



หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ชีววิทยา

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ เล่ม ๒

ตามผลการเรียนรู้

กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)

ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑

ผู้เรียบเรียง

ผศ.ดร.ศรัณยา พิระเกียรติขจร ปร.ด. (เทคโนโลยีชีวภาพ), วท.ม. (เทคโนโลยีชีวภาพ), วท.บ. (ชีววิทยา)
ดร.ธิดารัตน์ พวงไพโรจน์ ปร.ด. (เทคโนโลยีชีวภาพ), วท.ม. (วิทยาการพืช), วท.บ. (ชีววิทยา)
น.สพ.คิระ พิระเกียรติขจร สพ.บ. (สัตวแพทยศาสตร์)

ผู้ตรวจ

ดร.นวิยา ฮุยเป้า ปร.ด. (สรีรวิทยา), วท.ม. (สรีรวิทยา), วท.บ. (ชีววิทยา)
ดร.พรสวรรค์ สุทธินันท์ ปร.ด. (ชีววิทยา), วท.ม. (พฤกษศาสตร์), วท.บ. (ชีววิทยา)
ดร.ชิตติพงษ์ ทิพบรรจง ปร.ด. (กายวิภาคศาสตร์และชีววิทยาโครงสร้าง), วท.บ. (ชีววิทยา)

บรรณาธิการ

ผศ.ดร.พิศเรศ คู่ยด่วน ปร.ด. (สรีรวิทยา), วท.บ. (ชีววิทยา)

ปีที่พิมพ์ ๒๕๖๔

พิมพ์ครั้งที่ ๑

จำนวน ๕,๐๐๐ เล่ม

ISBN : 978-616-07-2218-1

จัดพิมพ์โดย บริษัท สำนักพิมพ์เอมพันธ์ จำกัด

❖ **ฝ่ายการตลาด, ฝ่ายการเงินและบัญชี, ฝ่ายผลิตและจัดส่ง :**

๖๙/๑๐๙ หมู่ ๑ ซ.พระแม่การุณย์ ต.บ้านใหม่ อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี ๑๑๑๒๐

โทร. ๐ ๒๕๘๔ ๕๘๘๘, ๐ ๒๕๘๔ ๕๙๙๓, ๐ ๒๕๑๖ ๔๕๘๐-๒ โทรสาร ๐ ๒๕๑๑ ๕๕๗๓

❖ **ฝ่ายวิชาการ :**

๘๗/๑๒๒ ถ.เทศบาลสงเคราะห์ แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ ๑๐๙๐๐

โทร. ๐ ๒๕๕๔ ๔๘๑๘-๒๐, ๐ ๒๕๕๓ ๘๑๖๘-๙ โทรสาร ๐ ๒๕๘๐ ๒๕๒๓

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติ ลิขสิทธิ์เป็นของบริษัท สำนักพิมพ์เอมพันธ์ จำกัด

คำอธิบายรายวิชาเพิ่มเติม

ชีววิทยา

กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 เล่ม 2

เวลา 60 ชั่วโมง จำนวน 1.5 หน่วยกิต

การศึกษาเกี่ยวกับสารพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต องค์ประกอบและโครงสร้างของกรดนิวคลีอิก คุณสมบัติของสารพันธุกรรม โครโมโซม วัฏจักรเซลล์และการแบ่งเซลล์ การกลายพันธุ์ การศึกษาพันธุศาสตร์ของเมนเดล และการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมตามกฎของเมนเดล การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล การถ่ายทอยีนบนโครโมโซมของมนุษย์ การศึกษาทางชีววิทยาระดับโมเลกุล เทคโนโลยีดีเอ็นเอ การเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอ โดยเทคนิคพหิเมอร์เชนรีเอกชัน การวิเคราะห์ดีเอ็นเอโดยเทคนิคอิเล็กโทรโฟริซิส การหาลำดับนิวคลีโอไทด์และการศึกษาจีโนม การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ ความปลอดภัยของเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ กำเนิดของสิ่งมีชีวิตระยะเริ่มแรก ในสภาพของโลกระยะต่าง ๆ วิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต การศึกษาวิวัฒนาการจากหลักฐาน และการศึกษาข้อสนับสนุนต่าง ๆ ทฤษฎีวิวัฒนาการ และแนวคิดของฌอง ลามาร์ก ทฤษฎีวิวัฒนาการ และแนวคิดของชาร์ลส์ ดาร์วิน พันธุศาสตร์ประชากร การกำเนิดสปีชีส์ การเปลี่ยนแปลงทางสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต วิวัฒนาการและโรคภัยไข้เจ็บ วิวัฒนาการของมนุษย์

เพื่อให้นักเรียนได้ศึกษา ค้นคว้า และนำไปใช้ในชีวิตประจำวันเพื่อให้มีคุณลักษณะอันพึงประสงค์ พร้อมทั้งคุณธรรมและจริยธรรม การแก้ปัญหา มีความรับผิดชอบ และตระหนักถึงวิทยาศาสตร์ในกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม

คำนำ

หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี **ชีววิทยา** ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 เล่ม 2 ได้เรียบเรียงขึ้นตามผลการเรียนรู้ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551

เนื้อหาในหนังสือเล่มนี้แบ่งออกเป็น 4 หน่วยการเรียนรู้ ประกอบด้วย **ยีนและโครโมโซม การศึกษาพันธุศาสตร์ของเมนเดลและการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมตามกฎของเมนเดล ชีววิทยาระดับโมเลกุล กำเนิดและวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต** นอกจากนี้ ในหนังสือยังมี QR Code (Quick Response Code)  ที่เข้าผ่านระบบ **LINE** หรือแอปพลิเคชันสำหรับอ่าน QR Code เพื่อให้นักเรียนได้เข้าถึงข้อมูลและสื่อการเรียนรู้อื่นๆ อีกด้วย

หวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี **ชีววิทยา** ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 เล่ม 2 เล่มนี้ จะอำนวยความสะดวกต่อผู้สอนที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดการเรียนรู้ เพื่อให้นักเรียนได้พัฒนาเต็มตามศักยภาพและบรรลุตามเป้าหมายของหลักสูตรต่อไป



ฝ่ายวิชาการ บริษัท สำนักพิมพ์เอมพันธ์ จำกัด

 สาระชีววิทยา

1. เข้าใจธรรมชาติของสิ่งมีชีวิต การศึกษาชีววิทยาและวิธีการทางวิทยาศาสตร์ สารที่เป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิต ปฏิกริยาเคมีในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต กล้องจุลทรรศน์ โครงสร้างและหน้าที่ของเซลล์ การลำเลียงสารเข้าและออกจากเซลล์ การแบ่งเซลล์ และการหายใจระดับเซลล์

2. เข้าใจการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม การถ่ายทอดยีนบนโครโมโซม สมบัติและหน้าที่ของสารพันธุกรรม การเกิดมิวเทชัน เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ หลักฐานข้อมูลและแนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต ภาวะสมดุลของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก การเกิดสปีชีส์ใหม่ ความหลากหลายทางชีวภาพ กำเนิดของสิ่งมีชีวิต ความหลากหลายของสิ่งมีชีวิต และอนุกรมวิธาน รวมทั้งนำความรู้ไปใช้ประโยชน์

3. เข้าใจส่วนประกอบของพืช การแลกเปลี่ยนแก๊สและคายน้ำของพืช การลำเลียงของพืช การสังเคราะห์ด้วยแสง การสืบพันธุ์ของพืชดอกและการเจริญเติบโต และการตอบสนองของพืช รวมทั้งนำความรู้ไปใช้ประโยชน์

4. เข้าใจการย่อยอาหารของสัตว์และมนุษย์ การหายใจและการแลกเปลี่ยนแก๊ส การลำเลียงสารและการหมุนเวียนเลือด ภูมิคุ้มกันของร่างกายการขับถ่าย การรับรู้และการตอบสนองต่อการเคลื่อนที่ การสืบพันธุ์และการเจริญเติบโต ฮอโมนกับการรักษาคุณภาพ และพฤติกรรมของสัตว์ รวมทั้งนำความรู้ไปใช้ประโยชน์

5. เข้าใจแนวคิดเกี่ยวกับระบบนิเวศ กระบวนการถ่ายทอดพลังงานและการหมุนเวียนสารในระบบนิเวศ ความหลากหลายของไบโอม การเปลี่ยนแปลงแทนที่ของสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศ ประชากรและรูปแบบการเพิ่มของประชากร ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม ปัญหาและผลกระทบที่เกิดจากการใช้ประโยชน์ และแนวทางการแก้ไข

 ตารางวิเคราะห์หน่วยการเรียนรู้
ตามสาระการเรียนรู้เพิ่มเติม

หน่วยการเรียนรู้ที่	เรื่อง	สาระชีววิทยา				
		1	2	3	4	5
 5	ยีนและโครโมโซม		✓			
 6	การศึกษาพันธุศาสตร์ของเมนเดลและการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมตามกฎของเมนเดล (mendelian genetics)		✓			
 7	ชีววิทยาระดับโมเลกุล		✓			
 8	กำเนิดและวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต		✓			



ผลการเรียนรู้



1. สืบค้นข้อมูล อธิบาย และสรุปผลการทดลองของเมนเดล
2. อธิบาย และสรุปกฎแห่งการแยก และกฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ และนำกฎของเมนเดลนี้ไปอธิบายการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมและใช้ในการคำนวณโอกาสในการเกิดฟีโนไทป์และจีโนไทป์แบบต่างๆ ของรุ่น F_1 และ F_2
3. สืบค้นข้อมูล วิเคราะห์ อธิบาย และสรุปเกี่ยวกับการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล
4. สืบค้นข้อมูล วิเคราะห์ และเปรียบเทียบลักษณะทางพันธุกรรมที่มีการแปรผันไม่ต่อเนื่องและลักษณะทางพันธุกรรมที่มีการแปรผันต่อเนื่อง
5. อธิบายการถ่ายทอดยีนบนโครโมโซม และยกตัวอย่างลักษณะทางพันธุกรรมที่ถูกควบคุมด้วยยีนบนออโตโซมและยีนบนโครโมโซมเพศ
6. สืบค้นข้อมูล อธิบายสมบัติและหน้าที่ของสารพันธุกรรม โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของ DNA และสรุปการจำลอง DNA
7. อธิบาย และระบุขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีนและหน้าที่ของ DNA และ RNA แต่ละชนิดในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีน
8. สรุปความสัมพันธ์ระหว่างสารพันธุกรรม แอลลีลโปรตีน ลักษณะทางพันธุกรรม และเชื่อมโยงกับความรู้เรื่องพันธุศาสตร์เมนเดล
9. สืบค้นข้อมูล และอธิบายการเกิดมิวเทชันระดับยีนและระดับโครโมโซม สาเหตุการเกิดมิวเทชัน รวมทั้งยกตัวอย่างโรคและกลุ่มอาการที่เป็นผลของการเกิดมิวเทชัน
10. อธิบายหลักการสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมโดยใช้ดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์
11. สืบค้นข้อมูล ยกตัวอย่าง และอภิปรายการนำเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอไปประยุกต์ใช้ทั้งในด้านสิ่งแวดล้อม นิติวิทยาศาสตร์ การแพทย์การเกษตรและอุตสาหกรรม และข้อควรคำนึงถึงด้านชีวจริยธรรม
12. สืบค้นข้อมูล และอธิบายเกี่ยวกับหลักฐานที่สนับสนุนและข้อมูลที่ใช้อธิบายการเกิดวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต
13. อธิบาย และเปรียบเทียบแนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตของ ฌอง ลามาร์ก และทฤษฎีเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตของชาร์ลส์ ดาร์วิน
14. ระบุสาระสำคัญ และอธิบายเงื่อนไขของภาวะสมดุลของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก บัญญัติที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีลในประชากร พร้อมทั้งคำนวณหาความถี่ของแอลลีลและจีโนไทป์ของประชากรโดยใช้หลักของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก
15. สืบค้นข้อมูล อภิปราย และอธิบายกระบวนการเกิดสปีชีส์ใหม่ของสิ่งมีชีวิต



สารบัญ



หน่วยการเรียนรู้ที่

5

ยีนและโครโมโซม

1

สารพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต	3
องค์ประกอบและโครงสร้างของกรดนิวคลีอิก	11
คุณสมบัติของสารพันธุกรรม	15
โครโมโซม	32
วัฏจักรเซลล์และการแบ่งเซลล์	46
การกลายพันธุ์ (mutation)	60
กิจกรรมส่งเสริมการเรียนรู้	88

หน่วยการเรียนรู้ที่

6

การศึกษาพันธุศาสตร์ของเมนเดลและการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมตามกฎของเมนเดล (mendelian genetics)

89

การศึกษาพันธุศาสตร์ของเมนเดลและการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมตามกฎของเมนเดล (mendelian genetics)	91
การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล (non-mendelian genetics)	113
การถ่ายทอดยีนบนไมโครโซมของมนุษย์	134
กิจกรรมส่งเสริมการเรียนรู้	142

หน่วยการเรียนรู้ที่

7

ชีววิทยาระดับโมเลกุล

143

- ❖ การศึกษาทางชีววิทยาระดับโมเลกุล 144
- ❖ เทคโนโลยีดีเอ็นเอ 144
- ❖ การเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอ โดยเทคนิคพอลิเมอร์เชนรีเอกชัน (Polymerase Chain Reaction, PCR) 145
- ❖ การวิเคราะห์ดีเอ็นเอ โดยเทคนิคอิเล็กโทรโฟเรซิส (Electrophoresis) 150
- ❖ การหาลำดับนิวคลีโอไทด์ (Sequencing) และการศึกษาจีโนม 151
- ❖ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ 154
- ❖ ความปลอดภัยของเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ 159
- 📝 กิจกรรมส่งเสริมการเรียนรู้ 172

หน่วยการเรียนรู้ที่

8

กำเนิดและวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต

173

- ❖ กำเนิดของสิ่งมีชีวิต 174
- ❖ วิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต 178
- ❖ การศึกษาวิวัฒนาการจากหลักฐาน และการศึกษาข้อสนับสนุนต่าง ๆ 183
- ❖ ทฤษฎีวิวัฒนาการ และแนวคิดของฌอง ลามาร์ก 188
- ❖ ทฤษฎีวิวัฒนาการ และแนวคิดของชาร์ลส์ ดาร์วิน 195
- ❖ พันธุศาสตร์ประชากร 198
- ❖ การกำเนิดสปีชีส์ 203
- ❖ การเปลี่ยนแปลงทางสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต 208
- ❖ วิวัฒนาการและโรคภัยไข้เจ็บ 213
- ❖ วิวัฒนาการของมนุษย์ 218
- บรรณานุกรม 224

หน่วยการเรียนรู้ที่

5

ยีนและโครโมโซม



แนวคิด

ลักษณะฟีโนไทป์ของสิ่งมีชีวิตถูกควบคุมโดยสารพันธุกรรม สิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่มีกรดนิวคลีอิกชนิด DNA เป็นสารพันธุกรรมอยู่ภายในบริเวณนิวเคลียสของเซลล์หรือในนิวเคลียสสำหรับเซลล์ยูคาริโอต ส่วนไวรัสมีสารพันธุกรรมทั้งแบบ DNA และ RNA ซึ่งอาจเป็นสายเดี่ยวหรือสายคู่ เซลล์ทุกชนิดต้องมีการแบ่งเซลล์ซึ่งอาจเป็นการแบ่งตัวจากหนึ่งเป็นสองในแบบมีรีียว หรือแบบไมโทซิสในเซลล์ยูคาริโอต เพื่อเพิ่มจำนวนเซลล์ในสิ่งมีชีวิตหลายเซลล์ยังมีการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสสำหรับสร้างเซลล์สืบพันธุ์เพื่อใช้ในการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ นอกจากนี้ เซลล์โปรคาริโอตส่วนใหญ่มีโครงสร้าง DNA เป็นแบบวงกลม และมีเพียง 1 โมเลกุล ส่วนเซลล์ยูคาริโอตมีโครงสร้างของ DNA เป็นเส้นตรงและมีหลายโมเลกุล ทั้งยังอาจพบโครโมโซมชนิดพิเศษในเซลล์บางชนิด ข้อมูลทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตถ่ายทอดไปยังรุ่นลูกด้วยการแบ่งเซลล์ และยังสามารถกำหนดลักษณะฟีโนไทป์ของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดด้วยการถอดรหัสและการแปลรหัสจนได้โปรตีนที่สามารถทำงานได้สมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลทางพันธุกรรมสามารถเกิดการกลายพันธุ์ได้ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดปกติของการแสดงออกในสิ่งมีชีวิต

สาระการเรียนรู้

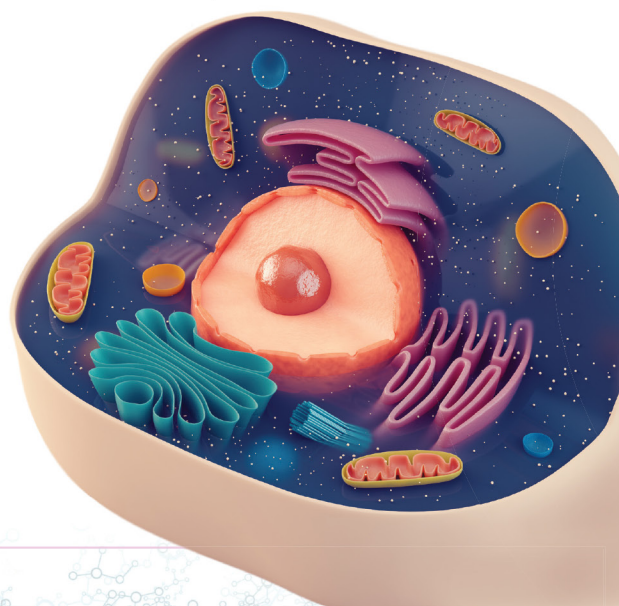
1. สารพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต
2. องค์ประกอบและโครงสร้างของกรดนิวคลีอิก
3. คุณสมบัติของสารพันธุกรรม
4. โครโมโซม
5. วัฏจักรเซลล์และการแบ่งเซลล์
6. การกลายพันธุ์

ผลการเรียนรู้

1. สืบค้นข้อมูล อธิบายสมบัติ และหน้าที่ของสารพันธุกรรม โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของ DNA และสรุปการจำลอง DNA
2. อธิบาย และระบุขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีนและหน้าที่ของ DNA และ RNA แต่ละชนิดในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีน
3. สรุปความสัมพันธ์ระหว่างสารพันธุกรรม แอลลีลโปรตีน ลักษณะพันธุกรรม และเชื่อมโยงกับความรู้เรื่อง พันธุศาสตร์เมนเดล
4. สืบค้นข้อมูล และอธิบายการเกิดมิวเทชันระดับยีนและระดับโครโมโซมสาเหตุการเกิดมิวเทชันรวมทั้งยกตัวอย่างโรค และกลุ่มอาการที่เป็นผลของการเกิดมิวเทชัน

จากหน่วยการเรียนรู้ที่ 2 นักเรียนได้เรียนรู้เกี่ยวกับ **'ทฤษฎีเซลล์ (Cell theory)'** ซึ่งประกอบด้วย 1. สิ่งมีชีวิตทุกชนิดประกอบด้วยเซลล์เดียวหรือหลายเซลล์ 2. เซลล์เป็นหน่วยพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตที่ทำหน้าที่ได้ และ 3. เซลล์ทุกชนิดเพิ่มจำนวนมาจากเซลล์ที่มีอยู่เดิมด้วยกระบวนการแบ่งเซลล์ อย่างไรก็ตาม ด้วยความก้าวหน้าขององค์ความรู้ตลอดจนเทคนิคต่างๆ ของสาขาวิชาเซลล์วิทยา (Cytology) ชีวเคมี (Biochemistry) และพันธุศาสตร์ (Genetics) ทำให้มีการเสนอ **'ทฤษฎีเซลล์สมัยใหม่ (modern cell biology)'** เพิ่มเติมอีก 3 ข้อ ได้แก่

1. พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาทางชีวเคมีสามารถถ่ายทอดภายในเซลล์ได้
2. เซลล์ทุกเซลล์มีองค์ประกอบพื้นฐานเหมือนกัน โดยเซลล์โปรแคริโอตและเซลล์ยูแคริโอตที่เป็นเซลล์เดียวและหลายเซลล์ ล้วนมีเยื่อหุ้มเซลล์ล้อมรอบส่วนของสารพันธุกรรม และไซโทพลาซึม (cytoplasm) ซึ่งสารพันธุกรรมอาจอยู่บริเวณนิวคลีออยด์ (พบในเซลล์โปรแคริโอต) หรืออยู่ในนิวเคลียส (พบในเซลล์ยูแคริโอต) ส่วนในไซโทพลาซึมพบออร์แกเนลล์แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ อาจพบโครงสร้างห่อหุ้มเซลล์ เช่น ผนังเซลล์หรือสารเคลือบเซลล์อื่นๆ อีกด้วย
3. ข้อมูลลักษณะทางพันธุกรรมหรือสารพันธุกรรมสามารถถ่ายทอดไปสู่เซลล์ลูก โดยสารพันธุกรรมของเซลล์โปรแคริโอต และเซลล์ยูแคริโอตเป็นกรดนิวคลีอิกชนิดดีเอ็นเอ (DNA) ซึ่งจะมีการขดตัวเป็น 'โครโมโซม (chromosome)' สารพันธุกรรมสามารถถ่ายทอดไปสู่เซลล์ลูกด้วยกระบวนการแบ่งเซลล์แบบ 'ไมนารี ฟิชชัน(binary fission)' ในเซลล์โปรแคริโอต หรือกระบวนการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส(mitosis) ในเซลล์ยูแคริโอต นอกจากนี้ สิ่งมีชีวิตยังมีกระบวนการรีคอมบิเนชัน (recombination) ซึ่งทำให้สิ่งมีชีวิตเกิดความหลากหลายทางพันธุกรรมอีกด้วย



สารพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต



สิ่งมีชีวิตที่มีการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศและไม่อาศัยเพศมีการถ่ายทอดลักษณะบางประการจากรุ่นพ่อแม่ไปสู่รุ่นลูกเสมอ โดยเรียกลักษณะที่ถูกถ่ายทอดดังกล่าวว่า 'ลักษณะทางพันธุกรรม (genetic character)' รูปแบบการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมนี้ได้รับการอธิบายครั้งแรกโดยเกรเกอร์ เมนเดล (Gregor Mendel) ซึ่งต่อมาได้รับการยกย่องว่าเป็นบิดาแห่งพันธุศาสตร์ (Father of Genetics) ถึงแม้ว่านักวิทยาศาสตร์หลายท่านพยายามพิสูจน์ว่าลักษณะทางพันธุกรรมที่ถูกถ่ายทอดไปยังรุ่นลูกนั้นถูกควบคุมด้วยสารบางอย่างภายในเซลล์ แต่ก็ยังไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าสารที่ควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมนี้เป็นสารชีวโมเลกุลประเภทกรดนิวคลีอิกหรือโปรตีน

หลักฐานที่แสดงว่า DNA เป็นสารพันธุกรรมของแบคทีเรีย

ปี ค.ศ. 1869 **Johann Friedrich Miescher** นักฟิสิกส์ชาวสวิส ได้ทดลองสกัดนิวเคลียสจากเซลล์เม็ดเลือดขาวที่ติดมากับผ้าพันแผลด้วยสารที่มีคุณสมบัติเป็นเบส (alkali) Miescher เรียกสารที่สกัดได้จากนิวเคลียสนี้ว่า 'นิวคลีอิน (nuclein)' ซึ่งปัจจุบัน คือ กรดนิวคลีอิก (nucleic acid)

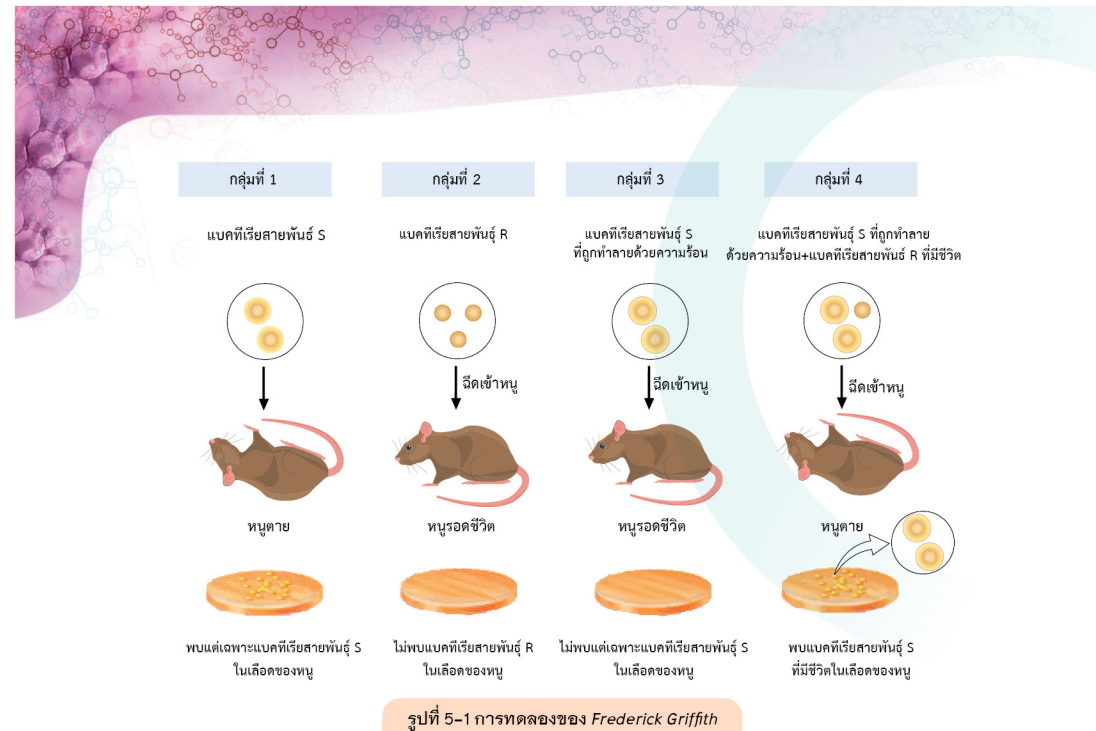
ปี ค.ศ. 1914 **Robert Feulgen** ชาวเยอรมัน ใช้สีฟุคซิน (fuchsin) ย้อมเซลล์ และพบว่าสีย้อมติดเฉพาะบริเวณนิวเคลียส โดยส่วนที่ติดสี คือ DNA แสดงว่า DNA อยู่ในนิวเคลียส

ปี ค.ศ. 1928 **Frederick Griffith** ชาวอังกฤษ ได้ทดลองโดยฉีดแบคทีเรียชนิด *Streptococcus pneumoniae* ที่ทำให้เกิดโรคปอดบวม (pneumonia) เข้าไปในหนูทดลอง โดยแบคทีเรียชนิดดังกล่าวมี 2 สายพันธุ์ ได้แก่ สายพันธุ์ S (smooth strain) ซึ่งโคโลนี (colony) มีลักษณะเรียบเนื่องจากมีแคปซูลห่อหุ้มเซลล์ ทำให้ไม่ถูกทำลายจากระบบภูมิคุ้มกันของโฮสต์ (host) จึงก่อให้เกิดโรคปอดบวมได้ ในขณะที่สายพันธุ์ R (rough strain) โคโลนีมีลักษณะขรุขระเพราะไม่มีแคปซูลห่อหุ้มเซลล์ จึงเป็นสายพันธุ์ที่ไม่ทำให้เกิดโรคปอดบวม Griffith ทำการทดลองโดยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

กลุ่มที่ 1 ฉีดเชื้อแบคทีเรีย *S. Pneumoniae* สายพันธุ์ S เข้าไปในหนูทดลอง พบว่า หนูตาย และพบแต่เฉพาะแบคทีเรียสายพันธุ์ S ในเลือดของหนูเมื่อนำมาเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ

กลุ่มที่ 2 ฉีดเชื้อแบคทีเรีย *S. Pneumoniae* สายพันธุ์ R เข้าไปในหนูทดลอง พบว่า หนูไม่ตาย และไม่พบแบคทีเรียสายพันธุ์ R ในเลือดของหนูเมื่อนำมาเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ

กลุ่มที่ 3 ฉีดเชื้อแบคทีเรีย *S. pneumoniae* สายพันธุ์ S ที่ถูกทำลายด้วยความร้อน (heat-killed)



S strain) เข้าไปในหนูทดลอง พบว่า หนูไม่ตาย และไม่พบแบคทีเรียสายพันธุ์ S ในเลือดของหนู เมื่อนำมาเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ

กลุ่มที่ 4 ฉีดเชื้อแบคทีเรีย *S. pneumoniae* สายพันธุ์ S ที่ถูกทำลายด้วยความร้อน ผสมกับแบคทีเรียสายพันธุ์ R ที่ยังมีชีวิตเข้าไปในหนูทดลอง พบว่า หนูตายและพบแบคทีเรียสายพันธุ์ S ที่มีชีวิตในเลือดของหนูเมื่อนำมาเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ

จากผลการทดลองในกลุ่มที่ 4 Griffith อธิบายว่า มีสารบางอย่างจาก *Streptococcus pneumoniae* สายพันธุ์ S ที่ถูกทำลายด้วยความร้อน สามารถถ่ายทอดไปยังแบคทีเรียสายพันธุ์ R ทำให้ก่อโรคปอดบวมในหนูได้ เรียกกระบวนการนี้ว่า ‘การแปลงพันธุ์ (transformation)’ ซึ่งเซลล์แบคทีเรียสายพันธุ์เดิมที่ได้รับ

สารดังกล่าวซึ่งคาดว่าจะเป็ น ‘สารพันธุกรรม’ จากแบคทีเรียอีกสายพันธุ์ ทำให้จีโนไทป์ (genotype) และฟีโนไทป์ (phenotype) เกิดการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม Griffith ยังไม่ทราบชัดเจนว่าสารดังกล่าวเป็นสารประเภทใด



ปี ค.ศ. 1944 **Oswald Avery, Colin MacLeod และ Maclyn McCarty** ได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบชนิดของสารพันธุกรรมที่สามารถถ่ายทอดระหว่างแบคทีเรียต่างสายพันธุ์ได้ โดยสกัด DNA จากแบคทีเรีย *Streptococcus pneumoniae* สายพันธุ์ S ใส่ในหลอดทดลอง 4 หลอด ดังนี้

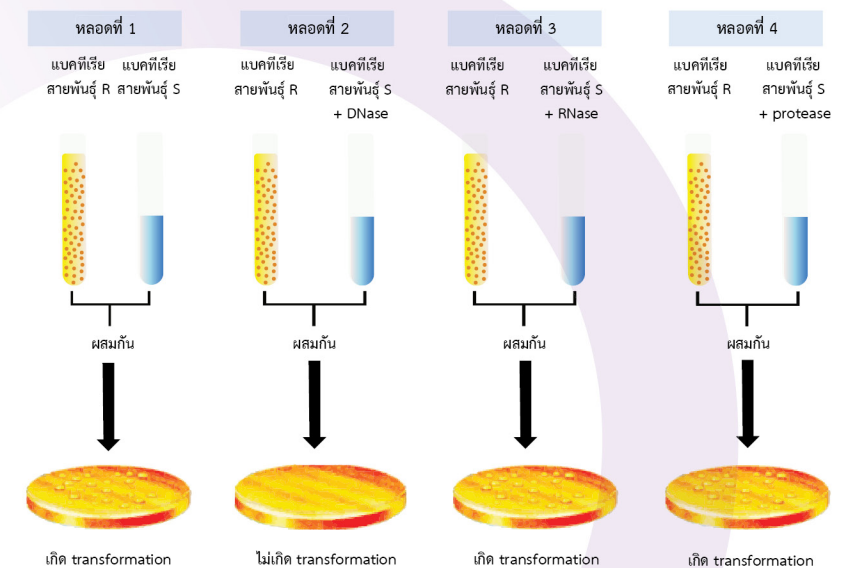
หลอดที่ 1 นำ DNA ของ *S. pneumoniae* สายพันธุ์ S ที่ไม่ได้เติมเอนไซม์ผสมกับเชื้อแบคทีเรีย *S. pneumoniae* สายพันธุ์ R ที่มีชีวิต จากนั้นนำแบคทีเรียที่ได้มาเลี้ยงในจานเพาะเชื้อ

หลอดที่ 2 นำ DNA ของ *S. pneumoniae* สายพันธุ์ S ที่เติมเอนไซม์ย่อย DNA (DNase) ผสมกับเชื้อแบคทีเรีย *S. pneumoniae* สายพันธุ์ R ที่มีชีวิต จากนั้นนำแบคทีเรียที่ได้มาเลี้ยงในจานเพาะเชื้อ

หลอดที่ 3 นำ DNA ของ *S. pneumoniae* สายพันธุ์ S ที่เติมเอนไซม์ย่อย RNA (RNase) ผสมกับเชื้อแบคทีเรีย *S. pneumoniae* สายพันธุ์ R ที่มีชีวิต จากนั้นนำแบคทีเรียที่ได้มาเลี้ยงในจานเพาะเชื้อ

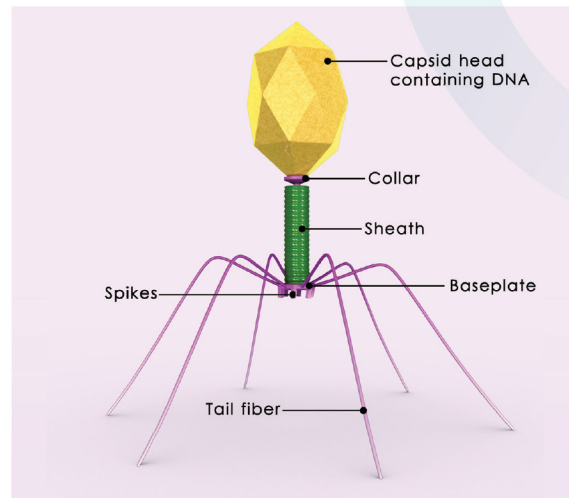
หลอดที่ 4 นำ DNA ของ *S. pneumoniae* สายพันธุ์ S ที่เติมเอนไซม์ย่อยโปรตีน (protease) ผสมกับเชื้อแบคทีเรีย *S. pneumoniae* สายพันธุ์ R ที่มีชีวิต จากนั้นนำแบคทีเรียที่ได้มาเลี้ยงในจานเพาะเชื้อ

ผลการทดลองพบว่า หลอดที่ 1, 3 และ 4 พบแบคทีเรียทั้งสายพันธุ์ S และ R แสดงว่าเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ในหลอดที่ 2 พบแต่แบคทีเรียสายพันธุ์ R แสดงให้เห็นว่า เมื่อ DNA ของแบคทีเรียสายพันธุ์ S ถูกทำลายจึงไม่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ จึงสรุปได้ว่า ‘DNA เป็นสารพันธุกรรมของแบคทีเรีย’



❖ หลักฐานที่แสดงว่า DNA เป็นสารพันธุกรรมของไวรัสชนิดฟาจ (Phage) ❖

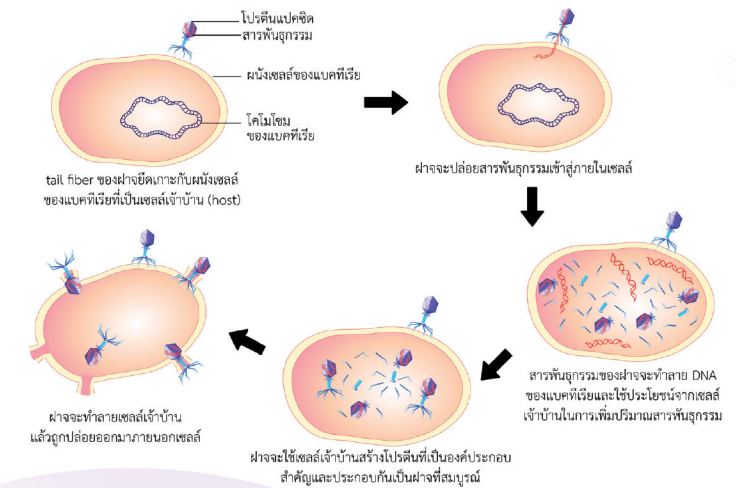
นอกเหนือจากการศึกษาชนิดของสารพันธุกรรมในแบคทีเรียแล้ว ในปี ค.ศ. 1952 Alfred Hershey และ Martha Chase ยังศึกษาชนิดของสารพันธุกรรมในแบคทีริโอฟาจ (bacteriophage) หรือเรียกสั้นๆ ว่า ฟาจ ชนิด T2 ซึ่งเป็นไวรัสที่มีขนาดเล็ก และมีความจำเพาะในการติดเชื้อแบคทีเรีย โครงสร้างของ phage ชนิดนี้ประกอบด้วย โปรตีนแคปซิด (capsid) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ 1. ส่วนหัว (head) ภายในมีสารพันธุกรรม 2. sheath 3. tail fiber 4. base plate



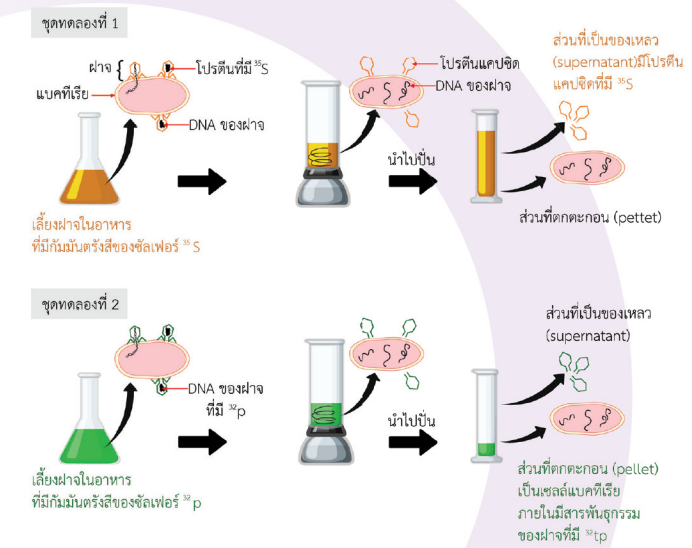
รูปที่ 5-3 โครงสร้างไวรัสชนิด bacteriophage ชนิด T2

ถึงแม้ไวรัสจะมีสารพันธุกรรมแต่ไวรัสไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ด้วยตัวเอง การเพิ่มจำนวนของไวรัส เช่น ฟาจชนิด T2 จะใช้ส่วน tail fiber ยึดเกาะกับผนังเซลล์ของแบคทีเรียที่เป็นเซลล์เจ้าบ้าน (host) จากนั้นจึงปล่อยสารพันธุกรรมเข้าสู่ภายในเซลล์โปรตีนส่วนอื่นๆ จะทิ้งอยู่ภายนอก หลังจากนั้นสารพันธุกรรมของฟาจจะทำลาย DNA ของแบคทีเรียและใช้ประโยชน์จากเซลล์เจ้าบ้านในการเพิ่มปริมาณสารพันธุกรรม ตลอดจนสร้างโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบสำคัญ ประกอบกันเป็นฟาจที่สมบูรณ์จำนวนมาก ท้ายที่สุดฟาจจะทำลายเซลล์เจ้าบ้านแล้วถูกปลดปล่อยออกมาภายนอกเซลล์

Hershey และ Chase ตั้งสมมติฐานการทดลองว่า 'มีเพียงสารพันธุกรรมของฟาจเท่านั้นที่เข้าไปในเซลล์แบคทีเรีย' จากสมมติฐานดังกล่าว Hershey และ Chase ได้แบ่งการทดลองเป็น 2 ชุด ได้แก่



รูปที่ 5-4 วงจรชีวิตของแบคทีริโอฟาจชนิด T2



รูปที่ 5-5 การทดลองของ Hershey และ Chase

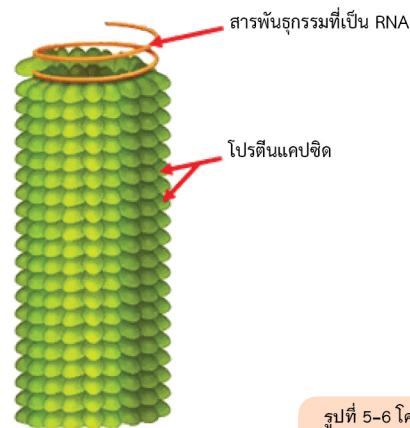
ชุดการทดลองที่ 1 เลี้ยงฝางในอาหารที่มีกัมมันตรังสี (radioactive isotopes) ของซัลเฟอร์ ^{35}S ซึ่งเป็นส่วนประกอบของโปรตีน เพื่อให้ ^{35}S เข้าไปเป็นส่วนประกอบของโปรตีนแคปซิด

ชุดการทดลองที่ 2 เลี้ยงฝางในอาหารที่มีกัมมันตรังสี (radioactive isotopes) ของฟอสฟอรัส ^{32}P ซึ่งเป็นส่วนประกอบของกรดนิวคลีอิก เพื่อให้ ^{32}P เข้าไปเป็นส่วนประกอบของสารพันธุกรรม

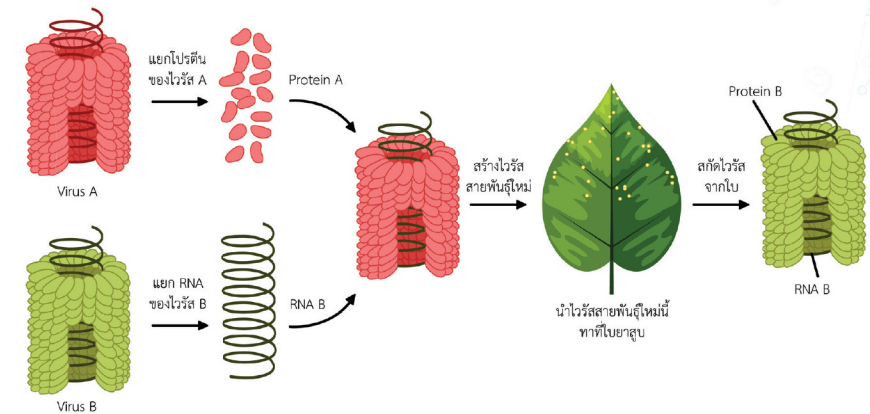
หลังจากนั้นเลี้ยงฝางในแต่ละชุดการทดลองร่วมกับแบคทีเรียชนิด *Escherichia coli* (*E. coli*) เป็นระยะเวลานานเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนของฝางในเซลล์ *E. coli* ซึ่งเป็นเซลล์เจ้าบ้าน จากนั้นจึงแยกแบคทีเรียออกจากฝางโดยใช้เครื่องปั่น แล้วจึงตรวจสอบหาชนิดและปริมาณของสารกัมมันตรังสี พบว่า ในชุดการทดลองที่ 1 หลังจากปั่นแล้วแยกส่วนประกอบได้ 2 ส่วน คือ ส่วนที่ตกตะกอน (pellet) ซึ่งเป็นเซลล์แบคทีเรีย และส่วนที่เป็นของเหลว (supernatant) ซึ่งเป็นเซลล์ฝาง พบ ^{35}S อยู่ในส่วนของเหลวถึง 80% แสดงว่า ^{35}S ที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนแคปซิดของฝางส่วนใหญ่ไม่สามารถเข้าไปในเซลล์แบคทีเรียได้ ส่วนชุดการทดลองที่ 2 หลังจากปั่นด้วยเครื่องปั่นแล้ว พบ ^{32}P อยู่ในส่วนที่ตกตะกอนถึง 65% แสดงว่า ^{32}P ที่เป็นส่วนประกอบของกรดนิวคลีอิกส่วนใหญ่สามารถเข้าไปในเซลล์ของแบคทีเรียได้ จากผลการทดลองของ Hershey และ Chase สามารถสรุปได้ว่า DNA เป็นสารพันธุกรรมมากกว่าโปรตีน

❖ หลักฐานที่แสดงว่า RNA เป็นสารพันธุกรรมของไวรัสบางชนิด ❖

ถึงแม้ว่าสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ รวมทั้งไวรัสชนิดฝาง T2 จะมีกรดนิวคลีอิกชนิด DNA เป็นสารพันธุกรรมทั้งแบบสองสาย (double-stranded DNA) หรือแบบสายเดี่ยว (single-stranded DNA) แต่ยังมีไวรัสบางชนิดที่มี RNA เป็นสารพันธุกรรม เช่น ไวรัสที่ทำให้เกิดโรคใบด่างในใบยาสูบ (Tobacco Mosaic Virus หรือ TMV) ซึ่งมีรูปร่างเป็นรูปทรงกระบอก มีโครงสร้างหลักเพียงโปรตีนหุ้มด้านนอกและสารพันธุกรรมชนิด single-stranded RNA



รูปที่ 5-6 โครงสร้างไวรัสชนิด Tobacco Mosaic Virus หรือ TMV



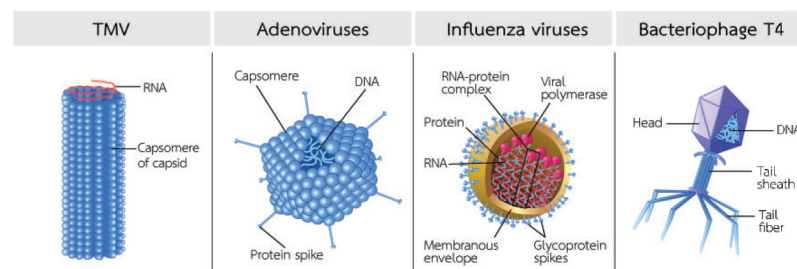
รูปที่ 5-7 การทดลองที่แสดงว่า RNA เป็นสารพันธุกรรมของไวรัสที่ทำให้เกิดโรคใบด่างในใบยาสูบ (TMV)

ช่วงปี ค.ศ. 1950 มีการทดลองที่แสดงว่า RNA เป็นสารพันธุกรรมของไวรัสชนิด TMV โดยมีการสกัด RNA จากไวรัส TMV แล้วนำไปฉีดพ่นลงบนใบยาสูบ พบว่าใบยาสูบเกิดการติดเชื้อและถูกทำลาย ต่อมาเมื่อมีการศึกษาโดยใช้ไวรัสที่ทำให้เกิดโรคใบด่างในใบยาสูบ 2 สายพันธุ์ คือ สายพันธุ์ A และสายพันธุ์ B โดยไวรัสสายพันธุ์ A มีโปรตีนชนิด A และสารพันธุกรรมเป็น RNA ชนิด A ส่วนไวรัสสายพันธุ์ B มีโปรตีนชนิด B และสารพันธุกรรมเป็น RNA ชนิด B ทำการทดลองโดยแยกโปรตีนและสารพันธุกรรมของไวรัสทั้งสองสายพันธุ์ออกจากกัน แล้วนำมารวมกันใหม่เพื่อสร้างไวรัสสายพันธุ์ใหม่โดยสลับโปรตีน และ RNA จากนั้นนำไวรัสสายพันธุ์ใหม่นี้มาฉีดพ่นที่ผิวใบยาสูบ เมื่อใบยาสูบแสดงอาการของโรคใบด่าง จึงนำมาสกัดเพื่อศึกษาชนิดของไวรัสที่ทำให้เกิดโรค จากผลการทดลองพบว่า ใบยาสูบที่เกิดโรคจากไวรัสสายพันธุ์ที่มี RNA ชนิด A และโปรตีนชนิด B จะพบแต่เชื้อไวรัสที่มีโปรตีน และ RNA ชนิด A เท่านั้น ส่วนใบยาสูบที่เกิดโรคจากไวรัสสายพันธุ์ที่มี RNA ชนิด B และโปรตีนชนิด A จะพบแต่เชื้อไวรัสที่มีโปรตีน และ RNA ชนิด B เท่านั้น จึงสรุปได้ว่า 'RNA เป็นสารพันธุกรรมที่ควบคุมการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของไวรัส TMV ไม่ใช่โปรตีน'

ความรู้เพิ่มเติม

ไวรัสไม่จัดว่าเป็นเซลล์เนื่องจากไม่มีคุณสมบัติตามทฤษฎีของเซลล์ ไวรัสมีองค์ประกอบเพียงกรดนิวคลีอิก ซึ่งอาจเป็น DNA หรือ RNA และโปรตีนห่อหุ้ม แต่ไวรัสทุกชนิดจำเป็นต้องอาศัยเซลล์ของสิ่งมีชีวิตอื่นหรือเซลล์บ้านในการเพิ่มจำนวนของไวรัสเอง

ชนิดของไวรัส	เซลล์เจ้าบ้าน	ชนิดของสารพันธุกรรม	จำนวนของยีน (ยีน)
Parvovirus	สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม	ssDNA	5
Lambda	Escherichia coli	dsDNA	71
T4	Escherichia coli	dsDNA	288
TMV	พืช	ssRNA	6
Inuenza virus	สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม	ssRNA	11
HIV	Primate	ssRNA	9
Herpes simplex virus Type II	มนุษย์	dsDNA	77



องค์ประกอบและโครงสร้างของกรดนิวคลีอิก

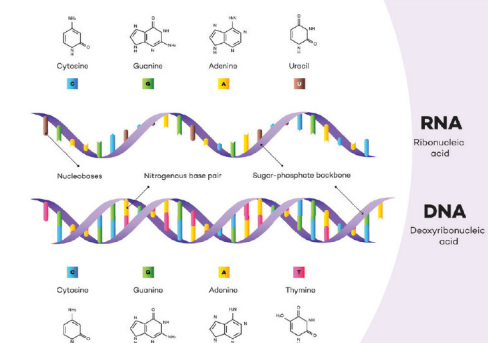
จากการทดลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า สารพันธุกรรมที่ควบคุมการถ่ายทอดลักษณะเป็นสารชีวโมเลกุลประเภทกรดนิวคลีอิก โดยสารพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่เป็นชนิด DNA แต่ในไวรัสบางชนิดเป็น RNA เช่น ไวรัสที่ทำให้เกิดโรคในใบยาสูบ (TMV) ไวรัสที่ก่อให้เกิดโรคไขหวัดใหญ่ (Influenza virus) ไวรัสที่ก่อให้เกิดโรคเอดส์ (HIV) เป็นต้น

โครงสร้างของกรดนิวคลีอิก

นิวคลีโอไทด์ (nucleotide)

กรดนิวคลีอิกมีหน่วยย่อยเป็น 'นิวคลีโอไทด์' มีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ น้ำตาลเพนโทสที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ไนโตรจีนัสเบส และหมู่ฟอสเฟต

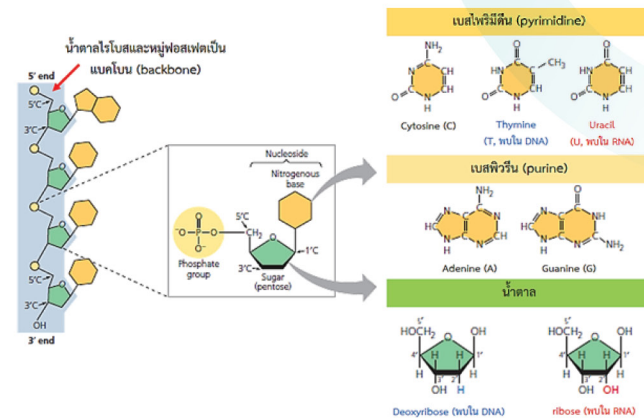
- น้ำตาลเพนโทสที่มีคาร์บอน 5 อะตอม มี 2 ชนิด ได้แก่
 - น้ำตาลดีออกซีไรโบส (deoxyribose) พบใน DNA
 - น้ำตาลไรโบส (ribose) พบใน RNA
- ไนโตรจีนัสเบส แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่
 - เบสพิวรีน (purine) ประกอบด้วย อะดีนีน (adenine, A) กวานีน (guanine, G)
 - เบสไพริมิดีน (pyrimidine) ประกอบด้วย ไซโทซีน (cytosine, C) ไทมีน (thymine, T) พบเฉพาะใน DNA) ยูราซิล (uracil, U) พบเฉพาะใน RNA)
- หมู่ฟอสเฟต



รูปที่ 5-8 ไนโตรจีนัสเบสของ DNA และ RNA

โพลีนิวคลีโอไทด์ (Polynucleotide)

กรดนิวคลีอิกประกอบด้วยนิวคลีโอไทด์หลายหน่วยต่อกันเป็นสายยาวโพลีนิวคลีโอไทด์ (Polynucleotide) โดยคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ของนิวคลีโอไทด์ตัวแรกเชื่อมต่อกับอะตอมออกซิเจนของนิวคลีโอไทด์ตัวที่สองด้วยพันธะฟอสโฟไดเอสเทอร์ (Phosphodiester Bond) เมื่อเกิดการต่อกันเป็นโพลีนิวคลีโอไทด์สายยาว จะพบว่าปลายด้านหนึ่งของสายโพลีนิวคลีโอไทด์เป็นปลายอิสระของหมู่ฟอสเฟตที่ต่ออยู่กับคาร์บอนตำแหน่งที่ 5 ของนิวคลีโอไทด์ตัวแรก เรียกปลายด้านนี้ว่า ปลาย 5' ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งเป็นปลายอิสระของ $-OH$ ที่จับกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ของนิวคลีโอไทด์ตัวสุดท้าย เรียกปลายด้านนี้ว่า ปลาย 3'



รูปที่ 5-9 องค์ประกอบของนิวคลีโอไทด์

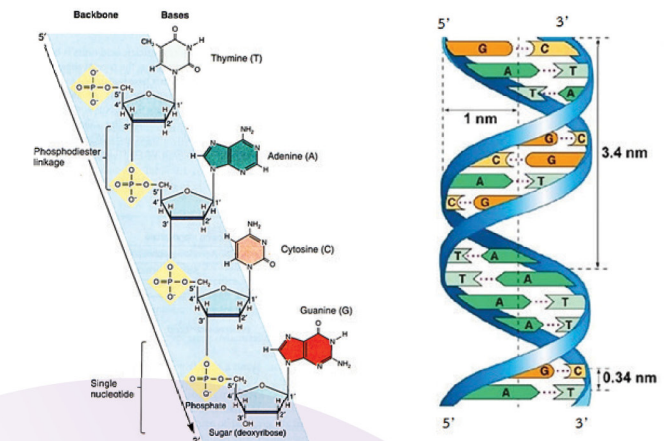
โครงสร้างของ DNA มีลักษณะเป็นสายโพลีนิวคลีโอไทด์เกลียวคู่

จากการศึกษาของนักวิทยาศาสตร์หลาย ๆ ท่าน ทำให้ทราบถึงโครงสร้างโมเลกุลของ DNA ประกอบด้วยสายโพลีนิวคลีโอไทด์ 2 สาย พันกันเป็นเกลียวในทิศทางขนานสวนทาง (antiparallel) โดยโพลีนิวคลีโอไทด์สายแรกมีปลาย 5' $\rightarrow$ 3' ส่วนสายที่สองมีปลาย 3' $\rightarrow$ 5' นอกจากนี้ ในโครงสร้างของโพลีเพปไทด์ทั้งสองสายจะสร้างพันธะไฮโดรเจนกับเบสคู่สม (complementary base) กล่าวคือ เบสคู่สมระหว่าง A กับ T โดยสร้างพันธะไฮโดรเจน 2 พันธะ ($A=T$) และเบสคู่สมระหว่าง G กับ C โดยสร้างพันธะไฮโดรเจน 3 พันธะ ($G=C$)

โครงสร้างของ DNA มีลักษณะเป็นเกลียวคู่ (double helix) คล้ายกับบันไดเวียนขวา (B-DNA) โดย 1 รอบเกลียวมีความยาว 3.4 นาโนเมตร (nm) พบเบสคู่สม 10 คู่เบส แต่ละคู่เบสจึงอยู่ห่างกัน 0.34 นาโนเมตร มีโมเลกุลของน้ำตาลไรโบสและหมู่ฟอสเฟตเป็นแบคโบน (backbone) เปรียบเทียบได้กับ

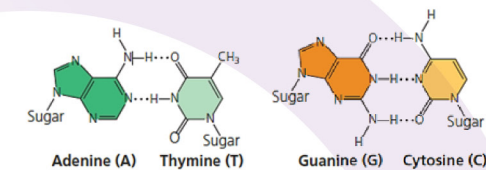


ราวบันได ส่วนขั้นบันได คือ เบสคู่สมระหว่างสายโพลีนิวคลีโอไทด์ อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันพบว่า DNA ยังคงมีลักษณะเป็นเกลียวคู่แบบเวียนซ้าย (Z-DNA) อีกด้วยขึ้นอยู่กับชนิดของเบส ปริมาณน้ำและไอออนของโลหะที่จับกับ DNA



(ก) สายโพลีนิวคลีโอไทด์ 1 สาย

(ข) เบสคู่สมระหว่างสายโพลีนิวคลีโอไทด์



รูปที่ 5- 10 (ค) พันธะไฮโดรเจนระหว่างเบสคู่สม

สำหรับการดิวคตินิกชนิด RNA มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับเบสคู่สมและพันธะไฮโดรเจนระหว่างเบสคู่สมของ DNA ที่ประกอบด้วยนิวคลีโอไทด์เชื่อมต่อกันด้วยพันธะฟอสโฟไดเอสเทอร์ แต่เป็นโพลีนิวคลีโอไทด์สายเดี่ยว ส่วนน้ำตาลเป็นน้ำตาลไรโบส และมีเบสยูราซิล (U) แทนเบสไทมีน (T) โดย RNA แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

1. RNA นำรหัส (messenger RNA, mRNA) ได้มาจากการบวนการถอดรหัสจาก DNA ต้นแบบ (transcription) ทำหน้าที่สำคัญเป็นรหัสพันธุกรรมสำหรับการสังเคราะห์โปรตีนในกระบวนการแปลรหัส (translation)
2. RNA ไรโบโซม (ribosomal RNA, rRNA) ได้มาจากการบวนการถอดรหัสจาก DNA ต้นแบบ ทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบของไรโบโซม
3. RNA ถ่ายโอน (transfer RNA, tRNA) ได้มาจากการบวนการถอดรหัสจาก DNA ต้นแบบ ทำหน้าที่ในการนำกรดอะมิโนต่าง ๆ ไปยังไรโบโซม เพื่อการสังเคราะห์โปรตีนต่อไป