



หนังสือเรียน

รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ชีววิทยา

ชั้น

มัธยมศึกษาปีที่ ๔ เล่ม ๒

ตามผลการเรียนรู้

กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)

ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑

จัดทำโดย

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงศึกษาธิการ

พิมพ์ครั้งที่ ๔

ISBN 978-616-576-352-3

จำนวน ๑๔๐,๐๐๐ เล่ม พ.ศ. ๒๕๖๖

จัดจำหน่ายโดย

องค์การค้ำของ สกสศ. พิมพ์ที่โรงพิมพ์ สกสศ. ลาดพร้าว

๒๒๔๙ ถนนลาดพร้าว วังทองหลาง กรุงเทพมหานคร

❖ มีลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติ



ประกาศสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน
เรื่อง อนุญาตให้ใช้สื่อการเรียนรู้ในสถานศึกษา

ด้วยสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ชีววิทยา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ เล่ม ๒ ตามผลการเรียนรู้กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน ได้พิจารณาแล้ว อนุญาตให้ใช้ในสถานศึกษาได้

ประกาศ ณ วันที่ ๕ มกราคม พ.ศ. ๒๕๖๗

ว่าที่ร้อยตรี

(ธนุ วงษ์จินดา)

เลขาธิการคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน

คำนำ

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) มีอำนาจหน้าที่ในการพัฒนาหลักสูตร วิธีการเรียนรู้ การประเมินผล การจัดทำหนังสือเรียน แบบฝึกหัด และสื่อการเรียนรู้ทุกประเภทที่ใช้ประกอบการเรียนรู้ในกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของการจัดการศึกษาขั้นพื้นฐาน

หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ชีววิทยา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ เล่ม ๒ นี้ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) จัดทำขึ้นตามผลการเรียนรู้ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ เพื่อให้สถานศึกษาพิจารณาเทียบเคียงกับหลักสูตรสถานศึกษา และพิจารณาเลือกใช้หนังสือนี้ประกอบการจัดการเรียนรู้ให้สอดคล้องกับหลักสูตรสถานศึกษาของตนได้ตามความเหมาะสม

กระทรวงศึกษาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือเรียนเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการจัดการเรียนรู้ในรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาคุณภาพและมาตรฐานการศึกษา กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ขอขอบคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตลอดจนบุคคลและหน่วยงานอื่น ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการจัดทำไว้ ณ โอกาสนี้

ว่าที่ร้อยตรี

(ธนุ วงษ์จินดา)

เลขาธิการคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน

คำชี้แจง

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำตัวชี้วัดและสาระการเรียนรู้แกนกลาง กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษา ขั้นพื้นฐานพุทธศักราช ๒๕๕๑ โดยมีจุดเน้นเพื่อต้องการพัฒนาผู้เรียนให้มีความรู้ความสามารถที่ทัดเทียมกับนานาชาติ ได้เรียนรู้วิทยาศาสตร์ที่เชื่อมโยงความรู้กับกระบวนการ ใช้กระบวนการสืบเสาะหาความรู้และแก้ปัญหาที่หลากหลาย มีการทำกิจกรรมด้วยการลงมือปฏิบัติเพื่อให้ผู้เรียนได้ใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และทักษะแห่งศตวรรษที่ ๒๑ ซึ่งในปีการศึกษา ๒๕๖๑ เป็นต้นไป โรงเรียนจะต้องใช้หลักสูตรกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) สสวท. จึงได้จัดทำหนังสือเรียนที่เป็นไปตามมาตรฐานหลักสูตรเพื่อให้โรงเรียนได้ใช้สำหรับจัดการเรียนการสอนในชั้นเรียน

หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ชีววิทยา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ เล่ม ๒ นี้ มีผลการเรียนรู้และสาระการเรียนรู้เพิ่มเติมที่ครอบคลุมเนื้อหาบางส่วนที่ปรากฏตามตัวชี้วัดรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์ชีวภาพ โดยเมื่อผู้เรียนเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ชีววิทยา เล่ม ๑ - เล่ม ๖ ครบทุกชั้นปีในชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ - ๖ แล้วจะสามารถบรรลุผลสัมฤทธิ์ตามตัวชี้วัดของรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์ชีวภาพได้ และในขณะเดียวกันก็สามารถต่อยอดเนื้อหาจากรายวิชาพื้นฐานไปสู่เนื้อหาในรายวิชาเพิ่มเติมได้โดยไม่ต้องเสียเวลาเรียนซ้ำซ้อน ทั้งนี้หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ชีววิทยา เล่ม ๒ นี้ มีเนื้อหาที่จำเป็นที่ต้องเรียนประกอบด้วยเรื่องโครโมโซมและสารพันธุกรรม การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ และวิวัฒนาการ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาในด้านวิทยาศาสตร์ หรือประกอบอาชีพในสาขาที่ใช้วิทยาศาสตร์เป็นฐาน เช่น แพทย์ ทันตแพทย์ สัตวแพทย์ เทคโนโลยีชีวภาพ เทคนิคการแพทย์ วิศวกรรม สถาปัตยกรรม วัสดุศาสตร์ อุตุนิยมวิทยา ธรณีวิทยา ฯลฯ โดยเน้นกระบวนการคิดวิเคราะห์และการแก้ปัญหา เชื่อมโยงความรู้สู่การนำไปใช้ในชีวิตจริง ผู้เรียนจะได้ทำกิจกรรมที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญรวมทั้งกิจกรรมที่ผู้เรียนสามารถคิดค้นและออกแบบการทดลองด้วยตนเอง มีแบบตรวจสอบความรู้ความเข้าใจก่อนเรียน มีแบบฝึกหัดเพื่อให้ตรวจทานความรู้หลังจากที่เรียนไปแล้ว รวมทั้งสรุปความรู้ในแต่ละบทด้วย ในการจัดทำหนังสือเรียนเล่มนี้ ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีจากผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิชาการอิสระ คณาจารย์ทั้งหลาย รวมทั้งครูผู้สอน นักวิชาการ จากสถาบัน และสถานศึกษาทั้งภาครัฐและเอกชน จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สสวท. หวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ชีววิทยา เล่ม ๒ นี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้เรียน และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่าย ที่จะช่วยให้การจัดการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์มีประสิทธิภาพและประสิทธิผล หากมีข้อเสนอแนะใดที่จะทำให้หนังสือเรียนเล่มนี้ มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โปรดแจ้ง สสวท. ทราบด้วย จะขอบคุณยิ่ง

ส. ธีระเดช

(รองศาสตราจารย์ธีระเดช เจียรสุขสกุล)

ผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กระทรวงศึกษาธิการ

ข้อแนะนำทั่วไปในการใช้หนังสือเรียน

หนังสือเรียนเป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้นักเรียนได้ใช้ในการศึกษาเนื้อหาที่สำคัญ และเกิดทักษะที่จำเป็นที่สอดคล้องกับมาตรฐานและสาระการเรียนรู้ รวมทั้งยังมีสื่อที่ช่วยเสริมการเรียนรู้ของนักเรียน โดยสามารถเชื่อมต่อไปยังหน้าเว็บไซต์รายการสื่อได้จาก QR code หรือ URL ที่อยู่ประจำแต่ละบท การทำความเข้าใจเกี่ยวกับสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียน จะช่วยให้นักเรียนใช้หนังสือเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียน มีดังนี้

1	คำถามสำคัญ  คำถามประจำบทที่ผู้เรียนต้องอาศัยความรู้ทั้งหมดในบทเรียนในการตอบคำถาม ซึ่งผู้เรียนควรตอบได้หลังจากได้เรียนรู้ในบทนั้นแล้ว	2	จุดประสงค์การเรียนรู้  เป้าหมายของการจัดการเรียนรู้ที่ต้องการให้นักเรียนเกิดความรู้หรือทักษะหลังจากผ่านกิจกรรมการจัดการเรียนรู้ในแต่ละหัวข้อ ซึ่งผู้เรียนควรศึกษาทำความเข้าใจก่อนเริ่มเรียนรู้ในแต่ละหัวข้อ
3	ตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน  ชุดคำถามที่ใช้ในการตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน ซึ่งผู้เรียนควรตอบคำถามให้ถูกต้องทั้งหมด หากไม่ถูกต้องควรทบทวนเนื้อหาขึ้นก่อนเริ่มการเรียนรู้เรื่องใหม่ในแต่ละบท	4	ชวนคิด  คำถามระหว่างเรียนที่เชื่อมโยงหรือต่อยอดความรู้เดิมที่ศึกษาแล้วกับความรู้ใหม่หรือความรู้ในศาสตร์อื่น เพื่อให้ผู้เรียนเห็นความสัมพันธ์หรือความต่อเนื่องของเนื้อหา
5	ตรวจสอบความเข้าใจ  คำถามระหว่างเรียนที่ช่วยประเมินการเรียนรู้ ซึ่งผู้เรียนสามารถใช้ตรวจสอบว่า ตนเองมีความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาแล้วหรือยัง	6	ลองทำดู  การปฏิบัติที่ช่วยเสริมความรู้ที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาในบทเรียน ซึ่งผู้เรียนสามารถลงมือปฏิบัติด้วยตนเองนอกเวลาเรียนได้

7	กิจกรรม	8	ตัวอย่าง
	การปฏิบัติที่ช่วยในการเรียนรู้เนื้อหาหรือฝึกฝนให้เกิดทักษะตามจุดประสงค์การเรียนรู้ของบทเรียน โดยอาจเป็นการทดลอง การสืบค้นข้อมูล หรือกิจกรรมอื่นๆ ซึ่งผู้เรียนควรลงมือปฏิบัติกิจกรรมด้วยตนเอง		การแสดงแนวทางการตอบคำถามหรือการแก้ไขข้อผิดพลาด ซึ่งผู้เรียนสามารถศึกษาเพื่อให้ความเข้าใจในเนื้อหาบทเรียนมากขึ้น
9	กิจกรรมเสนอแนะ	10	ความรู้เพิ่มเติม
	การปฏิบัติที่ช่วยเสริมความรู้ที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาในบทเรียน ซึ่งอาจเป็นกิจกรรมที่ลงมือปฏิบัติในห้องเรียนหรือนอกเวลาเรียนได้		ความรู้ที่เพิ่มเติมจากเนื้อหาในบทเรียน เพื่อให้ผู้เรียนมีความรู้ความเข้าใจมากขึ้น โดยไม่มีการวัดและประเมินผล
11	รู้หรือไม่	12	การเชื่อมโยงความรู้
	ความรู้ที่เชื่อมโยงให้เห็นความสอดคล้องของเนื้อหาบทเรียน กับปรากฏการณ์หรือสถานการณ์ในชีวิตประจำวัน		เนื้อหาที่แสดงความเชื่อมโยงของความรู้ในบทเรียนกับความรู้ในวิชาวิทยาศาสตร์สาขาอื่น ความรู้ในชีวิตประจำวัน หรือความรู้ที่ใช้ในอาชีพต่าง ๆ
13	กรณีศึกษา	14	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน
	ตัวอย่างข้อมูลจากการศึกษาหรืองานวิจัยที่สอดคล้องกับความรู้ในบทเรียน เพื่อให้ผู้เรียนศึกษาวิเคราะห์จากกรณีจริง		การสรุปเนื้อหาสำคัญภายในบทเรียน เพื่อช่วยให้เห็นภาพรวมของเนื้อหาทั้งหมด
15	แบบฝึกหัดท้ายบท	16	สื่อ AR (Augmented Reality)
	คำถามท้ายบทเรียนสำหรับให้ผู้เรียนตรวจสอบความเข้าใจหลังจากเรียนจบบทเรียนแล้ว ซึ่งผู้เรียนสามารถใช้เป็นข้อมูลในการทบทวนเนื้อหาที่ยังไม่เข้าใจได้		สื่อเสริมการเรียนรู้ที่ใช้เทคโนโลยี AR ผู้เรียนสามารถดาวน์โหลดเพื่อใช้งานผ่านแอปพลิเคชัน "AR วิทย์ ม.ปลาย"

สารบัญ	บทที่ 4 - 7	
บทที่	เนื้อหา	หน้า
4	โครโมโซมและสารพันธุกรรม	1
	4.1 โครโมโซม	4
	4.2 สารพันธุกรรม	9
	4.3 สมบัติของสารพันธุกรรม	19
	4.4 มิวเทชัน	35
โครโมโซมและสารพันธุกรรม	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	47
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4	50
5	การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม	55
	5.1 การศึกษาพันธุกรรมของเมนเดล	58
	5.2 ลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล	82
	5.3 ยีนบนโครโมโซมเดียวกัน	101
การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	105
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5	106
6	เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ	113
	6.1 พันธุวิศวกรรมและการโคลนนิ่ง	116
	6.2 การหาขนาดของ DNA และการหาลำดับนิวคลีโอไทด์	128
	6.3 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ	133
	6.4 เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอกับความปลอดภัยทางชีวภาพและชีวจริยธรรม	152
เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	155
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6	157



คำถามสำคัญ

1. DNA ยีน และโครโมโซมมีความสัมพันธ์กันอย่างไร
2. การจำลองดีเอ็นเอมีความสำคัญอย่างไร
3. DNA เกี่ยวข้องกับลักษณะทางพันธุกรรมอย่างไร
4. มิวเทชันทำให้สิ่งมีชีวิตมีลักษณะต่างไปจากเดิมได้อย่างไรและส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอย่างไร



จุดประสงค์การเรียนรู้

1. สืบค้นข้อมูลและอธิบายโครงสร้างและองค์ประกอบของโครโมโซม และหลักการจำแนกโครโมโซม
2. อภิปรายเกี่ยวกับการค้นพบสารพันธุกรรมโดยใช้วิธีการทางวิทยาศาสตร์
3. อธิบายโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของ DNA
4. สืบค้นข้อมูล อธิบาย และสรุปเกี่ยวกับ DNA แต่ละโมเลกุลมีจำนวนและลำดับนิวคลีโอไทด์แตกต่างกัน
5. อธิบายและสรุปความสัมพันธ์ในเชิงโครงสร้างระหว่างยีน DNA และโครโมโซม
6. อธิบายสมบัติและหน้าที่ของสารพันธุกรรม
7. สืบค้นข้อมูล อธิบาย และสรุปกระบวนการจำลองดีเอ็นเอ
8. สืบค้นข้อมูล อธิบาย และระบุขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีน
9. อธิบายหน้าที่ของ DNA และ RNA แต่ละชนิดในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีน
10. เปรียบเทียบการสังเคราะห์โปรตีนของโพรแคริโอตและยูแคริโอต
11. สืบค้นข้อมูล อภิปราย และอธิบายสาเหตุและผลของการเกิดมิวเทชันระดับยีนและระดับโครโมโซม
12. ยกตัวอย่างโรคและกลุ่มอาการที่เป็นผลของการเกิดมิวเทชันระดับยีนและระดับโครโมโซม



ตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน

ให้นักเรียนใส่เครื่องหมายถูก (✓) หรือผิด (×) หน้าข้อความตามความเข้าใจของนักเรียน

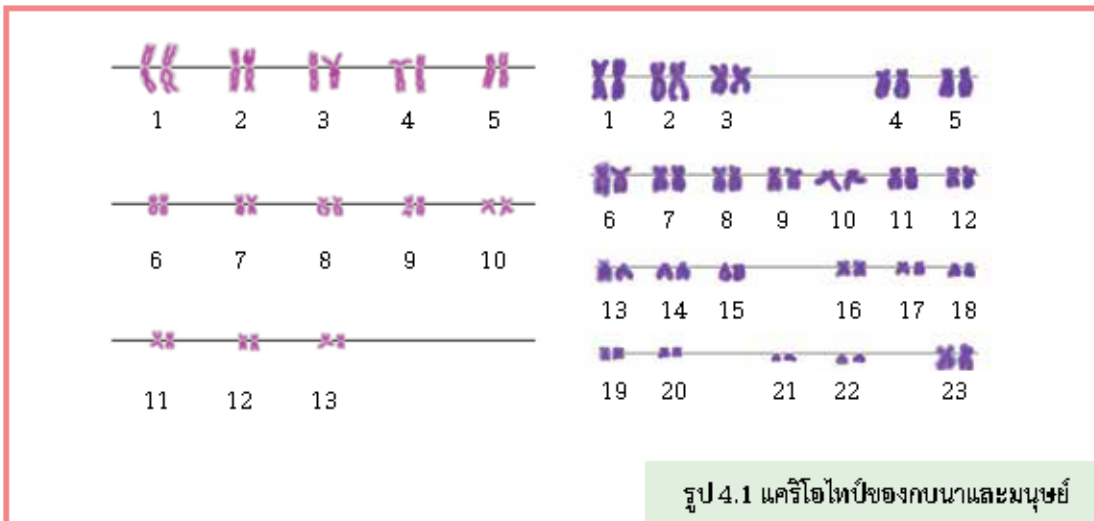
- ☐ 1. โครโมโซมของเซลล์ยูแคริโอตประกอบด้วย DNA และโปรตีน
- ☐ 2. ซิสเตอร์โครมาทิดยึดติดกันที่ตำแหน่งเซนโทรเมียร์
- ☐ 3. สิ่งมีชีวิตที่มีโครโมโซมของเซลล์ร่างกายมีลักษณะเหมือนกัน 2 ชุด เรียกว่า ดิพลอยด์
- ☐ 4. ฮอมอโลกัสโครโมโซมแยกออกจากกันในระยะแอนาเฟส II
- ☐ 5. กรดนิวคลีอิกทำหน้าที่เก็บและถ่ายทอดข้อมูลทางพันธุกรรม
- ☐ 6. นิวคลีโอไทด์ประกอบด้วย น้ำตาลเพนโทส ไนโตรจีนัสเบส และหมู่ฟอสเฟต
- ☐ 7. นิวคลีโอไทด์เชื่อมต่อกันด้วยพันธะฟอสโฟไดเอสเทอร์เป็นสายยาว เรียกว่า พอลินิวคลีโอไทด์
- ☐ 8. DNA ประกอบด้วยพอลินิวคลีโอไทด์ 2 สาย
- ☐ 9. การเปลี่ยนแปลงของยีนหรือโครโมโซมไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต

4.1 โครโมโซม

จากที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการแบ่งเซลล์มาแล้วนั้น เซลล์ยูแคริโอตในระยะอินเตอร์เฟสจะเห็นโครมาตินอยู่ในนิวเคลียส เมื่อมีการแบ่งนิวเคลียสในระยะโพรเฟส โครมาตินจะมีการขดตัวทำให้หนาขึ้นและสั้นลง เรียกว่า โครโมโซม

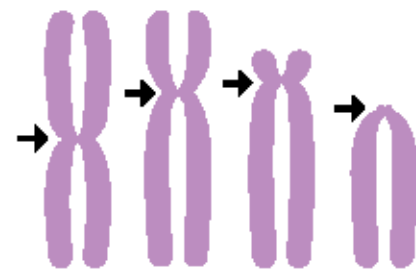
4.1.1 รูปร่าง ลักษณะ และจำนวนโครโมโซม

จากภาพนำบท เมื่อนำโครโมโซมมาจัดทำแคโรไทป์ (karyotype) โดยจัดเรียงตามขนาดของโครโมโซมและตำแหน่งของเซนโทรเมียร์ จะจัดเรียงโครโมโซมของกบนาได้ 13 คู่ และโครโมโซมของมนุษย์ได้ 23 คู่ จะสังเกตได้ว่า โครโมโซมมีรูปร่างลักษณะเหมือนกันเป็นคู่ เรียกโครโมโซมแต่ละคู่นี้ว่า โฮโมโลกัสโครโมโซม (homologous chromosome) ดังรูป 4.1



รูป 4.1 แคโรไทป์ของกบนาและมนุษย์

การจำแนกโครโมโซมสามารถจำแนกได้ตามขนาดของโครโมโซมและตำแหน่งของเซนโทรเมียร์ เมื่อพิจารณาตำแหน่งเซนโทรเมียร์ ดังรูป 4.2 พบว่าสิ่งมีชีวิตสปีชีส์หนึ่งอาจมีโครโมโซมที่มีรูปร่างแบบเดียวหรือหลายแบบก็ได้



→ แสดงตำแหน่งเซนโทรเมียร์

รูป 4.2 โครโมโซมแบบต่างๆ

สิ่งมีชีวิตที่เป็นดิพลอยด์จะมีโครโมโซมในเซลล์ร่างกายเหมือนกัน 2 ชุด (2n) โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตแต่ละสปีชีส์มีจำนวนโครโมโซมคงที่ ดังแสดงในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 จำนวนโครโมโซมในเซลล์ร่างกายของสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ต่างๆ

สัตว์	จำนวนโครโมโซม (2n)	พืช	จำนวนโครโมโซม (2n)
สุนัข (<i>Canis familiaris</i>)	78	ฝ้าย (<i>Gossypium hirsutum</i>)	52
ไก่ (<i>Gallus domesticus</i>)	78	ยาสูบ (<i>Nicotiana tabacum</i>)	48
ม้า (<i>Equus caballus</i>)	64	มันฝรั่ง (<i>Solanum tuberosum</i>)	48
ลา (<i>Equus asinus</i>)	62	สน (<i>Pinus ponderosa</i>)	24
มนุษย์ (<i>Homo sapiens</i>)	46	มะเขือเทศ (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	24
หนู (<i>Mus musculus</i>)	40	ข้าว (<i>Oryza sativa</i>)	24
แมว (<i>Felis domesticus</i>)	38	แตงโม (<i>Citrullus vulgaris</i>)	22
ผึ้ง (<i>Apis mellifera</i>)	32	ข้าวโพด (<i>Zea mays</i>)	20
กบ (<i>Rana pipiens</i>)	26	กะหล่ำปลี (<i>Brassica oleracea</i>)	18
แมลงวัน (<i>Musca domestica</i>)	12	มะละกอ (<i>Carica papaya</i>)	18
แมลงหวี่ (<i>Drosophila melanogaster</i>)	8	หอม (<i>Allium cepa</i>)	16
ยุงก้นปล่อง (<i>Anopheles dirus</i>)	6	ถั่วลันเตา (<i>Pisum sativum</i>)	14

? นักวิทยาศาสตร์สามารถใช้จำนวนโครโมโซมในการระบุสปีชีส์ของสิ่งมีชีวิตได้หรือไม่ เพราะเหตุใด

? ตัวอย่างสิ่งมีชีวิตในตาราง 4.1 มีจำนวนโครโมโซมที่เป็นเลขคู่เพราะเหตุใด

จากตาราง 4.1 จะเห็นว่า สิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์กันอาจมีจำนวนโครโมโซมเท่ากันได้ จึงไม่สามารถใช้จำนวนโครโมโซมในการระบุสปีชีส์ของสิ่งมีชีวิตได้ อย่างไรก็ตามจำนวนโครโมโซมของสิ่งมีชีวิตสปีชีส์เดียวกันจะมีจำนวนคงที่และเท่ากันเสมอ เมื่อศึกษาลักษณะของโครโมโซมของสิ่งมีชีวิตแต่ละสปีชีส์จะพบว่า มีโครโมโซมที่มีรูปร่างลักษณะแตกต่างกัน



ความรู้เพิ่มเติม

แคโรไทป์เป็นการศึกษาจำนวนและลักษณะรูปร่างของโครโมโซมในนิวเคลียสของเซลล์ยูแคริโอต แล้วนำมาจัดเรียงกันเป็นกลุ่มตามขนาดโครโมโซมและตำแหน่งของเซนโทรเมียร์ โดยนิยมใช้โครโมโซมในระยะเมทาเฟส เนื่องจากโครโมโซมมีการขดตัวจึงมีขนาดใหญ่ขึ้นและสั้นลง จึงเป็นระยะที่มองเห็นโครโมโซมชัดที่สุด

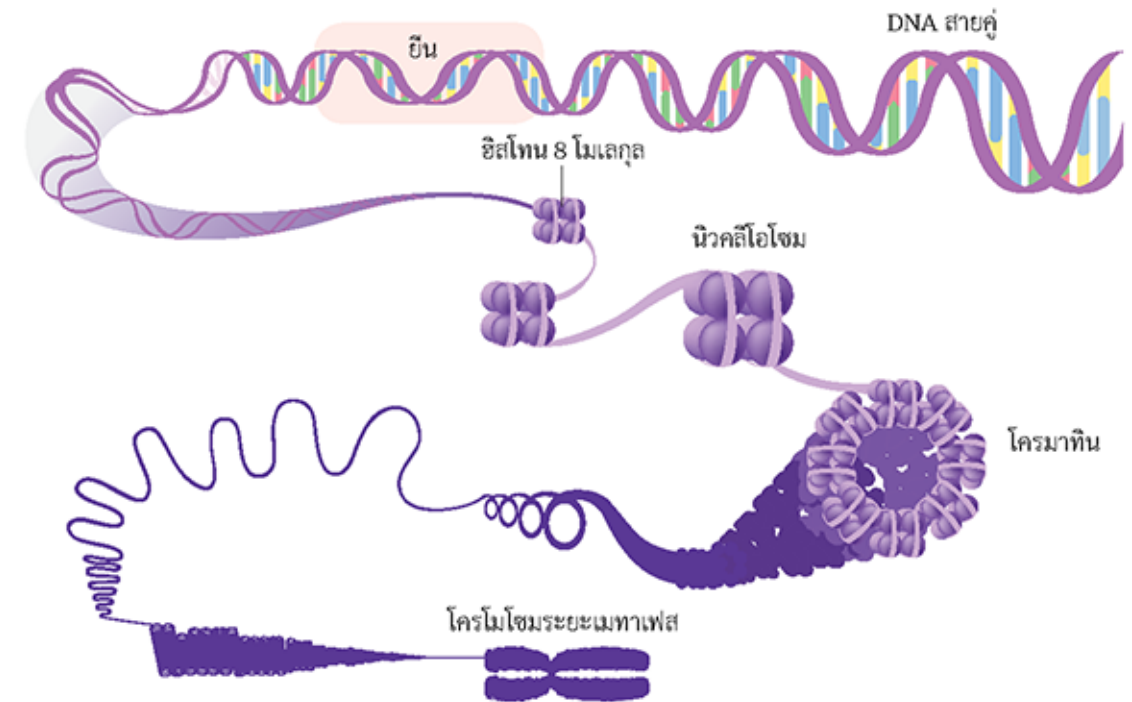
ในทางการแพทย์มีการใช้เซลล์ชนิดต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์โครโมโซม เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ดังนี้

- ลิ้มโฟไซด์ เพื่อศึกษาลักษณะ ขนาด และจำนวนของโครโมโซมเพื่อนำไปจัดเรียงแคโรไทป์
- เซลล์ไขกระดูก เพื่อตรวจความผิดปกติของโครโมโซมในผู้ป่วยโรคมะเร็งเม็ดเลือดขาว
- เซลล์ของพืชที่เพาะในน้ำคร่ำ เพื่อศึกษาความผิดปกติทางพันธุกรรม

4.1.2 ส่วนประกอบของโครโมโซม

โครโมโซมของยูแคริโอตประกอบด้วย DNA ซึ่งนับเป็น 1 ใน 3 ส่วนของโครโมโซม และอีก 2 ใน 3 เป็นโปรตีนซึ่งส่วนใหญ่เป็นฮิสโตน (histone) และบางส่วนเป็นโปรตีนที่ไม่ใช่ฮิสโตนหรือนอนฮิสโตนโปรตีน (non-histone protein) จากการศึกษาพบว่าฮิสโตนเป็นโปรตีนที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกรดแอมิโนที่มีประจุบวก เช่น ไลซีนและอาร์จินีน ทำให้มีสมบัติในการจับกับ DNA ซึ่งมีประจุเป็นลบได้ดี

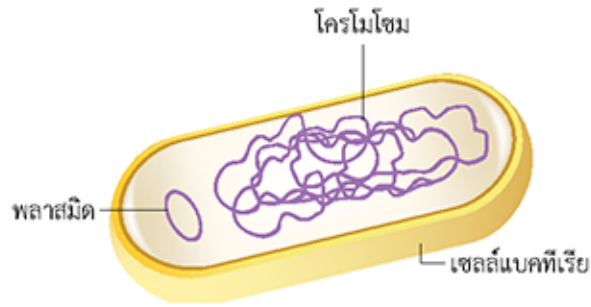
DNA ที่เป็นเส้น (linear DNA) สายคู่ 1 เส้นพันรอบกลุ่มฮิสโตน 8 โมเลกุล ทำให้มีรูปร่างคล้ายลูกปัด เรียกโครงสร้างนี้ว่า นิวคลีโอโซม (nucleosome) และนิวคลีโอโซมม้วนพันกันเป็นโครมาทิน โครมาทินในระยะที่มีการแบ่งนิวเคลียสจะมีการขดตัวทำให้หนาขึ้นและสั้นลงมองเห็นเป็นโครโมโซม ดังรูป 4.3



รูป 4.3 ส่วนประกอบโครโมโซมของยูแคริโอต

สาย DNA บางช่วงทำหน้าที่กำหนดลักษณะทางพันธุกรรม ซึ่งเรียก DNA ช่วงนั้นว่า ยีน (gene) ในเซลล์ยูแคริโอตนอกจากพบ DNA ในนิวเคลียสแล้ว ยังพบ DNA ในไมโทคอนเดรียและคลอโรพลาสต์อีกด้วย

โครโมโซมของเซลล์โพรแคริโอต เช่น แบคทีเรีย มีจำนวนโครโมโซมชุดเดียว และมีโครโมโซมเป็นวงอยู่ในไซโทพลาซึม โครโมโซมของแบคทีเรียประกอบด้วย DNA สายคู่ที่เป็นวง 1 โมเลกุล และไม่มีฮิสโตนเป็นองค์ประกอบ แต่มีโปรตีนชนิดอื่นที่คล้ายฮิสโตนช่วยในการขดตัวแน่น นอกจากนี้ในแบคทีเรียบางชนิดยังมีพลาสมิด (plasmid) ซึ่งเป็น DNA สายคู่ที่เป็นวงขนาดเล็กอยู่นอกโครโมโซมของแบคทีเรียอีกด้วย ดังรูป 4.4



รูป 4.4 โครโมโซมและพลาสมิดภายในเซลล์แบคทีเรีย

สารพันธุกรรมทั้งหมดของโครโมโซม 1 ชุด ของสิ่งมีชีวิตหนึ่งๆ เรียกว่า **จีโนม** (genome) จากการศึกษาสิ่งมีชีวิตบางสปีชีส์พบว่า สิ่งมีชีวิตแต่ละสปีชีส์มีขนาดของจีโนม จำนวนโครโมโซม และจำนวนยีนแตกต่างกัน ดังตาราง 4.2 มีการศึกษาจีโนมเพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งของยีน ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน และหน้าที่ของยีนเพื่อนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ

ตาราง 4.2 ขนาดของจีโนม จำนวนโครโมโซม และจำนวนยีนของสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ต่างๆ

สิ่งมีชีวิต	ขนาดของจีโนม โดยประมาณ (ล้านคู่เบส)	จำนวน โครโมโซม	จำนวนยีน โดย ประมาณ
มนุษย์ (<i>Homo sapiens</i>)	3,000	46	25,000
หนู (<i>Mus musculus</i>)	2,900	40	25,000
ข้าว (<i>Oryza sativa</i> L. ssp. <i>japonica</i>)	389	24	37,000
อะราบิโดพซิส (<i>Arabidopsis thaliana</i>)	135	10	25,000
ยีสต์ (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	12	32	6,000
แบคทีเรีย (<i>Escherichia coli</i>)	4.6	1	3,200

- ? ยูแคริโอตเซลล์เดียวและหลายเซลล์มีขนาดของจีโนมและจำนวนยีนที่แตกต่างกันหรือไม่อย่างไร
- ? เพราะเหตุใดมนุษย์จึงมีจำนวนยีนมากกว่ายีสต์และแบคทีเรีย



รู้หรือไม่

แต่เดิมจีโนมหมายถึง ข้อมูลทางพันธุกรรมทั้งหมดของสิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่ง โดยใช้กับไวรัสและโพรแคริโอตส่วนใหญ่ ยูแคริโอตนั้น จีโนมหมายถึงข้อมูลทางพันธุกรรมของเซลล์แฮพลอยด์ แต่ในปัจจุบัน จีโนมอาจหมายถึงสารพันธุกรรมทั้งหมดภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ซึ่งประกอบด้วยสารพันธุกรรมในนิวเคลียส ไมโทคอนเดรีย และคลอโรพลาสต์



ความรู้เพิ่มเติม



Arabidopsis thaliana เป็นพืชต้นแบบในการศึกษาพันธุกรรมพืช เนื่องจากมีลักษณะเหมาะสมในการศึกษา คือ เป็นพืชดอกขนาดเล็ก เจริญเติบโตเร็ว วงจรชีวิตสั้น จีโนมมีขนาดเล็กประมาณ 135 ล้านคู่เบส และทราบลำดับนิวคลีโอไทด์ของจีโนมแล้ว

4.2 สารพันธุกรรม

4.2.1 การค้นพบสารพันธุกรรม

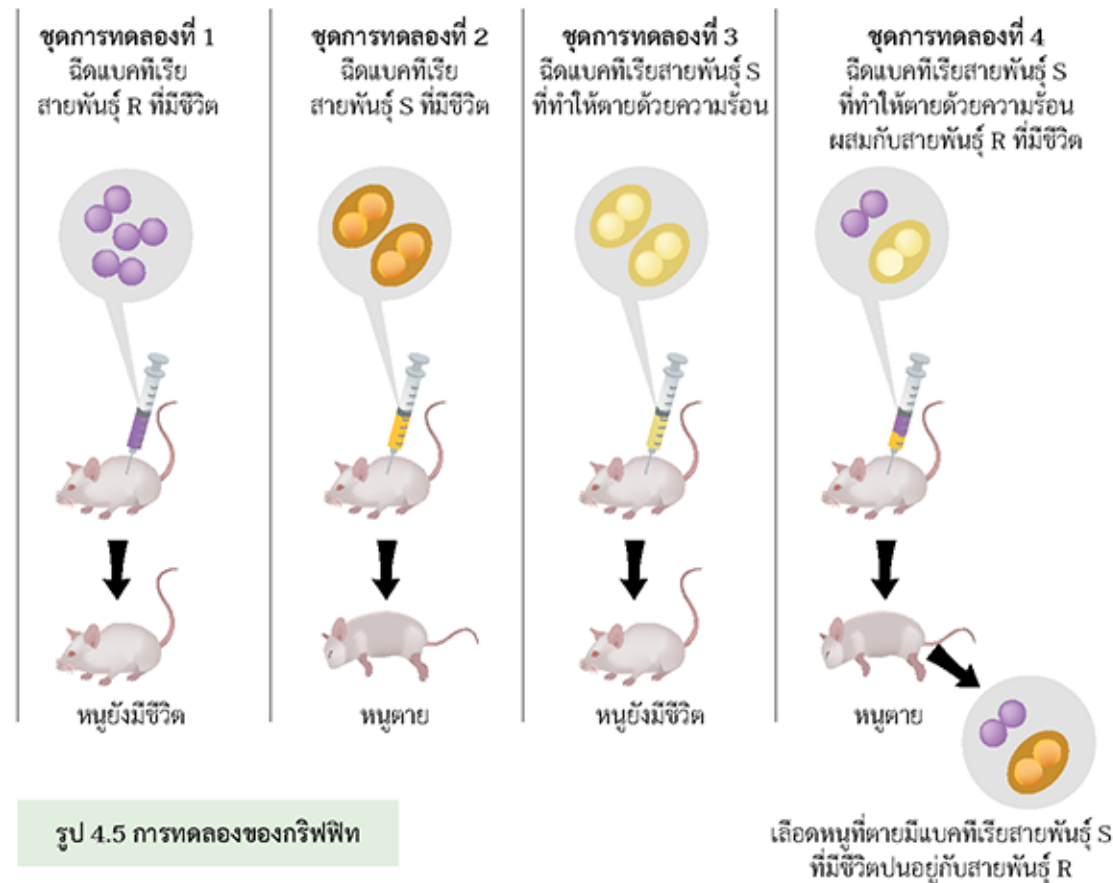
นักวิทยาศาสตร์ได้ใช้วิธีการทางวิทยาศาสตร์ศึกษาเกี่ยวกับสารพันธุกรรม ดังนี้

ในปี พ.ศ. 2412 ฟรีดริช มีเชอร์ (Friedrich Miescher) แพทย์ชาวสวิส ได้ศึกษาส่วนประกอบในนิวเคลียสของเซลล์เม็ดเลือดขาวที่ติดมากับผ้าพันแผล โดยนำมาย่อยเอาโปรตีนออกด้วยเอนไซม์เพปซิน พบว่าเอนไซม์นี้ไม่สามารถย่อยสลายสารชนิดหนึ่งที่อยู๋ภายในนิวเคลียสได้ เมื่อนำสารนี้มาวิเคราะห์ทางเคมีก็พบว่า มีธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ ต่อมาเมื่อค้นพบว่าสารนี้มีสมบัติเป็นกรดจึงเรียกว่า กรดนิวคลีอิก

ในปี พ.ศ. 2457 มีการพัฒนาสีฟุคซิน (fuchsin) ที่สามารถย้อมติด DNA ได้เป็นสีแดง และเมื่อนำไปย้อมเซลล์ พบว่าสีจะติดที่นิวเคลียสและรวมตัวหนาแน่นที่โครโมโซม จึงสรุปว่า DNA อยู่ที่โครโมโซม

การค้นพบว่า DNA อยู่ที่โครโมโซม ทำให้นักวิทยาศาสตร์คิดว่า DNA เป็นสารพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตต่างๆ อย่างไรก็ตามยังมีนักวิทยาศาสตร์ที่คิดว่า โปรตีนน่าจะเป็นสารพันธุกรรม เนื่องจากโปรตีนประกอบด้วยกรดแอมิโน 20 ชนิด การเรียงลำดับกรดแอมิโนแบบต่างๆ น่าจะทำให้มีโปรตีนชนิดต่างๆ มากพอที่จะควบคุมลักษณะของสิ่งมีชีวิตอย่างครบถ้วน นักวิทยาศาสตร์พิสูจน์ได้อย่างไรว่า DNA หรือโปรตีนเป็นสารพันธุกรรมที่ควบคุมลักษณะของสิ่งมีชีวิต

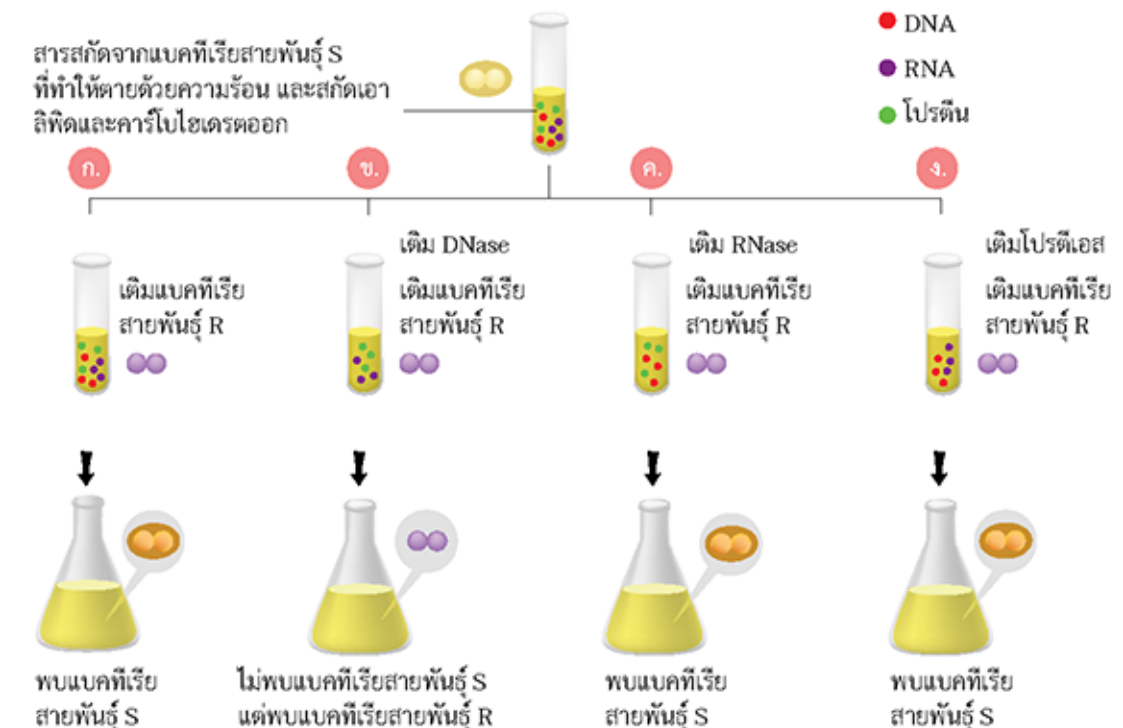
ในปี พ.ศ. 2471 เฟรเดอริก กริฟฟิท (Frederick Griffith) แพทย์ชาวอังกฤษ ทำการทดลองโดยฉีดแบคทีเรีย *Streptococcus pneumoniae* ที่ทำให้เกิดโรคปอดบวมเข้าไปในหนู แบคทีเรียที่ฉีดเข้าไปนี้มี 2 สายพันธุ์ คือ สายพันธุ์ R เป็นสายพันธุ์ที่มีผิวขรุขระ (rough) เพราะไม่มีแคปซูล (capsule) ห่อหุ้มเซลล์ ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่ไม่ทำให้เกิดโรคปอดบวม กับสายพันธุ์ S เป็นสายพันธุ์ที่มีผิวเรียบ (smooth) เพราะมีแคปซูลห่อหุ้มเซลล์ ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่ทำให้เกิดโรคปอดบวมรุนแรงทำให้หนูตายได้ ดังรูป 4.5



- ? ถ้าทำการทดลองเฉพาะชุดการทดลองที่ 3 และ 4 โดยที่ไม่มีชุดการทดลองที่ 1 และ 2 จะสามารถสรุปผลได้หรือไม่ เพราะเหตุใด
- ? ถ้านำเลือดของหนูจากชุดการทดลองที่ 2 และ 3 มาตรวจ จะพบแบคทีเรียหรือไม่ อย่างไร
- ? ในชุดการทดลองที่ 4 พบทั้งแบคทีเรียสายพันธุ์ S และสายพันธุ์ R ในเลือดของหนูที่ตาย แบคทีเรียสายพันธุ์ใดที่ทำให้หนูตาย เพราะเหตุใด

กริฟฟิทได้รายงานว่ามีสารบางอย่างจากแบคทีเรียสายพันธุ์ S ที่ทำให้ตายด้วยความร้อนได้เข้าไปยังแบคทีเรียสายพันธุ์ R บางเซลล์และทำให้แบคทีเรียสายพันธุ์ R เปลี่ยนแปลงเป็นสายพันธุ์ S ที่มีชีวิต สายพันธุ์ S เหล่านี้ยังสามารถถ่ายทอดลักษณะไปสู่รุ่นลูกหลานได้ อย่างไรก็ตามกริฟฟิทยังไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าสารนั้นคืออะไร

ในปี พ.ศ. 2487 นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน 3 คน คือ ออสวอลด์ แอเวอรี (Oswald Avery) คอลิน แมคลอยด์ (Colin MacLeod) และแมคลิน แมคคาร์ที (Maclyn McCarty) ทำการทดลองต่อจากกริฟฟิท เพื่อตรวจสอบว่า DNA RNA หรือโปรตีนเป็นสารที่เปลี่ยนพันธุกรรมของแบคทีเรียจากสายพันธุ์ R ให้เป็นแบคทีเรียสายพันธุ์ S โดยนำแบคทีเรียสายพันธุ์ S มาทำให้ตายด้วยความร้อน แล้วสกัดเอาลิพิดและคาร์โบไฮเดรตออก จากนั้นนำสารสกัดส่วนที่เหลือใส่ในหลอดทดลอง 4 หลอด เติมน้ำ เติมน้ำเกลือ และเอนไซม์ DNase เพื่อย่อย DNA เติมน้ำ เติมน้ำเกลือ และเอนไซม์ RNase เพื่อย่อย RNA หรือเติมน้ำ เติมน้ำเกลือ และเอนไซม์ โปรตีเอส (protease) เพื่อย่อยโปรตีน ดังการทดลองในรูป 4.6 ปั่นไว้ระยะเวลาหนึ่ง แล้วนำไปเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อตรวจสอบแบคทีเรียที่เกิดขึ้น



รูป 4.6 การทดลองของแอเวอรี แมคลอยด์ และแมคคาร์ที

? ถ้าเพิ่มชุดการทดลอง จ. ที่เติมเอนไซม์ทั้ง 3 ชนิด คือ DNase RNase และโปรตีเอสลงในหลอดทดลองที่มีแบคทีเรียสายพันธุ์ R แล้วนำไปเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ เมื่อตรวจสอบจะพบแบคทีเรียสายพันธุ์ใด เพราะเหตุใด

จากผลการทดลองของแอเวอรีและคณะ ปรากฏว่าในชุดการทดลอง ก. ซึ่งเป็นชุดควบคุมที่มีส่วนผสมของแบคทีเรียสายพันธุ์ R กับสารสกัดจากแบคทีเรียสายพันธุ์ S ที่ทำให้ตายด้วยความร้อน พบแบคทีเรียสายพันธุ์ S แต่ชุดการทดลอง ข. ในภาวะที่มีเอนไซม์ DNase จะไม่พบแบคทีเรียสายพันธุ์ S ที่เกิดขึ้นใหม่ ในขณะที่ส่วนผสมของแบคทีเรียสายพันธุ์ R กับสารสกัดจากแบคทีเรียสายพันธุ์ S ของชุดการทดลอง ค. ในภาวะที่มีเอนไซม์ RNase และชุดการทดลอง ง. ในภาวะที่มีเอนไซม์โปรตีเอสจะพบแบคทีเรียสายพันธุ์ S เกิดขึ้น การทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นว่า DNA คือสารที่เปลี่ยนพันธุกรรมของแบคทีเรียจากสายพันธุ์ R ให้เป็นแบคทีเรียสายพันธุ์ S แอเวอรีและคณะจึงสรุปว่ากรดนิวคลีอิกชนิด DNA เป็นสารพันธุกรรม ไม่ใช่โปรตีนดังที่เคยเชื่อกันมาก่อนหน้านี้

นอกจากนี้ยังมีการทดลองอื่นๆ ที่ตามมา ซึ่งยืนยันตรงกันว่า DNA เป็นสารพันธุกรรม และต่อมาได้มีการค้นพบว่า DNA เป็นสารพันธุกรรมของไวรัสและสิ่งมีชีวิตทั่วไปทั้งแบคทีเรีย โปรทิสต์ พืช สัตว์ และมนุษย์ อย่างไรก็ตามไวรัสบางชนิดมี RNA เป็นสารพันธุกรรม เช่น ไวรัสที่ทำให้เกิดโรคใบด่างในใบยาสูบ ไวรัสที่เป็นสาเหตุของโรคโปลิโอ เอชไอวี ไข้หวัดนก และโรคมะเร็งบางชนิด

ดังนั้นจึงถือได้ว่าผลการทดลองของกริฟฟิทกับผลการทดลองของแอเวอรีและคณะเป็นจุดเริ่มต้นที่นำไปสู่ข้อสรุปที่สำคัญ คือ DNA เป็นสารพันธุกรรมที่ทำหน้าที่ถ่ายทอดลักษณะของสิ่งมีชีวิตไปสู่รุ่นต่อๆ ไปนั้น และจากการศึกษาของนักวิทยาศาสตร์ในระยะต่อมาพบว่า DNA มีทั้งส่วนที่ควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมเรียกว่า ยีน และส่วนที่ไม่ได้ควบคุมลักษณะทางพันธุกรรม



ชวนคิด

DNA ส่วนที่ไม่ใช่ยีน ทำหน้าที่อะไรบ้าง และมนุษย์สามารถใช้ประโยชน์จาก DNA ส่วนนี้ได้หรือไม่ อย่างไร



การเชื่อมโยงความรู้

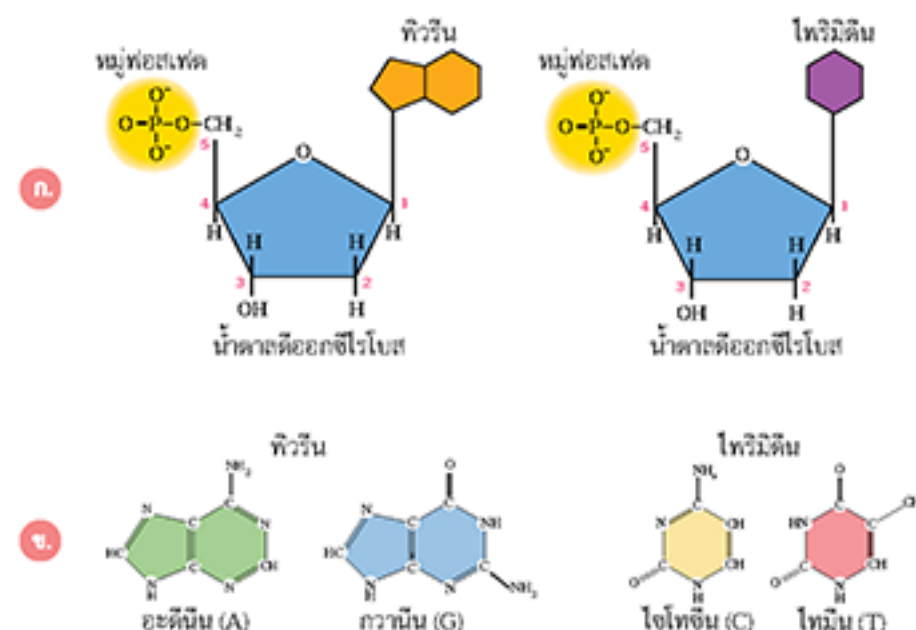
หนังสือเรียนชีววิทยา เล่ม 1 เรื่องกรดนิวคลีอิก

4.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของ DNA

DNA เป็นกรดนิวคลีอิกชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ (polymer) สายยาวประกอบด้วยหน่วยย่อยหรือมอนอเมอร์ (monomer) ที่เรียกว่า นิวคลีโอไทด์ (nucleotide)

นิวคลีโอไทด์ ประกอบด้วยหน่วยย่อย 3 ส่วน ได้แก่ น้ำตาลดีออกซีไรโบส ในโครงจีสเบส และหมู่ฟอสเฟต ซึ่งทั้ง 3 ส่วนจะประกอบกันโดยมีน้ำตาลดีออกซีไรโบสเป็นแกนหลัก มีไนโตรจีนัสเบสต่ออยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และหมู่ฟอสเฟตต่ออยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 5 ในโครงจีสเบสใน DNA แบ่งนิวคลีโอไทด์ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

- **พิวรีน** (purine) มีโครงสร้างเป็นวงซ้อนกัน 2 วง พิวรีน มี 2 ชนิด คือ อะดีนีน (A) กวานีน (G)
- **ไพริมิดีน** (pyrimidine) มีโครงสร้างเป็นวง 1 วง ไพริมิดีนมี 2 ชนิด คือ ไซโทซีน (C) และไทมีน (T) ดังรูป 4.7



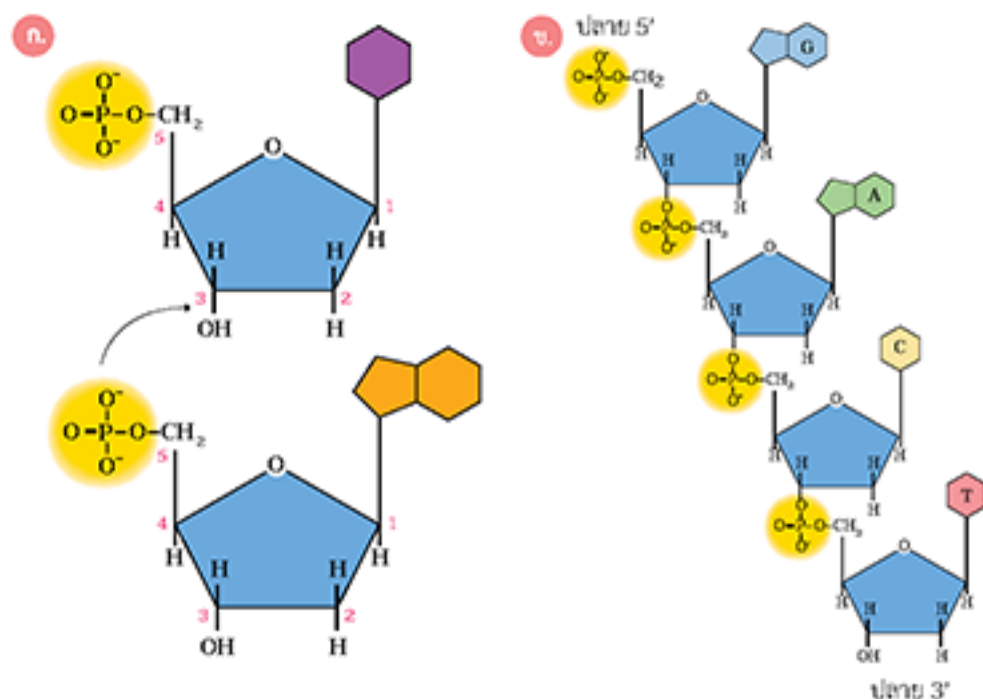
รูป 4.7 นิวคลีโอไทด์

ก. โครงสร้าง

ข. ไนโตรจีนัสเบส

? นิวคลีโอไทด์แต่ละชนิดเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร

นิวคลีโอไทด์เชื่อมต่อกันด้วยพันธะฟอสโฟไดเอสเตอร์ (phosphodiester bond) ระหว่างหมู่ฟอสเฟตซึ่งอยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 5 ของน้ำตาลในนิวคลีโอไทด์หนึ่งกับหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งตั้งอยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ของน้ำตาลในอีกนิวคลีโอไทด์หนึ่ง ดังรูป 4.8 ก. เมื่อนิวคลีโอไทด์หลายโมเลกุลมาเชื่อมต่อกันจะเกิดเป็นสายพอลินิวคลีโอไทด์ ดังรูป 4.8 ข.



รูป 4.8 พอลินิวคลีโอไทด์

ก. การเชื่อมต่อระหว่างนิวคลีโอไทด์

ข. สายพอลินิวคลีโอไทด์ที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างนิวคลีโอไทด์

จากรูปจะเห็นว่าที่ปลายด้านหนึ่งของสายพอลินิวคลีโอไทด์มีหมู่ฟอสเฟตอิสระต่อกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 5 ของน้ำตาลคือออกซีไรโบส เรียกปลายด้านนี้ว่า ปลาย 5' และอีกปลายด้านหนึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลต่อกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ของน้ำตาลคือออกซีไรโบส เรียกปลายด้านนี้ว่า ปลาย 3'

ปี พ.ศ. 2492 เออร์วิน ชาร์กาฟฟ์ (Erwin Chargaff) นักชีวเคมีชาวอเมริกัน ได้วิเคราะห์ปริมาณเบสที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของโมเลกุล DNA ในสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ต่างๆ พบว่า DNA ที่สกัดจากสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ต่างๆ มีอัตราส่วนของเบส 4 ชนิดแตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง 4.3

ตาราง 4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเบสในโมเลกุล DNA ในเซลล์ร่างกายของสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ต่างๆ

สิ่งมีชีวิต	ชนิดของเบส (ร้อยละ)				อัตราส่วน	
	อะดีนีน (A)	ไทมีน (T)	กวานีน (G)	ไซโทซีน (C)	A : T	G : C
อีสต์	31.3	32.9	18.7	17.1	0.95	1.09
เม่นทะเล	32.8	32.1	17.7	18.4	1.02	1.02
ปลาแซลมอน	29.7	29.1	20.8	20.4	1.02	1.02
หนู	28.6	28.4	21.4	21.5	1.01	1.00
มนุษย์ (โทมัส)	29.3	30.0	20.7	20.0	0.98	1.04

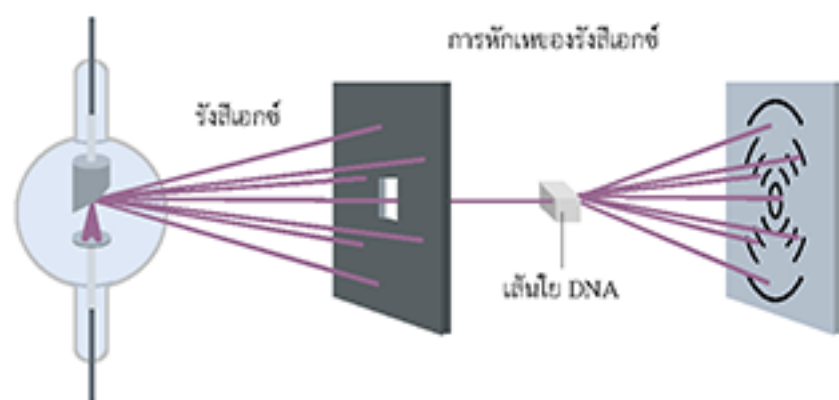
- ? ปริมาณเบส 4 ชนิด ใน DNA ของสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ต่างๆ สัมพันธ์กันอย่างไร
- ? อัตราส่วนของ A + T และ G + C ในโมเลกุลของ DNA ของสิ่งมีชีวิตแต่ละสปีชีส์มีค่าใกล้เคียงกันหรือไม่
- ? อัตราส่วนของ A + G และ T + C ในโมเลกุลของ DNA ของสิ่งมีชีวิตแต่ละสปีชีส์มีค่าใกล้เคียงกันหรือไม่

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของชาร์กาฟฟ์แสดงให้เห็นว่า ในสิ่งมีชีวิตแต่ละสปีชีส์จะมีปริมาณของเบส 4 ชนิดแตกต่างกัน แต่มีปริมาณของ A ใกล้เคียงกับ T และปริมาณของ G ใกล้เคียงกับ C เสมอ โดยสิ่งมีชีวิตจะมีอัตราส่วนระหว่าง A : T และ G : C ใกล้เคียงกับ 1 จากอัตราส่วนดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า DNA จะต้องมีการจัดเรียงตัวของนิวคลีโอไทด์ 4 ชนิด ที่ทำให้จำนวนของ A เท่ากับ T และ G เท่ากับ C

4.2.3 โครงสร้างของ DNA

ปี พ.ศ. 2494-2495 มอริซ วิลคินส์ (Maurice Wilkins) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ศึกษาโครงสร้างของ DNA ของสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ต่าง ๆ โดยใช้เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) ด้วยการฉายรังสีเอกซ์ผ่านเส้นใย DNA การหักเหของรังสีเอกซ์ทำให้เกิดภาพบนแผ่นฟิล์ม

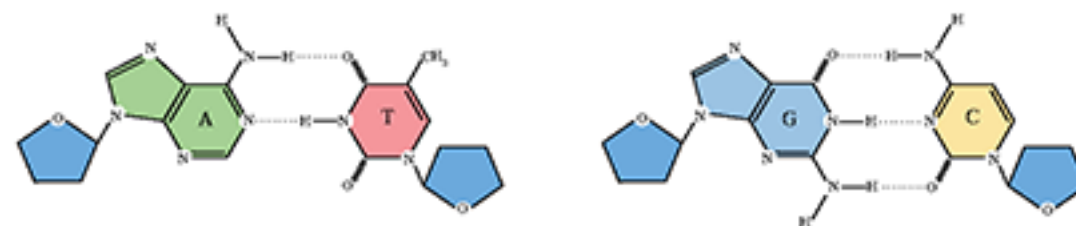
ปี พ.ศ. 2495 โรซาลินด์ แฟรงคลิน (Rosalind Franklin) นักเคมีชาวอังกฤษ และเรย์มอนด์ กอสลิง (Raymond Gosling) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ใช้เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน และได้ภาพถ่ายที่ชัดเจน ดังรูป 4.9 ซึ่งภาพถ่ายนี้แสดงว่า DNA ประกอบด้วยพอลินิวคลีโอไทด์ 2 สาย มีลักษณะเป็นเกลียว โดยเกลียวแต่ละรอบมีระยะห่างเท่า ๆ กัน รวมทั้งทำให้ทราบขนาดความกว้างและความห่างของเกลียวแต่ละรอบ จากผลการศึกษานี้ทำให้มีความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างทางกายภาพของ DNA ที่ชัดเจนขึ้น



รูป 4.9 ภาพบนแผ่นฟิล์มที่เกิดจากการหักเหของรังสีเอกซ์ผ่านเส้นใย DNA

ในปี พ.ศ. 2496 เจมส์ วอตสัน (James Watson) นักชีวเคมีชาวอเมริกัน และฟรานซิส คริก (Francis Crick) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ได้เสนอแบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลของ DNA โดยใช้ความรู้จากข้อมูลปริมาณเบสที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของโมเลกุล DNA และภาพจากเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของเส้นใย DNA

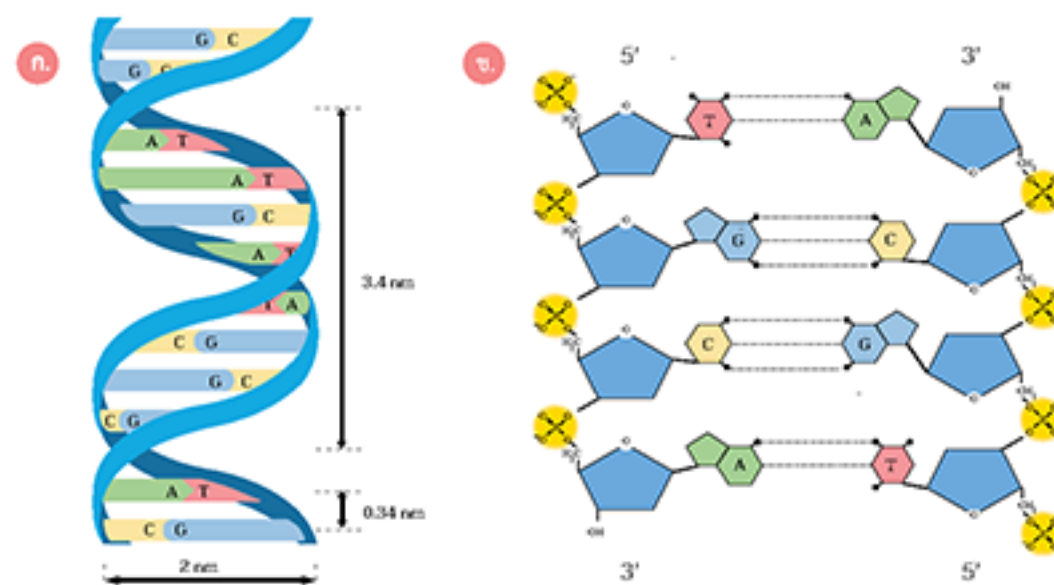
DNA ประกอบด้วยพอลินิวคลีโอไทด์ 2 สาย ซึ่งติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างเบสจากพอลินิวคลีโอไทด์สายหนึ่งกับเบสจากพอลินิวคลีโอไทด์อีกสายหนึ่ง โดย A คู่กับ T และ C คู่กับ G เสมอ เรียกว่า **เบสคู่สม** (complementary base pair) ดังรูป 4.10



รูป 4.10 A สร้างพันธะไฮโดรเจน 2 พันธะกับ T และ G สร้างพันธะไฮโดรเจน 3 พันธะกับ C

? แรงยึดระหว่างคู่เบส A กับ T และคู่เบส G และ C คูใดมีความแข็งแรงมากกว่ากัน เพราะเหตุใด

DNA มีโครงสร้างเป็นเกลียวคู่ (double helix) มีทิศทางเวียนขวาลักษณะคล้ายบันไดเวียน โดยมีน้ำตาลดีออกซีไรโบสจับกับหมู่ฟอสเฟตเป็นราวบันได และบันไดแต่ละขั้นคือ เบส 1 คู่เบส โดยโครงสร้างเกลียวคู่มีความกว้าง 2 nm เกลียวแต่ละรอบห่างกัน 3.4 nm และแต่ละคู่เบสมีระยะห่างกัน 0.34 nm โดยใน 1 เกลียวของ DNA ประกอบด้วยคู่เบส 10 คู่ ดังรูป 4.11 ก. โดยพอลินิวคลีโอไทด์ 2 สายที่เข้ามาคู่กันนั้น จะมีทิศทางตรงกันข้าม (antiparallel) ดังรูป 4.11 ข.



รูป 4.11 โครงสร้างของ DNA

ก. โครงสร้างเกลียวคู่ของ DNA

ข. องค์ประกอบทางเคมีของ DNA



กิจกรรม 4.1 แบบจำลอง DNA

จุดประสงค์

1. สร้างแบบจำลอง DNA จากวัสดุต่าง ๆ
2. เปรียบเทียบจำนวนนิวคลีโอไทด์และชนิดของเบสจากแบบจำลอง DNA

วัสดุและอุปกรณ์

กระดาษ ลูกปัด ผัก ผลไม้ หรือวัสดุอื่น ๆ ที่สามารถหาได้ในท้องถิ่น

วิธีการทำกิจกรรม

1. กำหนดความยาวของ DNA ที่มี 15-20 นิวคลีโอไทด์ และกำหนดชนิดของเบสที่เป็นองค์ประกอบของนิวคลีโอไทด์
2. สร้างแบบจำลอง DNA ที่สอดคล้องกับจำนวนนิวคลีโอไทด์และชนิดของเบสที่กำหนดไว้จากข้อ 1 โดยใช้วัสดุต่าง ๆ เช่น กระดาษ ลูกปัด ผัก ผลไม้ หรือวัสดุอื่น ๆ ที่สามารถหาได้ในท้องถิ่น
3. นำเสนอผลงานและเปรียบเทียบจำนวนนิวคลีโอไทด์และชนิดของเบสที่เหมือนกันหรือแตกต่างกันของแต่ละกลุ่ม



คำถามท้ายกิจกรรม

1. แบบจำลอง DNA ของแต่ละกลุ่มมีจำนวนนิวคลีโอไทด์เท่ากันหรือแตกต่างกันอย่างไร และถ้ามีจำนวนนิวคลีโอไทด์เท่ากัน การจัดเรียงตัวของเบสในแต่ละพอลินิวคลีโอไทด์ใน DNA จะเหมือนกันหรือไม่ อย่างไร
2. ถ้า DNA สายเดี่ยวประกอบด้วยนิวคลีโอไทด์ 2 โมเลกุลเรียงต่อกัน จะสามารถจัดเรียงเบสให้แตกต่างกันได้อย่างไรบ้าง

ลำดับนิวคลีโอไทด์ของ DNA ที่เกิดจากเบส 4 ชนิดเรียงต่อกันก็มีหลายรูปแบบ เช่น ถ้า DNA ประกอบด้วยนิวคลีโอไทด์ 2 โมเลกุลเรียงต่อกัน จะสามารถจัดเรียงให้แตกต่างกันได้ 16 แบบ (4^2) ดังนั้นถ้า DNA ประกอบด้วยนิวคลีโอไทด์จำนวนมาก ก็จะมีรูปแบบของการเรียงลำดับนิวคลีโอไทด์ที่แตกต่างกันได้หลายรูปแบบ ขนาดของจีโนมในสิ่งมีชีวิตแต่ละสปีชีส์อาจประกอบด้วยนิวคลีโอไทด์นับล้านคู่จึงทำให้มีรูปแบบของ DNA ได้อย่างหลากหลาย ซึ่งน่าจะมากพอที่จะทำหน้าที่ควบคุมหรือกำหนดลักษณะพันธุกรรมต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตได้ DNA กำหนดและควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมได้อย่างไร

4.3 สมบัติของสารพันธุกรรม

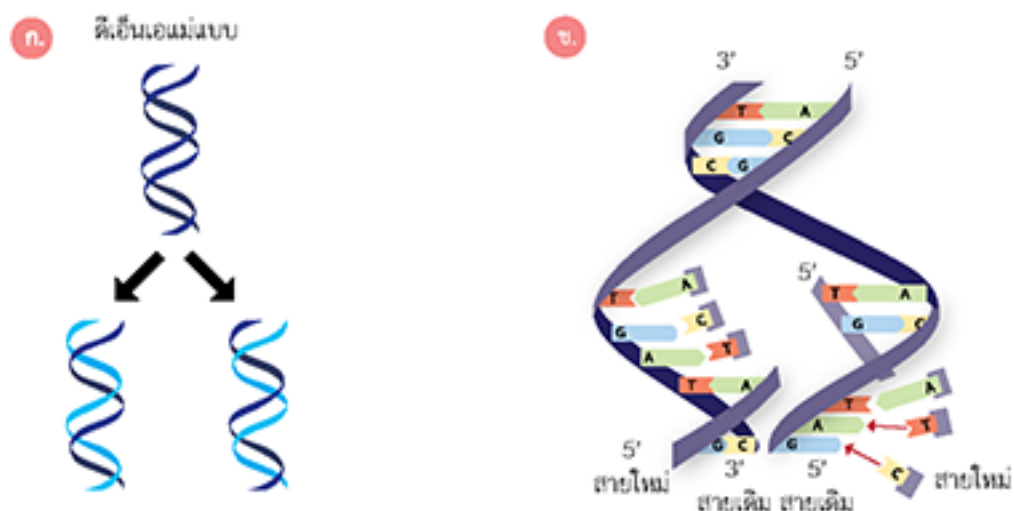
สารพันธุกรรมมีสมบัติสำคัญคือ สามารถเพิ่มจำนวนได้โดยมีลักษณะเหมือนเดิม สามารถถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากรุ่นพ่อแม่ไปยังรุ่นลูกได้ สามารถควบคุมให้เซลล์สังเคราะห์สารต่าง ๆ เพื่อแสดงลักษณะทางพันธุกรรมให้ปรากฏ และอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้บ้าง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจก่อให้เกิดลักษณะทางพันธุกรรมที่แตกต่างไปจากเดิม และเป็นส่วนหนึ่งของการเกิดสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ใหม่

4.3.1 การจำลองดีเอ็นเอ

ก่อนที่เซลล์จะมีการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิสหรือไมโอซิส จะมีการจำลอง DNA เกิดขึ้นในระยะ S ของระยะอินเตอร์เฟสซึ่งเป็นระยะที่เซลล์มีการสังเคราะห์ดีเอ็นเอเพิ่มขึ้นอีกชุดหนึ่ง

ในปี พ.ศ. 2496 วอลตันและคริกได้ตีพิมพ์บทความเรื่องโครงสร้าง DNA และเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการจำลองดีเอ็นเอ (DNA replication) ต่อมาเมื่อมีการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า ในการจำลองดีเอ็นเอเริ่มจากพอลินิวคลีโอไทด์ 2 สายแยกออกจากกัน โดยพอลินิวคลีโอไทด์แต่ละสายทำหน้าที่เป็นดีเอ็นเอแม่แบบ (DNA template) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการจำลองดีเอ็นเอจะมีการเพิ่มโมเลกุลของ DNA จาก 1 โมเลกุล เป็น 2 โมเลกุล แต่ละโมเลกุลมีพอลินิวคลีโอไทด์สายเดิม 1 สาย และสายใหม่ 1 สาย เรียกวิธีการนี้ว่า การจำลองแบบกึ่งอนุรักษ (semiconservative replication) ดังรูป 4.12 ก.

โดยในการสร้าง DNA สายใหม่มีการนำนิวคลีโอไทด์อิสระเข้ามาต่อหางปลาย 3' ของ DNA ที่กำลังสร้างอยู่ จึงเรียกว่าเป็นการสร้าง DNA ในทิศทางจากปลาย 5' ไปปลาย 3' และนิวคลีโอไทด์ที่เข้ามาใหม่นั้นจะมีเบสคู่สมกับเบสในสายดีเอ็นเอแม่แบบ ดังรูป 4.12 ข. ทำให้ DNA ที่สังเคราะห์ใหม่เหมือนกับ DNA โมเลกุลเดิม

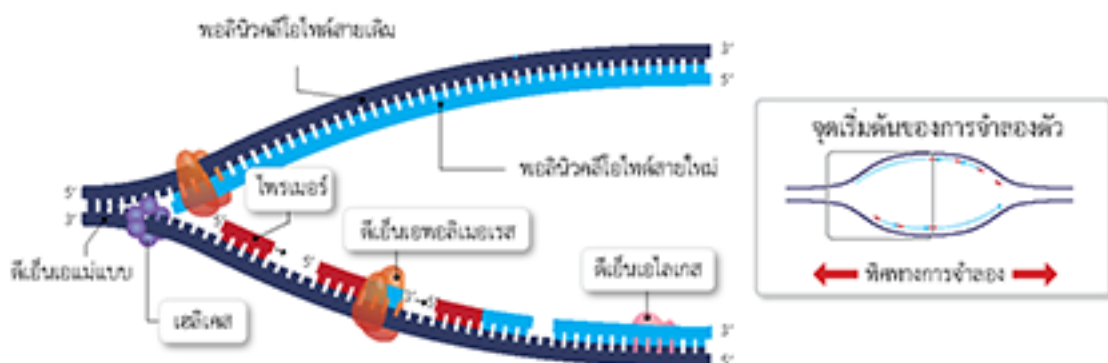


รูป 4.12 การจำลองดีเอ็นเอ

ก. การจำลองแบบกึ่งอนุรักษ์

ข. นิวคลีโอไทด์เข้าต่อทางด้านปลาย 3' ของสายพอลินิวคลีโอไทด์ที่กำลังสร้าง

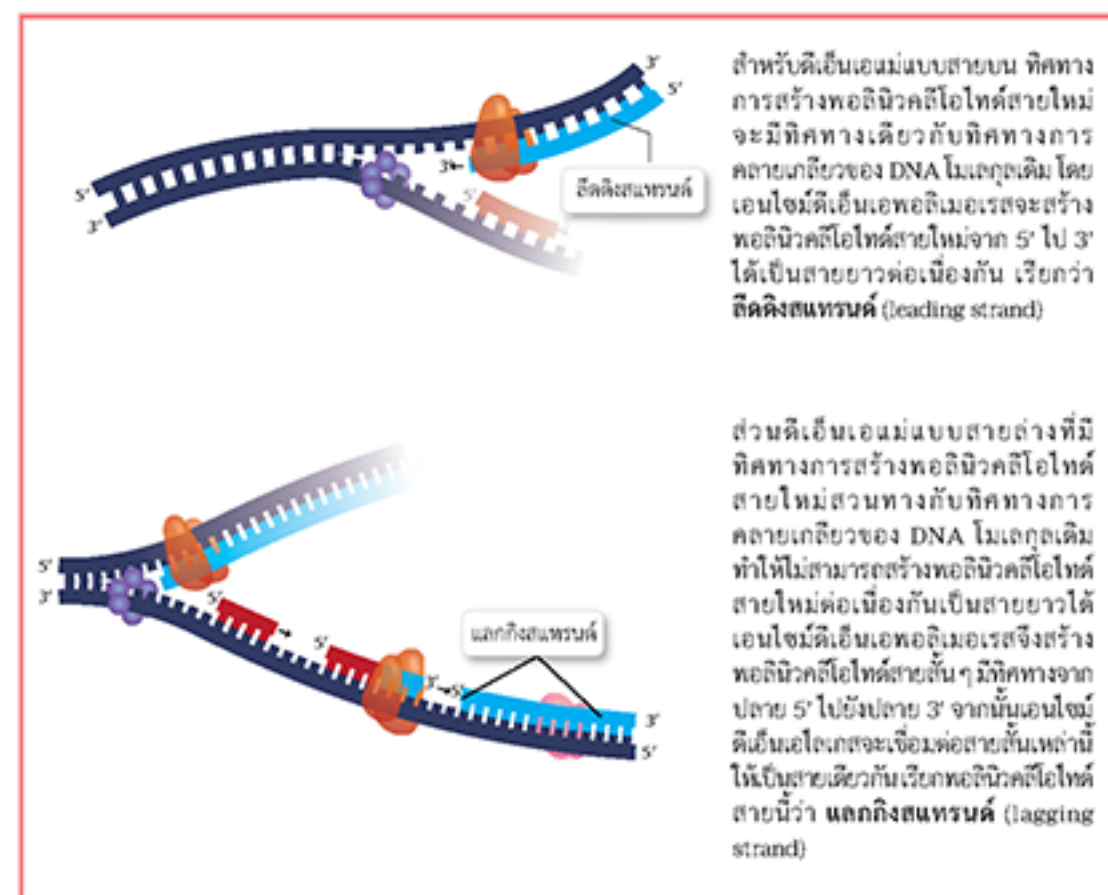
ในขั้นตอนการจำลองดีเอ็นเอ จะมีโปรตีนมากระตุ้นให้ DNA คลายตัวที่ตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการจำลองตัว (origin of replication) ซึ่งการจำลองดีเอ็นเอจะเกิดขึ้นทั้ง 2 ทิศทาง เอนไซม์เฮลิเคส (helicase) สลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างคู่เบส ทำให้พอลินิวคลีโอไทด์ 2 สายแยกออกจากกัน พอลินิวคลีโอไทด์แต่ละสายทำหน้าที่เป็นแม่แบบสำหรับการสังเคราะห์ DNA โดยมีไพรเมอร์มาเกาะในตำแหน่งที่เป็นเบสคู่สมเป็นจุดเริ่มต้นของการสร้างพอลินิวคลีโอไทด์สายใหม่ และเอนไซม์ดีเอ็นเอไลเกส (DNA ligase) ทำหน้าที่เชื่อมต่อพอลินิวคลีโอไทด์สายสั้น ๆ ดังรูป 4.13



รูป 4.13 การจำลองดีเอ็นเอ

การสังเคราะห์พอลินิวคลีโอไทด์สายใหม่จะสร้างในทิศทางจากปลาย 5' ไปยังปลาย 3' เสมอ กระบวนการสังเคราะห์ DNA สายใหม่ทั้งสองสายเหมือนกันหรือไม่ อย่างไร

จากรูป 4.13 จะเห็นว่า ดีเอ็นเอแม่แบบสายบนมีปลาย 5' อยู่ทางซ้าย และปลาย 3' อยู่ทางขวา ส่วนอีกสายหนึ่งมีทิศทางตรงข้ามกัน แต่พอลินิวคลีโอไทด์ 2 สาย มีทิศทางการคลายเกลียวและแยกออกจากกันไปในทิศทางด้านซ้าย การสังเคราะห์ DNA สายใหม่ทั้ง 2 สาย จึงมีส่วนที่แตกต่างกัน ดังรูป 4.14



สำหรับดีเอ็นเอแม่แบบสายบน ทิศทางการสร้างพอลินิวคลีโอไทด์สายใหม่จะมีทิศทางเดียวกับทิศทางการคลายเกลียวของ DNA ไม่เกิดอุปสรรค โดยเอนไซม์ดีเอ็นเอพอลิเมอเรสจะสร้างพอลินิวคลีโอไทด์สายใหม่จาก 5' ไป 3' ได้เป็นสายยาวต่อเนื่องกัน เรียกว่า ลีดดิ้งสแตรนด์ (leading strand)

ส่วนดีเอ็นเอแม่แบบสายล่างที่มีทิศทางการสร้างพอลินิวคลีโอไทด์สายใหม่สวนทางกับทิศทางการคลายเกลียวของ DNA ไม่เกิดอุปสรรค ทำให้ไม่สามารถสร้างพอลินิวคลีโอไทด์สายใหม่ต่อเนื่องกันเป็นสายยาวได้ เอนไซม์ดีเอ็นเอพอลิเมอเรสจึงสร้างพอลินิวคลีโอไทด์สายสั้น ๆ มีทิศทางจากปลาย 5' ไปยังปลาย 3' จากนั้นเอนไซม์ดีเอ็นเอไลเกสจะเชื่อมต่อสายสั้นเหล่านี้ให้เป็นสายเดียวกันเรียกว่าพอลินิวคลีโอไทด์สายนี้ว่า แลกกิงสแตรนด์ (lagging strand)

รูป 4.14 การสังเคราะห์ลีดดิ้งสแตรนด์และแลกกิงสแตรนด์

? หากพิจารณาบริเวณด้านขวาของจุดเริ่มต้นของการจำลองตัว ซึ่ง DNA มีทิศทางการคลายเกลียวและแยกออกจากกันไปในทิศทางด้านขวา DNA สายบนจะยังคงเป็นแม่แบบสำหรับการสร้างลีดดิ้งสแตรนด์หรือไม่ อย่างไร

4.3.2 การควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมของ DNA

ในร่างกายของมนุษย์มีเซลล์หลายชนิดซึ่งมีรูปร่าง ลักษณะ และหน้าที่ที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีองค์ประกอบของเซลล์โดยเฉพาะโปรตีนที่แตกต่างกัน เช่น ฮีโมโกลบินในเซลล์เม็ดเลือดแดงทำหน้าที่ลำเลียงออกซิเจน นอกจากนี้เซลล์แต่ละชนิดจะสร้างโปรตีนที่แตกต่างกันด้วย เช่น ต่อมไทรอยด์ประกอบด้วยเซลล์หลายชนิด เช่น เซลล์ฟอลลิคูลาร์ที่มีโปรตีนสำหรับการสังเคราะห์ฮอร์โมนไทรอกซินทำหน้าที่ควบคุมอัตราเมแทบอลิซึมของร่างกาย เซลล์พาราฟอลลิคูลาร์ที่สร้างฮอร์โมนแคลซิโทนินทำหน้าที่กระตุ้นการสะสมแคลเซียมที่กระดูก ลดการดูดกลับแคลเซียมที่ไตและลดอัตราการดูดซึมแคลเซียมที่ลำไส้เล็ก ดังรูป 4.15 ดังนั้นโปรตีนจึงเกี่ยวข้องกับการแสดงลักษณะทางพันธุกรรมและการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต



รูป 4.15 ต่อมไทรอยด์

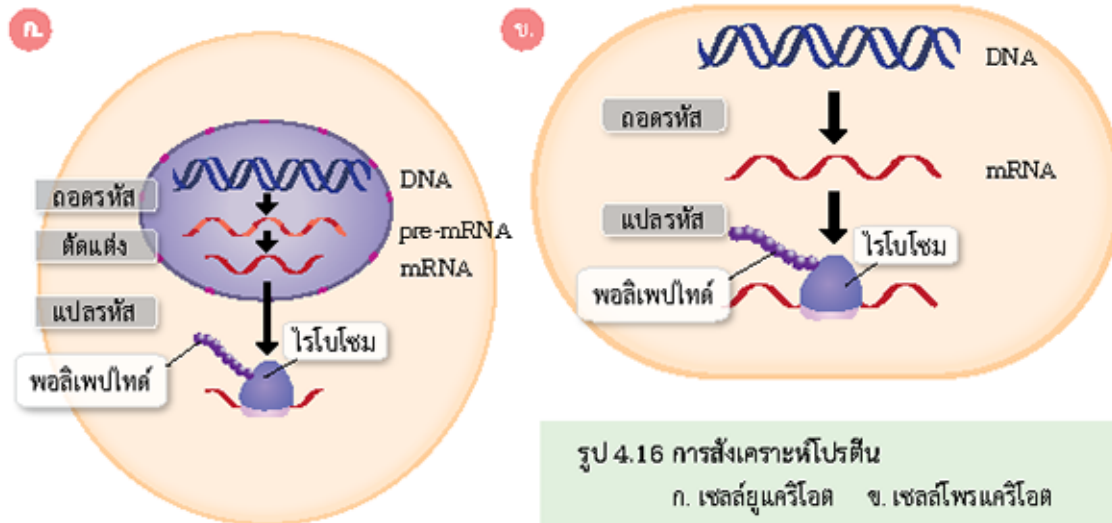
เซลล์ทั้งสองชนิดนี้ในต่อมไทรอยด์มี DNA ที่มีลำดับนิวคลีโอไทด์ที่เหมือนกัน เพราะเหตุใดเซลล์จึงมีรูปร่าง ลักษณะ และหน้าที่ที่แตกต่างกัน

เซลล์แต่ละชนิดมีการแสดงออกของยีนและการสังเคราะห์โปรตีนที่แตกต่างกัน โดยขึ้นกับกลไกต่าง ๆ ที่ควบคุมการแสดงออกของยีนนั้น ๆ ทำให้สิ่งมีชีวิตหลายเซลล์มีเซลล์ที่มีการแสดงออกหลายแบบเพื่อทำหน้าที่เฉพาะ แม้ว่าเซลล์เหล่านั้นจะมี DNA ที่มีลำดับนิวคลีโอไทด์ที่เหมือนกัน จากที่ทราบมาแล้วว่า ยีนเป็นช่วงของ DNA ที่ควบคุมลักษณะทางพันธุกรรม และโปรตีนเกี่ยวข้องกับการแสดงลักษณะทางพันธุกรรม DNA และโปรตีนมีความสัมพันธ์กันอย่างไร

สิ่งมีชีวิตพหุเซลล์มี DNA อยู่ในนิวเคลียส ส่วนการสังเคราะห์โปรตีนเกิดขึ้นในไซโทพลาซึม ดังนั้น DNA จึงไม่ได้เป็นแม่แบบในการสังเคราะห์โปรตีนโดยตรง จากการศึกษาของนักวิทยาศาสตร์พบว่า มีเมสเซนเจอร์อาร์เอ็นเอ (messenger RNA; mRNA) เป็นตัวนำข้อมูลทางพันธุกรรมจากยีนบน DNA ที่อยู่ในนิวเคลียสไปยังไซโทพลาซึม ซึ่งมีไรโบโซมทำหน้าที่ในการสังเคราะห์โปรตีน การนำข้อมูลทางพันธุกรรมจาก DNA ไปใช้ในการสังเคราะห์โปรตีน ประกอบด้วย

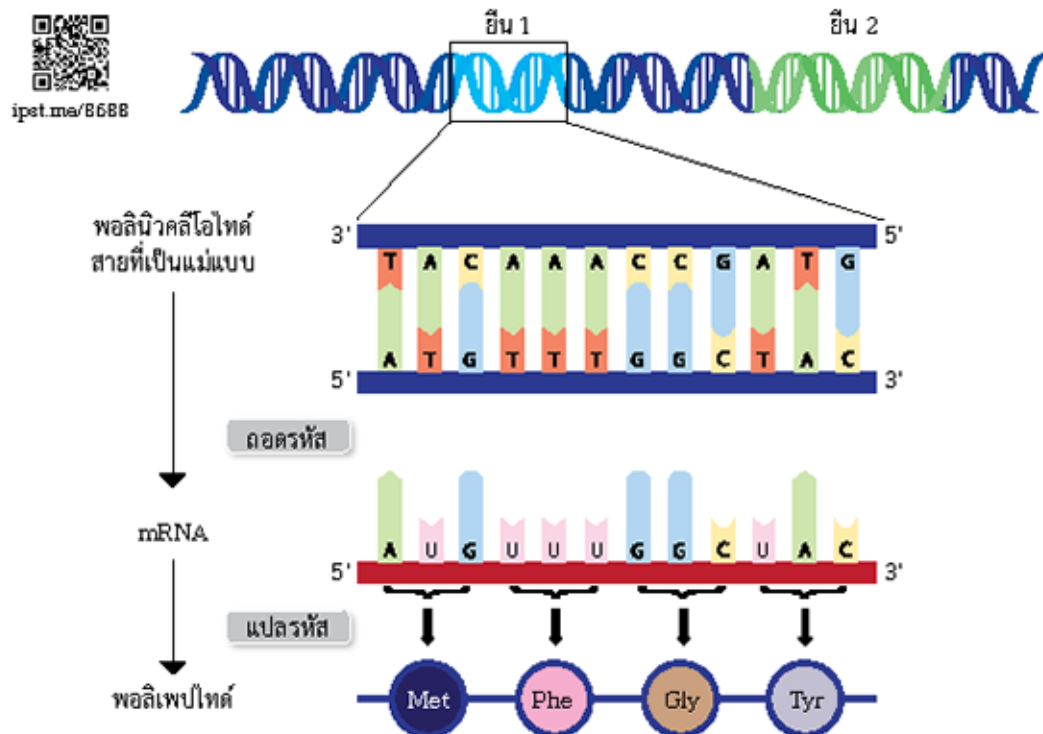
1. การสังเคราะห์ mRNA โดยใช้ DNA เป็นแม่แบบเรียกว่า การถอดรหัส (transcription)
2. การสังเคราะห์โปรตีนโดยไรโบโซมจากการอ่านรหัสพันธุกรรมที่เป็นลำดับเบสบน mRNA เรียกว่า การแปลรหัส (translation)

การสังเคราะห์โปรตีนในยูแคริโอตจะมีกระบวนการถอดรหัสภายในนิวเคลียสได้เป็น pre-mRNA หลังจากนั้นจะมีขั้นตอนการตัดแต่งอาร์เอ็นเอ (RNA processing) เพื่อให้ได้ mRNA ที่สมบูรณ์ ที่จะออกจากนิวเคลียสไปยังไซโทพลาซึมแล้วจึงเกิดการแปลรหัสต่อไป ส่วนในโพรแคริโอตจะมีกระบวนการถอดรหัสได้ mRNA และเกิดการแปลรหัสในไซโทพลาซึม ดังรูป 4.16



รูป 4.16 การสังเคราะห์โปรตีน
ก. เซลล์ยูแคริโอต ข. เซลล์โพรแคริโอต

การสังเคราะห์ mRNA ไม่ได้เกิดทั้งสาย DNA แต่จะเกิดเฉพาะบริเวณที่เป็นยีน ซึ่งมีตำแหน่งที่เป็นจุดเริ่มต้นของการสังเคราะห์โปรตีน ดังรูป 4.17

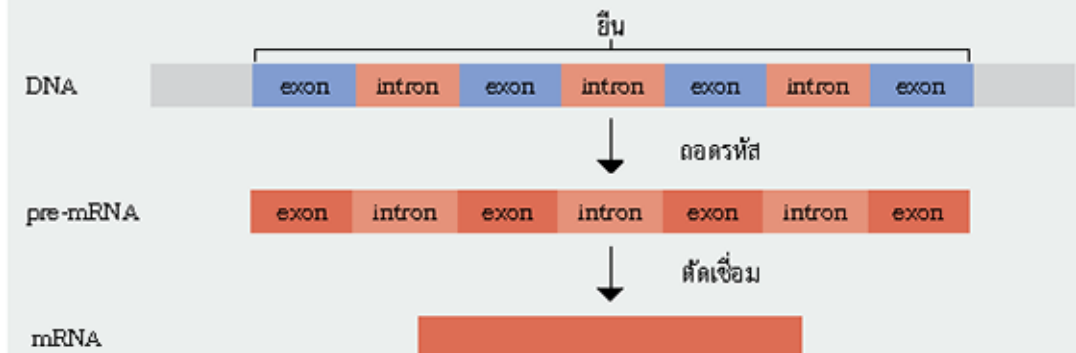


รูป 4.17 การสังเคราะห์โปรตีนโดยใช้ข้อมูลทางพันธุกรรมจาก DNA



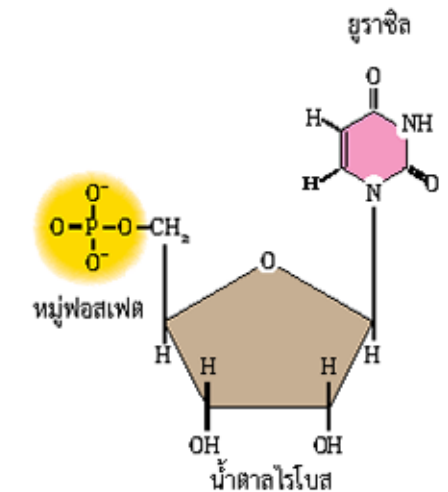
ความรู้เพิ่มเติม

ตัวอย่างหนึ่งของการตัดแต่งอาร์เอ็นเอในยูแคริโอต คือ การตัดเชื่อมอาร์เอ็นเอ (RNA splicing) เนื่องจากยีนของเซลล์ยูแคริโอตมีส่วนที่เป็นเอกซอน (exon) ซึ่งประกอบด้วยส่วนของลำดับนิวคลีโอไทด์ที่จะแปลรหัสและส่วนที่เกี่ยวข้องกับการแปลรหัส และส่วนที่เป็นอินตรอน (intron) ซึ่งเป็นลำดับนิวคลีโอไทด์ในยีนที่ถูกตัดออกไปหลังถอดรหัสจึงไม่ถูกแปลรหัสเป็นโปรตีน หลังจากที่ถูกถอดรหัสได้ pre-mRNA แล้ว จะมีกระบวนการตัดเชื่อมอาร์เอ็นเอที่นำส่วนที่เป็นอินตรอนออกไป และส่วนที่เป็นเอกซอนจะต่อกันได้เป็น mRNA ที่จะนำไปแปลรหัสเป็นสายพอลิเพปไทด์ต่อไป



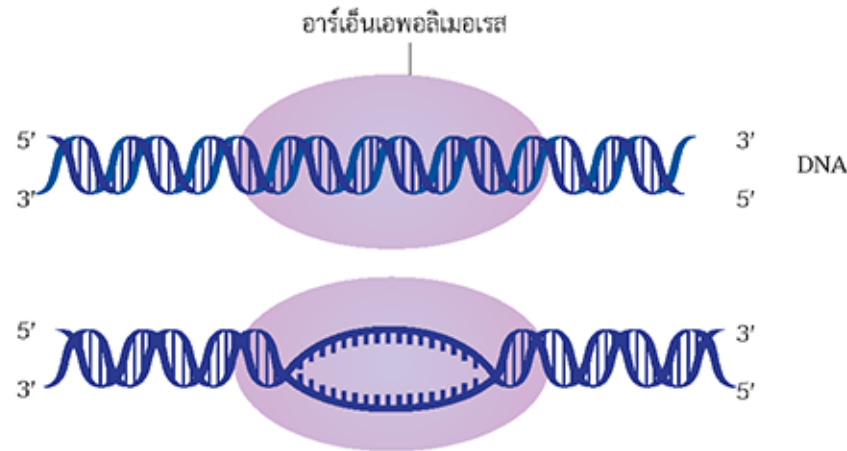
การถอดรหัส

การสังเคราะห์ mRNA โดยใช้ DNA เป็นแม่แบบจะคล้ายกับการจำลอง DNA แต่ใช้ DNA สายเดียวเป็นแม่แบบ โดยการเติมนิวคลีโอไทด์เข้าไปทางปลาย 3' ของ mRNA ทำให้การสังเคราะห์ mRNA มีทิศทางจากปลาย 5' ไปยังปลาย 3' โดยใช้เอนไซม์อาร์เอ็นเอพอลิเมอเรส และนิวคลีโอไทด์ 4 ชนิด ซึ่งจะแตกต่างกันตามองค์ประกอบที่เป็นเบส ได้แก่ อะดีนีน (A) กวานีน (G) ไซโทซีน (C) และยูราซิล (U) ดังรูป 4.18

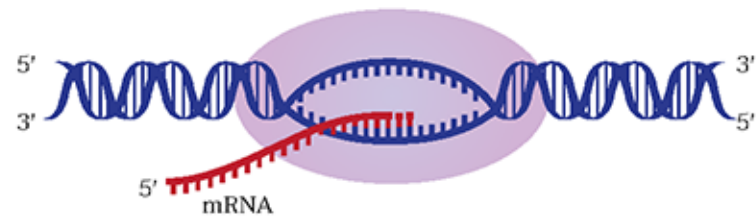


รูป 4.18 นิวคลีโอไทด์ที่มีเบสยูราซิล

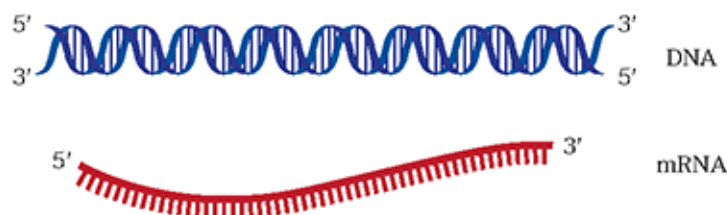
การถอดรหัสมีขั้นตอนดังรูป 4.19



ขั้นเริ่มต้น เอนไซม์อาร์เอ็นเอพอลิเมอเรสจะเข้าไปจับกับ DNA ตรงบริเวณที่จะสังเคราะห์ mRNA และสลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างคู่เบส พอลินิวคลีโอไทด์ 2 สายของ DNA จะคลายเกลียวแยกออกจากกัน โดยมีสายหนึ่งของ DNA เป็นแม่แบบ



ขั้นตอนสายยาว นิวคลีโอไทด์ที่มีเบสที่เป็นเบสคู่สมกับดีเอ็นเอแม่แบบ คือ C เข้าคู่กับ G และ U เข้าคู่กับ A จะเข้ามาจับกับนิวคลีโอไทด์ของดีเอ็นเอแม่แบบ เอนไซม์อาร์เอ็นเอพอลิเมอเรสจะเชื่อมนิวคลีโอไทด์อิสระด้านปลาย 3' ได้เป็นสายยาวของ mRNA ทิศทางการสังเคราะห์สาย mRNA จึงเป็นจากปลาย 5' ไปยังปลาย 3' ดังนั้นการสร้างสาย mRNA นั้น จะสลับทิศกับสายดีเอ็นเอแม่แบบซึ่งเรียงจากปลาย 3' ไปยังปลาย 5'



ขั้นสิ้นสุด เอนไซม์อาร์เอ็นเอพอลิเมอเรสหยุดทำงานและแยกตัวออกจากดีเอ็นเอแม่แบบ สาย mRNA ที่สังเคราะห์ได้แยกออกจาก DNA

รูป 4.19 ขั้นตอนการถอดรหัส

รหัสพันธุกรรม

โครงสร้างของ DNA ประกอบด้วยพอลินิวคลีโอไทด์ 2 สาย นิวคลีโอไทด์ที่เป็นองค์ประกอบของ DNA มี 4 ชนิด ซึ่งเรียงต่อกันได้หลากหลาย จึงเป็นไปได้ว่าความแตกต่างกันทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตขึ้นอยู่กับลำดับและจำนวนของนิวคลีโอไทด์ใน DNA ลำดับนิวคลีโอไทด์ของ DNA เกี่ยวข้องกับการแสดงลักษณะทางพันธุกรรมอย่างไร

เนื่องจาก DNA เป็นแม่แบบในการสังเคราะห์ mRNA ดังนั้นข้อมูลทางพันธุกรรมใน DNA จะถ่ายทอดให้กับ mRNA โดยการเรียงลำดับของนิวคลีโอไทด์ชนิดต่างๆ ของ mRNA จะเป็นตัวกำหนดการเรียงลำดับของกรดอะมิโนเพื่อสังเคราะห์โปรตีน ซึ่งเรียกว่า **รหัสพันธุกรรม** (genetic code) จากที่เรียนเรื่องโปรตีนมาแล้วนั้น ทำให้ทราบว่ามีการดอะมิโน 20 ชนิด นักเรียนคิดว่าจะต้องใช้นิวคลีโอไทด์จำนวนเท่าใด ต่อ 1 รหัสพันธุกรรมบนสาย mRNA จึงจะครอบคลุมชนิดของกรดอะมิโนครบทั้ง 20 ชนิด

โมเลกุลของ RNA เป็นพอลิเมอร์สายยาวของนิวคลีโอไทด์ ซึ่งมีนิวคลีโอไทด์ 4 ชนิด ถ้ารหัสพันธุกรรม 1 รหัส ประกอบด้วย 1 นิวคลีโอไทด์จะได้รหัสเพียง 4 รหัส และถ้ารหัสพันธุกรรม 1 รหัส ประกอบด้วย 2 นิวคลีโอไทด์จะได้รหัสเพียง 16 รหัส (4^2) ซึ่งจำนวนรหัสนี้ไม่เพียงพอกับจำนวนกรดอะมิโนที่มี 20 ชนิด แต่ถ้ารหัสพันธุกรรมประกอบด้วย 3 นิวคลีโอไทด์ ก็จะได้ 64 รหัส (4^3) ที่เพียงพอกับจำนวนชนิดของกรดอะมิโน

ในปี พ.ศ. 2504 คริกและคณะได้ให้ความเห็นว่า กรดอะมิโนแต่ละโมเลกุลถูกควบคุมด้วยรหัสพันธุกรรม ซึ่งประกอบด้วย 3 นิวคลีโอไทด์เรียงต่อกัน และในปีเดียวกันนักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบรหัสพันธุกรรมรหัสแรกคือ UUU ซึ่งเป็นรหัสของกรดอะมิโนฟีนอลอะลานีน ในเวลาต่อมาพบรหัสพันธุกรรมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 61 รหัสที่กำหนดชนิดของกรดอะมิโน รหัสพันธุกรรมที่เป็นรหัสสามเบส (triplet code) ซึ่งประกอบด้วย 3 นิวคลีโอไทด์เรียงต่อกันตามลำดับใน mRNA เป็น 1 รหัส เรียกว่า **โคดอน** (codon) ดังตาราง 4.4 แต่ละโคดอนแปลความหมายเป็นกรดอะมิโนแต่ละชนิด ส่วนลำดับเบสของทรานสเฟอร์อาร์เอ็นเอ (transfer RNA; tRNA) ที่เข้าคู่กับลำดับเบสของโคดอนใน mRNA เรียกว่า **แอนติโคดอน** (anticodon) ซึ่งประกอบด้วย 3 นิวคลีโอไทด์เช่นกัน

ตาราง 4.4 รหัสพันธุกรรม

		เบสดำแหน่งที่ 2								
		U		C		A		G		
เบสดำแหน่งที่ 1	U	UUU	Phe	UCU	Ser	UAU	Tyr	UGU	Cys	U
		UUC		UCC		UAC		UGC		C
		UUA	Leu	UCA		UAA	stop	UGA	stop	A
		UUG		UCG		UAG	stop	UGG	Trp	G
	C	CUU	Leu	CCU	Pro	CAU	His	CGU	Arg	U
		CUC		CCC		CAC		CGC		C
		CUA		CCA		CAA	Gln	CGA		A
		CUG		CCG		CAG		CGG		G
	A	AUU	Ile	ACU	Thr	AAU	Asn	AGU	Ser	U
		AUC		ACC		AAC		AGC		C
		AUA		ACA		AAA	Lys	AGA	Arg	A
		AUG	Met	ACG		AAG		AGG		G
	G	GUU	Val	GCU	Ala	GAU	Asp	GGU	Gly	U
		GUC		GCC		GAC		GGC		C
		GUA		GCA		GAA	Glu	GGA		A
		GUG		GCG		GAG		GGG		G
		เบสดำแหน่งที่ 3								

Phe หมายถึง ฟีนอลอะลานีน
 Leu หมายถึง ลิวซีน
 Ser หมายถึง ซีรีน
 Tyr หมายถึง ไทโรซีน
 Cys หมายถึง ซิสเทอีน
 Trp หมายถึง ทริปโตเฟน
 Pro หมายถึง โพรลีน
 His หมายถึง ฮิสทีดิน
 Gln หมายถึง กลูตามีน
 Arg หมายถึง อาร์จินีน
 Ile หมายถึง ไอโซลิวซีน

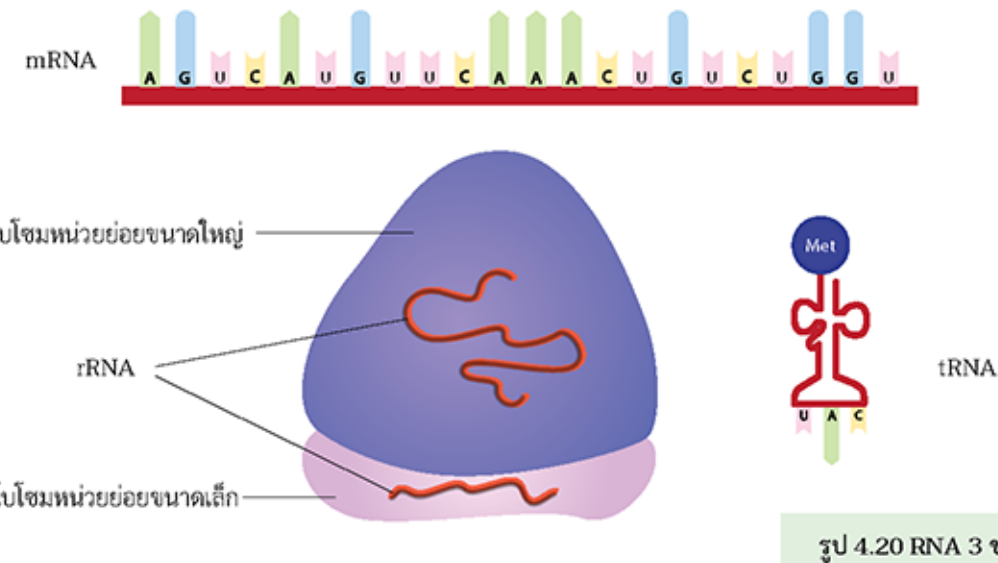
Met หมายถึง เมไทโอนีน
 Thr หมายถึง ทรีโอนีน
 Asn หมายถึง แอสพาราจีน
 Lys หมายถึง โลซีน
 Val หมายถึง วาลีน
 Ala หมายถึง อะลานีน
 Asp หมายถึง กรดแอสพาร์ติก
 Glu หมายถึง กรดกลูตามิก
 Gly หมายถึง ไกลซีน
 รหัสเริ่มต้น
 รหัสหยุด

นอกจากรหัส 61 รหัสที่กำหนดชนิดของกรดอะมิโนแล้ว ยังมีอีก 3 รหัส คือ UAA UAG และ UGA ที่ไม่กำหนดกรดอะมิโนชนิดใด ๆ ซึ่ง 3 รหัสนี้เป็นรหัสที่ทำให้การแปลรหัสสิ้นสุดลง เรียกว่า **รหัสหยุด (stop codon)** นอกจากนี้พบว่า AUG ซึ่งเป็นรหัสของกรดอะมิโนเมไทโอนีน ทำหน้าที่เป็น **รหัสเริ่มต้น (start codon)** ของการสังเคราะห์โปรตีนอีกด้วย

ลำดับนิวคลีโอไทด์บน mRNA ทำหน้าที่กำหนดชนิดและลำดับของกรดอะมิโนในสายพอลิเพปไทด์ ที่สังเคราะห์ขึ้น โดยที่ลำดับนิวคลีโอไทด์บน mRNA ซึ่งทำหน้าที่เป็นรหัสพันธุกรรมสำหรับกรดอะมิโนนี้ ได้จากการถอดรหัสพันธุกรรมจาก DNA

การแปลรหัส

จากการศึกษาการแปลรหัสพบว่ามี RNA ที่สำคัญ 3 ชนิด ดังรูป 4.20 แต่ละชนิดทำหน้าที่แตกต่างกัน คือ mRNA ทำหน้าที่นำข้อมูลทางพันธุกรรมจาก DNA ไปสังเคราะห์โปรตีน ส่วน tRNA ทำหน้าที่นำกรดอะมิโนที่จำเพาะกับรหัสพันธุกรรมบนสาย mRNA มาต่อเป็นสายพอลิเพปไทด์ และ **ไรโบโซมัลอาร์เอ็นเอ (ribosomal RNA; rRNA)** เป็นองค์ประกอบของไรโบโซม ซึ่งเป็นออร์แกเนลล์ที่ทำหน้าที่สังเคราะห์โปรตีน



เมื่อมีการถอดรหัสจาก DNA ได้เป็น mRNA แล้ว จะนำไปสังเคราะห์โปรตีนโดยการแปลรหัส โดย tRNA จะนำกรดอะมิโนมาเรียงต่อกันตามรหัสพันธุกรรมของ mRNA ได้เป็นสายพอลิเพปไทด์

มิวเทชันทำให้ลักษณะของสิ่งมีชีวิตเปลี่ยนแปลงไป เพราะการทำให้เกิดมิวเทชันจะทำให้ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีนที่ควบคุมการสังเคราะห์โปรตีนเปลี่ยนไป ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของโปรตีน ทำให้สามารถวิเคราะห์บทบาทหน้าที่ของโปรตีนชนิดนั้น ๆ ได้ ดังนั้นจึงมีการชักนำให้เกิดมิวเทชันเพื่อศึกษาการพัฒนาของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด เช่น ยีสต์ แมลงหวี่ และอะราบิโดพซิส และใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงพันธุ์พืช เช่น การฉายรังสีเพื่อปรับปรุงพันธุ์ทวลิป ถั่วเหลือง ข้าวสาลี และมันเทศ

ถ้ามิวเทชันเกิดขึ้นในตำแหน่งที่สำคัญอาจส่งผลกระทบทำให้สิ่งมีชีวิตไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ แต่ถ้าไม่อยู่ในตำแหน่งที่สำคัญก็จะสามารถอยู่รอดได้ บางครั้งการเกิดมิวเทชันอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมที่ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตดำรงชีวิตได้ดีกว่าเดิม ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ DNA และโครโมโซม จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้สิ่งมีชีวิตมีลักษณะแตกต่างกันออกไป แต่หากลักษณะเหล่านี้สามารถถ่ายทอดไปยังรุ่นต่อ ๆ ไปได้ มีผลทำให้เกิดการแปรผันทางพันธุกรรมสร้างความหลากหลายของสิ่งมีชีวิตสืบพันธุ์ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งนำไปสู่การเกิดวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต ซึ่งจะได้ศึกษาในบทที่ 7 เรื่องวิวัฒนาการ

คำอธิบายรายวิชาเพิ่มเติม

ชีววิทยา เล่ม ๒
ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔

กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ.๒๕๖๐)
เวลา ๖๐ ชั่วโมง จำนวน ๑.๕ หน่วยกิต

ศึกษาเกี่ยวกับโครโมโซม และสารพันธุกรรม โครงสร้างของ DNA การจำลอง DNA การควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมของ DNA มิวเทชัน และการเกิดมิวเทชัน ศึกษาการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม การศึกษาพันธุกรรมของเมนเดล การถ่ายทอดยีนบนโครโมโซม ลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล การถ่ายทอดยีนบนโครโมโซมเพศ ยีนบนโครโมโซมเดียวกัน ศึกษาเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ พันธุวิศวกรรมและการโคลนนิ่ง การหาขนาดของ DNA และการหาลำดับนิวคลีโอไทด์ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอและเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอกับความปลอดภัยทางชีวภาพและชีวจริยธรรม ศึกษาเกี่ยวกับวิวัฒนาการ หลักฐานและข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต แนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต พันธุศาสตร์ประชากร ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีล และกำเนิดสปีชีส์ โดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ การสืบเสาะหาความรู้ การสืบค้นข้อมูล การสังเกต วิเคราะห์ เปรียบเทียบ อธิบาย อภิปราย และสรุป เพื่อให้เกิดความรู้ ความเข้าใจ มีความสามารถในการตัดสินใจ มีทักษะปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ รวมทั้งทักษะการเรียนรู้แห่งศตวรรษที่ ๒๑ ในด้านการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ ด้านการคิดและการแก้ปัญหา ด้านการสื่อสาร สามารถสื่อสารสิ่งที่เรียนรู้และนำความรู้ไปใช้ในชีวิตของตนเอง มีจิตวิทยาศาสตร์ จริยธรรม คุณธรรม และค่านิยมที่เหมาะสม

ผลการเรียนรู้

๑. สืบค้นข้อมูล อธิบายสมบัติและหน้าที่ของสารพันธุกรรม โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของ DNA และสรุปการจำลอง DNA
๒. อธิบายและระบุขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีนและหน้าที่ของ DNA และ RNA แต่ละชนิดในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีน
๓. สืบค้นข้อมูล และอธิบายการเกิดมิวเทชันระดับยีนและระดับโครโมโซม สาเหตุการเกิดมิวเทชัน รวมทั้งยกตัวอย่างโรคและกลุ่มอาการที่เป็นผลของการเกิดมิวเทชัน
๔. สืบค้นข้อมูล อธิบายและสรุปผลการทดลองของเมนเดล
๕. สรุปความสัมพันธ์ระหว่างสารพันธุกรรม แอลลีล โปรตีน ลักษณะทางพันธุกรรม และเชื่อมโยงกับความรู้เรื่องพันธุศาสตร์เมนเดล
๖. อธิบายและสรุปกฎแห่งการแยกและกฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ และนำกฎของเมนเดลนี้ไปอธิบายการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมและใช้ในการคำนวณโอกาสในการเกิดฟีโนไทป์และจีโนไทป์แบบต่าง ๆ ของรุ่น F_1 และ F_2
๗. สืบค้นข้อมูล วิเคราะห์ อธิบาย และสรุปเกี่ยวกับการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล
๘. สืบค้นข้อมูล วิเคราะห์ และเปรียบเทียบลักษณะทางพันธุกรรมที่มีการแปรผันไม่ต่อเนื่องและลักษณะทางพันธุกรรมที่มีการแปรผันต่อเนื่อง
๙. อธิบายการถ่ายทอดยีนบนโครโมโซม และยกตัวอย่างลักษณะทางพันธุกรรมที่ถูกควบคุมด้วยยีนบนออโตโซมและยีนบนโครโมโซมเพศ
๑๐. อธิบายหลักการสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมโดยใช้ดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์
๑๑. สืบค้นข้อมูล ยกตัวอย่าง และอภิปรายการนำเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอไปประยุกต์ใช้ทั้งในด้านสิ่งแวดล้อม นิติวิทยาศาสตร์ การแพทย์ การเกษตร และอุตสาหกรรม และข้อควรคำนึงถึงด้านชีวจริยธรรม
๑๒. สืบค้นข้อมูลและอธิบายเกี่ยวกับหลักฐานที่สนับสนุนและข้อมูลที่ใช้อธิบายการเกิดวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต
๑๓. อธิบายและเปรียบเทียบแนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตของตนเอง ลามาร์ก และทฤษฎีเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตของชาลส์ ดาร์วิน
๑๔. ระบุสาระสำคัญและอธิบายเงื่อนไขของภาวะสมดุลของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีลในประชากร พร้อมทั้งคำนวณหาความถี่ของแอลลีลและจีโนไทป์ของประชากรโดยใช้หลักของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก
๑๕. สืบค้นข้อมูล อภิปราย และอธิบายกระบวนการเกิดสปีชีส์ใหม่ของสิ่งมีชีวิต

รวมทั้งหมด ๑๕ ผลการเรียนรู้