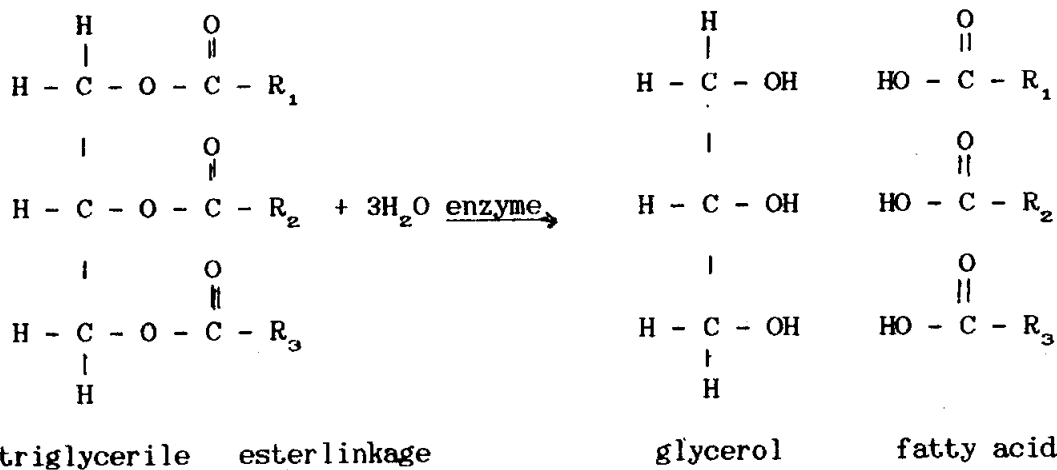
จาก Campbell, Neil A. 1990

(4) อนุพันธ์และคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน อนุพันธ์ของโมโนแซ็กคาไรด์เกิดจากการแทนที่หมู่  $-OH$  ด้วยหมู่  $-NH_2$  เรียกว่าประกอบในกลุ่มนี้ว่า น้ำตาลอะมิโน (amino sugar) เช่น แกลแลกโทซามีน (galactosamine) พบในกระดูกอ่อน กลูโคซามีน (glucosamine) เป็นหน่วยย่อยของสารประกอบไคติน (chitin) ซึ่งเป็นโครงสร้างแข็งหุ้มตัวสัตว์พวกแมลงและกุ้ง ตลอดจนสัตว์ขาปล้องพวกอื่น ๆ ทั้งแกลแลกโทซามีนและกลูโคซามีน เป็นหน่วยย่อยของโพลิไกลิโคแซ็กคาไรด์ที่สังเคราะห์ขึ้นกับโปรตีนของเซลล์เมมเบรนเม็ดเลือดแดง ช่วยเป็นตัวกำหนดหมู่เลือดเอบีโอ คาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน คือ ไกลโคโปรตีน และไกลโคลิพิด พบที่เซลล์เมมเบรนของสัตว์ มีบทบาทสำคัญต่อกลไกการทำงานของเซลล์ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 3 และบทที่ 12

2.3.2 ลิพิด ลิพิด (lipid) หรือไขมัน เป็นสารประกอบที่มี C H และ O เป็นส่วนประกอบหลักเช่นเดียวกับคาร์โบไฮเดรต แต่สัดส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอนและไฮโดรเจนน้อยกว่า โครงสร้างของโมเลกุลต่างออกไป ไขมันโดยทั่วไปไม่ละลายน้ำ ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อะซีโตน แอลกอฮอล์ อีเทอร์ คลอโรฟอร์ม และเบนซีน ลิพิดเป็นส่วนประกอบสำคัญของเซลล์เมมเบรน ฮอร์โมน และถือเป็นสารอาหารที่ให้พลังงานได้สูงสุด สัตว์จึงสะสมไขมันไว้ในเซลล์ไขมัน (fat cell) ลิพิดที่สำคัญสำหรับสิ่งมีชีวิตมีหลายกลุ่มคือ ไขมัน (neutral fat) ฟอสโฟลิพิด (phospholipid) สเตอรอยด์ (steroid) แคโรทีนอยด์ (carotenoid) และขี้ผึ้ง (wax)

(1) ไขมัน เป็นลิพิดที่พบได้ในสิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิด ประกอบด้วย กลีเซอรอล (glycerol) ที่มีหมู่ -OH 3 หมู่ พันธะกับ กรดไขมัน (fatty acid) ที่มีหมู่ -COOH (รูป 2-11) ด้วยพันธะเอสเทอร์ เรียกว่า สารประกอบไขมันนี้ว่า ไตรกลีเซไรด์ (triglyceride)

รูป 2-11 สูตรโครงสร้างทั่วไปของไขมัน เมื่อถูกไฮโดรไลส์ด้วยเอนไซม์ ได้กลีเซอรอล (แอลกอฮอล์) และกรดไขมัน

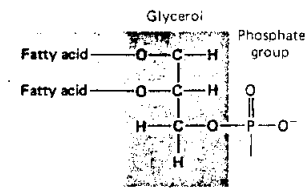


กรดไขมันมีคาร์บอนอะตอม 16-18 อะตอม มีประมาณ 30 ชนิด แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid) แต่ละคาร์บอนอะตอมพันธะเดี่ยวซึ่งกันและกัน เช่น กรดพาล์มิทิก (palmitic acid  $\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$ ) อีกกลุ่มหนึ่งคือ กรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) คาร์บอนอะตอมมีพันธะคู่ซึ่งกันและกัน บางตำแหน่งในเส้นโมเลกุล เช่น กรดโอเลอิก (oleic acid,  $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$ ) และกรดไลโนเลอิก

(linoleic acid,  $C_{18}H_{32}O_2$ ) กรดไขมันไม่อิ่มตัวถูกออกซิไดส์ได้ง่าย จึงทำให้น้ำมันหรือไขมันมี กลิ่นเหม็น (rancidity) พืชผักสะสมไขมันหรือน้ำมันไว้ในเมล็ด เช่น ฝ้าย ละหุ่ง ถั่วลิสง ถังเหลือง ปาล์ม สัตว์สะสมไขมันไว้ในเนื้อเยื่อไขมันซึ่งเปลี่ยนแปลงมาจากเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน พบบริเวณใต้ชั้นหนังและรอบอวัยวะภายใน

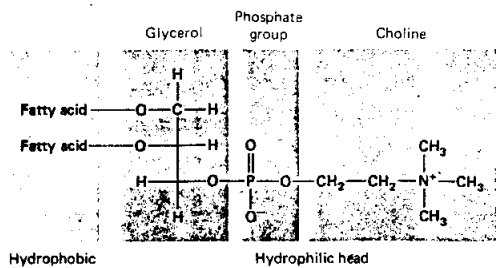
(2) ฟอสโฟลิพิด เป็นลิพิดที่เป็นส่วนประกอบหลักของเซลล์เมมเบรน ถือเป็นพวกแอมฟิพาธิกลิพิด (amphipathic lipid) คือภายในเส้นโมเลกุลมีส่วนที่ ชอบน้ำ (hydrophilic) และ ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) โมเลกุลของฟอสโฟลิพิดประกอบด้วย กลีเซอรอลต่อกับกรดไขมัน 2 โมเลกุล และ 1 หมู่ฟอสเฟต ซึ่งจะมีพันธะกับเบส เช่น โคลีน ปลายด้านที่มีกรดไขมันไม่ชอบน้ำ ส่วนหัวที่มีโมเลกุลของกลีเซอรอล ฟอสเฟต และเบสเป็นส่วนที่ชอบน้ำ (รูป 2-12) คุณสมบัติที่มีบทบาทสำคัญต่อกลไกการทำงานของเซลล์เมมเบรน (ดูข้อ 3.3)

รูป 2-12 สูตรโครงสร้างและภาพจำลองของเลซิทีน (lecithin or phosphatidylcholine) ฟอสโฟลิพิดส่วนใหญ่เป็นอนุพันธ์ของกรดฟอสฟาติก

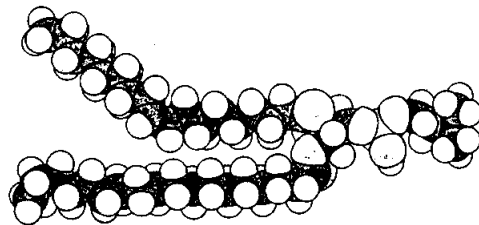


(a) Phosphatidic acid

จาก Vilee, Claude A., et al. 1989



(b) Lecithin



(3) แครอทินอยด์ สารสีเหลืองและสีแดงที่พบในพืช เช่น แครอท มะละกอ และมะเขือเทศ ถูกจัดไว้ในกลุ่มของลิพิด เนื่องจากมีลักษณะเป็นน้ำมันและไม่ละลายน้ำ โครงสร้างโมเลกุลของแคโรทีนอยด์ต่างจากพวกลิพิดพวกไขมัน กล่าวคือ ประกอบด้วยหน่วยย่อยเรียก

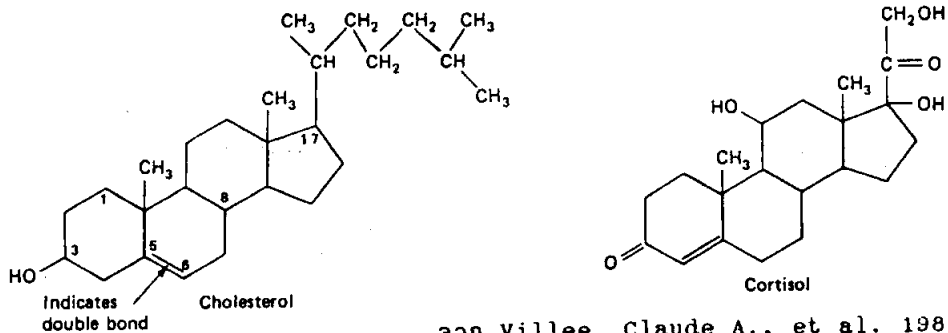


ไอโซพรีน (isoprene unit)  $(\text{CH}_2 = \text{CH} - \underset{\text{CH}_3}{\text{C}} = \text{CH}_2)$  ซึ่งเป็นโมโนเมอร์ของสารสี

แคโรทีน (สารต้นกำเนิดของวิตามิน เอ หรือ retinol) เรตินัล (retinal) สารเคมีที่ไวต่อการถูกกระตุ้นด้วยแสงซึ่งพบที่จอตาก็เป็นอนุพันธ์ของวิตามิน เอ และยังพบเรตินัลในโครงสร้างสำหรับรับการกระตุ้นด้วยแสง ในสัตว์พวกแมลงและปลาหมึกด้วย

(4) สเตอรอยด์ โครงสร้างของสเตอรอยด์ไม่ใช่ลิพิด (รูป 12-13) แต่ถูกจัดไว้ในกลุ่มของลิพิดเพราะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์คล้ายไขมัน สเตอรอยด์ที่สำคัญในสิ่งมีชีวิตคือคอเลสเตอรอล (cholesterol) ไบส์ซอลท์ (bile salt) ยอร์โมนเพศหญิงและเพศชาย ยอร์โมนที่ผลิตโดยต่อมหมวกไตส่วนนอก (คอร์ทิซอล) คอเลสเตอรอลเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์เมมเบรน โดยเฉพาะเซลล์เม็ดเลือดแดงและเซลล์ประสาท ไบส์ซอลท์ทำหน้าที่อิมัลซิไฟ ไขมันในลำไส้ เพื่อให้ไขมันถูกเอนไซม์ไลเปสย่อยได้ง่ายขึ้น สเตอรอยด์ยอร์โมนทำหน้าที่จรรโลงกลไกการทำงานของกระบวนการเมแทบอลิซึม

รูป 2-13 สูตรโครงสร้างของคอเลสเตอรอลและคอร์ทิซอล



จาก Villet, Claude A., et al. 1989

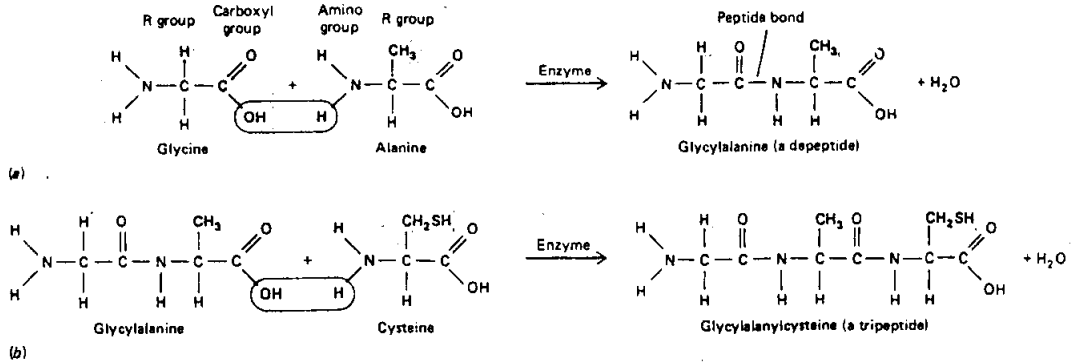
2.3.3 โปรตีน โปรตีนเป็นสารที่มีความสำคัญต่อชีวิตเคมีของสิ่งมีชีวิต เป็นส่วนประกอบหลักของเซลล์ คือ มีมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของสารที่พบในเซลล์ มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการเติบโต การซ่อมแซมส่วนสึกหรอของเซลล์และเนื้อเยื่อ ซดเซยสารอาหาร สร้างพลังงาน เมื่อสารพวกคาร์โบไฮเดรตและลิพิดขาดแคลน หน้าที่หลักอีกอย่างหนึ่งคือ ทำหน้าที่เป็นเอนไซม์ (enzyme) ในปฏิกิริยาชีวเคมีต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิต

โปรตีน คือพอลิเพปไทด์ของโมโนเมอร์ที่เป็น กรดอะมิโน (amino acid) ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ระหว่างหมู่  $-\text{COOH}$  และหมู่  $-\text{NH}_2$  ของแต่ละคู่ของกรดอะมิโน

(รูป 12-14)

รูป 2-14 การสร้างเส้นพอลิเพปไทด์ของ โปรตีน โดยการเติมกรดอะมิโนเข้าไปที่  
 ละครึ่งโมเลกุลด้วยความช่วยเหลือของ เอนไซม์

จาก Vilee, Claude A., et al. 1989



กรดอะมิโนที่พบเป็นส่วนประกอบของ โปรตีนของสิ่งมีชีวิตมี 20 ชนิดทุกชนิดประกอบด้วยหมู่อะมิโน ( $-NH_2$ ) และหมู่คาร์บอกซิล ( $-COOH$ ) พันธะอยู่กับคาร์บอนอะตอมตัวเดียวกัน เรียกว่า แอลฟาคาร์บอน (alpha carbon) กรดอะมิโนต่างกันว่าที่ ตัว R (side chain) ซึ่งมาต่อกับแอลฟาคาร์บอน เช่น ไกลซีน (glycine) มีหมู่ R เป็นไฮโดรเจนอะตอม จึงมีสูตร  $H-CH-COOH$  อะลานีน (alanine) มีหมู่ R เป็น  $-CH_3$  จึงมีสูตร  $CH_3-CH-COOH$

เนื่องจากกรดอะมิโนมีทั้งหมู่อะมิโนและหมู่คาร์บอกซิลในโมเลกุลเดียวกัน จึงทำให้มีคุณสมบัติเป็นกลาง (หรือ amphotheric) และทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ในของเหลวของสิ่งมีชีวิต และเนื่องจากแอลฟาคาร์บอนเป็นอสมมาตรคาร์บอน จึงทำให้กรดอะมิโนมีไอโซเมอร์เป็นแบบอีนันทิโอเมอร์ได้ด้วย

หมู่ R ของกรดอะมิโนเป็นปัจจัยกำหนดคุณสมบัติการมีชีวิต ไม่มีชีวิต หรือการมีประจุไฟฟ้า (ตาราง 2-2)

ตาราง 2-2 คุณสมบัติของกรดอะมิโน

มีซัลเฟอร์	ไม่มีซัลเฟอร์	มีประจุไฟฟ้า
glycine	serine	เป็นกรด (ประจุลบ)
alanine	threonine	aspartic acid
valine	asparagine	glutamic acid
leucine	glutamine	เป็นเบส (ประจุบวก)
isoleucine	tyrosine	histidine
proline	tryptophan	lysine
phenylalanine	cysteine	arginine
methionine		

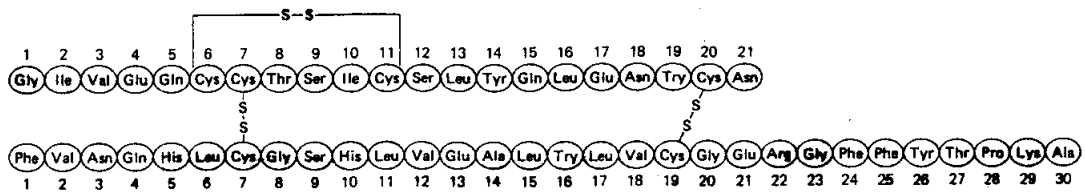
พืชส่วนใหญ่สามารถสังเคราะห์กรดอะมิโนขึ้นได้เอง คนและสัตว์สามารถสังเคราะห์กรดอะมิโนได้เพียงบางชนิด ชนิดที่สังเคราะห์เองไม่ได้ต้องกินเข้าไป (โดยกินจากกรดอะมิโนที่เป็นส่วนประกอบของโปรตีนที่มีอยู่ในอาหาร) เรียกว่า กรดอะมิโนที่จำเป็น (essential amino acid) สัตว์แต่ชนิดต้องการกรดอะมิโนที่จำเป็นไม่เหมือนกัน สำหรับคนมี 10 ชนิด คือ arginine histidine isoleucine leucine lysine methionine phenylalanine threonine tryptophan และ valine

กรดอะมิโนทั้ง 20 ชนิด ถูกสังเคราะห์ขึ้นเป็นเส้นพอลิเพปไทด์ได้มากชนิด ขึ้นอยู่กับลำดับการเรียงตัวและจำนวนของกรดอะมิโนในเส้นพอลิเพปไทด์นั้น เมื่อพอลิเพปไทด์จัดตัวโดยบิดเป็นเกลียว ม้วน ขด เป็นก้อน หรือรูปแบบอื่นจนเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ของโปรตีนก็ยิ่งทำให้มีจำนวนชนิดและคุณสมบัติของโปรตีนที่ต่างกันมากยิ่งขึ้น สามารถจำแนกโครงสร้างของโปรตีนได้ 4 ระดับคือ

(1) โครงสร้างระดับแรก (primary structure) กรดอะมิโนเรียงตัวกันเป็นเส้นพอลิเพปไทด์ โดยทราบชนิดและจำนวนหน่วยที่แน่นอน ลำดับการเรียงตัวของกรดอะมิโน

แต่ละชนิดถูกกำหนดโดยยีน เช่น ฮีโมโกลบิน ประกอบด้วยกรดอะมิโน 51 โมเลกุล ต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์เป็นพอลิเพปไทด์ 2 เส้น โดยมีพันธะไดซัลไฟด์ (-S-S) ช่วยยึดด้วย (รูป 2-15)

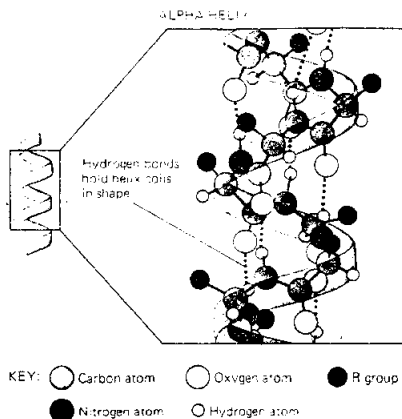
รูป 2-15 แบบจำลองโครงสร้างระดับแรกของโปรตีนฮีโมโกลบิน อักษรในวงรีแทนสัญลักษณ์กรดอะมิโน จาก Villet, Claude A., et al. 1989



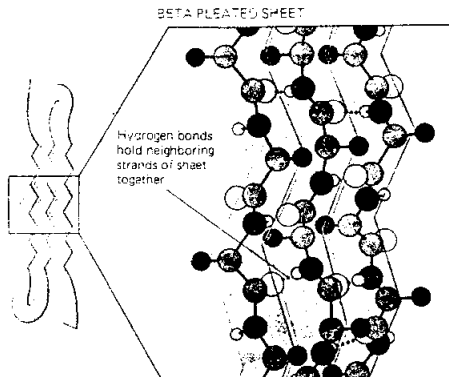
(2) โครงสร้างระดับที่สอง (secondary structure) เส้นพอลิเพปไทด์บิดเป็นเกลียว หรือรูปทรงที่แน่นอนแบบอื่น โดยเฉพาะพันธะไฮโดรเจนระหว่างไฮโดรเจนอะตอมและออกซิเจนอะตอม โครงสร้างระดับที่สองมี 2 ลักษณะ คือ ก. แบบบิดเกลียวเรียก อัลฟาเฮลิคส์ (alpha helix) (รูป 2-16 ก) ทำให้มีสมบัติยืดหยุ่น และ ข. แบบแผ่นพับคี่ออกเรียกว่า เบตา พลิท ชีท (beta pleated sheet) (รูป 2-16 ข) ทำให้มีสมบัติหยุ่นตัว เช่น ไฟบรอน (fibroin) ซึ่งเป็นโปรตีนผลิตจากต่อมสร้างใยของสัตว์พวกแมงมุม โครงสร้างแบบเบตา พลิท ชีท พบที่ส่วนในของโปรตีนที่มีโครงสร้างเป็นแบบก้อน (globular) มากชนิด

รูป 2-16 แบบจำลองโครงสร้างระดับที่สองของโปรตีน

ก. อัลฟาเฮลิคส์



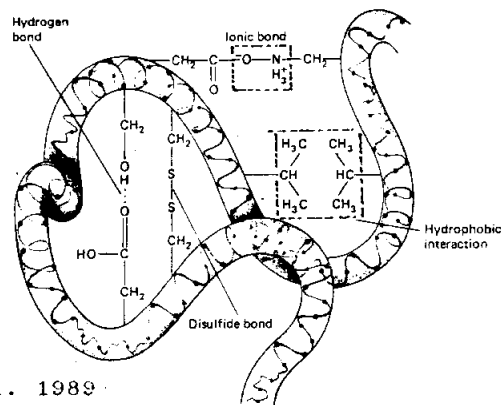
ข. เบตา พลิท ชีท



จาก Villet, Claude A., et al. 1989

(3) โครงสร้างระดับที่สาม (tertiary structure) เป็นโครงสร้างที่พัฒนา  
มาจากโครงสร้างระดับแรกและระดับที่สอง โดยมีอันตรกิริยาของหมู่ R ที่เป็นเส้นแขนงของ  
แกน จึงทำให้โปรตีนมีลักษณะเป็นก้อน ปัจจัยที่ทำให้เกิดโครงสร้างนี้ขึ้นมาได้คือ (ก) พันธะไฮ  
โดรเจนระหว่างหมู่ R ของกรดอะมิโนที่อยู่ใกล้กันภายในห่วง (ข) แรงดึงไอออนระหว่างหมู่  
R ที่มีประจุบวกและประจุลบ (ค) อันตรกิริยาพื้นน้ำ (hydrophobic interaction) ของ  
หมู่ R ที่ไม่มีขั้ว (ไม่มีประจุ) (ง) พันธะโคเวเลนต์ แบบพันธะไดซัลไฟด์ที่เชื่อมต่อกันระหว่างซัล  
เฟอร์อะตอมของกรดอะมิโน cysteine 2 หน่วย (โมเลกุล) (รูป 2-17) โปรตีนส่วนใหญ่  
จะมีโครงสร้างระดับที่สาม เช่น เอนไซม์ชนิดต่าง ๆ

รูป 2-17 แบบจำลองโครงสร้างระดับที่สามของโปรตีน ให้สังเกตพันธะแบบต่าง ๆ  
ที่ช่วยให้เกิดเป็นโครงสร้างแบบก้อน



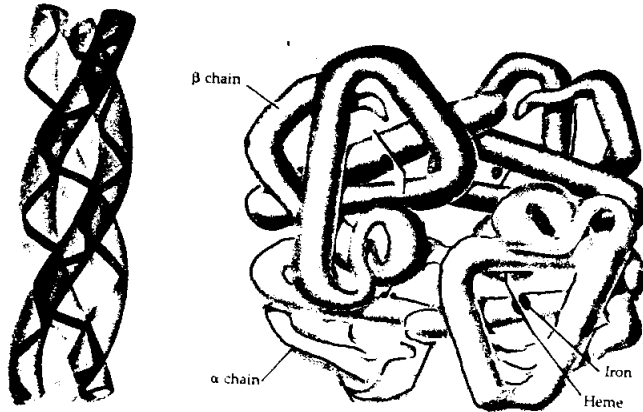
จาก Villet, Claude A., et al. 1989

(4) โครงสร้างระดับที่สี่ (quarternary structure) เป็นโปรตีนที่มีโครง  
สร้างซับซ้อนมาก เกิดจากการรวมพอลิเพปไทด์หลายโมเลกุลที่มีโครงสร้างตั้งแต่ระดับที่หนึ่งถึง  
ที่สามเข้าด้วยกัน เช่น คอลลาเจน (collagen) มีโครงสร้างเป็นเส้นใยที่มี 3 เส้นพอลิเพ  
ไทด์สอดต่อกัน (รูป 2-18 ก) ฮีโมโกลบิน (hemoglobin) ประกอบด้วยก้อนพอลิเพปไทด์  
4 โมเลกุล มีจำนวนกรดอะมิโนถึง 574 หน่วย และยึดอยู่กับอะตอมของธาตุเหล็ก (รูป 2-18  
ข)

รูป 2-18 ภาพจำลองโครงสร้างระดับที่สี่ของคอลลาเจนและฮีโมโกลบิน ให้  
สังเกตว่า ฮีโมโกลบินประกอบด้วย 2 แอลฟาเซน และ 2 เบตาเซน

ก. คอลลาเจน

ข. ฮีโมโกลบิน



จาก Campbell, Neil A. 1990

โครงสร้างต่าง ๆ ของโปรตีนเป็นตัวกำหนดหน้าที่การมีฤทธิ์ในทางชีววิทยา

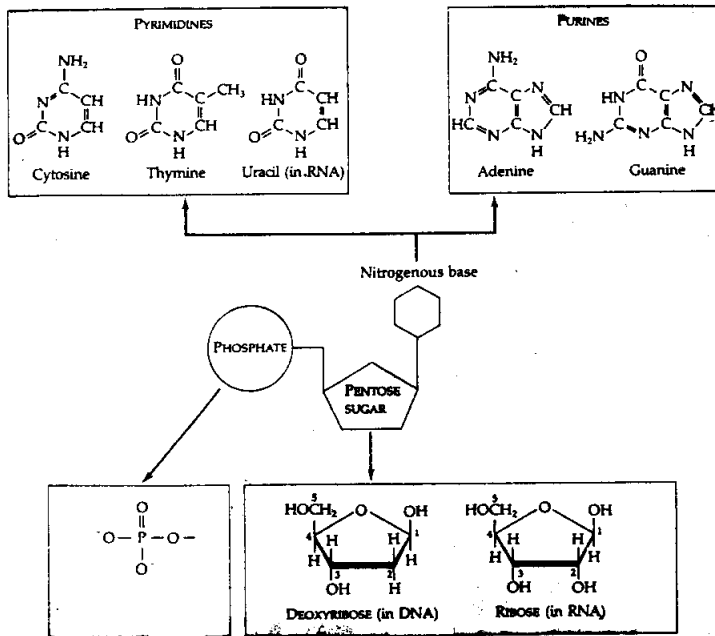
โปรตีนชนิดหนึ่งอาจมีโครงสร้างได้มากกว่าหนึ่งแบบทำให้มีหน้าที่ได้ตามลักษณะโครงสร้างนั้น ๆ ตำแหน่งที่มีลักษณะเป็นก้อนรวมอยู่ภายในเส้นพอลิเพปไทด์เรียกว่า โดเมน (domain) เป็นตำแหน่งที่จะมีปฏิกิริยา ซึ่งเห็นได้ง่ายคือ ตำแหน่งที่เป็นแอคทีฟไซต์ (active site) ของเอนไซม์ต่าง ๆ ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อเกิดการกลายพันธุ์ขึ้นที่ยีน จะทำให้ลำดับการเรียงตัวของกรดอะมิโนในเส้นพอลิเพปไทด์เปลี่ยนแปลงไป หรือกรดอะมิโนชนิดใดชนิดหนึ่งหายไป จะทำให้การทำงานของโปรตีนผิดพลาดไปด้วย เช่น กรณีของโรคโลหิตจางแบบ sickle cell anemia กรดอะมิโน ณ ตำแหน่งที่ 6 ของพอลิเพปไทด์ในฮีโมโกลบินเป็นชนิด valine (แทนที่ปกติเป็น glutamic acid) เป็นผลให้คุณสมบัติการละลายน้ำลดลง จึงเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเม็ดเลือดแดงและการจับออกซิเจนลดลงด้วย

2.3.4 กรดนิวคลีอิก มี 2 ชนิด คือ deoxyribonucleic acid (DNA) และ ribonucleic acid (RNA) ทั้งสองชนิดมีหน้าที่หลักคือ ควบคุมลักษณะถ่ายทอดทางพันธุกรรม และกำหนดลำดับการเรียงตัวของกรดอะมิโนในการสังเคราะห์โปรตีน ซึ่งจะมีกลไกการทำงานต่าง ๆ ของเอนไซม์ และสรีรวิทยาของสิ่งมีชีวิต

(1) DNA และ RNA เป็นพอลิเมอร์ เรียกว่า พอลินิวคลีโอไทด์ (polynucleotide) เกิดจากโมโนเมอร์ที่เรียกว่า นิวคลีโอไทด์ (nucleotide) หรือ nucleoside triphosphate หนึ่งนิวคลีโอไทด์ประกอบด้วย (ก) น้ำตาลเพนโทส (ดีออกซีไรโบส หรือ

ไรโบส) (ข) หมู่ฟอสเฟต และ (ค) เบสที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งอาจเป็น **พิวรีน (purine)** คือ adenine และ guanine หรือ **ไพริมิดีน (pyrimidine)** คือ cytosine thymine และ uracil (รูป 2-19) ข้อแตกต่างระหว่าง DNA และ RNA คือ DNA มีน้ำตาลเป็นดีออกซีไรโบสและไม่มีเบส uracil แต่ RNA มีน้ำตาลเป็นไรโบสและไม่มีเบส thymine (ดูตาราง 2-3)

**รูป 2-19** โครงสร้างของกรดนิวคลีอิก ให้สังเกตชนิดของน้ำตาลและเบสที่เป็นส่วนประกอบของ DNA และ RNA



จาก Campbell, Neil A. 1990

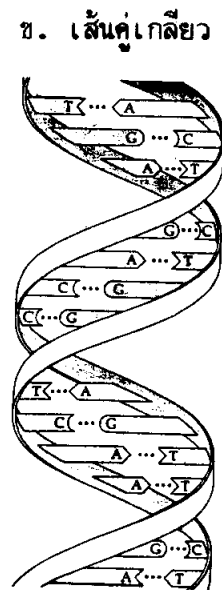
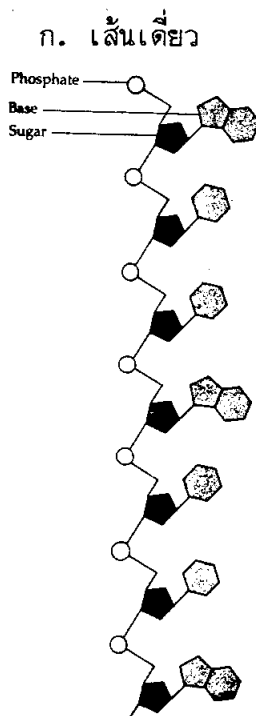
**ตาราง 2-3** เปรียบเทียบโมเลกุลของน้ำตาลและเบสที่เป็นส่วนประกอบของนิวคลีโอไทด์ใน DNA และ RNA

	DNA	RNA
pentose	deoxyribose	ribose
purine base	adenine (A)	A

	DNA	RNA
	guanine (G)	G
pyrimidine base	cytosine (C)	C
	thymine (T)	uracil (U)

พอลินิวคลีโอไทด์เกิดจากการมีพันธะเอสเทอร์ระหว่างหมู่ฟอสเฟตและน้ำตาลของต่างนิวคลีโอไทด์กัน (รูป 2-20 ก) ดังนั้นน้ำตาลและฟอสเฟตจึงทำหน้าที่เป็นแกนของเส้น (strand) พอลิเพปไทด์ โดยมีเบสชนิดต่าง ๆ พันธะอยู่ด้วย เบสเหล่านี้มีแรงดึงดูดด้วยพันธะไฮโดรเจนตามคู่สม (base pair) คือ A:T (A:U ใน RNA) และ C:G ทำให้เกิดโครงสร้างบิดเกลียวของเส้นคู่กรตนิวคลีโอทิกซ์ (รูป 2-20 ข) ผู้ค้นพบโครงสร้างนี้คือวัตสันและคริก

รูป 2-20 แบบจำลองเส้นเดี่ยวและเส้นคู่ของพอลินิวคลีโอไทด์ (DNA) สัญลักษณ์แทนชื่อเต็มคือ A - adenine, T - thymine, G - guanine, C-cytosine เส้นประหมายถึงพันธะไฮโดรเจน



จาก Campbell, Neil A. 1990



ทั้ง DNA และ RNA ถูกไฮโดรไลส์ด้วยเอนไซม์ deoxyribonuclease และ ribonuclease ตามลำดับ ได้หน่วยย่อยที่มีน้ำตาลพันธะอยู่กับเบสเรียกว่า นิวคลีโอไซด์ (nucleoside)

โครงสร้างของ RNA ต่างไปจากของ DNA กล่าวคือ RNA มีเพียงเส้นเดี่ยวไม่เป็นเส้นคู่ ขนาดของโมเลกุลและหน้าที่ต่างกัน มี 3 ชนิด คือ

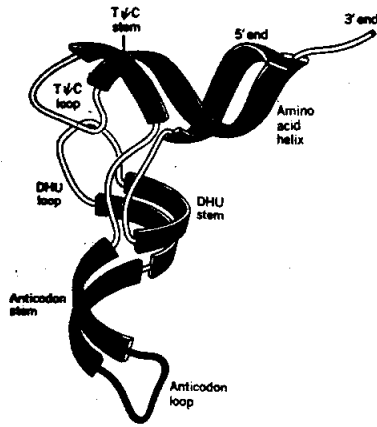
ก. เมสเซนเจอร์อาร์เอ็นเอ (messenger RNA) เขียนย่อว่า mRNA สังเคราะห์ขึ้นโดยแม่พิมพ์ DNA ในนิวเคลียสแล้วถูกส่งออกมาอยู่ในไซโทพลาซึมทำหน้าที่นำรหัสการสังเคราะห์โปรตีนที่เฉพาะแต่ละชนิด

ข. ไรโบโซมัลอาร์เอ็นเอ (ribosomal RNA) เขียนย่อว่า rRNA มีปริมาณมากที่สุด เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของไรโบโซม ทำหน้าที่กำหนดตำแหน่งเข้าเกาะของกรดอะมิโนเพื่อเข้ากับรหัสบนเส้น mRNA ในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีน

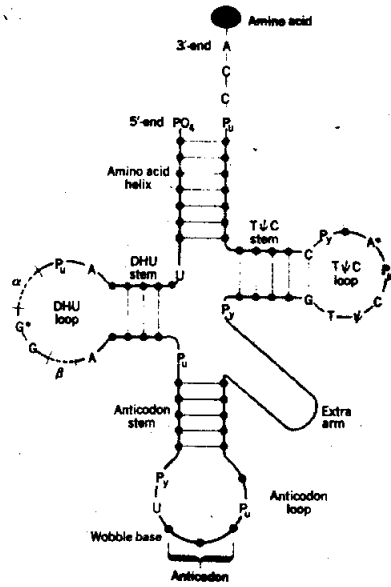
ค. ทรานสเฟอร์อาร์เอ็นเอ (transfer RNA) เขียนย่อว่า tRNA ขนาดโมเลกุลเล็กที่สุด ละลายน้ำได้ดีกว่า RNA สองชนิดแรก ประกอบด้วยนิวคลีโอไทด์ 70-80 หน่วย tRNA แต่ละโมเลกุลมีความเฉพาะต่อการพันธะกับกรดอะมิโนแต่ละชนิด กล่าวคือ tRNA ชนิดหนึ่งจับกับกรดอะมิโนได้เพียงชนิดเดียว ทำหน้าที่นำกรดอะมิโนไปส่งให้ไรโบโซมเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์โปรตีน โครงสร้างที่ทำหน้าที่นำกรดอะมิโนเรียกว่า clover-leaf form (รูป 2-21)

รูป 2-21 โครงสร้างโมเลกุลของ tRNA (ก) ซึ่งขดบิดเป็นเกลียวได้ด้วยแรงดึงพันธะไฮโดรเจนของเบสที่เป็นคู่สม (ข) ให้สังเกตตำแหน่งที่มีพันธะกับกรดอะมิโน (ACC) และตำแหน่งแอนติโคดอน (anticodon) ที่จะจับกับรหัสโคดอน (codon) ของ mRNA (ไม่ได้แสดงไว้ในรูป) ตัวอักษรแทนนิวคลีโอไทด์ที่มีเบสแต่ละชนิด

ก.



ข.



(2) นิวคลีโอไทด์อื่นที่สำคัญ นอกจาก DNA และ RNA แล้วยังมีนิวคลีโอไทด์ที่สำคัญ เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึมหลายชนิด คือ

ก. แอดิโนซีนไตรฟอสเฟต (adenosine triphosphate) เขียนย่อว่า ATP ประกอบด้วยแอดิโนซีน น้ำตาลไรโบส และ 3 หมู่ฟอสเฟต (รูป 2-22 ก) เป็นสารสำคัญที่ เก็บพลังงานไว้ที่พันธะของฟอสเฟตหมู่ที่ 2 และที่ 3 ซึ่งเขียนแสดงพันธะพลังงานสูงเป็น P

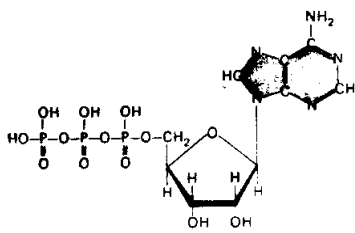
ข. ไซคลิกแอดิโนซีนโมโนฟอสเฟต (cyclic adenosine monophosphate) เขียนย่อว่า cAMP หมู่ฟอสเฟต 2 หมู่ถูกตัดออกจาก ATP ด้วยเอนไซม์ adenylate cyclase ทำให้ได้วง cAMP ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นการทำงานของฮอร์โมน ต่าง ๆ (รูป 2-22 ข)

ค. โคเอนไซม์ (coenzyme) ประกอบด้วยแอดิโนซีน น้ำตาลไรโบส 2 หมู่ ฟอสเฟต และวิตามิน ทำหน้าที่ช่วยการมีฤทธิ์ของเอนไซม์ หรืออาจทำหน้าที่รับและส่งไฮโดร เจนอะตอมในปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน เช่น nicotinamide adenine dinucleotide (NAD<sup>+</sup>) (รูป 2-22 ค)

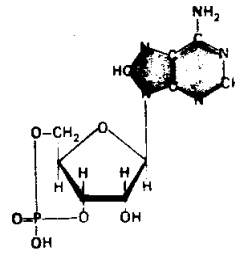
รูป 2-22 โครงสร้างโมเลกุลของนิวคลีโอไทด์ที่สำคัญต่อชีวเคมีของสิ่งมีชีวิต

ก. แอดีนอซินไตรฟอสเฟต

ข. ไซคลิกแอดีนอซินโมโนฟอสเฟต

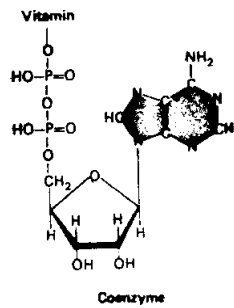


Adenosine Triphosphate (ATP)



Cyclic Adenosine Monophosphate (cAMP)

ค. โคเอนไซม์  $\text{NAD}^+$



จาก Audesirk, G. & Teresa Audesirk 1986