สารเคมีในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

ธาตุและสารประกอบภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

สสารทุกรูปแบบ ทั้งสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิต ประกอบขึ้นด้วย โครงสร้างหน่วยย่อยที่สุดเรียกว่า **ธาตุเคมี (chemical element)**

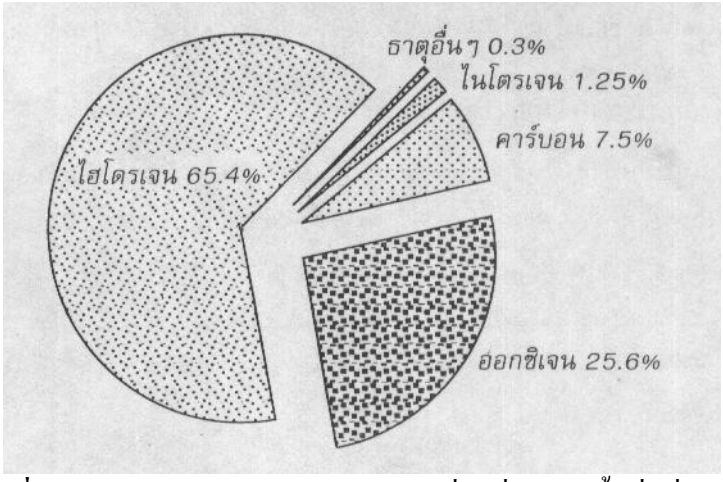
ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของร่างกายคน

ธาตุทั้งหมดที่มนุษย์รู้จักมีประมาณ 100 ชนิด มีประมาณ 20 กว่าชนิด ที่พบในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

■ **ธาตุที่พบในปริมาณมาก** - มีปริมาณรวมกันถึงร้อยละ 99.75 ได้แก่ ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), คาร์บอน (C), ไนโตรเจน (N)

■ **ธาตุที่พบในปริมาณน้อย** - ได้แก่ แคลเซียม (Ca), ฟอสฟอรัส (P), โพแทสเซียม (K), และกำมะถัน (S)

■ **ธาตุอื่น ๆ ที่พบในปริมาณน้อยมาก** - รวมกันไม่ถึงร้อยละ 0.001 ได้แก่ เหล็ก (Fe), คลอรีน (CI), ไอโอดีน (I), โซเดียม (Na), แมกนีเซียม (Mg), ทองแดง (Cu), แมงกานีส (Mn), โคบอลต์ (Co), สังกะสี (Zn), โครเมียม (Cr), ฟลูออรีน (F), โมลิบดีนัม (Mo), ซิลิกอน (Si), ดีบุก (Sn) ทั้งหมดนี้ก็มีความจำเป็นมากเช่นกัน เพราะเป็นองค์ประกอบสารสำคัญที่ทำหน้าที่ในร่างกาย



ภาพที่ 3.1 : ปริมาณธาตุชนิดต่าง ๆ (ค่าเฉลี่ย) ที่พบในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต

สารในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

สารในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

■ **สารอินทรีย์ (organic substance)** คือ สารประกอบที่มีธาตุคาร์บอน (C) และธาตุไฮโดรเจน (H) เป็นองค์ประกอบ

■ สารอินทรีย์ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบโมเลกุลใหญ่มาก เรียกว่า **ชีวโมเลกุล (biological molecule)** เกิดจากการรวมตัวของสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่เป็นหน่วยย่อย

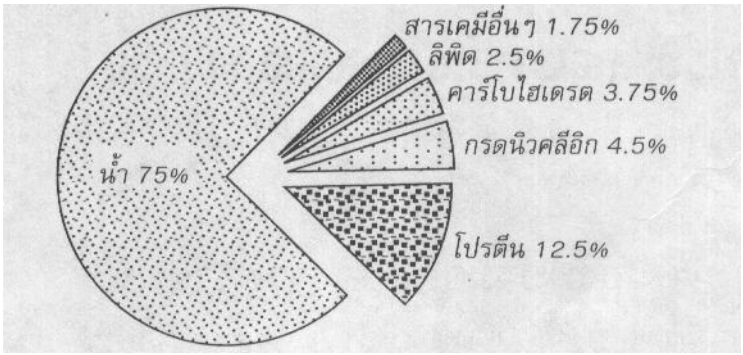
■ สารชีวโมเลกุล แบ่งได้เป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ลิพิด โปรตีน กรดนิวคลีอิก

■ **สารอนินทรีย์ (inorganic substance)** คือ สารประกอบที่ไม่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ น้ำ แร่ธาตุต่าง ๆ มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตมากเช่นเดียวกัน

■ น้ำเป็นสารประกอบที่มีมากสุดในเซลล์สิ่งมีชีวิตทั่วไป มีสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดี และมีสภาพเป็นกลาง ดังนั้นน้ำทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายสารแทบทุกชนิด มีผลช่วยย่อยอาหาร ดูดซึม ลำเลียง และขับถ่าย ช่วยการเกิดปฏิกิริยาเคมีและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และช่วยควบคุมอุณหภูมิร่างกาย เนื่องจากน้ำมีความจุความร้อนสูง การหลั่งเหงื่อช่วยระบายความร้อน ฯลฯ

สารเคมีในร่างกายคน

สัดส่วนของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบเซลล์ของคน สรุปได้ดังกราฟ



ภาพที่ 3.6 : สัดส่วนสารเคมีในเซลล์ของคน

คาร์โบไฮเดรต

■ **คาร์โบไฮเดรต** มาจากคำว่า ไฮเดรตของคาร์บอน (hydrate of carbon) หรือคาร์บอนที่มีน้ำอยู่ด้วย ประกอบด้วยธาตุเพียง 3 ชนิด คือ คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O)

■ **สูตรทั่วไปคือ** $(CH_2O)_n$ ตัวอย่างเช่น $C_6H_{12}O_6$, $C_5H_6O_3$

■ โมเลกุลคาร์โบไฮเดรตส่วนใหญ่มีสัดส่วน H : O = 2 : 1 เช่นเดียวกับโมเลกุลของน้ำ

แต่ที่จริงแล้ว O อยู่ในรูปแอลกอฮอล์ (-OH), อัลดีไฮด์ (R-C(=O)-H) หรือคีโตน (R-C(=O)-R')

■ คาร์โบไฮเดรตแบ่งตามขนาดโมเลกุลเป็น 3 ประเภท คือ มอโนแซ็กคาไรด์ (monosaccharide), โอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide), พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide)

มอโนแซ็กคาไรด์

■ **มอโนแซ็กคาไรด์** คือ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เป็นคาร์โบไฮเดรตขนาดเล็กที่สุด ประกอบด้วยคาร์บอน 3-7 อะตอม ไม่สามารถย่อย (hydrolysis) เล็กกว่านี้อีก

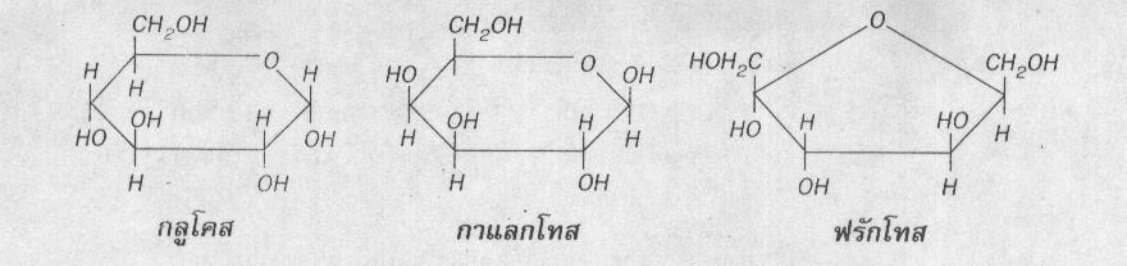
ตารางที่ 3.2 : ตัวอย่างมอโนแซ็กคาไรด์

ชนิด	สูตรเคมี	ตัวอย่าง
triose, C_3	$C_3H_6O_3$	PGAL (phosphoglyceraldehyde) เป็นน้ำตาลตัวแรกที่เกิดจากการสังเคราะห์แสง
tetrose, C_4	$C_4H_8O_4$	erythrose
pentose, C_5	$C_5H_{10}O_5$	ribose เป็นองค์ประกอบของ RNA
	$C_5H_{10}O_4$	deoxyribose เป็นองค์ประกอบของ DNA
hexose, C_6	$C_6H_{12}O_6$	glucose (dextrose), fructose (lavulose), galactose

*deoxyribose มี H : O ไม่เป็นอัตราส่วน 2 : 1

■ มอโนแซ็กคาไรด์ที่เรารู้จัก คือ **พวกเฮกโซส** ($C_6H_{12}O_6$) ได้แก่ กลูโคส ฟรักโทส กาแลกโทส ซึ่งมีสูตรโมเลกุลเหมือนกัน แต่โครงสร้างการเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลแตกต่างกันเรียกว่าเป็น **ไอโซเมอร์ (isomer)** กัน

■ น้ำตาลสามชนิดนี้ เป็นผลสุดท้ายของการย่อยคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่อื่น ๆ ที่สามารถดูดซึมสู่ร่างกาย เซลล์นำไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน และเปลี่ยนแปลงเป็นสารจำเป็นอื่น ๆ



ภาพที่ 3.7 : กลูโคส กาแลกโทส และฟรักโทส มีสูตรโมเลกุลเหมือนกัน แต่สูตรโครงสร้าง (การเรียงตัวของอะตอม) แตกต่างกัน

โอลิโกแซ็กคาไรด์

■ **โอลิโกแซ็กคาไรด์** คือ น้ำตาลที่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ตั้งแต่ 2 – 10 โมเลกุล

■ ที่พบมากคือ น้ำตาลโมเลกุลคู่ ได้แก่ ซูโครส มอลโทส แลกโทส มีอยู่ในอาหารหลายชนิด เมื่อเข้าสู่ร่างกายก็จะถูกย่อยเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว

ตารางที่ 3.3 : ประโยชน์ของน้ำตาลโมเลกุลคู่ในสารอาหาร

ซูโครส	- พบมากในอ้อย น้ำตาลมะพร้าว ผลไม้สุด และอยู่ในรูปน้ำตาลทราย
(กลูโคส + ฟรักโทส)	น้ำตาลปึก น้ำตาลกรวด
	- เป็นน้ำตาลที่เราได้รับจากอาหารมากที่สุด (25% ของแคลอรีจาก
	คาร์โบไฮเดรต)
แลกโทส	- พบในน้ำนมคนและสัตว์ ไม่พบในพืช
(กลูโคส + กาแลกโทส)	- มีความหวานน้อยที่สุด
	- เป็นคาร์โบไฮเดรตในน้ำนม
	- เหมาะสำหรับเป็นอาหารเลี้ยงทารก (ไม่ทำให้ท้องเสียและหวานน้อย)
มอลโทส	- พบในข้าวมอลต์และเมล็ดข้าวที่กำลังงอก
(กลูโคส + กลูโคส)	- ในร่างกายเกิดขึ้นจากการย่อยแป้งและไกลโคเจน
	- ข้าวที่เคี้ยวในปากมีรสหวาน เพราะแป้งถูกเอนไซม์อะไมเลสย่อย
	เป็นมอลโทส

พอลิแซ็กคาไรด์

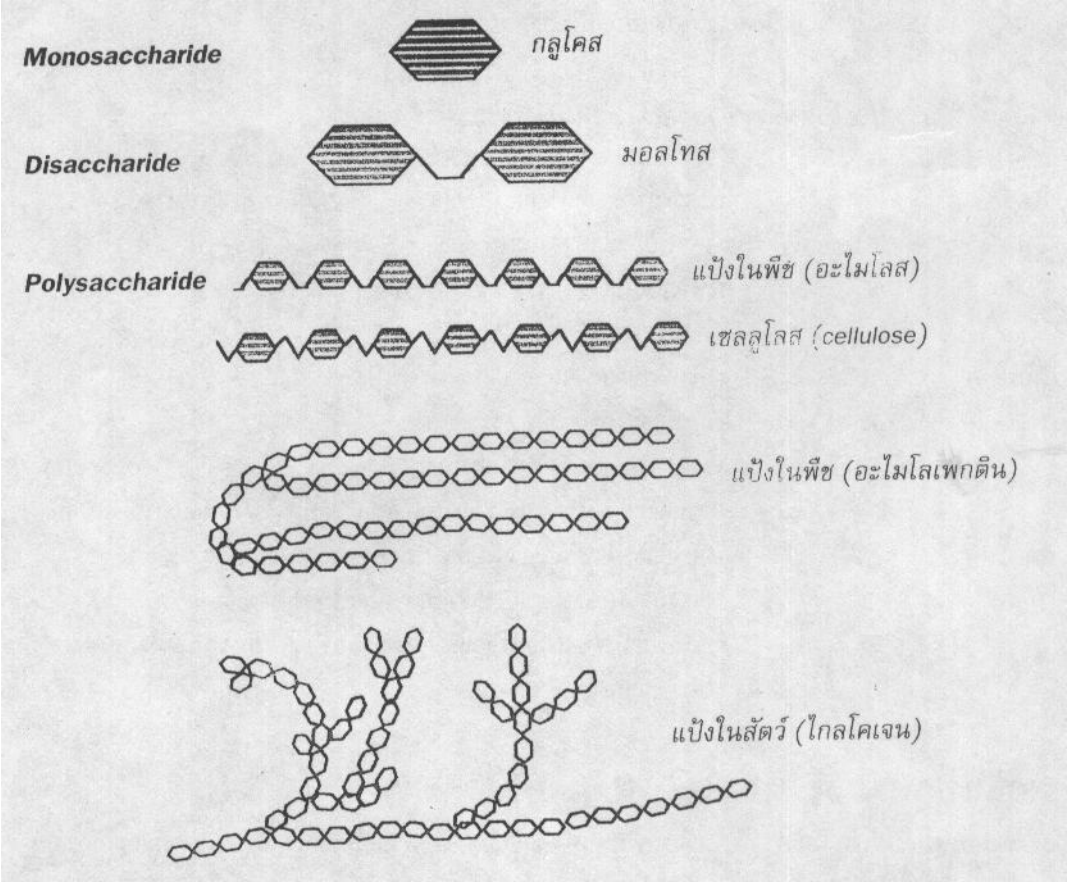
■ **พอลิแซ็กคาไรด์** คือ คาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวมากกว่า 10 โมเลกุลขึ้นไป (100 – 1,000 โมเลกุล) เรียงต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) อาจมีแขนงหรือไม่มีก็ได้ เรียกกระบวนการนี้ว่า **พอลิเมอไรเซชัน (polymerization)**

■ มีสมบัติเป็นของแข็งสีขาว แทบไม่มีละลายน้ำ ไม่มีรสหวาน ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมี

■ ตัวอย่างพอลิแซ็กคาไรด์ที่สำคัญ ได้แก่ แป้ง เดกซ์ทริน ไกลโคเจน เซลลูโลส ทั้งหมดมีกลูโคสเป็นองค์ประกอบ แต่โครงสร้างแตกต่างกันเป็นสายยาวหรือแตกแขนงต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 3.4 : ตัวอย่างพอลิแซ็กคาไรด์ที่สำคัญ

เซลลูโลส	- โครงสร้างเป็นสายยาว ไม่แตกแขนง - เป็นสารโครงสร้างของพืช โดยเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ - ร่างกายคนไม่มีเอนไซม์ย่อยเซลลูโลส ไม่มีประโยชน์ในแง่อาหาร แต่เป็นกากอาหารกระตุ้นการขับถ่าย
แป้ง	- โครงสร้างเป็นสายยาวหรือมีแตกแขนงเป็นสายยาวไม่กี่แขนง - เป็นแหล่งอาหารคาร์โบไฮเดรตที่คนใช้บริโภคมากที่สุด - มีสมบัติไม่ละลายในน้ำเย็น แต่ละลายได้ในน้ำร้อน - แป้งถูกย่อย (hydrolysis) จะได้สารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงตามลำดับ ดังนี้ แป้ง ⟶ เดกซ์ทริน ⟶ มอลโทส ⟶ กลูโคส
ไกลโคเจน	- โครงสร้างเป็นสายยาว มีแตกแขนงเป็นสายสั้น ๆ จำนวนมาก - ร่างกายสัตว์สำรองไกลโคเจนไว้ที่ตับและกล้ามเนื้อไว้ใช้เมื่อขาดแคลน กลูโคสเปรียบเป็น “แป้งของสัตว์”



ภาพที่ 3.8 : เปรียบเทียบสูตรโครงสร้างมอโนแซ็คคาไรด์ ไดแซ็คคาไรด์ และพอลิแซ็คคาไรด์ (แป้งเซลลูโลส ไกลโคเจน) มีหน่วยย่อยเป็นกลูโคสเหมือนกัน

ลิพิด (lipids)

■ **ลิพิดหรือสารไขมัน** คือ สารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในตัวทำละลายไขมัน (เช่น อีเทอร์คลอโรฟอร์ม เบนซิน อะซีโตน ฯลฯ)

■ โมเลกุลลิพิดประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน เช่นเดียวกับคาร์โบไฮเดรต แต่สัดส่วนของธาตุแตกต่างกัน

■ ตัวอย่างลิพิดที่สำคัญ ได้แก่ ไขมันและน้ำมัน (fats and oils), ฟอสโฟลิพิด (phospholipids), สเตรอยด์ (steroid), ไข (wax) ฯลฯ

ไขมันและน้ำมัน

■ **ไขมันและน้ำมัน** คือ ลิพิดที่ประกอบด้วย กลีเซอรอล (glycerol) 1 โมเลกุล กับกรดไขมัน 1, 2 หรือ 3 โมเลกุลก็ได้ ซึ่งเรียกว่า **มอโนกลีเซอไรด์ (monoglyceride), ไดกลีเซอไรด์ (diglyceride)** หรือ**ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride)** ตามลำดับ

■ ไขมันที่พบมากที่สุดในสัตว์และพืชคือ ไตรกลีเซอไรด์ เช่น ไตรสเตียริน (tristerin) ประกอบด้วยกลีเซอรอล 1 โมเลกุลจับกับกรดสเตียริก 3 โมเลกุล

■ การย่อยไขมันและน้ำมันในอาหาร (เกิดขึ้นในลำไส้เล็ก) เป็นปฏิกิริยารวมตัวกับน้ำ (hydrolysis) โดยมีเอนไซม์ลิเพสเป็นตัวเร่ง ได้ผลการย่อยเป็นกลีเซอรอล และกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ

■ ปฏิกิริยาสังเคราะห์ไขมัน (เกิดขึ้นได้ที่เนื้อเยื่อของพืชและสัตว์) เป็นการรวมตัวของกลีเซอรอลและกรดไขมัน ทำให้มีโมเลกุลน้ำเกิดขึ้นเท่ากับจำนวนโมเลกุลของกรดไขมัน

■ ไขมันและน้ำมันทุกชนิดมีกลีเซอรอลเหมือน ๆ กัน สิ่งที่ทำให้ไขมันและน้ำมันมีหลายชนิดและมีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพแตกต่างกัน คือ กรดไขมันต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบ

กรดไขมัน

■ **กรดไขมัน** อาจมีอยู่เป็นองค์ประกอบของลิพิดต่าง ๆ หรืออยู่ในรูปอิสระ

■ โดยทั่วไปกรดไขมันจากธรรมชาติ มีแกนโมเลกุลเป็นคาร์บอน จำนวนเป็นคู่ เรียงเป็นสายยาว ไม่แตกแขนง

■ ที่พบมากที่สุดคือ กรดไขมันคาร์บอน 16 ตัว และ 18 ตัว

■ กรดไขมันแบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ โดยอาศัยหลักเกณฑ์ได้หลายอย่าง ดังนี้

แบ่งตามระดับความอิ่มตัว

1. กรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid) คือ กรดไขมันที่คาร์บอนต่อกับคาร์บอนด้วย**พันธะเดี่ยว** กล่าวคือ แขนคาร์บอนอีก 3 แขนจับกับไฮโดรเจนแขนละอะตอม ซึ่งเป็นจำนวนอะตอมไฮโดรเจนสูงสุดที่จะจับไว้ได้ (เรียกว่า อิ่มตัวด้วยไฮโดรเจน)

ตัวอย่างของกรดไขมันอิ่มตัว เช่น กรดปาลมิติก ($C_{15}H_{31}COOH$), กรดสเตียริก ($C_{17}H_{35}COOH$)

2. กรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) คือ กรดไขมันที่มีคาร์บอนบางอะตอมต่อกันด้วย**พันธะคู่** ทำให้โมเลกุลไขมันจับไฮโดรเจนได้ลดลง 2 อะตอมต่อพันธะคู่ 1 พันธะ (เรียกว่า ไม่อิ่มตัวด้วยไฮโดรเจน)

ตัวอย่างกรดไขมันไม่อิ่มตัว เช่น กรดโอเลอิก ($C_{17}H_{33}COOH$) ซึ่งมีพันธะคู่ 1 พันธะ กรดไลโนเลอิก ($C_{17}H_{31}COOH$) มีพันธะคู่ 2 พันธะ

แบ่งตามความต้องการทางโภชนาการ

1. กรดไขมันจำเป็น (essential fatty acid) เป็นกรดไขมันที่ร่างกายสังเคราะห์ขึ้นเองไม่ได้ ต้องได้รับจากอาหาร มีชนิดเดียวคือ กรดไลโนเลอิก (linoleic acid) ซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว มีมากในน้ำมันพืชต่าง ๆ (**ยกเว้น** น้ำมันปาล์มและน้ำมันมะพร้าว) และไขมันสัตว์น้ำ เช่น ปลา หอย

ความสำคัญของกรดไลโนเลอิกต่อร่างกาย คือ เสริมสร้างความแข็งแรงให้แก่ผนังหลอดเลือดและเยื่อหุ้มเซลล์ รวมตัวกับโคเลสเตอรอลเพื่อขนส่งไปในกระแสเลือด ซึ่งจะมีผลให้ลดระดับโคเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ในเลือด

2. กรดไขมันไม่จำเป็น (nonessential fatty acid) เป็นกรดไขมันที่ร่างกายของคนเราสามารถสังเคราะห์ขึ้นเองได้ และมีอยู่มากในอาหารไขมันทั่ว ๆ ไป ทั้งในน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์

แบ่งตามความยาวของสาย

1. กรดไขมันสายสั้น และกรดไขมันสายปานกลาง (shot and medium chain fatty acids) เป็นกรดไขมันที่ประกอบด้วยคาร์บอน 4 – 8 อะตอม และ 10 – 12 อะตอม พบมากในไขมันจากพืช (ยกเว้นน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันปาล์ม) อยู่ในสภาพที่เป็นน้ำมัน

2. กรดไขมันสายยาว (long chain fatty acid) ประกอบด้วยคาร์บอนตั้งแต่ 14 อะตอมขึ้นไป จนอาจจะมากถึง 24 อะตอม พบมากในไขมันสัตว์ แข็งตัวง่าย

ฟอสโฟลิพิด

■ โครงสร้างคล้ายไตรกลีเซอไรด์ (กลีเซอรอลจับกับกรดไขมัน 3 โมเลกุล) แต่มีหมู่ฟอสเฟตแทนที่กรดไขมัน 1 โมเลกุล

■ หมู่ฟอสเฟตของฟอสโฟลิพิด มักจับหมู่สารประกอบไนโตรเจนที่มีประจุ ทำให้โมเลกุลฟอสโฟลิพิดประกอบด้วย 2 ส่วนที่มีสมบัติต่างกัน

- **ส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic part)** คือ ส่วนที่เป็นหมู่ฟอสเฟตและสารประกอบไนโตรเจนที่มีประจุ เป็นส่วนหัวที่มีขั้ว (polar head) มีสมบัติละลายน้ำ

- **ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (nonpolar tail)** คือ ส่วนใหญ่ของโมเลกุลที่เป็นกรดไขมัน เป็นส่วนหางที่ไม่มีขั้ว (nonpolar tail) ไม่ละลายน้ำ

■ โมเลกุลฟอสโฟลิพิดที่มีสองส่วน เป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ โดยมีโมเลกุลฟอสโฟลิพิดหนา 2 ชั้น เรียงตัวจัดส่วนไขมัน (ไม่ชอบน้ำ) อยู่ด้านในและประกบกัน ส่วนชอบน้ำอยู่ด้านนอก ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์มีสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่าน สารไม่มีขั้วและสารละลายได้ในไขมันผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้โดยการแพร่ สารมีขั้วต้องใช้โปรตีนเป็นตัวพาหรือใช้พลังงานด้วย

■ นอกจากนี้โมเลกุลฟอสโฟลิพิดยังทำหน้าที่ล้อมรอบหยดไขมัน ทำให้ลำเลียงไขมันไปในเลือดซึ่งเป็นตัวกลางแบบน้ำได้

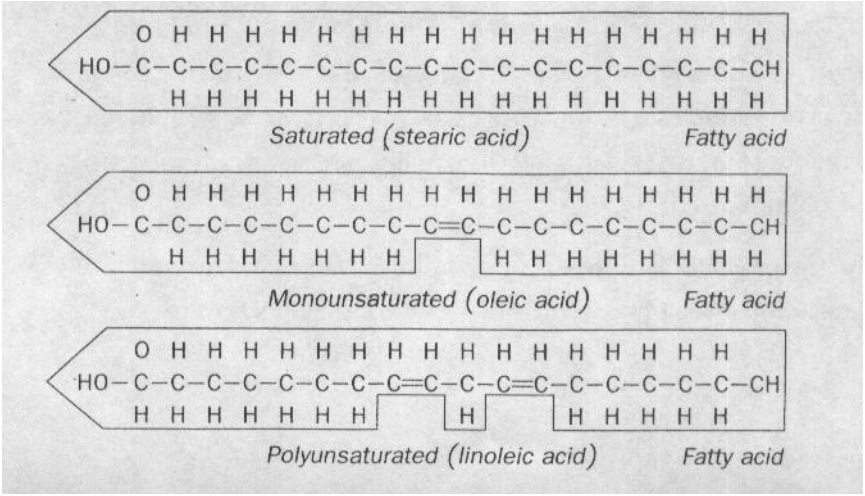
สเตรอยด์

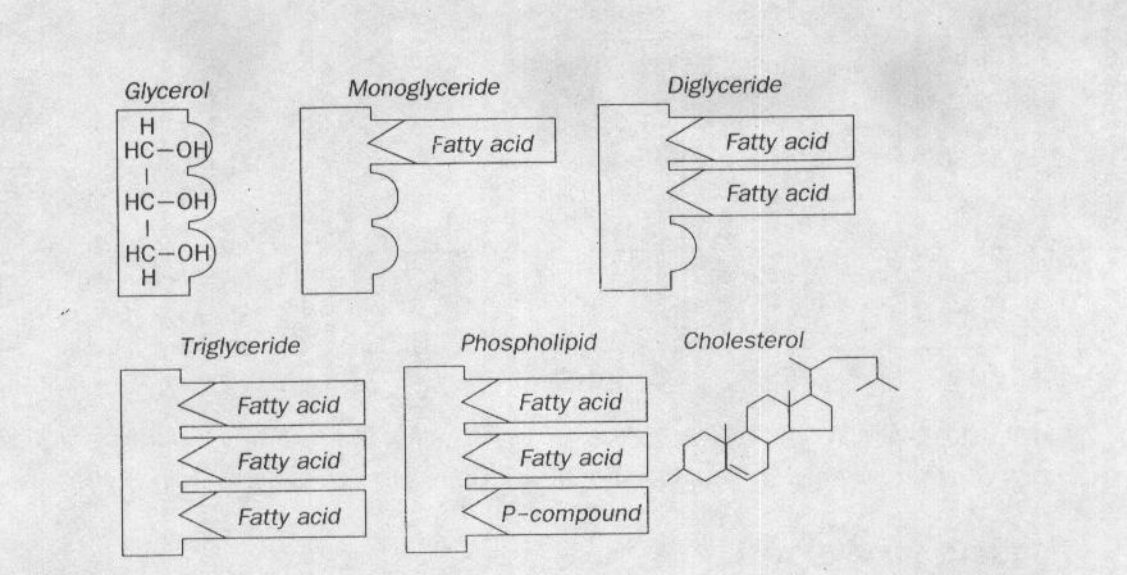
■ **สเตรอยด์** เป็นลิพิดที่มีโครงสร้างแตกต่างจากไขมันและฟอสโฟลิพิดมาก ประกอบด้วยวงของคาร์บอน 5 หรือ 6 อะตอม ต่อกัน 4 วง

■ **สเตรอยด์ที่สำคัญ** ได้แก่ ฮอร์โมนเพศ (เอสโทรเจน, โพรเจสเทอโรน. เทสโทสเทอรโรน), ฮอร์โมนจากต่อมหมวกไต (คอร์ติซอล และอัลโดสเทอโรน), โคเลสเตอรอล, วิตามินดี

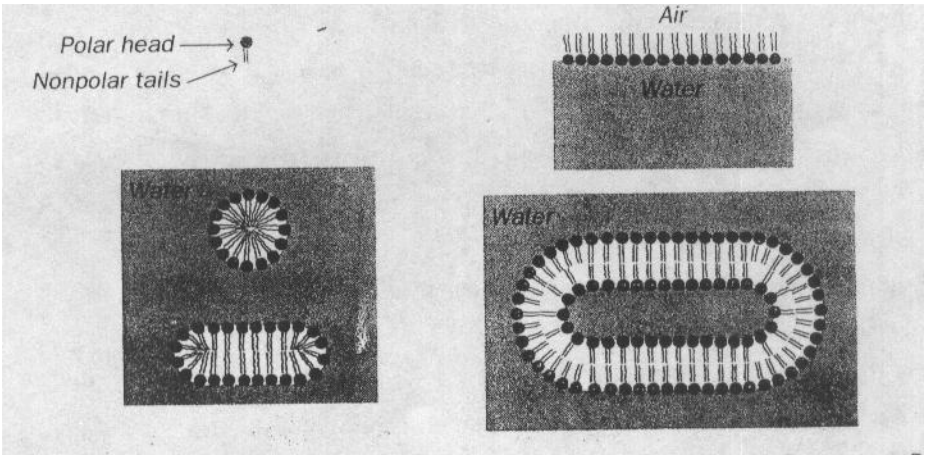
■ **โคเลสเตอรอล** เป็นส่วนประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์โดยเพาะเซลล์ประสาทมีโคเลสเตอรอลอยู่มาก เป็นสารต้นกำเนิดของฮอร์โมนสเตรอยด์ และของ 7-ดีโฮโดรโคเลสเตอรอลที่ผิวหนัง ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงเป็นวิตามิน ดี เมื่อถูกแสงอัลตราไวโอเลต

■ ความผิดปกติมีผลให้มีปริมาณโคเลสเตอรอลและไขมันในเลือดสูง ทำให้สะสมอยู่ที่ผนังด้านในของเส้นเลือด เป็นสาเหตุของโรคหลอดเลือดตีบตัน ซึ่งถ้าเกิดกับหลอดเลือดที่ไปเลี้ยงอวัยวะสำคัญ เช่น สมองและหัวใจก็จะเป็นอันตรายถึงตายได้อย่างง่ายดาย





ภาพที่ 3.9 : แสดงสูตรโครงสร้างของลิพิดชนิดต่าง ๆ, กลีเซอรอล, กลีเซอไรด์, ฟอสโฟลิพิด, โคเลสเตอรอล



ภาพที่ 3.10 การแบ่งส่วนของโมเลกุลฟอสโฟลิพิด และการเรียงตัวของโมเลกุลฟอสโฟลิพิดแบบต่าง ๆ ในตัวกลางที่เป็นน้ำ

โปรตีน

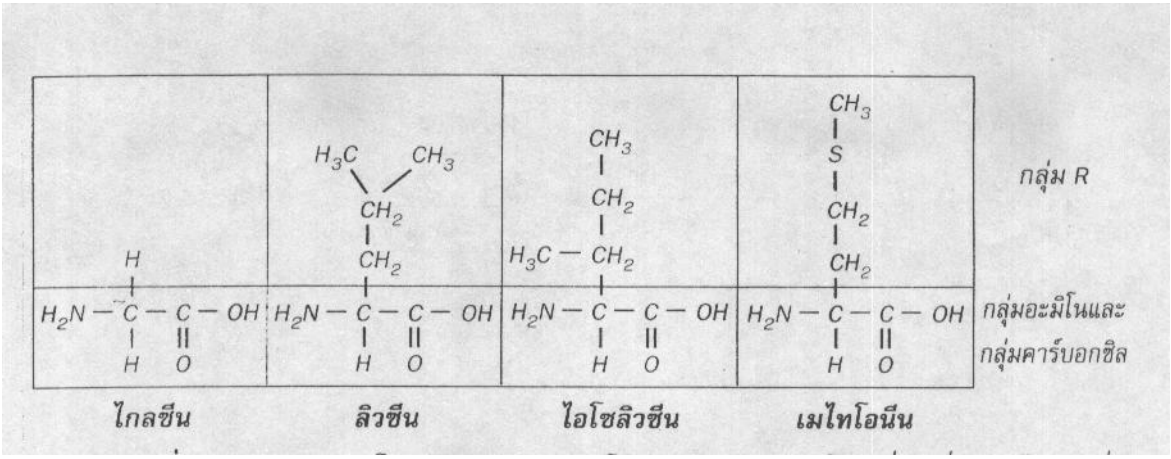
■ ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเซลล์และเนื้อเยื่อทุกชนิด โดยเฉพาะกล้ามเนื้อ เลือด กระดูก และเป็นสารสำคัญ เช่น เอนไซม์ ฮอร์โมน แอนติบอดี ฯลฯ

■ ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน บางชนิดอาจมี กำมะถัน ฟอสฟอรัส และเหล็ก เป็นองค์ประกอบด้วย

■ หน่วยย่อยที่ประกอบขึ้นเป็นโปรตีน คือ **กรดอะมิโน (amino acid)** ซึ่งมีอยู่ 20 กว่าชนิด โปรตีนต่างชนิดกันเกิดจากความแตกต่างของชนิด จำนวน และลำดับกรดอะมิโน

■ โครงสร้างกรดอะมิโนทุกชนิด ประกอบด้วยหน่วยย่อย 3 กลุ่ม คือ

1. **กลุ่มอะมิโน** ($-HN_2$)
2. **กลุ่มคาร์บอกซิล** หรือกลุ่มกรด (-COOH)
3. **กลุ่มข้าง (side chain)** หรือกลุ่ม R เฉพาะกลุ่มนี้แตกต่างกันในกรดอะมิโนแต่ละชนิด



ภาพที่ 3.11 : แสดงสูตรโครงสร้างของกรดอะมิโนบางชนิด กรดอะมิโนตัวที่เล็กที่สุดคือ ไกลซีนที่มีกลุ่ม R เป็น H และกรดอะมิโนตัวใหญ่ที่สุดคือ ทริปโตเฟนที่มีกลุ่ม R ขนาดใหญ่มาก

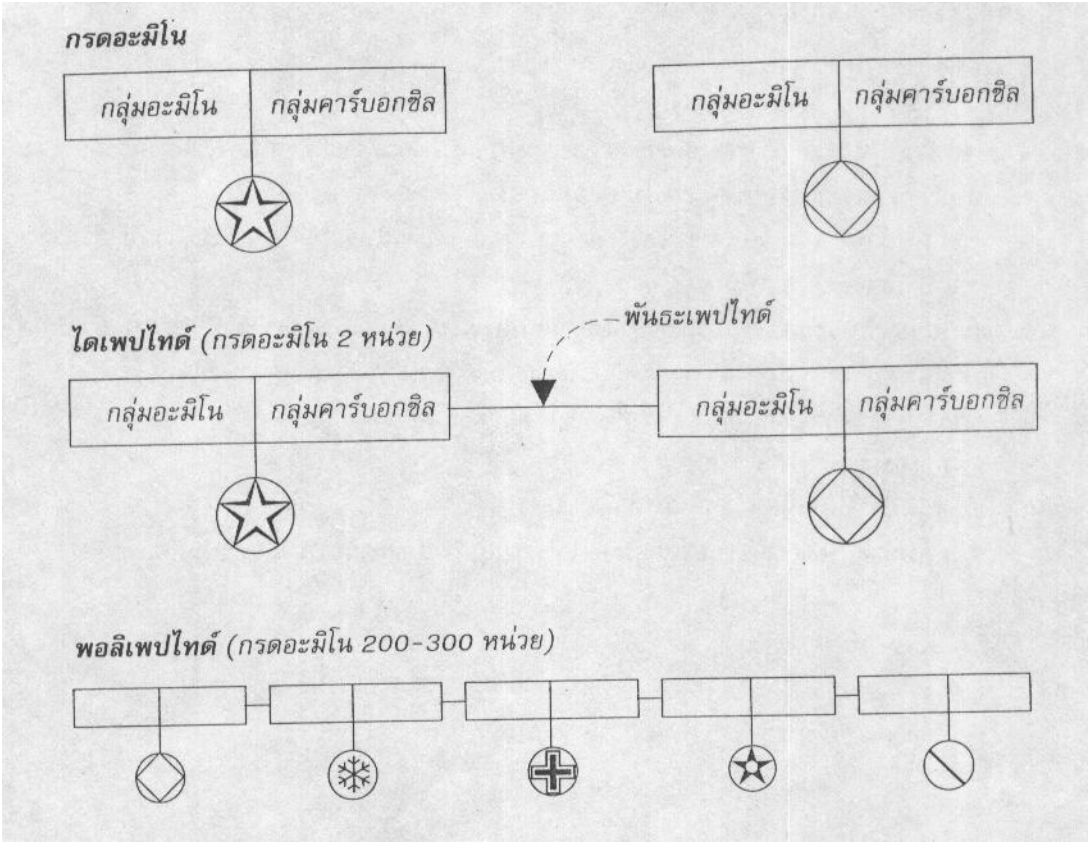
การสังเคราะห์โปรตีน

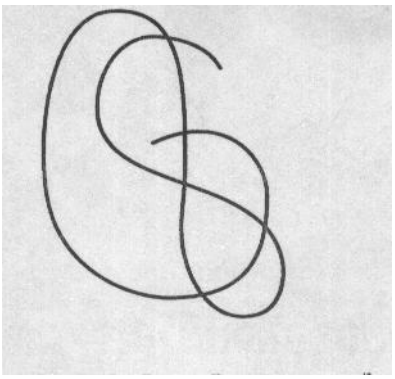
■ โปรตีนสังเคราะห์ได้ในเซลล์สิ่งมีชีวิตทุกชนิด ตามกำหนดของรหัสพันธุกรรมในโมเลกุล DNA บนโครโมโซมในนิวเคลียส ซึ่งได้รับการถ่ายทอดมาจากพ่อแม่และบรรพบุรุษ โปรตีนชนิดหนึ่ง ๆ มีชนิด จำนวนและลำดับของกรดอะมิโนบนสายพอลิเพปไทด์ที่จำเพาะแน่นอน

■ กรดอะมิโนจับกันเป็นสายยาวด้วย**พันธะเพปไทด์ (peptide bond)** เป็นพันธะโควาเลนต์ระหว่างกลุ่มคาร์บอกซิลของกรดอะมิโนตัวหนึ่งกับกลุ่มอะมิโนของกรดอะมิโนอีกตัวหนึ่ง เกิดเป็นสายของกรดอะมิโน เรียกว่า **เพปไทด์** ตัวอย่างเช่น ไดเพปไทด์ (กรดอะมิโน 2 ตัว), ไตรเพปไทด์ (กรดอะมิโน 3 ตัว) และพอลิเพปไทด์ (กรดอะมิโนจำนวนมาก) ซึ่งพบในโปรตีนส่วนใหญ่

■ โปรตีนอาจประกอบด้วยพอลิเพปไทด์ 1 สาย หรือหลายสายก็ได้ ตัวอย่างเช่น อินซูลิน (พอลิเพปไทด์ 2 สาย), ฮีโมโกลบิน (พอลิเพปไทด์ 4 สาย)

■ สายพอลิเพปไทด์มักเกิดพันธะไฮโดรเจน ทำให้ม้วน ขด หรือพับทบในสายเดียวกัน หรือหลายสายจับตัวกัน แล้วอาจพับ หมุนรอบเป็นเส้น หรือขดเป็นก้อน หรือแต่ละก้อนยังอาจจะมาจับรวมกันอีก





ภาพที่ 3.12 : โครงสร้างของกรดอะมิโน ไดเพปไทด์ พอลิเพปไทด์ และโปรตีน

ประเภทของกรดอะมิโน

กรดอะมิโนแบ่งตามคุณค่าโภชนาการ เป็น 2 ประเภท

1. กรดอะมิโนจำเป็น (essential amino acid) คือ กรดอะมิโนที่ร่างกายสังเคราะห์ไม่ได้ จำเป็นต้องได้รับจากอาหารโปรตีน

2. กรดอะมิโนไม่จำเป็น (nonessential amino acid) คือ กรดอะมิโนที่ร่างกายสังเคราะห์ขึ้นได้เองจากอาหารที่ได้รับเข้าไป

ตารางที่ 3.5 : กรดอะมิโนจำเป็นและกรดอะมิโนไม่จำเป็น

กรดอะมิโนจำเป็น	กรดอะมิโนไม่จำเป็น
อาร์จีนีน* (arginine, arg)	อะละนีน (alanine, ala)
ฮีสทิดีน* (histidine, his)	แอสปาราจีน (asparagine, asn)
ไอโซลิวซีน (isoleucine, ile)	กรดแอสปาติก (aspartic acid, asp)
ลิวซีน (leucine, leu)	ซีสเทอีน (cystein, cys)
ไลซีน (lysine, lys)	กรดกลูตามีน (glutamic acid, glu)
เมไทโอนีน (methionine, met)	กลูตามีน glutamine, glu)
ฟีนิลอะลานีน (phenylalanine, phe)	ไกลซีน (glycine, gly)
ทรีโอนีน (threonine, thr)	ไพรลีน (proline, pro)
ทริปโตเฟน (tryptophan, trp)	ซีรีน (serine, ser)
วาลีน (valine, val)	ไทโรซีน (tyrosine, tyr)

* อาร์จีนีน, ฮีสทีดิน เป็นกรดอะมิโนจำเป็นเฉพาะในวัยเด็ก

กรดนิวคลีอิก

■ **กรดนิวคลีอิก** คือ สารประกอบที่เก็บรหัสพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด และถ่ายทอดลักษณะพันธุกรรมจากสิ่งมีชีวิตจากรุ่นหนึ่งไปอีกรุ่นหนึ่ง

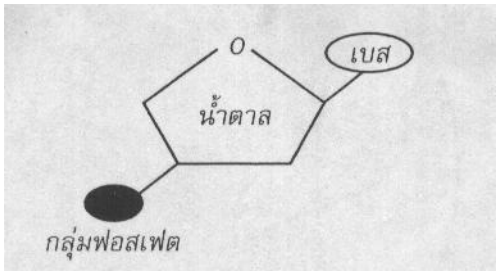
■ กรดนิวคลีอิกที่สำคัญมี 2 ชนิด ได้แก่ DNA (deoxyribonucleic acid) และ RNA (riboncleic acid)

■ กรดนิวคลีอิก คือ สายของนิวคลีโอไทด์ (nucleotide) เรียงต่อกัน เรียกว่า **พอลินิวคลีโอไทด์ (polynucleotide)** ตัวอย่างเช่น DNA คือ พอลินิวคลีโอไทด์ 2 สาย

■ **นิวคลีโอไทด์แต่ละโมเลกุล** มีโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยย่อย 3 ชนิด คือ

1. **กลุ่มฟอสเฟต** ($-PO_4$) 1 กลุ่ม
2. **กลุ่มน้ำตาลเพนโทส** 1 กลุ่ม (ใน DNA คือ ดีออกซีไรโบส, ใน RNA คือ ไรโบส)
3. **กลุ่มไนโตรเจนเบส** 1 กลุ่ม (ชนิดหนึ่งใน 4 ชนิด คือ อะดีนีน, ไทมีน, กวานีน, ไซโทซีน สำหรับ DNA, แต่ RNA มียูราซิลแทนไทมีน)

■ รหัสพันธุกรรมในโมเลกุล DNA คือ ลำดับที่แตกต่างกันของเบสของนิวคลีโอไทด์ที่เรียงต่อกัน



ภาพที่ 3.13 : โครงสร้างของนิวคลีโอไทด์ ซึ่งเป็นหน่วยย่อยของกรดนิวคลีอิก (พอลินิวคลีไทด์)

ปฏิกิริยาเคมีในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

ปฏิกิริยาเคมีในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต มีทั้งการสังเคราะห์ชีวโมเลกุลที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต และการสลายสารชีวโมเลกุลที่ได้รับจากการกินอาหาร ซึ่งเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานเคมีและการผลิตพลังงานเคมีของเซลล์

พลังงานเคมีคืออะไร

■ **พลังงานเคมี** คือ พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาเคมี เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงพันธะเคมีเมื่อเกิดปฏิกิริยา

■ พันธะเคมีที่ยึดอะตอมรวมตัวเป็นโมเลกุล มีค่าพลังงานที่ตรึงอะตอมเข้าด้วยกัน ค่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพันธะ (ไอออนิกหรือโควาเลนต์) และชนิดของอะตอมที่เกิดพันธะ สามารถวัดได้จากการให้พลังงานแก่สาร (ในสถานะก๊าซ) จนทำให้พันธะเคมีที่ยึดอะตอมสลายไป เรียกพลังงานที่ใช้สลายพันธะเคมีมีว่า **พลังงานพันธะ (bond energy)**

■ ตัวอย่างเช่น พลังงานพันธะไอออกนิกของ Li-F, Na-Cl, K-Cl = 240, 183, 165 กิโลแคลอรีต่อโมล ตามลำดับ, พลังงานพันธะโควาเลนต์ของ C = O, H-H, H-Cl = 173, 104 และ 103 กิโลแคลอรีต่อโมล ตามลำดับ

■ เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมี สารตั้งต้นเปลี่ยนแปลงเป็นสารผลิตภัณฑ์ จะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานควบคู่ไปกับการเปลี่ยนแปลงพันธะเคมีด้วย กล่าวคือ ต้องการใช้พลังงานไปสลายพันธะของสารตั้งต้น พันธะเคมีที่สลายก็จะมีพลังงานปล่อยออกมา ซึ่งบางส่วนถูกใช้ไปสร้างพันธะใหม่ของสารผลิตภัณฑ์ สารผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจจะมีพลังงานพันธะสูงหรือต่ำกว่าสารตั้งต้นก็ได้

ปฏิกิริยาเคมีดูดพลังงาน (endergonic reaction)

■ **ปฏิกิริยาเคมีดูดพลังงาน** คือ ปฏิกิริยาเคมีที่ใส่พลังงานกระตุ้นมากกว่าพลังงานที่ปฏิกิริยาปล่อยออกมา สารผลิตภัณฑ์ที่ได้มีพลังงานพันธะสูงกว่าสารตั้งต้น

■ ตัวอย่างปฏิกิริยาดูดพลังงาน เช่น ปฏิกิริยาการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสง

$$2H_2O + \text{พลังงานไฟฟ้า} \longrightarrow 2H_2 + O_2$$

$$6CO_2 + 12H_2O_2 + \text{พลังงานแสง} \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2$$

ปฏิกิริยาเคมีคายพลังงาน (exergonic reaction)

■ **ปฏิกิริยาเคมีคายพลังงาน** คือ ปฏิกิริยาเคมีที่ใส่พลังงานกระตุ้นน้อยกว่าพลังงานที่ปฏิกิริยาปล่อยออกมา สารผลิตภัณฑ์ที่ได้มีพลังงานพันธะต่ำกว่าสารตั้งต้น

■ ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยารวมตัวของไฮโดรเจนกับออกซิเจนเกิดน้ำ, ปฏิกิริยาสลายกลูโคส

$$2H_2O + O_2 \longrightarrow 2H_2O_2 + \text{พลังงาน}$$

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O \longrightarrow CO_2O_6 + 12H_2O + \text{พลังงาน}$$

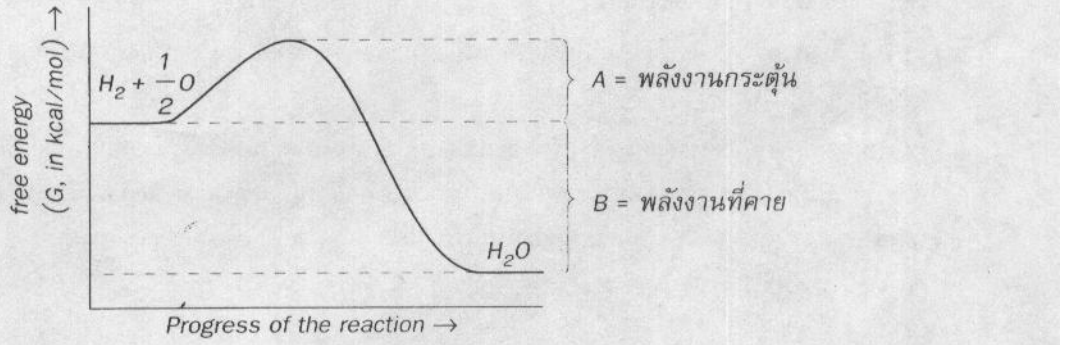
■ **ถ้าอยู่ในระบบปิด** พลังงานใช้สลายน้ำจะเท่ากับพลังงานได้จากการรวมตัวของไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นน้ำ (ประมาณ 36 kcal / mole) และพลังงานใช้สังเคราะห์กลูโคสเท่ากับพลังงานที่ได้จากสลายกลูโคส (ประมาณ 690 kcal + mole)

โดยทั่วไป ปฏิกิริยาเหล่านี้เกิดขึ้นใน**ระบบเปิด** พลังงานที่เกิดขึ้นบางส่วนจะอยู่ในรูปของพลังงานที่ใช้ไม่ได้ เช่น เป็นพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อม

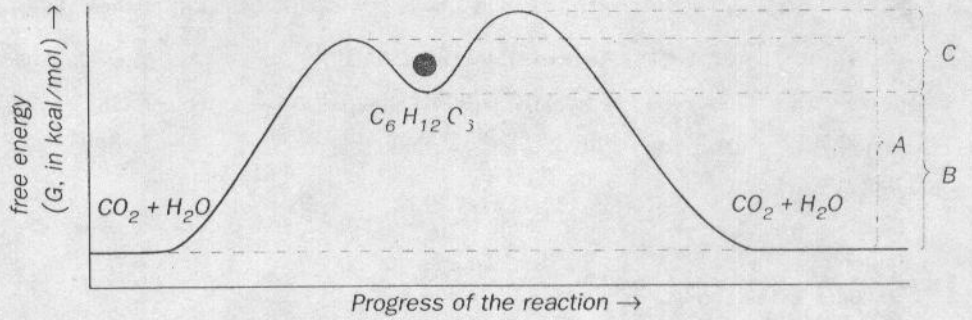
■ ปฏิกิริยาคายพลังงานเกิดขึ้นได้เองโดยง่าย หรือต้องการพลังงานกระตุ้นเพียงเล็กน้อยในการเริ่ม
ต้นเท่านั้น เช่น การรวมตัวของไฮโดรเจนกับออกซิเจนจนเกิดน้ำ ต้องการเปลวไฟหรือประกายไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยกระตุ้น ก็จะเกิดปฏิกิริยารวมตัวเกิดขึ้นต่อเนื่อง จนในที่สุดระเบิดขึ้นมีความร้อนถูกปล่อยออกมา และมีโมเลกุลน้ำเกิดขึ้น

ในขณะที่ปฏิกิริยาดูดพลังงานเกิดขึ้นยาก เพราะต้องการพลังงานกระตุ้นในปริมาณมากและต้องให้ตลอดเวลาของการเกิดปฏิกิริยา

■ พลังงานเคมีที่เซลล์สิ่งมีชีวิตนำมาใช้ทำกิจกรรมต่าง ๆ ในการดำรงชีวิต ได้มาจากปฏิกิริยาสลายอาหารต่าง ๆ ที่เรียกว่า **ปฏิกิริยาการหายใจของเซลล์** ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีประเภทคายพลังงานนั่นเอง



ภาพที่ 3.14 : *แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานของปฏิกิริยาการรวมตัวของก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซออกซิเจนเกิดเป็นน้ำ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบคายพลังงาน*



ภาพที่ 3.15 : เปรียบเทียบปริมาณพลังงานกระตุ้นที่ต้องการใช้ในปฏิกิริยาสังเคราะห์แสง (ปฏิกิริยาดูดพลังงาน) กับปฏิกิริยาการหายใจ (ปฏิกิริยาคายพลังงาน

A = พลังงานกระตุ้นของการสังเคราะห์แสง

B = พลังงานที่ดูดของการสังเคราะห์แสง = พลังงานที่คายของการหายใจ

C = พลังงานกระตุ้นของการหายใจ

เมแทบอลิซึม (Metabolism)

■ **เมแทบอลิซึม** คือ ปฏิกิริยาเคมีทั้งหมดที่เกิดในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต แบ่งเป็น 2 ด้าน

- **คะตะบอลิซึม (catabolism)** เป็นปฏิกิริยาสลายสารชีวโมเลกุล (คาร์โบไฮเดรต, ลิพิด, โปรตีน) เป็นสารโมเลกุลเล็ก (เช่น กรดแลกติก, กรดแอซีติก, คาร์บอนไดออกไซด์, แอมโมเนีย, ยูเรีย) เป็นผลให้มีการปล่อยพลังงานเคมีที่สะสมในสารโมเลกุลใหญ่ออกมา และถูกนำไปใช้สังเคราะห์สารพลังงานสูง (ATP) ซึ่งเป็นพลังงานเคมีรูปที่เซลล์นำไปใช้ได้
- **อะนาบอลิซึม (anabolism)** เป็นปฏิกิริยาสังเคราะห์สารชีวโมเลกุลขึ้นมาจากสารตั้งต้น หรือหน่วยย่อยของสารเหล่านี้ อะนาบอลิซึมต้องใช้พลังงาน ATP ที่ได้จากคะตะบอลิซึม

■ เมแทบอลิซึมของสารใดสารหนึ่ง เช่น เมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต จะมีทั้งคะตะบอลิซึมและอะนาบอลิซึมเกิดขึ้นในเซลล์ตลอดเวลา แต่ไม่ใช่ปฏิกิริยาย้อนกลับของกันและกัน และมีการควบคุมแยกจากกัน ที่เป็นเช่นนี้เพราะการสลายสารและการสังเคราะห์สารชีวโมเลกุล ต่างไม่ใช่ปฏิกิริยาเดี่ยว แต่ประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อย ๆ ที่ค่อยเปลี่ยนแปลงสารไปทีละขั้น สารต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างเปลี่ยนแปลงเป็นสารผลิตภัณฑ์ เรียกว่า **สารอินเทอร์มีเดียทหรือสารเมทาบอไลต์ (intermediate หรือ metabolite)**

■ ทุกปฏิกิริยาในเมแทบอลิซึมเกิดขึ้นได้ ต้องมีปัจจัยต่าง ๆ เหมาะสม และต้องมีเอนไซม์เฉพาะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

■ เอนไซม์ช่วยควบคุมการใช้และการปล่อยพลังงานของปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นอย่างเหมาะสมต่อเซลล์มีชีวิต คือ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องใช้พลังงานกระตุ้นสูงเกิดความต้านทานของเซลล์ และควบคุมการปล่อยพลังงานของปฏิกิริยาทีละน้อย ไม่ทำให้เป็นอันตรายต่อเซลล์ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทัน

เอนไซม์และการทำงานของเอนไซม์

■ **เอนไซม์ (enzyme)** คือ สารเร่งปฏิกิริยาชีวเคมีในเซลล์ หรือ **ไบโอคะตะลิสต์ (biocatalyst)**

■ เอนไซม์มีผลทำให้ปฏิกิริยาชีวเคมีนั้นเกิดขึ้นรวดเร็วกว่าปฏิกิริยาเคมีในหลอดทดลองนับล้านเท่า และได้สารผลิตภัณฑ์ (product) ทั้ง 100 เปอร์เซ็ฯต์โดยไม่มีสารอื่น ๆ (by product) เกิดขึ้นด้วย ในขณะที่ปฏิกิริยาเคมีที่มีคะตะลิสต์หรือไม่มี ต้องใช้เวลานานมากเป็นวัน และเกิดสารอื่น ๆ ร่วมกับผลิตภัณฑ์เสมอ

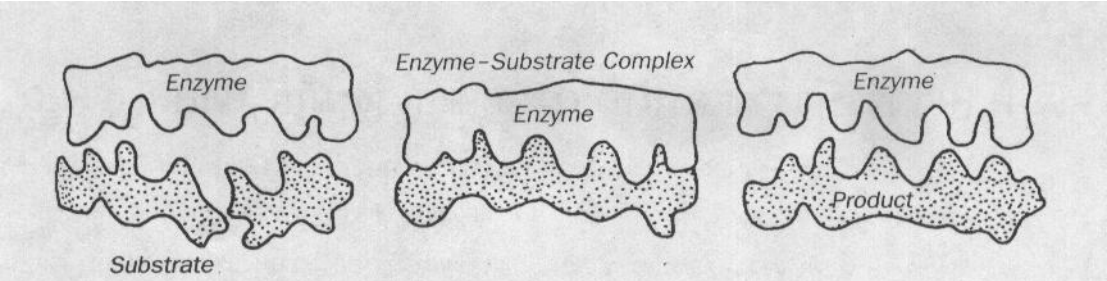
โครงสร้างเอนไซม์

■ **เอนไซม์เป็นโปรตีน** อาจเป็นพอลิเพปไทด์สายเดียวหรือหลายสาย ซึ่งม้วนตัวเป็นทรงกลม เนื่องจากมีการจับกันระหว่างกลุ่มข้างของกรดอะมิโน (เป็นการเรียงตัวของโครงสร้างโปรตีนระดับสาม) และมีกลุ่มข้างบางกลุ่มเรียงตัวเป็นช่องหรือร่องที่มีลักษณะพิเศษ ทำหน้าที่เป็น**บริเวณเร่งหรือแอกทีฟไซต์ (active site)** ของเอนไซม์ ทำหน้าที่จะจับกับโมเลกุลเฉพาะที่เข้ากันได้ และทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาขึ้น

ความจำเพาะของเอนไซม์ต่อปฏิกิริยา

■ เอนไซม์ชนิดหนึ่ง ๆ มีความจำเพาะเร่งปฏิกิริยาเคมีชนิดหนึ่ง ๆ เท่านั้น เนื่องจากบริเวณแอกทีฟไซต์ในโมเลกุลเอนไซม์มีรูปร่างเฉพาะ ที่มีสารตั้งต้น (ซับสเตรต) เพียงชนิดเดียวหรือประเภทเดียวมีโครงสร้างโมเลกุลเข้ากันได้

■ ในปี พ.ศ. 2437 **อีมิล ฟิเชอร์ (Emil Fischer)** อธิบายความจำเพาะของเอนไซม์โดยเปรียบเทียบกับ**แบบจำลองแม่กุญแจกับลูกกุญแจ (lock and key model)** เอนไซม์เปรียบเป็นลูกกุญแจและสารตั้งต้นเป็นแม่กุญแจ ถ้ามีโครงสร้างที่เข้ากันพอดีก็จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงได้ คือ ถ้าเอนไซม์จับกับสารตั้งต้นได้ก็จะมีผลเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้น



ภาพที่ 3.17 : *แสดงการทำงานของเอนไซม์ อธิบายด้วยแบบจำลองแม่กุญแจ - ลูกกุญแจ โดยเปรียบเอนไซม์เป็นลูกกุญแจ สารตั้งต้นเป็นแม่กุญแจ*

กลไกการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์

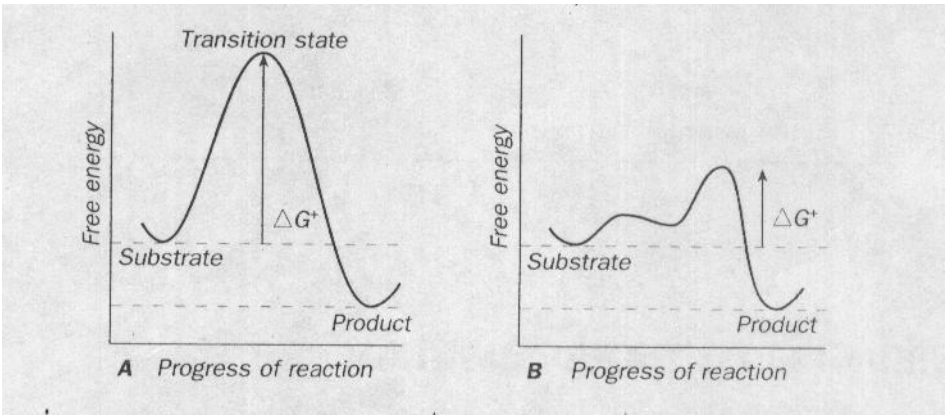
■ การเกิดปฏิกิริยาเคมีใด ๆ ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาที่สารตั้งต้น A เปลี่ยนแปลงเป็นสารผลิตภัณฑ์ P ต้องการพลังงานอิสระปริมาณหนึ่งใช้กระตุ้นให้มีการสลายและสร้างพันธะเคมีที่จะทำให้สาร A กลายเป็นสาร P พลังงานที่ต้องการใช้กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เรียกว่า **พลังงานอิสระในการกระตุ้น (free energy of activation)**

■ โดยทั่วไปปฏิกิริยาเคมีสามารถเร่งให้เกิดเร็วขึ้นได้ 2 วิธี คือ

- **เพิ่มอุณหภูมิ** มีผลทำให้โมเลกุลเคลื่อนไหวและพลังงานเพิ่มขึ้น
- **เติมคะตะลิสต์หรือตัวเร่งปฏิกิริยา** (เอนไซม์หรือคะตะลิสอื่น ๆ) มีผลทำให้ปฏิกิริยาต้องการพลังงานกระตุ้นลดต่ำกว่าเดิม

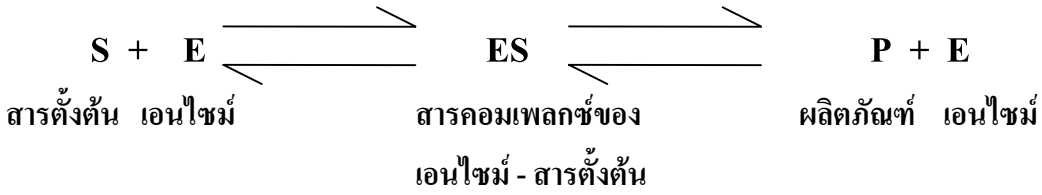
■ **กลไกการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์** อธิบายได้ว่า

- โมเลกุลเอนไซม์ (E) จับชั่วคราวกับโมเลกุลสารตั้งต้น (S) เกิดสารประกอบเชิงซ้อน (enzyme-substrate complex หรือ ES)
- ในโครงสร้างของสาร ES โมเลกุลสารตั้งต้นอยู่ในสภาพดึงตึงหรือบิดเบี้ยว ซึ่งเปลี่ยนแปลงต่อไปเป็นผลิตภัณฑ์ (P) ได้ง่าย ดังนั้น สาร ES ต้องการพลังงานกระตุ้นในการเปลี่ยนแปลงเป็นสาร P ต่ำกว่าที่สาร S ต้องการมาก
- สาร ES เปลี่ยนแปลงเป็นสาร P ได้รวดเร็ว พร้อมกับปล่อยโมเลกุลเอนไซม์เป็นอิสระในสภาพเดิม เอนไซม์สามารถจับกับสารตั้งต้นโมเลกุลใหม่เร่งปฏิกิริยาได้อีก



ภาพที่ 3.20 : เปรียบเทียบพลังงานกระตุ้นที่ปฏิกิริยาเคมีต้องการ (ΔG) ระหว่างภาพ A เมื่อปฏิกิริยาไม่มีเอนไซม์เร่ง และภาพ B เมื่อปฏิกิริยามีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง

■ ปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง นอกจากเปลี่ยนแปลงจากสาร $S \rightarrow P$ แล้ว เอนไซม์ยังสามารถเร่งปฏิกิริยาย้อนกลับ จากสาร $S \rightarrow P$ ได้ด้วย ดังนั้นปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งจึงเขียนเป็นสมการที่มีหัวลูกศรทั้งไปและกลับได้ดังนี้



ศึกษาการทำงานเอนไซม์คะตะเลสเร่งปฏิกิริยาสลาย H_2O_2

■ H_2O_2 เป็นสารเคมีที่ใช้ฟอกสี และเป็นผลิตภัณฑ์จากเมแทบอลิซึมของเซลล์ที่เกิดขึ้นตลอดเวลา แต่เซลล์มีเอนไซม์คะตะเลส ที่ทำให้ H_2O_2 สลายตัวรวดเร็ว จนไม่เป็นอันตรายต่อเซลล์

■ เราจะได้เอนไซม์นี้จากยอดพืชอ่อน ๆ (เช่น ยอดคะน้า, ถั่วงอก) นำมาโขลกละเอียดกับน้ำกลั่น และคั้นเอาแต่ของเหลว แบ่งเป็นส่วน ๆ และเตรียมไว้ใช้สำหรับการทดลองดังนี้

ส่วนที่ 1 - น้ำคั้นยอดพืช

ส่วนที่ 2 - น้ำคั้นยอดพืช $5\ cm^3 \rightarrow$ อุ่นบีกเกอร์ที่อุณหภูมิ $60 - 70^{O}C \rightarrow$ ทิ้งไว้ให้เย็น

■ **การทดลอง**

หลอด	น้ำคั้นยอดพืช	น้ำกลั่น	H_2O_2 3%	สังเกตผลการทดลอง
1 (ทดลอง)	ส่วน 1, 2 cm^3	-	5 cm^3	……...
2 (ทดลอง)	ส่วน 2, 2 cm^3	-	5 cm^3	……..
3 (ควบคุม)	-	2 cm^3	5 cm^3	……..

■ **สรุปผลการทดลอง**

หลอดที่น้ำคั้นของยอดพืชยังคงมีสีเขียวอยู่ แสดงว่า H_2O_2 สลายไป (โดยเอนไซม์คะตะเลส)

หลอดที่น้ำคั้นยอดพืชมีสีซีดขาว แสดงว่า H_2O_2 ยังไม่สลาย (เอนไซม์หมดฤทธิ์)

ตารางที่ 3.5 : พลังงานกระตุ้นที่ต้องการใช้ในปฏิกิริยาสลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ถ้ามีเอนไซม์คะตะเลสเป็นตัวเร่ง จะต้องการพลังงานลดลงเหลือ 7 กิโลแคลอรีต่อโมล และมีผลทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาสูงขึ้นถึง 10^8 เท่า

	พลังงานกระตุ้น (กิโลแคลอรี่/โมล
ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	18
ใช้แพลตินัมเป็นตัวเร่ง	13
ใช้เอนไซม์คะตะเลสเป็นตัวเร่ง	7

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์

เอนไซม์สามารถทำงานเร่งปฏิกิริยาเคมีได้ภายใต้สภาพอุณหภูมิ และความเป็นกรด-เบส (pH) ในระดับปานกลางของเซลล์ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความเป็นกรด – เบส ปริมาณสารเคมีบางชนิด ที่มีผลทำให้โปรตีนเปลี่ยนแปลงรูปร่างไป จะมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์

ผลของอุณหภูมิ

■ อุณหภูมิสูงขึ้น อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น

■ เอนไซม์สิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ ช่วงอุณหภูมิเหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ประมาณ $25 – 40^{O}C$ แต่ที่อุณหภูมิสูงถึง $45^{O}C$ ขึ้นไป เอนไซม์ซึ่งเป็นโปรตีนจะเสื่อมสภาพและเปลี่ยนรูปร่าง (denature) กล่าวคือ โมเลกุลเอนไซม์ที่ได้รับความร้อนจะคลายตัวเหยียดออก และแอกทีฟไซด์เปลี่ยนรูปร่างไป ทำให้ทำงานไม่ได้อย่างถาวร

■ เอนไซม์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่อาศัยอยู่ได้ในน้ำพุร้อน สามารถทนอุณหภูมิสูงถึง $90^{O}C$ และทำงานได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ $72^{O}C$

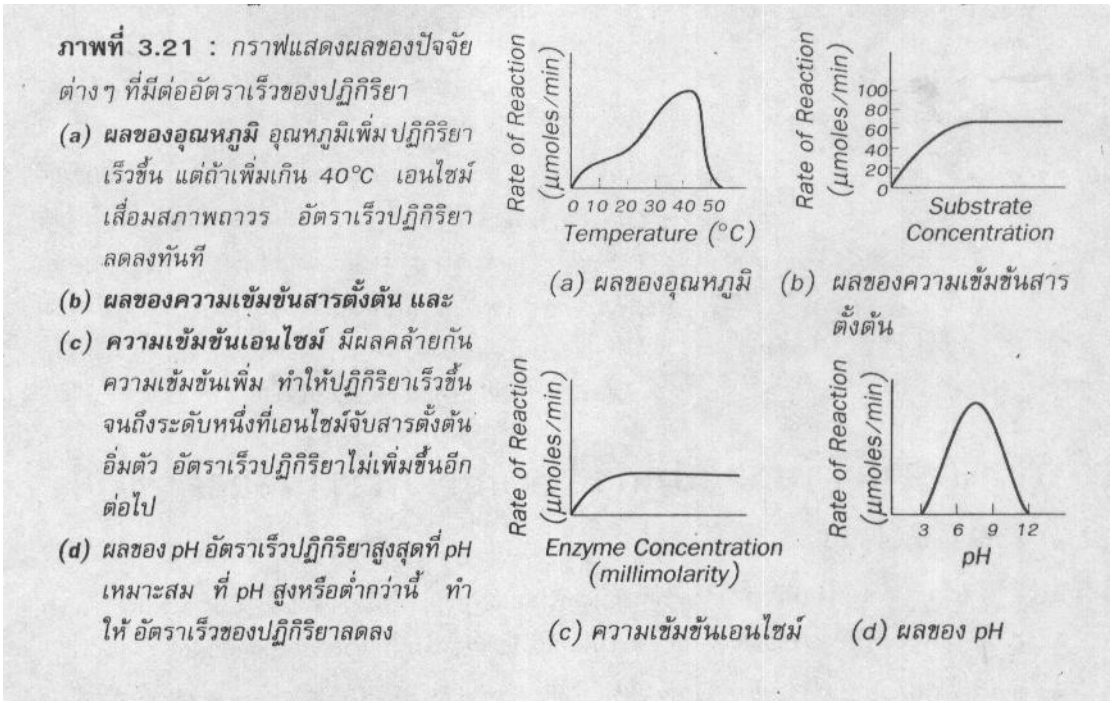
ผลของความเป็นกรด-เบส

■ เอนไซม์ส่วนใหญ่ทำงานได้ดีที่ความเป็นกรด-เบส (pH) ประมาณ 7 ถ้า pH เปลี่ยนแปลงไปมาก ๆ เอนไซม์ก็จะเปลี่ยนสภาพ (denature) ไปได้

■ เอนไซม์เร่งปฏิกิริยาย่อยอาหารบางชนิด เช่น เพปซิน เร่งปฏิกิริยาย่อยโปรตีนได้ดีที่ pH 1.5 – 2.5, ทริปซินที่ pH 7.5 – 8.5, อัลคาไลน์ฟอสเฟสที่ pH 9.0 – 9.2, แต่แอซิดฟอสเฟสเทสที่ pH 5.5 ฯลฯ

ผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นและเอนไซม์

■ เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิ, pH, ปริมาณเอนไซม์คงที่ เมื่อเพิ่มปริมาณสารตั้งต้น กล่าวคือ การเพิ่มเอนไซม์ในระยะแรกจะทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเอนไซม์มากเกินพอ ความเร็วของปฏิกิริยาจะไม่เพิ่มขึ้นอีก ทั้งนี้เพราะไม่มีสารตั้งต้นเหลือพอที่จะเข้าทำปฏิกิริยา



ภาพที่ 3.21 : *กราฟแสดงผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา*

*(a) **ผลของอุณหภูมิ** อุณหภูมิเพิ่มปฏิกิริยาเร็วขึ้น แต่ถ้าเพิ่มเกิน 40°C เอนไซม์เสื่อมสภาพถาวร อัตราเร็วปฏิกิริยาลดลงทันที*

*(b) **ผลของความเข้มข้นสารตั้งต้น** และ*

*(c) **ความเข้มข้นเอนไซม์** มีผลคล้ายกัน ความเข้มข้นเพิ่ม ทำให้ปฏิกิริยาเร็วขึ้น จนถึงระดับหนึ่งที่เอนไซม์จับสารตั้งต้นอิ่มตัว อัตราเร็วปฏิกิริยาไม่เพิ่มขึ้นอีกต่อไป*

(d) ผลของ pH อัตราเร็วปฏิกิริยาสูงสุดที่ pH เหมาะสม ที่ pH สูงหรือต่ำกว่านี้ ทำให้ อัตราเร็วของปฏิกิริยาลดลง

ตัวยับยั้งและตัวเร่งเอนไซม์

■ สารบางชนิดมีผลต่อการทำงานเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ สารที่ทำให้การทำงานของเอนไซม์ลดลง เรียกว่า **ตัวยับยั้ง (inhibitor)** สารที่ทำให้การทำงานของเอนไซม์เพิ่มขึ้นเรียกว่า **ตัวเร่ง (activator)**

การยับยั้งแบบแก่งแย่ง

■ **ตัวยับยั้งแบบแก่งแย่ง (competitive inhibitor)** มีโครงสร้างคล้ายสารตั้งต้น แย่งที่จับกับเอนไซม์ที่แอกทีฟไซต์ ทำให้สารตั้งต้นเอนไซม์ได้ลดลง ปฏิกิริยาจึงลดลงหรือหยุดชะงักไป

■ ในปฏิกิริยา $A + B \rightarrow C$ ที่มีสาร y เป็นตัวยับยั้งแบบแก่งแย่ง ปฏิกิริยาจะหยุดชะงักลงได้ ถ้าเติมสาร y แต่ถ้าเติมสาร A และ B ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในปริมาณมากกว่าสาร Y ปฏิกิริยาก็จะเกิดขึ้นต่อไปได้ เพราะสารตั้งต้นมีโอกาสจับกับแอกทีฟไซต์ของเอนไซม์มากกว่าตัวยับยั้ง

■ ตัวอย่างเช่น เพนนิซิลลิน เป็นตัวยับยั้งแบบแก่งแย่งของเอนไซม์เร่งปฏิกิริยาสร้างผนังเซลล์ของแบคทีเรีย ดังนั้นจึงใช้เพนนิซิลลินเป็นยาปฏิชีวนะทำลายแบคทีเรียได้

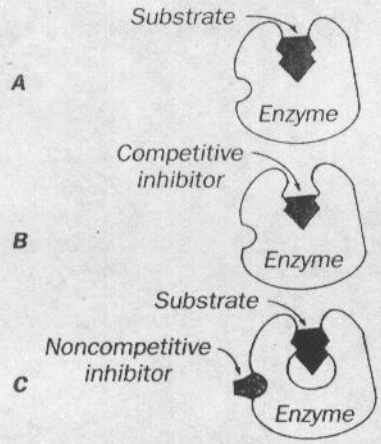
การยับยั้งแบบแอลโลสเตอริก

■ **ตัวยับยั้งแบบแอลโลสเตอริก (allosteric inhibitor)** ไม่ได้มีโครงสร้างเหมือนสารตั้งต้นและไม่ได้จับกับเอนไซม์ที่แอกทีฟไซต์ แต่จับเอนไซม์ที่แอลโลสเตอริกไซต์ (allosteric site) ที่มีอยู่ในเอนไซม์บางชนิด (allosteric enzyme) ซึ่งมีผลให้เอนไซม์มีรูปร่างเปลี่ยนไปและทำงานได้ลดลง

■ ในปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องกัน เช่น $A \xrightarrow{e_1} B \xrightarrow{e_2} C \xrightarrow{e_3} D$ สารที่เป็นผลิตภัณฑ์ (เช่น สาร D) มักเป็นตัวยับยั้งแบบแอลโลสเตอริกต่อเอนไซม์ในปฏิกิริยาต้น ๆ (เช่น e_1) ดังนั้นเมื่อผลิตภัณฑ์มีปริมาณมากขึ้น จะมีการยับยั้งแบบป้อนกลับ (negative feedback) เป็นการควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยา

■ กรณีที่มีสารมาจับที่แอลโลสเตอริกไซต์ แล้วมีผลทำให้เอนไซม์นั้นทำงานได้ดีขึ้น เรียกสารที่มาจับว่า **ตัวเร่งแบบแอลโลสเตอริก (allosteric activator)**

■ แอลโลสเตอริกเอนไซม์จึงมีบทบาทสำคัญมากในการควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยาต่าง ๆ ในเมแทบอลิซึม และเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า **เอนไซม์ควบคุม (regulatory enzyme)**



ภาพที่ 3.22 : *เปรียบเทียบการยับยั้งแบบแก่งแย่ง และการยับยั้งแบบแอลโลสเตอริก*

ภาพ A *การเร่งปฏิกิริยาตามปกติ สารตั้งต้นจับกับเอนไซม์ที่แอกทีฟไซต์*

ภาพ B *การยับยั้งแบบแก่งแย่ง ตัวยับยั้งที่มีรูปร่างคล้ายกับสารตั้งต้นแย่งจับกับเอนไซม์ที่แอกทีฟไซต์*

ภาพ C *การยับยั้งแบบแอลโลสเตอริก ตัวยับยั้งจับเอนไซม์ที่แอลโลสเตอริกไซต์ ทำให้เอนไซม์มีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไป สารตั้งต้นจับกับแอกทีฟไซต์ได้ไม่พอดี การเร่งปฏิกิริยาจึงไม่เกิดขึ้น*

การศึกษาลำดับของปฏิกิริยาจากการทำงานของตัวยับยั้ง

■ **ตัวยับยั้งเอนไซม์** มีความจำเพาะในการยับยั้งเอนไซม์หนึ่งโดยไม่มีผลต่อเอนไซม์อื่น

■ ถ้าเติมตัวยับยั้งเอนไซม์เร่งปฏิกิริยาขั้นตอนหนึ่งของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องกัน จะมีผลทำให้มีสารตั้งต้นของปฏิกิริยานั้นสะสมอยู่ และไม่มีผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยานั้นและต่อจากนั้นเกิดขึ้น

■ ดังนั้น ถ้าใส่ตัวยับยั้งทีละตัว สังเกตผลที่เกิดขึ้น จะทราบได้ว่าปฏิกิริยาขั้นตอนใดเกิดขึ้นก่อนหรือหลัง และสามารถทราบลำดับปฏิกิริยาทั้งหมดได้ในที่สุด

■ การค้นพบว่ามีสารหลายชนิดเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยาหายใจของเซลล์ที่เลี้ยงไว้ในหลอดทดลองได้ เช่น กรดมาโลนิก, ไซยาไนด์, ฟลูออไรด์, กรดไอโอโดแอซีติก ฯลฯ ซึ่งเป็นหลักฐานแสดงว่าการหายใจของเซลล์ประกอบด้วยปฏิกิริยาหลายขั้น แต่ละขั้นมีเอนไซม์เฉพาะเป็นตัวเร่ง ตัวยับยั้งเหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือศึกษาลำดับของปฏิกิริยาได้ดังนี้

■ สมมติปฏิกิริยาช่วงหนึ่งของการหายใจ มีดังนี้

$$\longrightarrow \longrightarrow \longrightarrow \text{สาร A} \xrightarrow{e_1} \text{สาร C} \xrightarrow{e_2} \text{สาร B} \xrightarrow{e_3} \text{สาร} \longrightarrow \longrightarrow \longrightarrow$$

(e_1, e_2, e_3) คือ เอนไซม์ของแต่ละขั้น)

ตารางที่ 3.6 : ผลที่ได้จากการใส่ตัวยับยั้งเอนไซม์ e_1, e_2, e_3

ใส่ตัวยับยั้งเอนไซม์	สารที่เท่าเดิม	สารที่เพิ่ม	สารที่ลดลง	สรุป
e_1	-	A	B, C, D	สาร A เกิดขึ้นก่อนสาร B, C และ D
e_2	A	C	B, D	สาร A เกิดก่อนสาร C สาร C เกิดก่อนสาร B และ D
e_3	A, C	B	D	สาร A และ C เกิดก่อนสาร B สาร B เกิดก่อนสาร D

■ การศึกษานี้สรุปได้ว่า สาร D เกิดจากสาร B, สาร B เกิดจากสาร C, สาร C เกิดจากสาร A และด้วยวิธีการในทำนองเดียวกันนี้ร่วมกับวิธีการอื่น ๆ ในที่สุดนักชีวเคมีจึงทราบลำดับของปฏิกิริยาต่าง ๆ ในการหายใจของเซลล์ และเมแทบอลิซึมของสารต่าง ๆ ได้

พลังงานกับสิ่งมีชีวิต

■ เซลล์สิ่งมีชีวิตทุกชนิดต้องการพลังงานตลอดเวลา เพื่อใช้ทำกิจกรรมต่าง ๆ ที่จะทำให้สิ่งมีชีวิตนั้นดำรงชีวิตอยู่ได้ มีการเจริญเติบโต และสืบพันธุ์ได้ ตัวอย่างกิจกรรมของเซลล์ ได้แก่ การนำสารเข้าสู่เซลล์ การลำเลียงสารภายในเซลล์ การสังเคราะห์และสลายสารชีวโมเลกุล การกำจัดสารที่ไม่ต้องการออกจากเซลล์ ฯลฯ

■ พลังงานมีหลายรูป ได้แก่ พลังงานเคมี พลังงานไฟฟ้า พลังงานกล พลังงานรังสี (ความร้อน แสง เสียง และคลื่นรังสีต่าง ๆ) และพลังงานนิวเคลียร์ (ปรมาณู)

■ พลังงานรูปต่าง ๆ สามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้ แต่ไม่มีการสูญหายและไม่มีการเพิ่มขึ้นมาโดยไม่มีแหล่งที่ไปหรือแหล่งที่มา

ตารางที่ 3.7 : พลังงานรูปต่าง ๆ และความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต

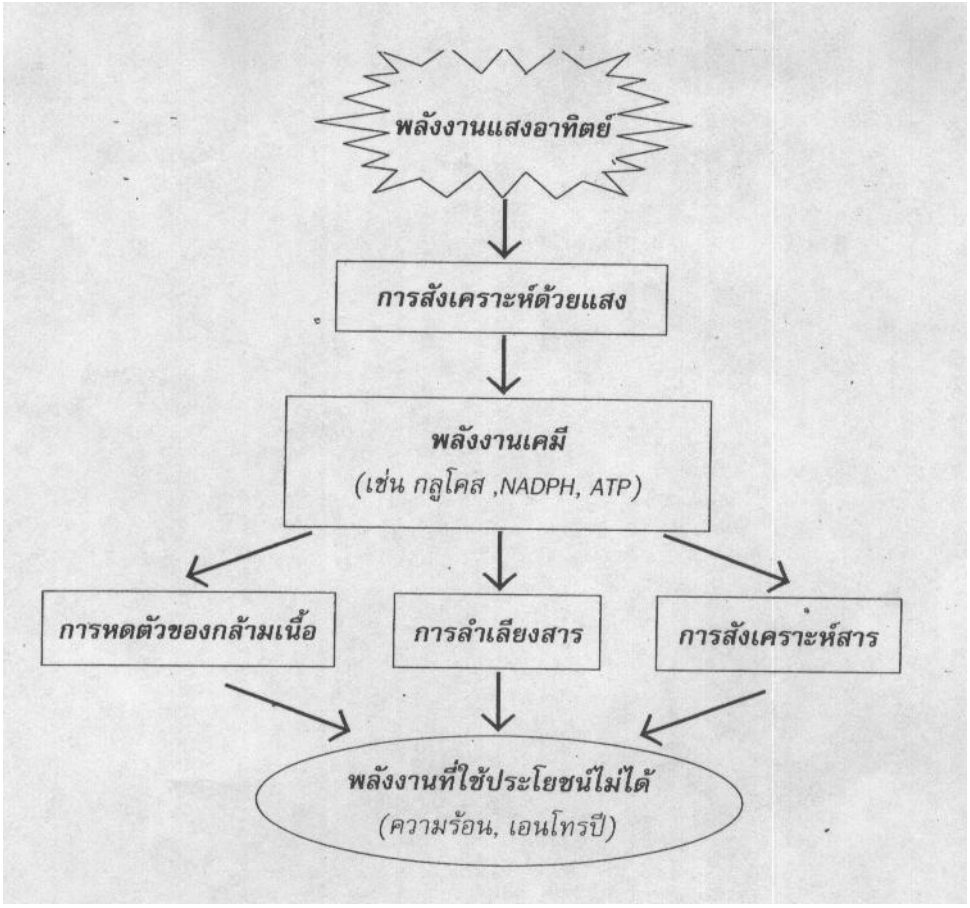
รูปพลังงาน	คืออะไร	ความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต
พลังงานเคมี	พลังงานศักย์ที่สะสมในโครงสร้างโมเลกุลของสาร (พลังงานของพันธะเคมี)	สำคัญต่อสิ่งมีชีวิตมาก เพราะเป็นพลังงานรูปเดียวที่เซลล์สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ ดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ได้
พลังงานไฟฟ้า	พลังงานจลน์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปตามวัตถุที่นำไฟฟ้าได้	เกี่ยวข้องกับการทำงานของเซลล์ประสาทที่เป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า
พลังงานกล	พลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยตรง	พลังงานเคมีจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานกลทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของสิ่งมีชีวิตได้
พลังงานรังสี	พลังงานในรูปของคลื่น เช่น แสง, ความร้อน, เสียง, คลื่นวิทยุ, รังสีอัลตราไวโอเลต ฯลฯ	ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช ใช้ในการมองเห็นภาพ
พลังงานนิวเคลียร์ (ปรมาณู)	พลังงานที่ถูกปล่อยจากสารกัมมันตรังสี ที่มีอยู่ตามธรรมชาติหรือโดยมนุษย์ เช่น เตาปฏิกรณ์ปรมาณู, ระเบิดนิวเคลียร์	ดวงอาทิตย์ เป็นระเบิดนิวเคลียร์ตามธรรมชาติ ปล่อยพลังงานรังสีสู่โลกซึ่งพืชนำไปใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นต้นตอของพลังงานเคมีที่ถ่ายทอดในสิ่งมีชีวิต

■ แหล่งพลังงานที่ทำให้สิ่งมีชีวิตบนโลกเกิดขึ้นมา และดำรงชีวิตอยู่ได้คือ พลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ พืชสีเขียวมีคลอโรฟิลล์ดูดพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรต และสารอาหารอื่น ๆ ขึ้นจากวัตถุดิบ คือคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การสังเคราะห์แสงด้วยพืช คือการเปลี่ยนรูปของพลังงานแสงมาเป็นพลังงานเคมีในพันธะเคมีของโมเลกุลสารอาหาร

■ การกินกันเป็นทอด ๆ เป็นห่วงโซ่อาหารหรือสายใยอาหาร ของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในระบบนิเวศ ทำให้มีการถ่ายทอดพลังงานเคมีในอาหารจากพืชไปสู่สัตว์ต่าง ๆ ที่เป็นผู้บริโภคและไปสู่สิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ในระบบนิเวศ

■ เซลล์สิ่งมีชีวิตทุกชนิดมีการหายใจของเซลล์เป็นกระบวนการสลายพันธะเคมีในโมเลกุลสารอาหารปล่อยพลังงานออกมาใช้สังเคราะห์**สารพลังงานสูง คือ ATP (adenosine triphosphate)** ดังนั้นการหายใจของเซลล์จึงเป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีชนิดหนึ่งไปเป็นพลังงานเคมีอีกชนิดหนึ่ง

■ สาร ATP เป็นพลังงานเคมีที่เป็นตัวกลางที่สำคัญที่สุด เปรียบเสมือน “เงินตรา” ที่เซลล์นำไปใช้และจ่ายแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกิจกรรมต่าง ๆ ของเซลล์



ภาพที่ 3.23 : การเปลี่ยนรูปของพลังงานในโลกของสิ่งมีชีวิต พลังงานแสงเป็นต้นกำเนิดของพลังงานที่เซลล์จะนำไปใช้ กลูโคสและผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ของการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นสารเชื้อเพลิงของเซลล์สิ่งมีชีวิตทุกชนิด ที่นำไปใช้ผลิตพลังงานสำหรับการดำเนินกิจกรรมดำรงชีวิต และในที่สุดพลังงานแสงก็จะเปลี่ยนไปเป็นรูปที่นำมาใช้ประโยชน์ไม่ได้ เช่น พลังงานความร้อน