cupress
สารชีวโมเลกุล
Biomolecules
อนงนาฏ ไพนุพงศ์

สารชีวโมเลกุล
(BIOMOLECULES)

สารชีวโมเลกุล
(BIOMOLECULES)

อนงนาฏ ไพนุพงศ์

สำนักพิมพ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2568

250.-

อนงนาฎ ไพนุพงศ์
สารชีวโมเลกุล / อนงนาฎ ไพนุพงศ์
1. สารชีวโมเลกุล. 2. โมเลกุล.
572
ISBN (e-book) 978-974-03-4373-8
สพจ. 2690

สิทธิในการผลิตและพิมพ์หนังสือเล่มนี้เป็นของสำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยแต่ผู้เดียว
การผลิตและการลอกเลียนหนังสือเล่มนี้ไม่ว่ารูปแบบใดทั้งสิ้น
ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จัดพิมพ์โดย สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พิมพ์ครั้งที่ 1 จำนวน 800 เล่ม พ.ศ. 2568
บรรณาธิการอำนวยการ : รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์
กองบรรณาธิการฝ่ายวิชาการ : ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.ปิยนาถ บุนนาค
ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ
ศาสตราจารย์ นายแพทย์ชิษณุ พันธุ์เจริญ
รองศาสตราจารย์ ดร.พิมพันธ์ เดชะคุปต์

ผู้ประสานงาน : วาสนา ซำเซ็น
พิสูจน์อักษร : พัชรมณฑ์ คณาน
ออกแบบปกและรูปเล่ม : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้จัดจำหน่าย : ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร. 0-2218-9872 โทรสาร 0-2254-9495
Call Center (จัดส่งทั่วประเทศ) โทร. 0-2255-4433
http://www.chulabook.com facebook page: Chulabook
chulabookcourse.com คอร์สเรียนออนไลน์ เรียนได้ทุกที่ทุกเวลา
Apps: CU-eBook Store
ร้านค้าติดต่อ : แผนกธุรกิจร้านค้า สาขาหัวหมาก โทร. 0-2374-1375-6 โทรสาร 0-2374-1374
พิมพ์ที่ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [CUB6707-005K] โทร. 0-2218-3562-3
www.cupress.chula.ac.th

คำนำ

หนังสือ “สารชีวโมเลกุล” (Biomolecules) เป็นส่วนหนึ่งของเนื้อหาวิชาในรายวิชาชีวเคมี ชีวเคมีสำหรับเทคโนโลยีการประมง ที่ผู้เขียนได้รวบรวมและเรียบเรียงในหัวข้อเรื่องเกี่ยวกับสารชีวโมเลกุลสำคัญ ๆ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ลิพิด โปรตีน เอนไซม์ กรดนิวคลิอิก และเรื่องของเซลล์ รวมถึงโครงสร้างภายในเซลล์ ซึ่งเป็นแหล่งที่พบสารชีวโมเลกุลซึ่งเป็นองค์ประกอบของเซลล์สิ่งมีชีวิตโดยทั่วไป อันเป็นเนื้อหาพื้นฐานที่สามารถศึกษาได้ด้วยตนเองเพื่อความเข้าใจและนำไปต่อยอดการทำความเข้าใจเนื้อหาส่วนอื่น เช่น การเปลี่ยนแปลงของสารชีวโมเลกุลที่เรียกว่า เมแทบอลิซึม (metabolism) ได้ ตลอดจนเนื้อหาอื่น ๆ ที่มีความลึกและซับซ้อนอันจะนำไปสู่ความเข้าใจการทำงานระดับเซลล์ เพื่อให้เกิดประโยชน์กับชีวิตสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย หนังสือเล่มนี้เหมาะกับนักเรียนนักศึกษา ครู อาจารย์ และผู้ที่สนใจโดยทั่วไป ที่นำไปใช้เพื่อให้เกิดการเรียนรู้ด้วยตนเองได้ตลอดชีวิต

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ครู อาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชา บิดา มารดาที่เป็นกำลังใจ และเป็นแรงบันดาลใจให้ข้าพเจ้าได้เขียนหนังสือเล่มนี้จนแล้วเสร็จสมบูรณ์ เพื่อเป็นประโยชน์ทางวิชาการต่อไป

ขอขอบคุณ คณะกรรมการ ผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ ตรวจสอบความถูกต้องของเนื้อหา ข้อเสนอแนะให้แก้ไขข้อบกพร่อง เพื่อให้หนังสือมีความสมบูรณ์ที่สุด ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต ที่ให้การสนับสนุนทุนเพื่อการผลิตหนังสือ เรื่อง “สารชีวโมเลกุล” มา ณ โอกาสนี้ด้วย

อนงนาฏ ไพนุพงศ์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
4 เมษายน 2567

สารบัญ

หน้า

คำนำ

สารบัญ

สารบัญตาราง

สารบัญภาพประกอบ

บทที่ 1 เซลล์ และโครงสร้างภายในเซลล์ **1**

รูปร่าง และขนาดของเซลล์ 2
ชนิดของเซลล์ 3
เซลล์โพรคาริโอต 3
เซลล์ยูคาริโอต 4
โครงสร้างภายในเซลล์ 6
ผนังเซลล์ 6
ไซโทซอล 7
เยื่อหุ้มเซลล์ 7
นิวเคลียส 8
ไรโบโซม 8
แกรนูลสะสม 9
ไมโทคอนเดรีย 9
เอนโดพลาสมิกเรทิคูลัม 10
ไมโครบอดี หรือเพอร์ออกซิโซม 11
ไลโซโซม 11
กอลจิคอมเพล็กซ์ 12
แวคิวโอล 12
โครงร่างของเซลล์ 13
น้ำ 16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ความแตกต่างระหว่างเซลล์โพรคาริโอต และเซลล์ยูคาริโอต	20
สารชีวโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างเซลล์	21
สรุป	24
บทที่ 2 ลิพิด	**25**
กรดไขมัน	26
ชนิดของกรดไขมัน	26
กรดไขมันชนิดอิ่มตัว	26
กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว	27
การเรียกตำแหน่งพันธะคู่ในโมเลกุลของกรดไขมัน	28
ระบบ Δ	28
ระบบ n	28
ระบบอักษรกรีก	28
คุณสมบัติของกรดไขมัน	30
ชนิดของลิพิด	32
ลิพิดธรรมดา หรือลิพิดอย่างง่าย	33
ไตรกลีเซอไรด์ หรือไตรเอซิลกลีเซอรอล	33
ไข หรือแวกซ์	34
ลิพิดเชิงประกอบ	35
ฟอสโฟลิพิด	35
ไกลโคลิพิด	39
ไลโพโปรตีน	41
ลิพิดเบ็ดเตล็ด	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
สเตอรอล	42
ไอโซพรีนอยด์	44
เทอร์พีน	45
โครงสร้าง และบทบาทของเยื่อหุ้มเซลล์	51
สรุป	51
บทที่ 3 คาร์โบไฮเดรต	**53**
หน้าที่ของคาร์โบไฮเดรต	53
ชนิดของคาร์โบไฮเดรต	54
โครงสร้างของมอนอแซคคาไรด์	56
โครงสร้างแบบเส้นตรง หรือแบบฟิชเชอร์	56
โครงสร้างแบบวงแหวน หรือแบบฮาเวิร์ด	58
ปฏิกิริยาของมอนอแซคคาไรด์	61
ปฏิกิริยากับด่าง (มอนอแซคคาไรด์เป็นสารรีดิวซ์)	61
ปฏิกิริยากับกรด	62
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน	62
ปฏิกิริยารีดักชัน	64
ปฏิกิริยาการเกิดไกลโคไซด์	65
การเกิดโอซาโซน	68
มอนอแซคคาไรด์ที่สำคัญ	69
กลูโคส	69
ฟรักโทส	69
กาแล็กโทส	69
แมนโนส	69
ไรโบส และดีออกซีไรโบส	70
อนุพันธ์ของมอนอแซคคาไรด์	71

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
น้ำตาลอะมิโน	71
น้ำตาลกรด	73
น้ำตาลแอลกอฮอล์	73
น้ำตาลดีออกซี	74
โอลิโกแซคคาไรด์	74
ไดแซคคาไรด์	74
ไตรแซคคาไรด์	77
พอลีแซคคาไรด์	77
โฮโมพอลีแซคคาไรด์	78
เฮเทอร์โรพอลีแซคคาไรด์	82
สรุป	88
บทที่ 4 กรดอะมิโน และโปรตีน	**89**
กรดอะมิโน	89
ชนิดของกรดอะมิโน	90
กรดอะมิโนที่เป็นเบส	90
กรดอะมิโนที่เป็นกรด	92
กรดอะมิโนที่หมู่อาร์มีขั้ว	92
กรดอะมิโนที่หมู่อาร์ไม่มีขั้ว	93
การแบ่งกรดอะมิโนตามความจำเป็นของร่างกาย	96
อนุพันธ์ของกรดอะมิโน	97
สมบัติของกรดอะมิโน	100
การละลาย	100
จุดหลอมเหลว	100
การดูดกลืนแสงของกรดอะมิโน	100
ความเป็นกรด-เบส ของกรดอะมิโน	101

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ปฏิกิริยานินไฮดริน	102
ปฏิกิริยาไบยูเรต	102
สายเพปไทด์ และการเรียกชื่อ	103
โปรตีน	104
หน้าที่ของโปรตีน	107
ชนิดของโปรตีน	112
โปรตีนเส้นใย	112
โปรตีนก้อนกลม	113
โครงสร้างของโปรตีน	113
โครงสร้างปฐมภูมิ	113
โครงสร้างทุติยภูมิ	114
โครงสร้างตติยภูมิ	117
โครงสร้างจตุรภูมิ	119
การเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน	122
การแยก และการทำให้โปรตีนบริสุทธิ์	124
สรุป	129
บทที่ 5 เอนไซม์	**131**
ลักษณะทั่วไปของเอนไซม์	131
การเรียกชื่อ และชนิดของเอนไซม์	133
ชื่อสามัญ	133
ชื่อตามระบบ	134
รหัสเอนไซม์	137
ประเภทของเอนไซม์	137
โครงสร้างของเอนไซม์	139
การทำงานของเอนไซม์	141

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
สมมติฐานแม่กุญแจ และลูกกุญแจ	143
สมมติฐานการเหนี่ยวนำให้เหมาะสม	144
โคแฟกเตอร์ และโคเอนไซม์	145
โคแฟกเตอร์	145
โคเอนไซม์	146
ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์	148
อุณหภูมิ	148
ค่า pH	149
ความเข้มข้นของซับสเตรต	150
ความเข้มข้นของเอนไซม์	150
จลนศาสตร์ของเอนไซม์	151
การหาค่า K_m และค่าความเร็วสูงสุดของปฏิกิริยา	154
แบบไลน์ลีเวอร์-เบอร์ก (Lineweaver-Burk)	154
แบบอิดี-ฮอฟสตี (Eadie-Hofstee)	155
ตัวยับยั้งเอนไซม์	157
ตัวยับยั้งแบบชั่วคราว หรือทวนกลับได้	157
ตัวยับยั้งแบบถาวร หรือทวนกลับไม่ได้	160
สรุป	160
บทที่ 6 กรดนิวคลิอิก	**161**
โครงสร้างของกรดนิวคลีอิก	161
เบสไนโตรเจน	162
น้ำตาลเพนโทส	163
หมู่ฟอสเฟต	164
นิวคลีโอไซด์	164
ชนิดของนิวคลีโอไซด์	165

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
การเรียกชื่อนิวคลีโอไซด์	165
นิวคลีโอไทด์	165
ชนิดของนิวคลีโอไทด์	165
การเรียกชื่อมอนอนิวคลีโอไทด์	166
ไซคลิกนิวคลีโอไทด์	168
พอลีนิวคลีโอไทด์	169
ระดับโครงสร้างของดีเอ็นเอ	172
โครงสร้างปฐมภูมิ	174
โครงสร้างทุติยภูมิ	175
โครงสร้างตติยภูมิ	176
ลักษณะสำคัญของดีเอ็นเอ	176
สมบัติสำคัญของดีเอ็นเอ	177
การแยก และทำให้ดีเอ็นเอบริสุทธิ์	178
กรดไรโบนิวคลีอิก	179
ชนิดของอาร์เอ็นเอ	180
อาร์เอ็นเอนำรหัส หรือ mRNA	180
อาร์เอ็นเอถ่ายโอน หรือ tRNA	183
อาร์เอ็นเอไรโบโซม หรือ rRNA	185
โครโมโซม	185
โครสร้างของโครโมโซม	185
ชนิดของโครโมโซมมนุษย์	187
การกลาย	187
ชนิดของการกลาย	188
สรุป	195
บรรณานุกรม	**197**
ดัชนี	**203**

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 ข้อแตกต่างขององค์ประกอบของเซลล์โพรคาริโอต และเซลล์ยูคาริโอต 21
2.1 กรดไขมันชนิดอิ่มตัว และกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวบางชนิดที่พบในธรรมชาติ 27
2.2 ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophilic group) หรือ R_3 ตามโครงสร้างภาพที่ 2.8 36
3.1 การเรียกชื่อมอนอแซคคาไรด์ตามจำนวนคาร์บอน 54
3.2 น้ำตาลแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ 65
4.1 ตัวย่อ สัญลักษณ์ และค่า p*K*a ที่ 25°C ของกรดอะมิโน 20 ชนิด 91
4.2 กรดอะมิโนตามความจำเป็นของร่างกาย 96
4.3 ตัวแลกเปลี่ยนไอออน 125
4.4 ชื่อทางการค้าของเจล หรือเม็ดบีด ตามช่วงขนาดโมเลกุลที่แยกได้ 126
5.1 เอนไซม์อย่างง่าย ชนิด serine proteases 138
5.2 ไอออนของโลหะที่เป็นโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์ชนิดต่าง ๆ 145
5.3 ค่า pH ที่เหมาะสมในการทำงานของเอนไซม์บางชนิด 149
5.4 ค่า K_m ของเอนไซม์ และซับสเตรตบางชนิด 156
6.1 การเรียกชื่อนิวคลีโอไซด์ 165
6.2 การเรียกชื่อมอนอนิวคลีโอไทด์ 166
6.3 ขนาด และรูปร่างของดีเอ็นเอจากแหล่งจาก ๆ 172
6.4 จำนวนโครโมโซมในสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ 186

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่		หน้า
1.1	(ก) กล้องจุลทรรศน์อย่างง่ายของ Robert Hooke (ข) ภาพวาดเซลล์ไม้คอร์ก	1
1.2	รูปร่างของเซลล์ชนิดต่าง ๆ	2
1.3	ตัวอย่างเซลล์โพรคาริโอต	3
1.4	โครงสร้างของเซลล์โพรคาริโอต	4
1.5	โครงสร้างเซลล์โพรคาริโอต และเซลล์ยูคาริโอต	5
1.6	โครงสร้างของเซลล์สัตว์ (animal cells)	5
1.7	โครงสร้างของเซลล์พืช (plant cells)	6
1.8	โครงสร้างของเยื่อเซลล์	7
1.9	นิวเคลียส	8
1.10	ไรโบโซม	9
1.11	ไมโทคอนเดรีย	10
1.12	โครงสร้างของเอ็นโดพลาสมิกเรทิคูลัมชนิดเรียบ (SER) และชนิดขรุขระ (RER)	11
1.13	โครงสร้างของกอลจิคอมเพล็กซ์ หรือกอลจิบอดี	12
1.14	แวคิวโอล	13
1.15	โครงร่างของไมโครฟิลาเมนต์	14
1.16	โครงร่างของอินเตอร์มีเดียทฟิลาเมนต์	15
1.17	โครงร่างของไมโครทิวบูล	15
1.18	การเกิดพันธะโคเวเลนซ์แบบมีขั้ว (polar covalent bonds) และโครงสร้างน้ำ	17
1.19	พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำ	18
1.20	พันธะไฮโดรเจนระหว่างน้ำกับหมู่ฟังก์ชัน (functional groups)	19
1.21	(ก) แหล่งที่พบสารชีวโมเลกุล (ข) สารชีวโมเลกุลที่พบเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างเซลล์ และออร์แกเนลล์	22
2.1	โครงสร้างทั่วไปของกรดไขมัน	26
2.2	การเรียกตำแหน่งพันธะคู่ในกรดไขมัน	29
2.3	ลักษณะโครงสร้างแบบ *cis*-form และ *trans*-form ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว	30

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.4	(ก) โมเลกุลแอมฟิพาทิก (amphipathic molecules) (ข) ลักษณะการกระจายตัวของลิพิดแบบไมเซลล์	31
2.5	โครงสร้างของ liposome ของลิพิด	32
2.6	โครงสร้างของมอโน-, ได-, และไตรกลีเซอไรด์	33
2.7	โครงสร้างของแวกซ์ (bee's wax) จากขี้ผึ้ง	35
2.8	โครงสร้างของกลีเซอโรฟอสโฟลิพิด	36
2.9	โครงสร้างและส่วนประกอบของ (ก) พลาสมาโลเจน และ (ข) platelet activating factor (PAF)	37
2.10	โครงสร้างของสฟิงโกลิพิดที่มีชื่อว่า sphingomyelin	38
2.11	โครงสร้างกลูโคซิลซีรีโบลซายด์ (glucosylcerebroside) ที่พบในเยื่อหุ้มเซลล์	39
2.12	โครงสร้างของ glycolipid หรือ sphingolipids ชนิดต่าง ๆ (ก) ซีรีโบลซายด์ (cerebroside) (ข) แกงกลิโอไซด์ (ganglioside)	40
2.13	โครงสร้าง และส่วนประกอบของไลโพโปรตีน	41
2.14	โครงสร้างของสเตอรอลบางชนิด	43
2.15	โครงสร้างของไอโซพรีนอยด์บางชนิด	44
2.16	โครงสร้างของมอนอไอโซพรีนบางชนิด	45
2.17	โครงสร้างของเซสควิเทอร์พีน (sesquiterpene)	46
2.18	โครงสร้างของไดเทอร์พีนบางชนิด	47
2.19	โครงสร้างของไตรเทอร์พีน	48
2.20	โครงสร้างของเตตระเทอร์พีน	48
2.21	โครงสร้างของ nonsteroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) บางชนิด	49
2.22	โครงสร้างของไอโคซานอยด์	50
2.23	โครงสร้าง และองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์	51
3.1	โครงสร้างของ trioses ชนิดอัลโดส (aldose) และคีโตส (ketose)	55
3.2	โครงสร้างของน้ำตาลชนิดอัลโดส	55

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.3	โครงสร้างของน้ำตาลชนิดคีโตส	56
3.4	โครงสร้างแบบเส้นตรงของ D-glyceraldehyde และ L-glyceraldehyde	57
3.5	โครงสร้างแบบเส้น หรือแบบฟิชเชอร์ของ D-glucose และ L-glucose	57
3.6	การเกิดเกิดปฏิกิริยาเฮมิอะซิทัล (hemiacetal) และปฏิกิริยาเฮมิคีทัล (hemiketal)	58
3.7	โครงสร้างแบบวงแหวนของน้ำตาล (ก) กลูโคส และ (ข) ฟรักโทส	59
3.8	(ก) โครงสร้างมอนอแซคคาไรด์แบบวงแหวนไพราโนสแบบรูปเก้าอี้ และแบบเรือ (ข) โครงสร้างแบบเก้าอี้ของกลูโคสทั้งแบบ α และ β	60
3.9	ปฏิกิริยาการทดสอบการเป็นสารรีดิวส์ของมอนอแซคคาไรด์	61
3.10	ปฏิกิริยา dehydration ของมอนอแซคคาไรด์กับกรดเข้มข้น	62
3.11	ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันของน้ำตาลกลูโคส และโครงสร้างของน้ำตาลกรด	63
3.12	ปฏิกิริยารีดักชันของมอนอแซคคาไรด์	64
3.13	ปฏิกิริยาการเกิดไกลโคไซด์	66
3.14	ตัวอย่างไกลโคไซด์ (ก) oleandrin ในยี่โถ (ข) anthocyanin ในดอกอัญชัน	67
3.15	ปฏิกิริยาการเกิดโอซาโซน	68
3.16	โครงสร้างของน้ำตาลไรโบส และดีออกซีไรโบสที่พบในสารพันธุกรรม	70
3.17	โครงสร้างอนุพันธ์ของน้ำตาลกลูโคสที่สำคัญทางชีววิทยา	72
3.18	โครงสร้างของกรดแอสคอบิก (ascorbic acid) หรือวิตามินซี	73
3.19	การเกิดรีดักชันของมอนอแซคคาไรด์เป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์	73
3.20	อนุพันธ์ของน้ำตาลแอลกอฮอล์ และน้ำตาลดีออกซี	74
3.21	โครงสร้างของน้ำตาลมอลโทส	75
3.22	โครงสร้างของน้ำตาลแล็กโทสที่พบในนม	76
3.23	โครงสร้างของน้ำตาลซูโครส หรือน้ำตาลทราย	76
3.24	โครงสร้างของไตรแซคคาไรด์ (raffinose)	77
3.25	โครงสร้างของเซลลูโลส	78
3.26	โครงสร้างของอะไมโลส และอะไมโลเพกทิน	79

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.27	โครงสร้างโมเลกุลของไกลโคเจน	80
3.28	โครงสร้างโมเลกุลของไคติน และไคโตซาน	81
3.29	โครงสร้างของอินูลิน	82
3.30	(ก) เพกทินในผนังเซลล์ของพืช (ข) โครงสร้างพื้นฐานของเพกทิน	83
3.31	มอนอเมอร์ของเพปติโดไกลแคน	84
3.32	เพปติโดไกลแคนบนผนังเซลล์ของ *Staphylococcus aureus* (gram-positive bacterium)	85
3.33	หน่วยซ้ำชนิดไดแซคคาไรด์ (disaccharide repeating units) ในโครงสร้างไกลโคสอะมิโนไกลแคน	86
4.1	โครงสร้างทั่วไปของกรดอะมิโน	89
4.2	โครงสร้างกรดอะมิโนที่เป็นเบส	90
4.3	โครงสร้างกรดอะมิโนที่เป็นกรด	92
4.4	โครงสร้างกรดอะมิโนที่กรดอะมิโนที่หมู่อาร์มีขั้ว ไม่แสดงประจุ	93
4.5	โครงสร้างกรดอะมิโนที่หมู่อาร์ไม่มีขั้ว (ชนิดอะลิฟาติก)	94
4.6	โครงสร้างกรดอะมิโนที่หมู่อาร์ไม่มีขั้ว (ชนิดอะโรมาติก)	95
4.7	โครงสร้างอนุพันธ์ของกรดอะมิโนที่สำคัญ	98
4.8	การดูดกลืนแสง UV ของกรดอะมิโนชนิดอะโรมาติก	101
4.9	ปฏิกิริยานินไฮดรินของกรดอะมิโน	102
4.10	ปฏิกิริยาไบยูเรต	103
4.11	ตัวอย่างสายเพปไทด์	104
4.12	พันธะเพปไทด์ที่เชื่อมต่อระหว่างกรดอะมิโนเป็นสายโปรตีน	105
4.13	การเชื่อมต่อของ (ก) ไดเพปไทด์ (ข) เตตระเพปไทด์ และ (ค) เพนตะเพปไทด์	106
4.14	ไกลโคโปรตีน (P-glycoprotein) เป็นตัวขนส่งยา	108
4.15	กลไกการทำงานของ cholera toxin	111
4.16	โครงสร้างของโปรตีนเส้นใย (ก) คอลลาเจน (triple helix) (ข) Tropocollagen	112

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.17	โครงสร้างของฮอร์โมนอินซูลิน (โปรตีนก้อนกลม)	113
4.18	(ก) ลำดับกรดอะมิโนในโครงสร้างปฐมภูมิของโปรตีน (ข) thyrotropin releasing (TRH)	114
4.19	มุม ϕ (phi) และมุม ψ (psi) ในพันธะเพปไทด์ของสายพอลีเพปไทด์	115
4.20	โครงสร้างทุติยภูมิของเกลียวแอลฟา (ก) พันธะเคมีในเกลียวแอลฟาของพอลลิง (Pauling's ปี 1960) (ข) พันธะเพปไทด์ที่กระจายในระนาบเดียวกับแกนเกลียว (ค) โครงสร้างแบบ ribbon	116
4.21	โครงสร้างทุติยภูมิของแผ่นพลีทบีตา	117
4.22	(ก) ลักษณะ diffraction pattern บน detector ในการศึกษาโครงสร้างโปรตีนด้วยเทคนิค X-ray crystallography (ข) โครงสร้างตติยภูมิของโปรตีน	118
4.23	โครงสร้างจตุรภูมิของฮีโมโกลบิน	120
4.24	โครงสร้างโปรตีน 4 ระดับ	121
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเกลือกับสารละลายของโปรตีน	122
4.26	การเสียสภาพธรรมชาติ และการกลับคืนสภาพธรรมชาติของโปรตีน	123
4.27	ตัวแลกเปลี่ยนไอออนในคอลัมน์แบบแลกเปลี่ยนไอออน	125
4.28	โครมาโทกราฟีแบบเจลฟิวเตรชัน	127
4.29	โครมาโทกราฟีแบบจำเพาะเจาะจง	127
5.1	ปฏิกิริยา dehydrogenation ในการเปลี่ยนแอลกอฮอล์ไปเป็นสารแอลดีไฮด์	134
5.2	การย้ายหมู่อะมิโน โดยอาศัยเอนไซม์ทรานส์อะมิเนส (transaminase)	134
5.3	ปฏิกิริยาการสลายพันธะเพปไทด์ โดยอาศัยเอนไซม์เพปทิเดส (peptidase)	135
5.4	ปฏิกิริยาการตัดคาร์บอนไดออกไซด์โดยอาศัยเอนไซม์ไพรูเวท ดีคาร์บอกซิเลส (pyruvate decarboxylase)	135
5.5	ปฏิกิริยาการเปลี่ยน methylmalonyl CoA โดยอาศัยเอนไซม์ mutase	136
5.6	ปฏิกิริยาการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอาศัยเอนไซม์ไพรูเวท คาร์บอกซีเลส	136
5.7	ตัวอย่างการสลายพันธะเพปไทด์ด้วยเอนไซม์อย่างง่าย (chymotrypsin)	138

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
5.8	บริเวณที่จับกับซับสเตรตของเอนไซม์ (substrate binding site)	140
5.9	บริเวณเร่งของเอนไซม์ (active site)	140
5.10	บริเวณอัลโลสเตริกของเอนไซม์	141
5.11	การทำงานของเอนไซม์	142
5.12	ตัวอย่างการจับกับซับสเตรตของเอนไซม์ pyruvate kinase	142
5.13	กราฟพลังงานของปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์ และไม่มีเอนไซม์	143
5.14	การจับกันระหว่างเอนไซม์กับซับสเตรตตามสมมุติฐานแม่กุญแจ และลูกกุญแจ	144
5.15	การจับกันระหว่างเอนไซม์กับซับสเตรตตามสมมุติฐานการเหนี่ยวนำให้เหมาะสม	144
5.16	โครงสร้างของโคเอนไซม์เอ (coenzyme A) และการทำงานของโคเอนไซม์	146
5.17	โครงสร้างของโคเอนไซม์บางชนิด	147
5.18	ผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ทริปซิน	148
5.19	ค่า pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์บางชนิด	149
5.20	ความเข้มข้นของซับสเตรตต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา	150
5.21	ความเข้มข้นของเอนไซม์ต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา	150
5.22	กราฟแสดงค่า K_m	153
5.23	กราฟสมการอัตราเร็วของไลน์วีเวอร์-เบอร์ก	154
5.24	กราฟอัตราเร็วของอิดี-ฮอฟสตรี	155
5.25	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับปริมาณความเข้มข้น E, S, ES และ P	156
5.26	การทำงานของตัวยับยั้งแบบแข่งขัน	157
5.27	ตัวอย่างตัวยับยั้งแบบแข่งขัน	158
5.28	การทำงานของตัวยับยั้งแบบไม่แข่งขัน	159
5.29	การทำงานของตัวยับยั้งแบบไม่สามารถแข่งขันได้โดยตรง	159
6.1	องค์ประกอบ 3 ส่วนของนิวคลีโอไทด์	161
6.2	โครงสร้างทั่วไปของเพียวรีน และอนุพันธ์เพียวรีน	162
6.3	โครงสร้างทั่วไปของไพริมิดีน และอนุพันธ์ไพริมิดีน	163

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
6.4	โครงสร้างของน้ำตาลดี-ไรโบส และดี-2-ดีออกซีไรโบส	163
6.5	หมู่ฟอสเฟต	164
6.6	โครงสร้างของนิวคลีโอไซด์บางชนิด	164
6.7	โครงสร้างทั่วไปของนิวคลีโอไทด์ที่พบใน DNA และ RNA	166
6.8	โครงสร้างของ ATP และองค์ประกอบ	167
6.9	โครงสร้างของดีออกซีไรโบนิวคลีโอไทด์	167
6.10	โครงสร้างของไรโบนิวคลีโอไทด์	168
6.11	โครงสร้างของ cAMP และ cGMP	168
6.12	โครงสร้างของพอลีนิวคลีโอไทด์ และพันธะฟอสโฟไดเอสเทอร์	169
6.13	โครงสร้างของพอลีนิวคลีโอไทด์ และการเขียนย่อโดยใช้ตัวอักษร	170
6.14	โครงสร้างแบบใช้ตัวอักษรกำกับเส้นของ oligonucleotide	171
6.15	โครงสร้างดีเอ็นเอ และการเข้าคู่กันของเบส (complementary base pairing) ด้วยพันธะไฮโดรเจน โดย Watson และ Crick	173
6.16	โครงสร้างปฐมภูมิของ DNA โดย Watson และ Crick	174
6.17	โครงสร้างทุติยภูมิของดีเอ็นเอแบบ A-, B- และ Z-form	175
6.18	การเสียสภาพ และการกลับคืนสภาพธรรมชาติของดีเอ็นเอ	177
6.19	อาร์เอ็นเอสายเดี่ยว (single strand)	180
6.20	อาร์เอ็นเอนำรหัส (mRNA) ในยูคาริโอต	181
6.21	โครงสร้างที่สมบูรณ์ของ mRNA ในโพรคาริโอต และยูคาริโอต	182
6.22	รหัสพันธุกรรมสำหรับแปลเป็นกรดอะมิโนในการสังเคราะห์โปรตีน	183
6.23	อาร์เอ็นเอถ่ายโอนแบบ clover-leaf shape	184
6.24	อาร์เอ็นเอถ่ายโอนแบบ L shape (พบมากในเซลล์)	184
6.25	ไรโบโซมอาร์เอ็นเอ	185
6.26	โครงสร้างของโครโมโซม	186
6.27	ลักษณะโครโมโซมของมนุษย์ชนิดต่าง ๆ	187

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

6.28 ผลของ tautomerism ในการเข้าคู่กันของเบส 190
6.29 การกลายแบบแทนที่ของเบสแบบ transition 191
6.30 การกลายแบบแทนที่ของเบสแบบ transversion 192
6.31 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของเบสแบบ (ก) nonsense (ข) missense mutation 193
6.32 การกลายแบบเฟรมชิพต์ 194

บทที่ 1
เซลล์ และโครงสร้างภายในเซลล์

เซลล์เป็นหน่วยโครงสร้างพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำงานของสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว (unicellular organism) และสิ่งมีชีวิตหลายเซลล์ (multicellular organism) สามารถมองเห็นเซลล์ได้ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (microscope) เซลล์ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1665 โดย โรเบิร์ต ฮุก (Robert Hooke) ซึ่งเป็นนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ จากการศึกษาชิ้นส่วนของไม้คอร์ก (cork) ที่ฝานบาง ๆ และมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ เห็นเป็นช่องว่างขนาดเล็กติดต่อกันจำนวนมาก เรียกว่า เซลล์ (cells) เซลล์ทุกเซลล์มีเยื่อหุ้มหรือเมมเบรน (membrane) เป็นองค์ประกอบล้อมรอบถัดจากเยื่อหุ้มเซลล์เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ที่เรียกว่า ไซโทพลาสซึม (cytoplasm) มีสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน เอนไซม์ สารอนินทรีย์ และน้ำ เป็นแหล่งการเกิดปฏิกิริยาสำคัญจำนวนมากที่ทำให้เซลล์มีชีวิต เมื่อมองลึกลงไปในเซลล์ยังประกอบด้วยองค์ประกอบย่อยที่เรียกว่า ออร์แกเนลล์ (organelles) อื่น ๆ ได้แก่ ไมโทคอนเดรีย (mitochondria) ไรโบโซม (ribosome) ไลโซโซม (lysosome) นิวเคลียส (nucleus) เป็นต้น เซลล์ทำหน้าที่แตกต่างกัน เช่น การสืบพันธุ์ (reproduction) เพื่อการดำรงเผ่าพันธุ์ การเคลื่อนไหว การเจริญเติบโต การตอบสนองต่อสิ่งเร้า และยังสร้างสารสำคัญที่จำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิต

(ก) (ข)

ภาพที่ 1.1 (ก) กล้องจุลทรรศน์อย่างง่ายของ Robert Hooke (ข) ภาพวาดเซลล์ไม้คอร์ก
ที่มา ดัดแปลงจาก Postlethwait JH and Hopson JL. 1992. pp. 54.