

คู่มือเรียนรายวิชา กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์
เพิ่มเติม ตามหลักสูตรแกนกลาง พ.ศ. 2551
(ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560)



BIOLOGICAL ชีววิทยา

พศ.ประสงค์ หล้าสะอาด

กค.บ. ชีววิทยา (เทียบเคียงม.ค.บ. 1)
ว.บ. (สัตววิทยา จุฬาลงกรณ์)
Cert. in Teaching & Learning in Hi-Ed.
and Research Supervision (University of Sydney, Australia)
อาจารย์สอนวิชาชีววิทยา CHEM. HOUSE

พศ.ดร.จิตเกษม หล้าสะอาด

ว.บ. (ชีววิทยา, จุฬาลงกรณ์), ว.ค. (กีฏวิทยา, ม.เกษตรศาสตร์)

ม.4 เล่ม 2



สรุปเนื้อหาสำคัญ

- โครโมโซมและสารพันธุกรรม
- การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม
- เทคโนโลยีทาง DNA
- วิวัฒนาการ

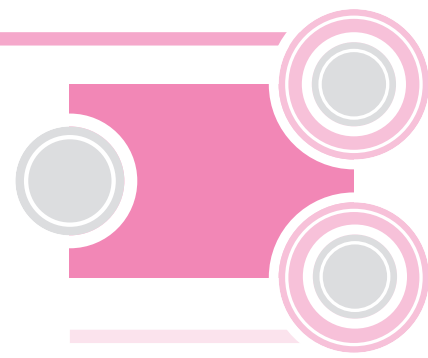
แบบทดสอบท้ายบท

ข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัยครบทุกระบบ

พร้อมเฉลยครบถ้วน



คู่มือรายวิชา เพิ่มเติม
กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์
(ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560)



เพิ่มเติม ชีววิทยา ม.4 เล่ม 2

- โครโมโซมและสารพันธุกรรม
- การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม
- เทคโนโลยีทาง DNA
- วิวัฒนาการ

เหมาะสำหรับ

- ☑ เน้นสำหรับนักเรียนที่เรียนวิทยาศาสตร์
- ☑ ใช้สอบ Entrance เข้ามหาวิทยาลัยระบบ Admissions PAT 2 และ O-NET
- ☑ ใช้สอบตรงเพื่อเข้ามหาวิทยาลัยประเภทโควตาฯ
- ☑ สอบประจำภาคเรียน
- ☑ สามารถใช้ศึกษาด้วยตนเอง

พศ.ประสงค์ หล้าสะอาด

กค.ม. ชีววิทยา (เกียรติคุณอันดับ 1), วท.ม. (สัตววิทยา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
Cert. in Teaching & Learning in Hi-Ed. and Research Supervision
(University of Sydney, Australia)

พศ.ดร.จิตเกษม หล้าสะอาด

วท.ม. (ชีววิทยา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย), วท.ด. (กีฏวิทยา, ม.เกษตรศาสตร์)

● **สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ (ฉบับเพิ่มเติม) พ.ศ. 2558**

เพิ่มเติม จิตวิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560)

ชีววิทยา

ม.4 เล่ม 2

ผู้เรียบเรียง : **ผศ.ประสงค์ เหล่าสะอาด**
ผศ.ดร.จิตเกษม เหล่าสะอาด

กองบรรณาธิการ : อรศรี ไรจน์พจนรัตน์, ณัฐธินัน ลูกเสือดิรา, อมรศักดิ์ บุญเรือง, พิรุณนิชา ไบสุวรรณ
 สถาพร พุศิริถิรพร, มนชญา กมลวานนท์, ยุภาภรณ์ แดงมณี

จัดพิมพ์ : บริษัท สำนักพิมพ์ พ.ศ. พัฒนา จำกัด
 12 หมู่ 6 แยก 3 ถ.พระราม 6 (ซ. 41) แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400
 โทร 02-279-6222 (อัตโนมัติ 15 คู่สาย) โทรสาร 02-279-6203-4

พิมพ์ที่ : บริษัท เรืองแสงการพิมพ์ (2002) จำกัด
 48/1722 หมู่ 7 ซอยหมู่บ้าน ดี.เค. ถนนกาญจนาภิเษก แขวงบางบอน เขตบางบอน กรุงเทพฯ 10150

ผู้พิมพ์ - ผู้โฆษณา
 นายมานิตย์ พิภพปัญญา



หนังสือเล่มนี้พิมพ์ด้วย **กระดาษรีไซเคิล** เอ
 กระดาษจากไม้ปลูก ไม่รบกวนไม้ธรรมชาติ



คู่มือเรียนรายวิชา **เพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ชีววิทยา ม.4 เล่ม 2** นี้ ได้เรียบเรียงขึ้นตามโครงสร้างใหม่ หลักสูตรการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551 (**ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560**) ตรงตามหลักสูตรสาระการเรียนรู้ วิทยาศาสตร์เพิ่มเติมใหม่ล่าสุดตามผลการเรียนรู้ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (**ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560**) ของสสวท. ทบทวนได้เพิ่มเติมเนื้อหาที่เห็นว่านักเรียนระดับนี้ควรจะได้รู้ได้เข้าใจเอาไว้ด้วย เพื่อให้นักเรียนได้มีความรอบรู้อย่างกว้างขวาง เพื่อเป็นประโยชน์ในการสอบประจำภาค และสอบเข้าศึกษาต่อในระดับสูงต่อไป

เนื้อหาของหนังสือเล่มนี้สรุปไว้เป็นบทๆ ตามลำดับ พร้อมด้วยภาพประกอบจำนวนมาก เพื่อให้ง่ายแก่การเข้าใจ ท้ายบททุกบทมีตัวอย่างข้อสอบ วัดความรู้ตามจุดประสงค์การเรียนรู้เป็นจำนวนมาก เพื่อให้ครอบคลุมเนื้อหาในทุกแง่มุมให้นักเรียนได้ลองฝึกทำ นอกจากนี้ผู้เรียบเรียงยังได้เฉลยข้อสอบอย่างละเอียด โดยให้เหตุผลประกอบด้วยทุกข้อ เพื่อความสะดวกของนักเรียนที่ใช้หนังสือเล่มนี้ ผู้เรียบเรียงขอแนะนำ วิธีการใช้หนังสือเล่มนี้ อย่างถูกต้องคือ อ่านและทำความเข้าใจเนื้อหาก่อน ต่อจากนั้นจึงลองทำตัวอย่างข้อสอบหากสงสัยหรือไม่เข้าใจ หรือทำไม่ได้จึงค่อยเปิดแบบเฉลยดู และควรดูที่เหตุผลที่ให้ไว้ด้วยว่าทำไมจึงเลือกข้อนั้น หากท่านปฏิบัติได้ดังนี้ ผู้เรียบเรียงเชื่อว่าหนังสือเล่มนี้ จะเป็นหนังสือ คู่มือเรียน **กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ ชีววิทยา ม.4 เล่ม 2 (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560)**ของท่านอย่างแท้จริง

ในการจัดทำหนังสือเล่มนี้อาจมีข้อบกพร่องหรือผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ผู้เรียบเรียงยินดีรับความคิดเห็นและข้อเสนอแนะจากผู้ทุกท่าน เพื่อจะได้แก้ไขปรับปรุงสำหรับการพิมพ์ครั้งต่อไป

ผู้เรียบเรียงหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือ คู่มือเรียน **กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ ชีววิทยา ม.4 เล่ม 2 (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560)** นี้ คงอำนวยประโยชน์ให้แก่ นักเรียนมากพอสมควร

ด้วยความปรารถนาดีอย่างจริงใจ



(ผศ.ประสงค์ หล้าสะอาด)

ในนามผู้เรียบเรียง

สารบัญ

บทที่ 4 โครโมโซมและสารพันธุกรรม

4.1 โครโมโซม	
รูปร่าง ลักษณะและจำนวนของโครโมโซม	1
ส่วนประกอบของโครโมโซม	5
4.2 สารพันธุกรรม	7
การค้นพบสารพันธุกรรม	7
องค์ประกอบทางเคมีของ DNA	9
โครงสร้างของ DNA (Deoxyribonucleic acid)	12
4.3 สมบัติของสารพันธุกรรม	16
การสังเคราะห์ DNA	16
การควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมของ DNA	19
โครงสร้างของ DNA ในโพรคาริโอตและยูคาริโอต	34
4.4 มิวเทชัน	35
4.5 โครโมโซมของคน	37
การเกิดลูกหญิงลูกชาย	39
ความผิดปกติของโครโมโซมในคน	39
4.6 การกำหนดเพศ	43
การกำหนดเพศในสิ่งมีชีวิตที่มีโครโมโซมเพศ	43
การกำหนดเพศโดยอาศัยชุดของโครโมโซม	47
การกำหนดเพศในพืชพวกมะละกอ ข้าวโพด	48
การกำหนดเพศโดยอาศัยสิ่งแวดล้อม	49
การกำหนดเพศในสิ่งมีชีวิตชั้นต่ำ	49

บทที่ 5 การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม

5.1 การศึกษาพันธุกรรมของเมนเดล	53
กฎการแยก	59
กฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระ	60
การถ่ายทอดยีนบนโครโมโซม	71
5.2 ลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล	73
ความเด่นไม่สมบูรณ์	73
ความเด่นรวม	74
มัลติเพิลแอลลีล	75
ลักษณะควบคุมด้วยยีนหลายคู่	80
การถ่ายทอดยีนบนโครโมโซมเพศ	85
5.3 ยีนบนโครโมโซมเดียวกัน	90
5.4 ลักษณะที่อยู่ใต้อิทธิพลของเพศ	94
5.5 ลักษณะที่ปรากฏเฉพาะเพศ	94
5.6 การถ่ายทอดลักษณะบางประการของยีนบนออโตโซม	95
ยีนที่ควบคุมลักษณะหมู่เลือดระบบ Rh	95
ยีนที่ทำให้เกิดโรคทาลัสซีเมีย	97

บทที่ 6 เทคโนโลยีทาง DNA

6.1 พันธุวิศวกรรมและการโคลนยีน	101
การโคลนยีนโดยใช้พลาสมิดของแบคทีเรีย	104
การเชื่อมต่อสาย DNA ด้วยเอนไซม์ดีเอ็นเอไลเกส	105
การถ่ายดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์เข้าสู่เซลล์แบคทีเรียคัดเลือกเซลล์ที่ต้องการ	108

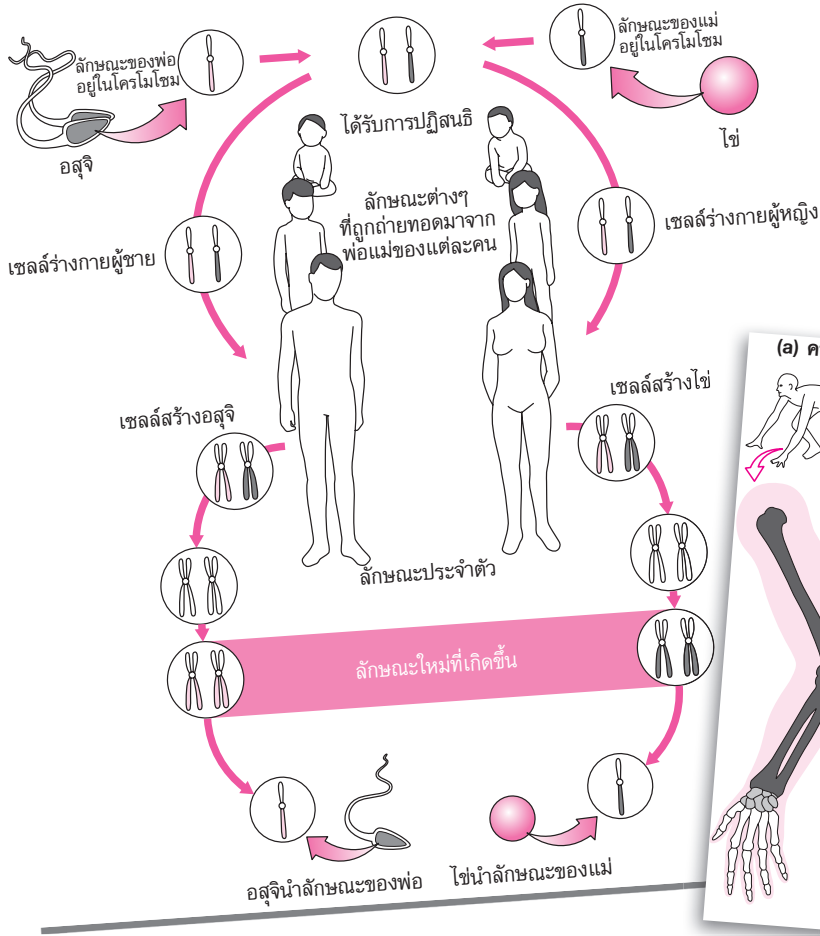
สารบัญ

6.2 การหาขนาดของ DNA และการหาลำดับนิวคลีโอไทด์	108
การหาขนาดของ DNA และการหาลำดับนิวคลีโอไทด์	108
การศึกษาจีโนม	108
6.3 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทาง DNA	110
ด้านการแพทย์และเภสัชกรรม	110
ด้านการเกษตรและอุตสาหกรรม	110
ด้านนิติวิทยาศาสตร์	112
6.4 ความปลอดภัยของเทคโนโลยีทาง DNA และมุมมองทางสังคมและวัฒนธรรม	112
♦ ตัวอย่างข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัย บทที่ 4-5-6 พันธุศาสตร์	113
☞ เฉลยตัวอย่างข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัย บทที่ 4-5-6 พันธุศาสตร์	145
♦ แบบทดสอบวัดความรอบรู้ บทที่ 4-5-6 พันธุศาสตร์	169
☞ เฉลยแบบทดสอบวัดความรอบรู้ บทที่ 4-5-6 พันธุศาสตร์	179

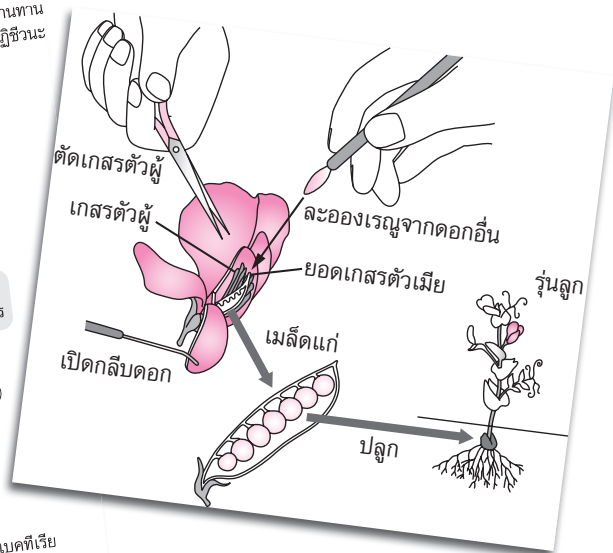
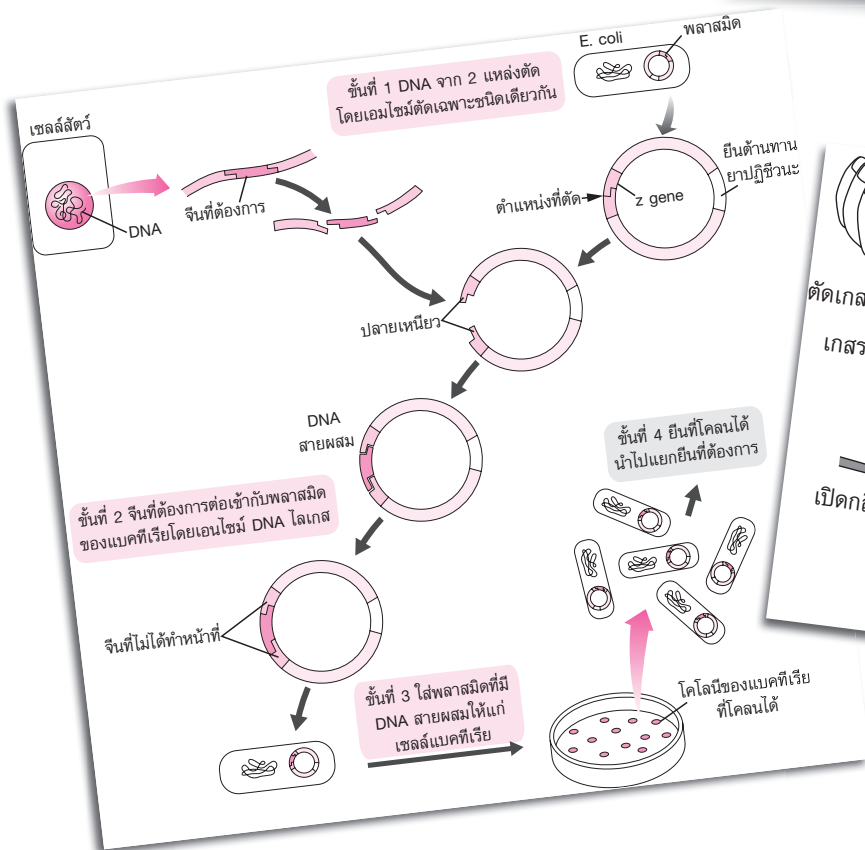
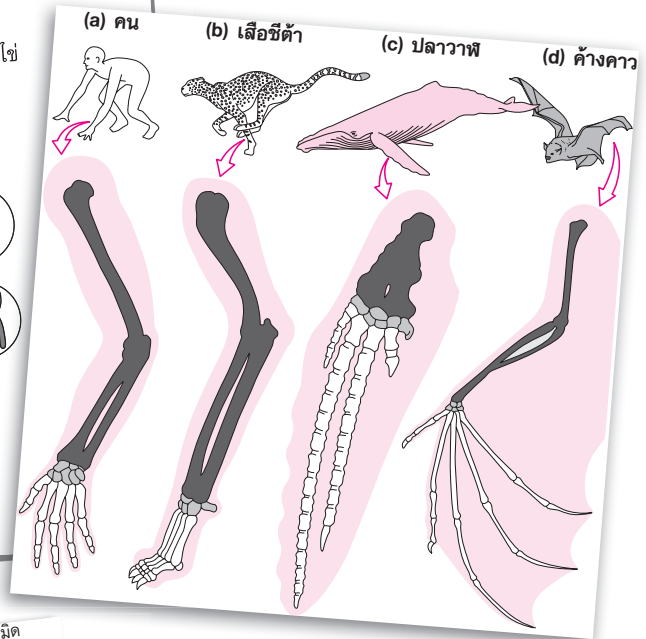
บทที่ 7 วิวัฒนาการ

7.1 หลักฐานและข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต	187
ซากดึกดำบรรพ์	187
กายวิภาคเปรียบเทียบ	192
วิทยาเอ็มบริโอ	193
การแพร่กระจายของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์	195
ชีววิทยาโมเลกุล	197
7.2 แนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต	200
แนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของลามาร์ก	200
แนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการการคัดเลือกโดยธรรมชาติของดาร์วิน	200

7.3 พันธุศาสตร์ประชากร	206
ความถี่ของแอลลีลและความถี่ของจีโนไทป์	206
หลักการของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก	207
การประยุกต์ใช้ทฤษฎีของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก	209
7.4 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีล	210
7.5 กำเนิดสปีชีส์	214
ความหมายของสปีชีส์	214
กำเนิดสปีชีส์ใหม่	216
7.6 การพัฒนากับวิวัฒนาการ	218
การดื้อสารฆ่าแมลงและยา	218
การพัฒนากับความสัมพันธ์ของสิ่งมีชีวิตในเชิงวิวัฒนาการ	219
มนุษย์กับวิวัฒนาการ	220
การพัฒนาและการสูญพันธุ์	220
7.7 กำเนิดของชีวิต	220
กำเนิดสิ่งมีชีวิต	220
วิวัฒนาการของพืช	225
วิวัฒนาการของสัตว์	226
7.8 วิวัฒนาการของมนุษย์	232
♦ ตัวอย่างข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัย บทที่ 7 วิวัฒนาการ	247
📖 เฉลยตัวอย่างข้อสอบเข้ามหาวิทยาลัย บทที่ 7 วิวัฒนาการ	260
♦ แบบทดสอบวัดความรอบรู้ บทที่ 7 วิวัฒนาการ	268
📖 เฉลยแบบทดสอบวัดความรอบรู้ บทที่ 7 วิวัฒนาการ	274



:ภาพช่วยจำ:



บทที่
4

โครโมโซมและสารพันธุกรรม

4.1 โครโมโซม

4.1.1 รูปร่าง ลักษณะ และจำนวนโครโมโซม

โครโมโซมในระยะเมทาเฟส และระยะแอนาเฟสของการแบ่งเซลล์เป็นระยะที่โครโมโซมมีการหดตัวสั้นที่สุดและขนาดค่อนข้างที่จะคงที่ จึงเหมาะสมที่จะนำมาศึกษารูปร่างของโครโมโซม (chromosome structure) จัดแบ่งโดยอาศัย ตำแหน่งของเซนโทรเมียร์ แบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ

1. **เมทาเซนทริก (metacentric chromosome)** เป็นโครโมโซมที่มีจุดเซนโทรเมียร์อยู่บริเวณกลางๆ แขนทั้งสองข้างจึงมีขนาดเท่าๆ กัน

2. **ซับเมทาเซนทริก (submetacentric chromosome)** เป็นโครโมโซมที่มีเซนโทรเมียร์ค่อนข้างไปทางด้านใดด้านหนึ่งทำให้แขนของโครโมโซมยาวไม่เท่ากันด้านหนึ่งยาวด้านหนึ่งสั้น

3. **อะโครเซนทริก (acrocentric chromosome)** เป็นโครโมโซมที่มีเซนโทรเมียร์ตั้งอยู่ใกล้ปลายสุดของด้านใดด้านหนึ่งมากจนทำให้แขนข้างหนึ่งสั้นมาก นอกจากนี้บนแขนสั้น (short arm) ยังอาจมีรอยคอดที่ 2 (secondary constriction) ทำให้ปลายตั้งมีลักษณะกลมเรียกว่า แซทเทลไลต์ (satellite)

4. **เทโลเซนทริก (telocentric chromosome)** เป็นโครโมโซมที่มีเซนโทรเมียร์อยู่ปลายสุดทางปลายใดปลายหนึ่งทำให้โครโมโซมมีเพียงแขนเดียว

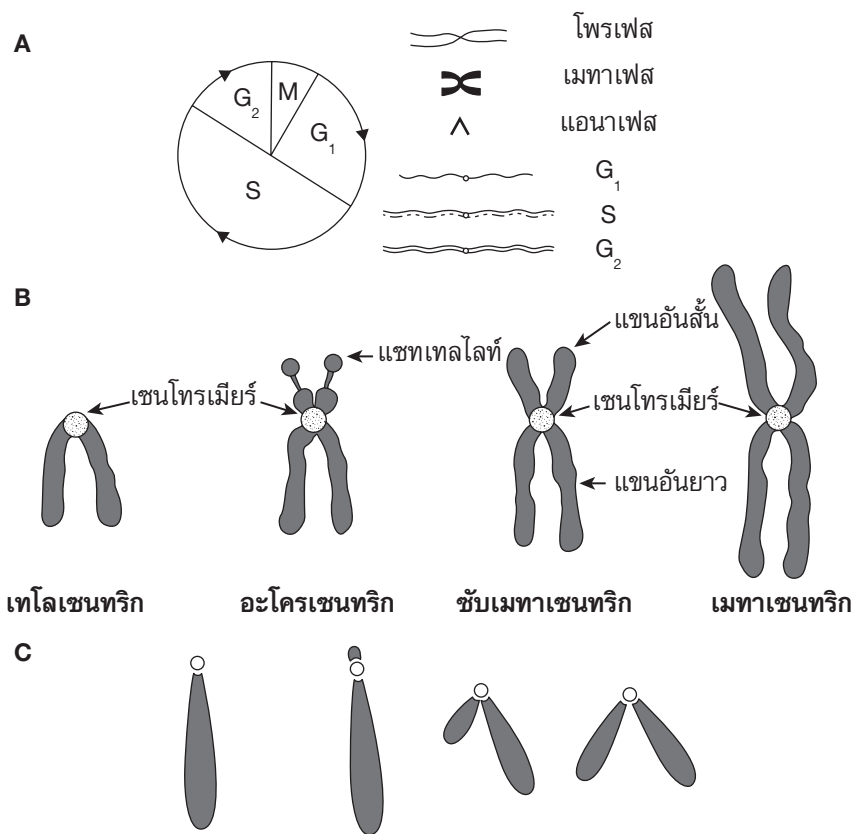
ในระยะแอนาเฟสมีการดึงเซนโทรเมียร์ไปยังขั้วทั้งสองของเซลล์ใหม่ทำให้โครโมโซมมีรูปร่างต่างๆ กัน เช่น พวงเมทาเซนทริกเป็นรูปตัว วี (V shape) ซับเมทาเซนทริกเป็นรูปตัว เจ (J shape) และอะโครเซนทริกและเทโลเซนทริกเป็นรูปตัว ไอ (I shape) เป็นต้น

โครโมโซมแต่ละโครโมโซมประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ

1. **เซนโทรเมียร์ (centromere)** มีชื่อเรียกหลายชื่อ เช่น ไคเนโทคอร์ (kinetochore) หรือ ไพรมารีคอนสตริกชัน (primary constriction) เป็นตำแหน่งที่แขนทั้งสองข้างของโครโมโซมมาพบกัน ซึ่งเป็นที่อยู่ของโปรตีนชนิดพิเศษและ DNA และมีสปินดีลจำนวนมากมาเกาะอยู่ทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของโครโมโซมไปยังขั้วของเซลล์ ตามปกติเซนโทรเมียร์จะแบ่งตัวตามยาวในระยะแอนาเฟส แต่ถ้าหากแยกกันตามขวางจะทำให้โครโมโซมที่แยกออกจากกันผิดปกติ

2. **โครโมนีมาตา (chromonemata)** ภายในโครโมโซมหรือโครมาทิดประกอบด้วยหน่วยย่อยคือโครโมนีมาตาซึ่งลักษณะเส้นใยยาวขดตัวจำนวนมากมายซึ่งก็คือ DNA และโปรตีนนั่นเอง

3. **เมทริกซ์ (matrix)** เป็นส่วนที่ล้อมรอบโครโมนีมาตา มีผนังเป็นปลอก (sheath หรือ pellicle) ยังไม่ทราบหน้าที่แน่นอน แต่เป็นไปได้ว่า ช่วยทำให้โครโมนีมาตารวมตัวกันเป็นโครโมโซมได้สะดวกขึ้น และช่วยห่อหุ้มยีนในขณะแบ่งเซลล์ด้วย



รูปที่ 4 - 1 โครโมโซม A รูปร่างของโครโมโซมขณะแบ่งเซลล์

B ชนิดของโครโมโซมตามตำแหน่งของเซนโทรเมียร์

C รูปร่างของโครโมโซมในระยะแอนาเฟส

4. แซทเทลไลต์ (satellite) คือส่วนสั้นๆ ที่อยู่บริเวณปลายๆ ของโครโมโซมเกิดจากการคอดของโครโมโซมอีกตำแหน่งหนึ่ง (secondary constriction) ให้เป็นเครื่องหมายในการจำแนกโครโมโซมได้ การสร้างนิวคลีโอลัส (nucleolus) มักจะเกี่ยวข้องกับการคอดของโครโมโซมในตำแหน่งนี้ (secondary constriction) และเรียกบริเวณที่โครโมโซมซึ่งมีการสร้างนิวคลีโอลัสว่า นิวคลีโอลาร์ ออร์แกไนซิง รีเจียน (nucleolar organizing region, NOR)

การศึกษาโครโมโซมของคนมีการเลือกชนิดของเซลล์ เพื่อวัตถุประสงค์ที่ต่างกันดังนี้

1. เซลล์ไขกระดูก เพื่อใช้ในการศึกษาและตรวจหาโครโมโซมของคนที่เป็นมะเร็งเม็ดเลือดขาว (วินิจฉัยและหาทางรักษา)
2. เซลล์ลิมโฟไซต์ เพื่อศึกษาจำนวนขนาดของโครโมโซมและนำมาจัดเรียงเป็นคู่เรียกว่า คาร์ิโอไทป์ (Karyotype)
3. เซลล์ของฟัตสจากน้ำคร่ำ เพื่อศึกษาความผิดปกติทางพันธุกรรม
4. เซลล์จากรก เพื่อศึกษาและวินิจฉัยความผิดปกติ หรือโรคของฟัตส

ในสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดจะมีจำนวนโครโมโซมไม่เท่ากันในยูคาริโอตชั้นสูง (higher eucaryote) โดยทั่วไปมีโครโมโซม 2 ชุด (2n, diploid) ยกเว้นในพืชชั้นสูงบางชนิด เช่น ข้าวสาลีบางพันธุ์ข้าวโพดบางพันธุ์ ยาสูบบางพันธุ์อาจมีโครโมโซมมากกว่า 2 ชุด (polyploid) ในยูคาริโอตชั้นต่ำ (lower eucaryote) ส่วนใหญ่ เช่น สาหร่าย เห็ดรา จะมีโครโมโซมเพียงชุดเดียว (n, monoploid) จำนวนโครโมโซมในสิ่งมีชีวิตมักมีมากขึ้นตามการเจริญพัฒนาหรือความสลับซับซ้อน (complexity) ของโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตนั้นแต่ก็ไม่ได้เป็นเช่นนี้เสมอไป

จำนวนโครโมโซมของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิด

สัตว์

ชื่อสามัญ (ไทย)	ชื่อวิทยาศาสตร์	จำนวนโครโมโซมทั้งหมด
1. คน	<i>Homo sapiens</i>	46
2. สุนัข	<i>Canis familiaris</i>	78
3. แมว	<i>Felis domestica</i>	38
4. ม้า	<i>Equus caballus</i>	54
5. หมู	<i>Sus scrofa</i>	40
6. ลิงวอก	<i>Macaca mulatta</i>	42
7. ลิงกอริลลา	<i>Gorilla gorilla</i>	46
8. ลิงชิมแปนซี	<i>Pan troglodytes</i>	48
9. หนู	<i>Rattus rattus</i>	42
10. ไฮดรา	<i>Hydra vulgaris</i>	32
11. นกพิราบ	<i>Columba livia</i>	80
12. เป็ด	<i>Anas platyrhynchos</i>	80
13. ผึ้ง	<i>Apis mellifica</i>	32, 16
14. ยุง	<i>Culex pipiens</i>	6
15. แมลงหวี่	<i>Drosophila melanogaster</i>	8
16. แมลงวัน	<i>Musca domestica</i>	12
17. ไรน้ำ	<i>Daphnia pulex</i>	20
18. คางคก	<i>Bufo terrestris</i>	20
19. แมลงสาบ	<i>Blattella germanica</i>	23, 24
20. ตั๊กแตน	<i>Melanoplus differentialis</i>	23, 24
21. กบ	<i>Rana pipiens</i>	26
22. ดาวทะเล	<i>Asterias forbesi</i>	36
23. ปลากัด	<i>Betta splendens</i>	42
24. หนูขาว	<i>Rattus norvegicus</i>	42
25. กระต่าย	<i>Oryctolagus cuniculus</i>	44
26. ชะนี	<i>Hylobates lar</i>	44
27. ลิงอุรังอุตัง	<i>Pongo pygmaeus</i>	48
28. แพะ	<i>Capra hircus</i>	60
29. ลา	<i>Equus asinus</i>	62
30. ล่อ	-	63 เป็นหมัน

พืช

ชื่อสามัญ (ไทย)	ชื่อวิทยาศาสตร์	จำนวนโครโมโซมทั้งหมด
1. มะละกอ	<i>Carica papaya</i>	18
2. กาแฟ	<i>Coffea arabica</i>	44
3. ทานตะวัน	<i>Helianthus annuus</i>	34
4. ยาสูบ	<i>Nicotiana tabacum</i>	48
5. มันฝรั่ง	<i>Solanum tuberosum</i>	48
6. ข้าว	<i>Oryza sativa</i>	24
7. อ้อย	<i>Saccharum officinarum</i>	80
8. หอม	<i>Allium cepa</i>	16
9. แตงกวา	<i>Cucumis sativus</i>	14
10. ส้ม	<i>Citrus sinensis</i>	18, 27, 36
11. ข้าวบาร์เลย์	<i>Hordeum vulgare</i>	14
12. ถั่วลันเตา	<i>Pisum sativum</i>	14
13. ผักตบชวา	<i>Eichhornia crassipes</i>	16
14. ลิ้นมังกร	<i>Antirrhinum majus</i>	16
15. กะหล่ำปลี	<i>Brassica oleracea</i>	18
16. ผักกาดหัว	<i>Raphanus sativus</i>	18
17. ข้าวโพด	<i>Zea mays</i>	20
18. แตงโม	<i>Citrullus vulgaris</i>	22
19. มะเขือเทศ	<i>Lycopersicon esculentum</i>	24
20. ฤๅษีผสม	<i>Coleus blumei</i>	24
21. สนภูเขา	<i>Pinus spp.</i>	24
22. ฝ้าย	<i>Gossypium arboreum</i>	26
23. เชอร์รี่	<i>Prunus cerasus</i>	32
24. แอปเปิล	<i>Malus sylvestris</i>	34, 51
25. ฟักทอง	<i>Cucurbita pepo</i>	40
26. ถั่วลิสง	<i>Arachis hypogaea</i>	40
27. กัลฉวย	<i>Musa paradisiaca</i>	22, 44, 55, 77, 88
28. ข้าวโอ๊ต	<i>Avena sativa</i>	42
29. ถั่วแขก	<i>Phaseolus vulgaris</i>	22
30. ข้าวสาลี	<i>Triticum vulgare</i>	42

สิ่งมีชีวิตชนิดอื่น ๆ บางชนิด

ชื่อสามัญ (ไทย)	ชื่อวิทยาศาสตร์	จำนวนโครโมโซมทั้งหมด
1. ยีสต์	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	30
2. สาหร่ายสีเขียวชนิดหนึ่ง	<i>Acetabularia mediterranea</i>	20
3. ยูกลีนา	<i>Euglena gracilis</i>	90
4. ราเมือกชนิดหนึ่ง	<i>Dictyostelium discoideum</i>	7
5. ราขนมปังสีชมพู	<i>Neurospora crassa</i>	7

ตารางที่ 4 - 1 แสดงจำนวนโครโมโซมของสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ

4.1.2 ส่วนประกอบของโครโมโซม

เซลล์ทุกเซลล์ในสิ่งมีชีวิตประกอบด้วยโครโมโซม โครโมโซมในเซลล์ร่างกายสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดมีจำนวนคงที่และเท่ากันเสมอ โครโมโซมของโพรคาริโอตและยูคาริโอต มีลักษณะที่แตกต่างกัน

ในโพรคาริโอต เช่น เซลล์แบคทีเรียโครโมโซมประกอบด้วย DNA รูปวงแหวน (circular DNA) เพียงชุดเดียว เรียกว่า จีโนพอร์ (genophore) ซึ่งเป็น DNA อย่างเดียวไม่มีโปรตีนอยู่ด้วยแบคทีเรีย *E. coli* มีจำนวนยีนประมาณ 3000 - 4000 ยีน ในไวรัสบางชนิด มี RNA ทำหน้าที่เป็นโครโมโซม (RNA virus) ซึ่งมีขนาดเล็กมาก โดยมียีนเพียง 3 ยีนเท่านั้น

ในยูคาริโอต โครโมโซมประกอบด้วย DNA RNA และโปรตีน โดยโปรตีนมี 2 ชนิดคือ โปรตีนฮิสโตน (histone) ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีกรดอะมิโนประจุบวก ซึ่งมีฤทธิ์เป็นเบสจำนวนมาก เช่น ไลซีน อาร์จินีน ช่วยให้ DNA เกาะกับโปรตีนได้อย่างดีและติดแน่นและโปรตีน นอน-ฮิสโตน (non-histone) ซึ่งเป็นโปรตีนชนิดอื่น ๆ จากการศึกษาเซลล์ชนิดยูคาริโอตชนิดต่าง ๆ พบว่า RNA และนอน-ฮิสโตน มีจำนวนน้อยและแปรผันไปตามชนิดของเซลล์ ส่วน DNA และฮิสโตนในเซลล์ทุกชนิดจะมีสัดส่วนค่อนข้างคงที่ คือประมาณ 1 : 1 ซึ่งแสดงว่า DNA และโปรตีนฮิสโตนมีความสำคัญมาก

เซลล์	DNA	RNA	ฮิสโตน	นอน-ฮิสโตน
ตับ	31	5	36	28
เอมบริโอของตัวลันเตา	31	4.5	33	7

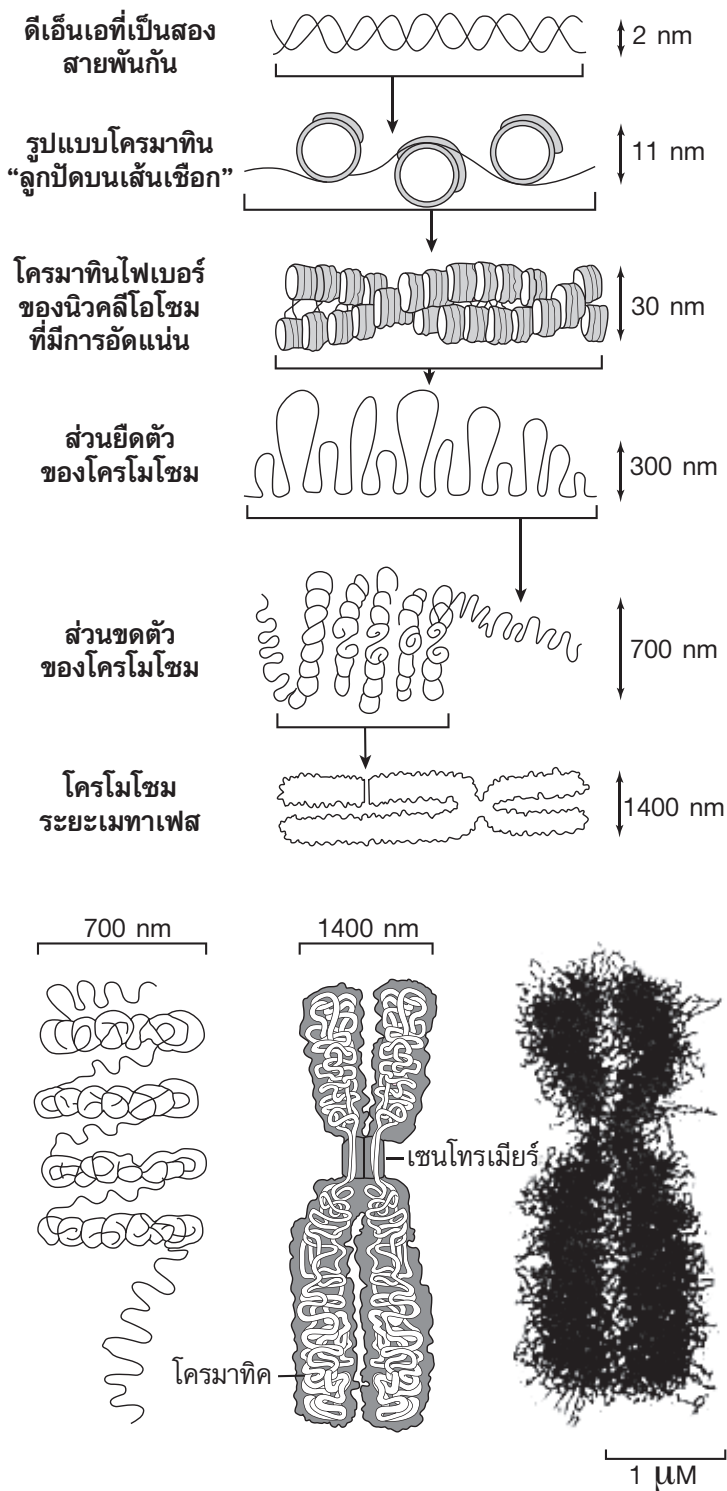
ตารางที่ 4 - 2 แสดงส่วนประกอบของโครโมโซม

นิวคลีโอโซม (nucleosome) คือโปรตีนฮิสโตนที่ผูกพันด้วย DNA 2 รอบ ทำให้มีลักษณะเหมือนลูกปัดที่ถูกร้อยด้วยเส้นด้าย (beads - on - a string) โดยเส้นด้ายคือ DNA ตัวเชื่อม (linker DNA) ซึ่งมีความยาวไม่คงที่ เมื่อย้อมสีโครโมโซมจะพบเป็นแถบสี 2 แบบคือ

1. ยูโครมาทิน (euchromatin) เป็นแถบสีจางเรียงตัวอย่างมีระเบียบเป็นที่ตั้งของยีนที่ทำหน้าที่จำนวนมาก
2. เฮเทอโรโครมาทิน (heterochromatin) เป็นบริเวณแถบสีเข้ม เป็นที่ตั้งของยีนจำนวนน้อยและมักไม่ได้ทำหน้าที่

ยูโครมาทิน	เฮเทอโรโครมาทิน
1. เป็นที่ตั้งของยีนจำนวนมาก	1. เป็นที่ตั้งของยีนจำนวนน้อย
2. เป็นยีนส่วนที่ทำหน้าที่	2. เป็นยีนส่วนที่ไม่ได้ทำหน้าที่
3. เป็นแถบสีจางและเป็นระเบียบ	3. เป็นแถบสีเข้มอยู่ใกล้เซนโทรเมียร์
4. อยู่บนโครโมโซมที่อยู่ห่างเซนโทรเมียร์	4. อยู่ใกล้เซนโทรเมียร์
5. มีการหดตัวและคลายตัวในขณะแบ่งเซลล์	5. ไม่มีการหดและคลายตัวในขณะแบ่งเซลล์
6. เปลี่ยนเป็นเฮเทอโรโครมาทินได้เมื่อไม่ทำหน้าที่	6. ส่วนใหญ่เปลี่ยนเป็นยูโครมาทินไม่ได้
7. สัณเคราะห์ได้เร็ว	7. สัณเคราะห์ได้ช้า

ตารางที่ 4 - 3 เปรียบเทียบลักษณะของยูโครมาทินและเฮเทอโรโครมาทิน



รูปที่ 4 - 2 การจัดเรียงตัวของโครโมโซมในระดับต่างๆ
เริ่มตั้งแต่สาย DNA พันอยู่กับโปรตีนฮิสโตน จนถึงแท่งโครโมโซม

4.2 สารพันธุกรรม

4.2.1 การค้นพบสารพันธุกรรม

สารพันธุกรรมได้มีการทดลองโดยนักวิทยาศาสตร์หลายท่านและเป็นขั้นตอนดังนี้

1. **โยฮันน์ ฟรีดริช มิเชอร์ (Johann Friedrich Miescher) พ.ศ. 2412** นักชีวเคมีชาวสวิสได้ทำการศึกษาสารเคมีที่สกัดได้จากนิวเคลียสของเซลล์เม็ดเลือดขาวที่ได้จากผ้าพันแผล และพบว่ามีความเป็นกรดเล็กน้อย มิเชอร์ให้ชื่อสารเคมีนี้ว่า *นิวคลีอิน (nuclein)* ซึ่งหมายถึงสารที่ได้จากนิวเคลียส สารนี้เมื่อตรวจสอบพบว่าเป็นกรดจึงได้ชื่อใหม่ว่า *กรดนิวคลีอิก (nucleic acid)* ซึ่งแตกต่างจากโปรตีนเนื่องจากโปรตีนไม่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย

2. **ร็อบเบิร์ต ฟอยล์เกน (Robert Feulgen) ปี พ.ศ. 2457** นักเคมีชาวเยอรมันได้ศึกษาและพัฒนาเทคนิค การย้อมสีนิวเคลียสทำหลังมิเชอร์ 2 - 3 ปี ฟอยล์เกนใช้สีฟุคซิน (fuchsin) ย้อมเซลล์และพบว่าสีนี้จะย้อมติดสารในนิวเคลียสให้สีม่วงแดงและสารที่ย้อมติดสีนี้คือ DNA (deoxyribonucleic acid) นั่นเอง นอกจากนี้ยังพบอีกว่า สีนี้จะย้อมติดเฉพาะสารภายในนิวเคลียสเท่านั้น ซึ่งแสดงว่าสารประกอบ DNA มีอยู่เฉพาะในนิวเคลียสเท่านั้น ในสิ่งมีชีวิตชนิดเดียวกันไม่ว่าจะเป็นเซลล์ของตับ ไต กล้ามเนื้อ หัวใจ ผิวหนัง จะมีปริมาณของ DNA เท่าๆ กัน ส่วนในเซลล์สืบพันธุ์จะมีปริมาณของ DNA ประมาณครึ่งหนึ่งของเซลล์ร่างกายของสิ่งมีชีวิตชนิดนั้นๆ

3. **เฟรเดอริก กริฟฟิท (Frederick Griffith) นายแพทย์ ชาวอังกฤษปี พ.ศ. 2471** ได้ทำการพิสูจน์สารพันธุกรรม เพื่อสนับสนุนว่า DNA เป็นสารพันธุกรรมไม่ใช่โปรตีน เนื่องจากในสมัยนั้นมีการถกเถียงกันมากกว่า สารพันธุกรรมนั้นควรจะเป็นกรดนิวคลีอิก โดยเฉพาะ DNA หรือ โปรตีนกันแน่ มีทั้งผู้ที่สนับสนุนว่าโปรตีนเป็นสารพันธุกรรมและก็มีผู้ที่สนับสนุนว่า DNA เป็นสารพันธุกรรม

กริฟฟิท เริ่มการทดลองโดยใช้แบคทีเรียนิวโมคอคคัส (*Streptococcus pneumoniae*) ซึ่งทำให้เกิดโรคปอดบวม ซึ่งมี 2 ชนิด คือ

1. **ชนิดที่ทำให้เกิดโรคปอดบวม** เป็นชนิดที่สร้างแคปซูล (capsule) ห่อหุ้มเซลล์ได้และสร้างโคโลนีขอบเรียบ (smooth colony) ให้ลักษณะย่อว่า S

2. **ชนิดที่ไม่ทำให้เกิดโรคปอดบวม** เป็นชนิดที่ไม่สร้างแคปซูลห่อหุ้มเซลล์และสร้างโคโลนีขอบขรุขระ (rough colony) ให้อักษรย่อว่า R

■ การทดลองของกริฟฟิททำดังนี้

กลุ่มควบคุม

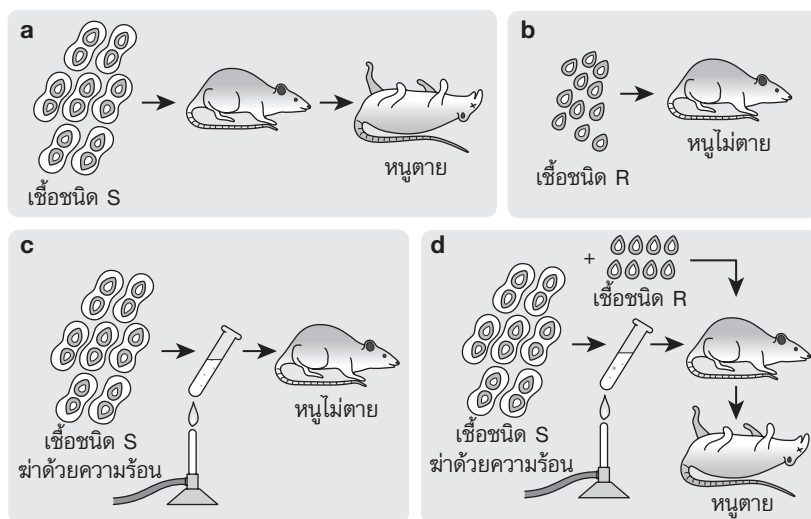
1. ฉีดเชื้อชนิด R เข้าไปในหนู ปรากฏว่าหนูไม่ตายและตรวจไม่พบเชื้อ R
2. ฉีดเชื้อชนิด S ซึ่งฆ่าด้วยความร้อนแล้วเข้าไปในหนู พบว่าหนูไม่ตายและตรวจไม่พบเชื้อ S

กลุ่มทดลอง

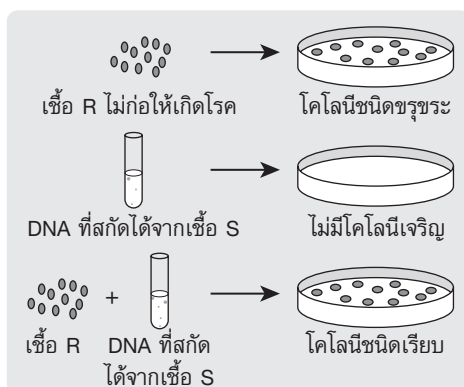
ฉีดเชื้อชนิด R ที่มีชีวิตอยู่พร้อมกับเชื้อชนิด S ที่ฆ่าด้วยความร้อนแล้ว เข้าไปในหนูพบว่าหนูตาย และตรวจพบเชื้อ S ด้วย

จากการทดลองชุดนี้แสดงให้เห็นว่าเชื้อชนิด R ต้องรับสารบางอย่างจากเชื้อชนิด S มาจึงทำให้เชื้อ R เปลี่ยนเป็นเชื้อชนิด S ได้ การเปลี่ยนแปลงสภาพจากชนิด R เป็นชนิด S เรียกว่า *ทรานฟอร์มเมชัน* (transformation) และสารที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพนี้เรียกว่า *ทรานฟอร์มมิงแฟคเตอร์* (transforming factor) ซึ่งยังไม่ทราบว่าสารนี้เป็นสารชนิดใด

4. ออสวอลด์ ที แอเวอรี่ (Oswald T. Avery) คอลิน แมคคลอยด์ (Colin Macleod) และ แมคคีน แมคคาร์ที (Maclyn McCarty) นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกันแห่งสถาบันร็อคกี้เฟลเลอร์ (Rockefeller Institute) ปี พ.ศ. 2487 ได้ทำการทดลองโดยการแยกสารต่างๆ คือ DNA, โปรตีน, ไขมัน, คาร์โบไฮเดรตจากแบคทีเรียชนิด S แล้วนำสารเหล่านี้ใส่รวมกับแบคทีเรียชนิด R ในหลอดทดลองทีละอย่างแล้วสังเกตผล



รูปที่ 4 - 3 การทดลองของกริฟฟิท



รูปที่ 4 - 4 การทดลองของแอเวอรี่ แมคคลอยด์ และแมคคาร์ที

- | | |
|---------------------------------|------------------------------|
| R + โปรตีนที่สกัดได้จาก S | ♦ ได้เชื้อชนิด R |
| R + ไขมันที่สกัดได้จาก S | ♦ ได้เชื้อชนิด R |
| R + คาร์โบไฮเดรตที่สกัดได้จาก S | ♦ ได้เชื้อชนิด R |
| R + DNA ที่สกัดได้จาก S | ♦ ได้เชื้อชนิด R และชนิด S |
| DNA จาก S อย่างเดียว | ♦ ไม่มีเชื้อทั้งชนิด R และ S |

นำเชื้อชนิด S ฉีดเข้าไปในหนูพบว่าหนูตายแล้วตรวจพบเชื้อชนิด S จำนวนมากมายจึงแสดงให้เห็นว่า สารทรานฟอर्मิงแฟกเตอร์ ซึ่งทำให้เชื้อชนิด R เปลี่ยนเป็นชนิด S คือ DNA แน่แน่นอน แต่ก็ยังมีผู้สงสัยอีกว่า DNA มักอยู่ร่วมกับโปรตีน และสารที่ถูกถ่ายทอดอาจเป็นโปรตีนก็ได้จึงได้มีการทดลองต่อโดยใช้หน่วยย่อย DNA และหน่วยย่อยโปรตีน ดังนี้

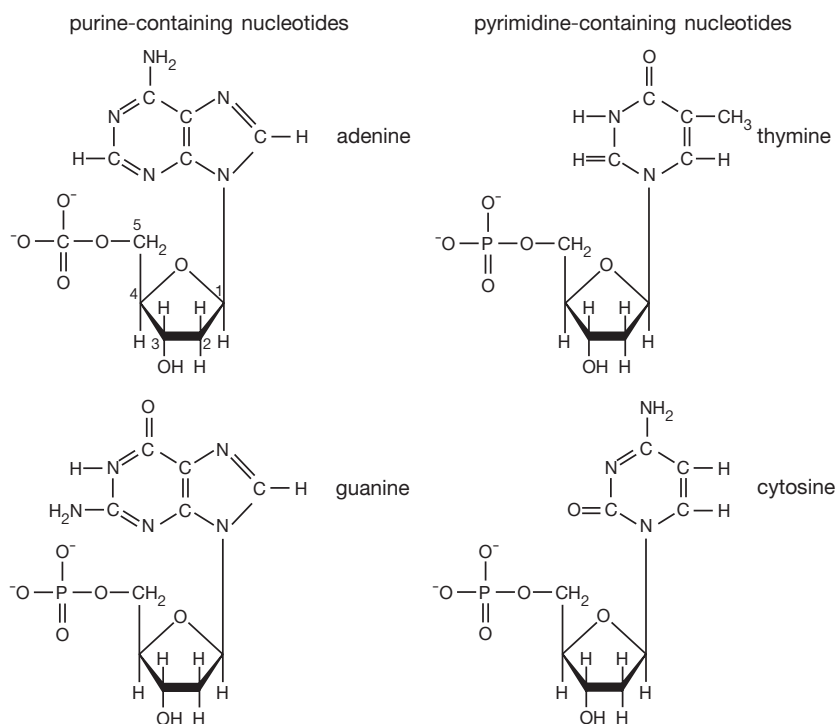
DNA ที่สกัดได้จาก S + เอนไซม์ที่ย่อย DNA + เชื้อชนิด R ♦ ได้เชื้อชนิด R

DNA ที่สกัดได้จาก S + เอนไซม์ที่ย่อยโปรตีน + เชื้อชนิด R ♦ ได้เชื้อชนิด R และชนิด S

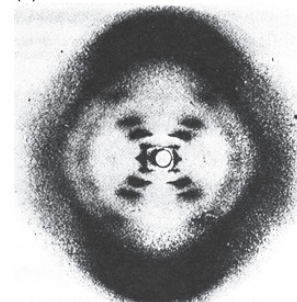
จากการทดลองทั้งหมดจึงสรุปได้ว่า DNA เป็นสารพันธุกรรมที่สามารถถ่ายทอดลักษณะการสร้างแคปซูล และการเกิดโรคจากเชื้อชนิด S ไปยังเชื้อชนิด R ได้

4.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของ DNA

ประมาณต้นคริสต์ศตวรรษที่ 20 เอ. คอสเซล (A. Kossel) แห่งเมืองไฮเดลเบิร์กประเทศเยอรมันนี และเอ.ที เลวิน (A.T. Levene) ชาวอเมริกันแห่งสถาบันร็อคกี้เฟลเลอร์ ได้ศึกษากรดนิวคลีอิกจากเซลล์สัตว์



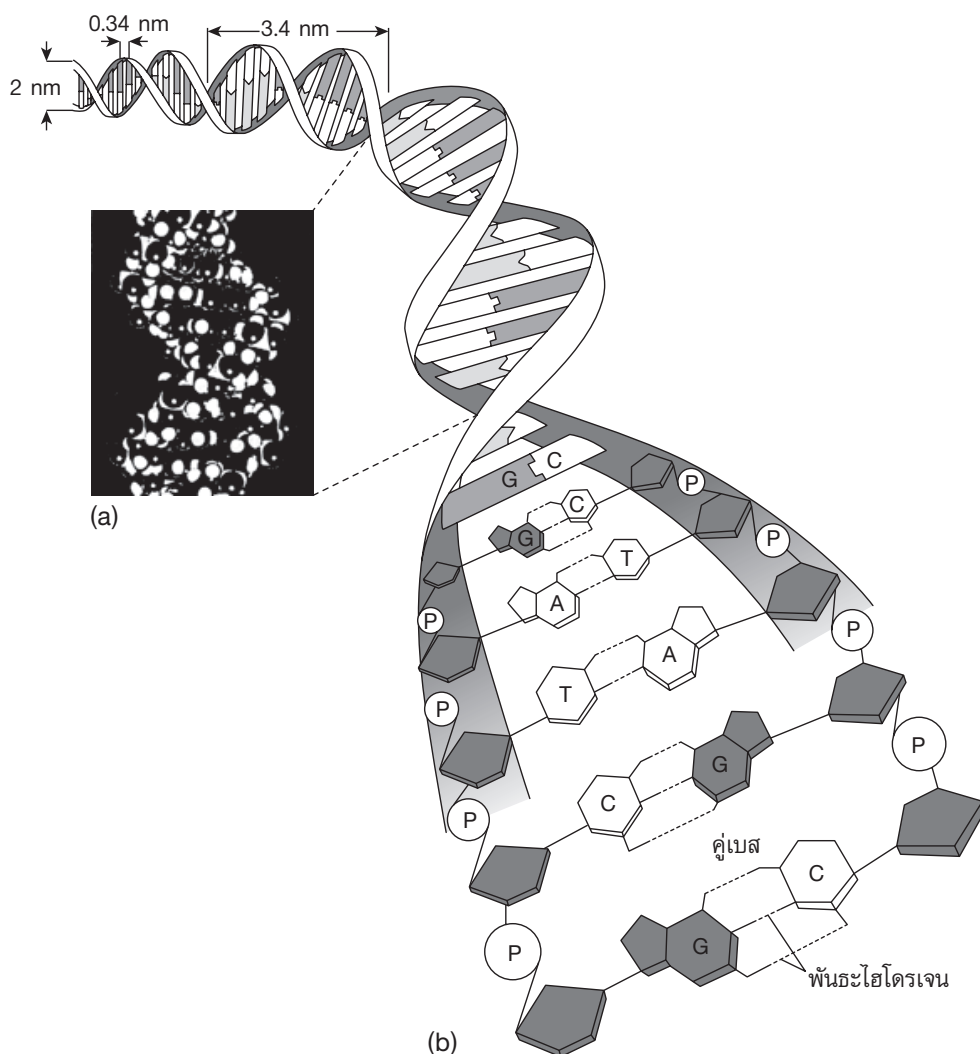
(a)



(b)

รูปที่ 4 - 5 แสดงนิวคลีโอไทป์ 4 ชนิด ของ DNA ภาพถ่ายโรชาลินแฟรงคลิน และภาพถ่าย X - ray diffraction DNA ของเธอ

และพบกรดนิวคลีอิกมีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ และมีสมบัติเป็นเบส จึงเรียกว่า **ไนโตรยีนัสเบส** (nitrogenous base) ต่อมาเลวินได้ศึกษากรดนิวคลีอิกของพืชและสัตว์และพบว่ามีการคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม คือ **น้ำตาลเพนโทส** (pentose sugar) เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยนอกจากพบว่ากรดนิวคลีอิกมีไนโตรยีนัส เบส และคาร์โบไฮเดรตแล้วยังพบว่ามีการเกลือฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ซึ่งมีธาตุฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยตามข้อสังเกตของมิเชอร์ในตอนแรก กรดนิวคลีอิกเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่และซับซ้อนมากประกอบด้วยหน่วยย่อยต่างๆ มาเรียงต่อกัน หน่วยย่อยนี้เรียกว่า **นิวคลีโอไทด์** (nucleotide) ซึ่งประกอบด้วยส่วนย่อยๆ 3 ส่วนคือ



รูปที่ 4 - 6 DNA สายคู่พันเป็นเกลียวและขยายส่วนปลายให้เห็นการเข้าคู่กันของคู่เบส และพันธะไฮโดรเจนที่ใช้ในการยึดเกาะกัน

1. เบสที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหรือไนโตรยีนัสเบส (nitrogenous base) แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1.1 เบสพิริมิดีน (pyrimidine base) ประกอบด้วยวงแหวนพิริมิดีน (pyrimidine ring) 1 วง มีเบสที่สำคัญและพบมากอยู่ 3 ชนิดคือ **ไซโทซีน (cytosine)** ใช้ตัวย่อว่า **C** **ไทมีน (thymine)** ใช้ตัวย่อว่า **T** และ **ยูเรซิล (uracil)** ใช้ตัวย่อว่า **U**

1.2 เบสปิวรีน (purine base) ประกอบด้วยวงแหวน 2 วงคือ วงแหวนพิริมิดีนเชื่อมอยู่กับวงแหวนอิมิดาโซล (imidazole ring) มีเบสที่สำคัญและพบมาก 2 ชนิดคือ **อะดีนีน (adenine)** ใช้ตัวย่อว่า **A** และ **กวานีน (guanine)** ใช้ตัวย่อว่า **G**

2. น้ำตาลเพนโทส (pentose sugar) เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีธาตุคาร์บอน 5 อะตอมมี 2 ชนิดคือ

2.1 น้ำตาลไรโบส (ribose sugar) เป็นส่วนประกอบของ RNA มีสูตรโมเลกุล $C_5H_{10}O_5$

2.2 น้ำตาลดีออกซีไรโบส (deoxyribose sugar) เป็นส่วนประกอบของ DNA มีสูตรโมเลกุล $C_5H_{10}O_4$

3. หมู่ฟอสเฟต (phosphate group) คือ PO_4^{3-}

โครงสร้างที่ประกอบด้วยไนโตรยีนัสเบสและน้ำตาลเพนโทสเรียกว่า **นิวคลีโอไซด์ (nucleoside)** ประกอบด้วย 2 กลุ่มคือ

(1) **กลุ่มที่มีน้ำตาลไรโบสและเบสเป็นองค์ประกอบ**

- น้ำตาลไรโบสและเบสอะดีนีน เรียกชื่อว่า **อะดีโนซีน (adenosine)**
- น้ำตาลไรโบสและเบสกวานีน เรียกชื่อว่า **กวานโนซีน (guanosine)**
- น้ำตาลไรโบส และเบส ไซโทซีน เรียกชื่อว่า **ไซทิดีน (cytidine)**
- น้ำตาลไรโบสและเบสยูเรซิล เรียกชื่อว่า **ยูริดีน (uridine)**

(2) **กลุ่มที่มีน้ำตาลดีออกซีไรโบสและเบสเป็นองค์ประกอบ**

- น้ำตาลดีออกซีไรโบสและเบสอะดีนีน เรียกชื่อว่า **ดีออกซีอะดีโนซีน (deoxyadenosine)**
- น้ำตาลดีออกซีไรโบสและเบสกวานีน เรียกชื่อว่า **ดีออกซีกวานโนซีน (deoxyguanosine)**
- น้ำตาลดีออกซีไรโบสและเบสไซโทซีน เรียกชื่อว่า **ดีออกซีไซทิดีน (deoxycytidine)**
- น้ำตาลดีออกซีไรโบสและเบสไทมีน เรียกชื่อว่า **ดีออกซีไทมิดีน (deoxythymidine)**

สำหรับนิวคลีโอไทด์ จะมีฟอสเฟตเกาะที่น้ำตาลเพนโทส อาจเกาะ 1 หมู่ 2 หมู่ หรือ 3 หมู่ การเรียกชื่อจะเรียกเหมือนกับนิวคลีโอไซด์ แล้วบอกจำนวนหมู่ของฟอสเฟตว่ามีอยู่เท่าไร เช่น

♦ นิวคลีโอไซด์ ชนิดอะดีโนซีนและมีฟอสเฟต 1 หมู่ เรียกชื่อว่าอะดีโนซีนมอโนฟอสเฟต (adenosine monophosphate, AMP)

♦ นิวคลีโอไซด์ชนิดอะดีโนซีนและมีฟอสเฟต 2 หมู่ เรียกชื่อว่าอะดีโนซีนไดฟอสเฟต (adenosine diphosphate, ADP)

♦ นิวคลีโอไซด์ชนิดอะดีโนซีนและมีฟอสเฟต 3 หมู่ เรียกชื่อว่าอะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (adenosine triphosphate, ATP)

4.2.3 โครงสร้างของ DNA (Deoxyribonucleic acid)

การศึกษาโครงสร้างของ DNA ได้กระทำเป็นขั้นเป็นตอนโดยเริ่มด้วย

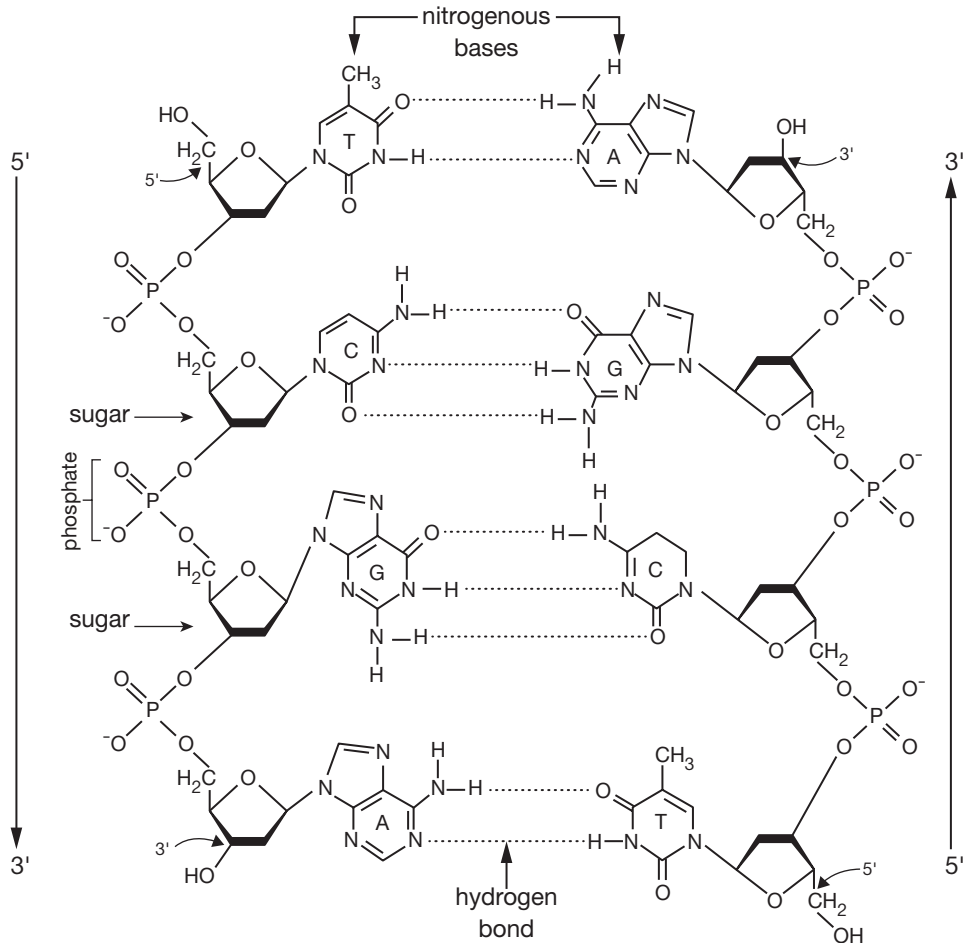
1. ในปี พ.ศ. 2492 เออร์วิน ชาร์กาฟฟ์ (Erwin Chargaff) นักชีวเคมีชาวอเมริกันและผู้ร่วมงานของเขาได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของ DNA ที่ได้จากสิ่งมีชีวิตหลายชนิดและพบว่าความสัมพันธ์ของคู่เบสคือเบสอะดีนีนจะใกล้เคียงกับไทมีนเบสกวานีนจะใกล้เคียงกับไซโทซีนเสมอซึ่งเรียกว่า กฎของชาร์กาฟฟ์ (Chargaff's rule) แสดงให้เห็นว่าเบสอะดีนีนต้องจับคู่กับไทมีนและเบสกวานีนต้องจับคู่กับไซโทซีน

ชนิดของเนื้อเยื่อและสิ่งมีชีวิต	ชนิดของเบส (%)				อัตราส่วน	
	A	T	G	C	A/T	G/C
วัณชิตเนยไวรัส	29.5	29.9	20.6	20	0.99	1.03
แบคทีเรีย (E. coli)	25.4	24.8	24.1	25.7	1.02	0.94
ยีสต์	31.3	32.9	7.7	7.1	0.95	1.09
เม่นทะเล (Arbacia lixula)	31.2	30.5	19.1	19.2	1.02	0.99
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
ข้าวสาลี	27.3	27.1	22.7	22.8	1.01	1.00
ต่อมไทมัสของคน	30.9	29.4	19.9	19.8	1.05	1.01
เม็ดเลือดแดงของไก่	28.8	29.2	20.5	21.5	0.99	0.96
เม็ดเลือดแดงของเต่า	29.7	27.9	22.0	21.3	1.06	1.03
ตับคน	30.3	30.3	19.5	19.9	1	0.98
ยูกลีนา	22.6	24.4	27.7	25.8	0.93	1.07

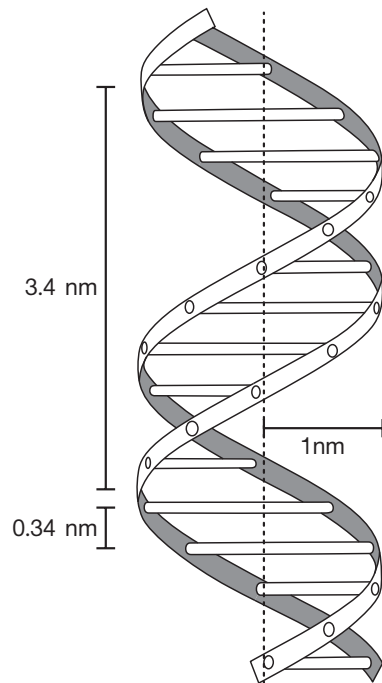
ตารางที่ 4 - 4 ปริมาณของเบสและอัตราส่วนของ A/T และ G/C ในสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ

2. ในปีพ.ศ. 2493 - 2494 เอ็ม เอช เอฟ วิลคินส์ (M.H.F. Wilkins) และ โรซาลิน แฟรงคลิน (Rosalin Franklin) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ได้ศึกษาโครงสร้างของ DNA โดยอาศัยการหักเหของรังสีเอกซ์ (X - ray diffraction) พบว่าโครงสร้างของ DNA อยู่ในสภาพเป็นเกลียว (helix) มีการจัดเรียงตัวเหมือนกันโดยแต่ละรอบของเกลียวมีระยะทางเท่า ๆ กัน และประกอบด้วยสายพอลินิวคลีโอไทด์เกินกว่า 1 สายขึ้นไป

3. ในปี พ.ศ. 2496 เจมส์ ดี. วอตสัน (James D. Watson) นักชีวเคมีชาวอเมริกัน และ ฟรานซิส เฮชซี.คริก (Francis H.C. Crick) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้รวบรวมหลักฐานข้อมูลต่าง ๆ เกี่ยวกับ DNA จากชาร์กาฟฟ์และวิลคินส์แล้วสรุปเป็นโครงสร้างของ DNA ดังนี้



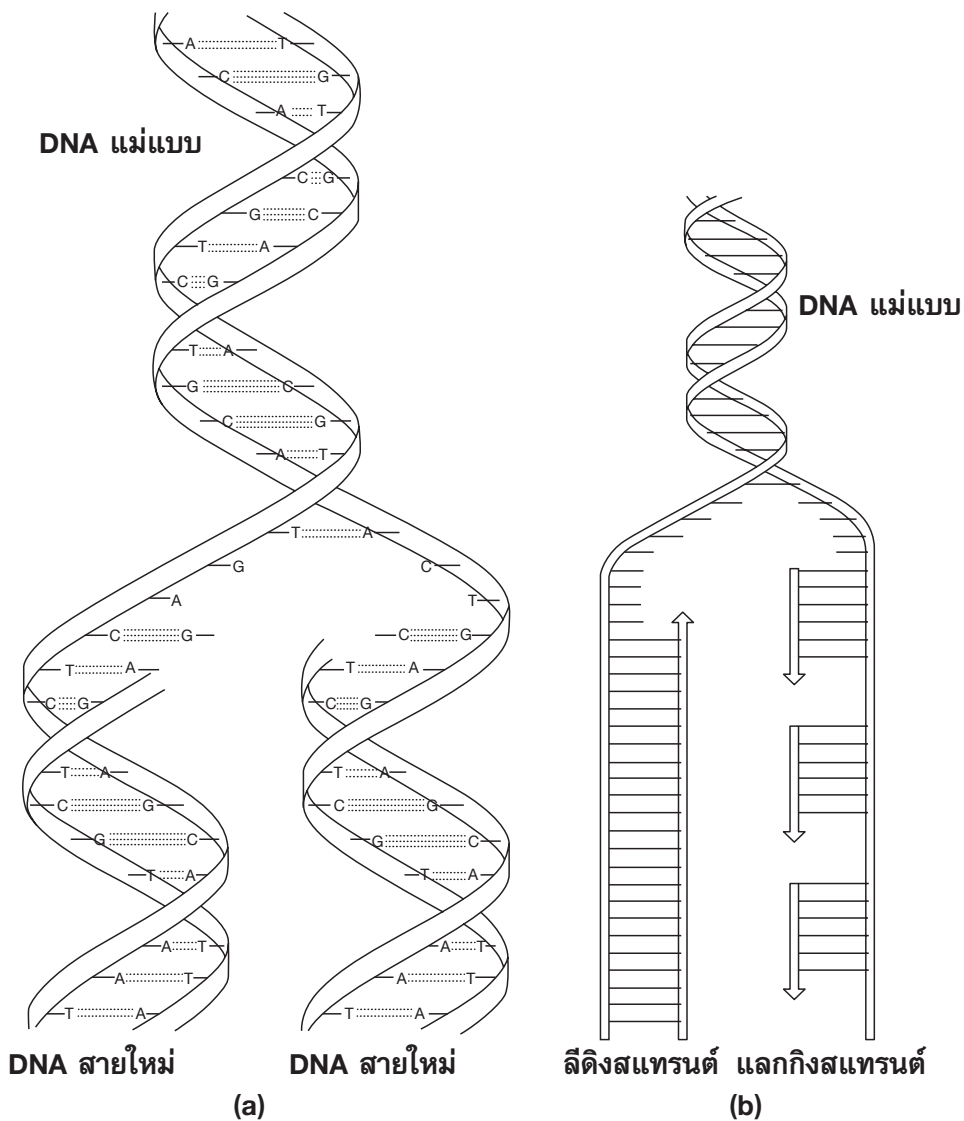
รูปที่ 4 - 7 วอตสัน อธิบาย Watson - Crick model of DNA
และการเกาะตัวของนิวคลีโอไทป์ 4 ชนิด ประกอบเป็น DNA



รูปที่ 4 - 8 ภาพเกลียวคู่ของ DNA ซึ่งนำเสนอโดยวอตสันและคริก

1. DNA ประกอบด้วยสายพอลินิวคลีโอไทด์ 2 สายและพอลินิวคลีโอไทด์ทั้งสองสายนี้มีทิศทางตรงกันข้าม (antiparallel)
2. พอลินิวคลีโอไทด์ 2 สาย มีลักษณะเป็นเกลียวคู่ (double helix) พันรอบกันคล้ายบันไดเวียนเป็นเกลียวเวียนขวา (ตามเข็มนาฬิกา) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 อังสตรอม
3. สายเกลียวคู่นี้มีน้ำตาลดีออกซีไรโบสและฟอสเฟตเป็นโครงเบสต่างๆ อยู่ด้านใน
4. เบสเหล่านี้ตั้งฉากกับโครงและเรียงตัวในพื้นราบเดียวกันและจับคู่กับเบสของอีกสายหนึ่งโดยอาศัยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ของคู่เบสที่จับคู่กัน
5. เบสอะดีนีนจับคู่กับเบสไทมีนด้วย 2 พันธะไฮโดรเจนและเบสกวานีนจับคู่กับเบสไซโทซีนด้วย 3 พันธะไฮโดรเจน

การหมุนครบ 1 รอบของเกลียวประกอบด้วยคู่เบส 10 หน่วย โดยการหมุนเป็นเกลียวทำมุม 36 องศากับแกน คู่เบสระยะห่างของแต่ละเบสเท่ากับ 3.4 อังสตรอม ดังนั้นการหมุน 1 รอบ จึงเป็นระยะทาง 34 อังสตรอมและทำให้เกิดร่อง 2 ชนิดคือ ร่องใหญ่ (major groove) กว้าง 12 อังสตรอมและร่องเล็ก (minor groove) มีความกว้าง 6 อังสตรอม DNA ประกอบด้วยนิวคลีโอไทด์ 4 ชนิด คือนิวคลีโอไทด์ที่มีเบสเป็น A T G C ความแตกต่างของโมเลกุล DNA อยู่ที่ยังการจัดเรียงลำดับเบส เช่น นิวคลีโอไทด์ 2 โมเลกุลต่อกัน ลำดับเบสจะแตกต่างกันได้ถึง 4 แบบ คือ AA AT TA AG GA AC CA TT TC CT TG GT CC CG GC GG จำนวนชนิดของการเรียงลำดับของเบสหาได้จากสูตร 4^n เมื่อ n คือจำนวนนิวคลีโอไทด์เรียงต่อกัน เช่น



รูปที่ 4 - 9 การสังเคราะห์ DNA สายใหม่จาก DNA สายเดิมและเป็นแบบกึ่งอนุรักษ์ (a) การสังเคราะห์ DNA ซึ่งค้นพบโดยนักชีวเคมีชาวญี่ปุ่น อาริโอกาซากิ ซึ่งเป็นแบบลีดิงสแตรนด์ (5' → 3') และ แแลกกิงสแตรนด์ (5' → 3') เป็นช่วงๆ (b)

2 นิวคลีโอไทด์เรียงต่อกัน $4^2 = 16$ แบบ

3 นิวคลีโอไทด์เรียงต่อกัน $4^3 = 64$ แบบ

4 นิวคลีโอไทด์เรียงต่อกัน $4^4 = 256$ แบบ

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า สายพอลินิวคลีโอไทด์ที่ยาวๆ มีคู่เบสจำนวนนับพันนับหมื่นคู่ การเรียงลำดับเบสจึงแตกต่างกันมากมายมหาศาลทำให้ DNA แตกต่างกันอย่างมากมาย

4.3 สมบัติของสารพันธุกรรม

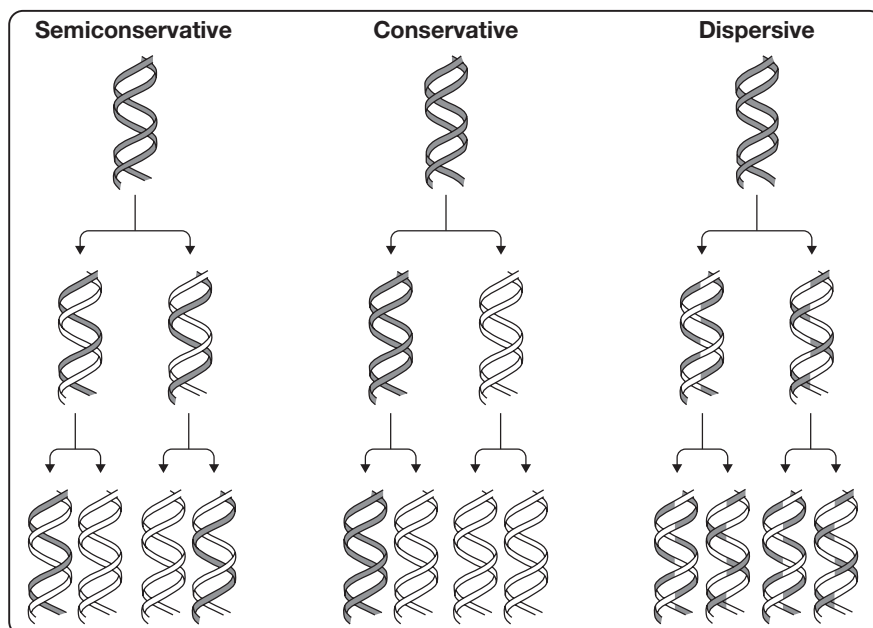
วอตสันและคริกค้นพบโครงสร้างของ DNA และพบว่าเป็นสารพันธุกรรม ซึ่งจะต้องมีคุณสมบัติสำคัญ 3 ประการ คือ

1. ต้องเพิ่มจำนวนตัวเองได้ และต้องมีลักษณะเหมือนเดิม เพื่อให้สามารถถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากรุ่นพ่อแม่ไปยังรุ่นลูกได้
2. ต้องควบคุมการสังเคราะห์สารที่จำเป็นของเซลล์ได้ ซึ่งจะเป็นตัวแสดงลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตชนิดนั้นได้
3. อาจเปลี่ยนแปลงได้บ้าง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะก่อให้เกิดพันธุกรรมใหม่ๆ ที่แตกต่างไปจากเดิมและเป็นโอกาสให้เกิดสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ใหม่ๆ ซึ่งแตกต่างไปจากสิ่งมีชีวิตชนิดเดิม และก่อให้เกิดวิวัฒนาการด้วย

วอตสัน คริก และวิลคินส์ ได้รับรางวัลโนเบลในปี พ.ศ. 2505 ด้วยผลงานการค้นพบโครงสร้างของ DNA ซึ่งเป็นความก้าวหน้าที่สำคัญยิ่งทางด้านวิทยาศาสตร์ ซึ่งทำให้เกิดการศึกษาค้นคว้าในระดับโมเลกุลของสารเคมีในเซลล์ทั้งโครงสร้างและหน้าที่ของสาร

4.3.1 การสังเคราะห์ DNA

การสังเคราะห์ DNA เรียกว่าการจำลองตัวเองของ DNA (DNA replication) คือการสังเคราะห์ DNA ใหม่ให้เหมือน DNA คู่เดิมโดยใช้ DNA คู่เดิมเป็นแม่แบบ (template) มีวิธีการที่เป็นไปได้ 3 วิธีคือ



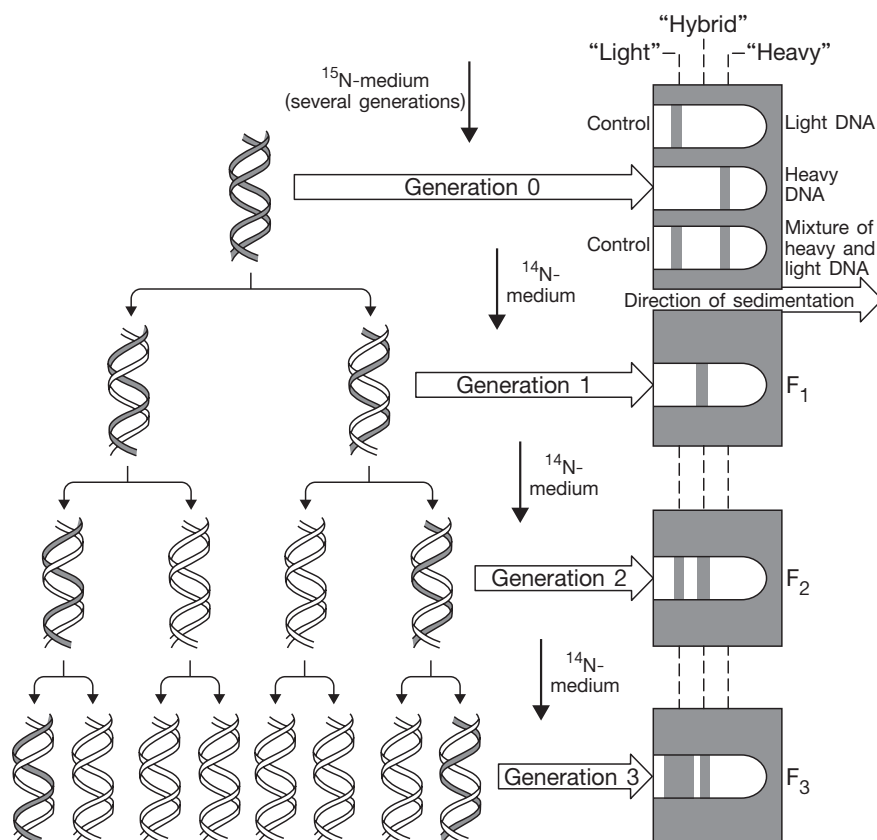
รูปที่ 4 - 10 แผนผังแสดงกลไกการจำลองตัวเองของ DNA

1. **วิธีอนุรักษ์ (conservative)** เป็นแบบที่คง DNA ต้นแบบไว้ หมายความว่า DNA ที่เป็นแม่พิมพ์เดิมจะสร้าง DNA ใหม่โดยคงคู่ของ DNA เดิมไว้ และ DNA คู่ใหม่ก็จับคู่กับ DNA คู่ใหม่

2. **วิธีกึ่งอนุรักษ์ (semiconservative)** เป็นแบบที่แยก DNA ต้นแบบออกจากกันหมายความว่า DNA ที่เป็นแม่พิมพ์เดิมจะสร้าง DNA ใหม่โดยที่ DNA ต้นแบบแยกออกจากกันแล้วสร้าง DNA เส้นใหม่ประกอบคู่กับ DNA เส้นเก่าทำให้ได้ DNA 2 คู่โดยแต่ละคู่มี DNA เส้นเก่า 1 เส้นเข้าคู่กับ DNA เส้นใหม่อีกหนึ่ง 1 เส้น

3. **วิธีกระจาย (dispersive)** เป็นแบบที่ DNA คู่เดิมถูกตัดออกเป็นช่วงๆ แล้วแยกออกเป็น 2 ส่วน แต่ละส่วนจะมี DNA ใหม่สร้างขึ้นมาซ่อมแซมส่วนที่ขาดหายไปจนครบสมบูรณ์ ผลที่ได้คือ DNA ใหม่ที่ได้ทั้ง 2 คู่จะมี DNA สายเก่ากระจายอยู่ตลอดเกลียวคู่ทั้งสอง

ในปี พ.ศ. 2500 นักชีวเคมีชาวอเมริกัน 2 ท่าน คือ เอ็ม เมเซลสัน (M. Meselson) และเฟลป์ ดับเบิลยู สทาล์ (F.W. Stahl) ได้ทำการทดลองและทำให้ทราบว่าการสังเคราะห์ DNA เป็นแบบกึ่งอนุรักษ์ (semiconservative) โดยการเลี้ยงแบคทีเรีย ในอาหารเพาะเชื้อที่มีสารกัมมันตภาพรังสีของไนโตรเจน (^{15}N) ต่อจากนั้นก็เอาแบคทีเรียเหล่านี้ไปเลี้ยงในอาหารมีไนโตรเจนธรรมดา (^{14}N) พบว่าถ้าให้แบคทีเรียแบ่งเซลล์ 1 ครั้ง ปริมาณของ ^{15}N ในแบคทีเรียรุ่นใหม่จะลดลงครึ่งหนึ่ง ถ้าแบ่งเซลล์ 2 ครั้ง ปริมาณของ ^{15}N จะลดลงเป็น $\frac{1}{4}$ และถ้าแบ่งเซลล์ถึงครั้งที่ 3 จำนวน ^{15}N จะลดลงเป็น $\frac{1}{8}$ การวัดปริมาณของ ^{15}N และ ^{14}N กระทำโดยการใช้นำหนักเหวี่ยง (centrifuge) ดังนี้



รูปที่ 4 - 11 การทดลองของ เอ็ม เมเซลสัน และเฟลป์ ดับเบิลยู สทาล์

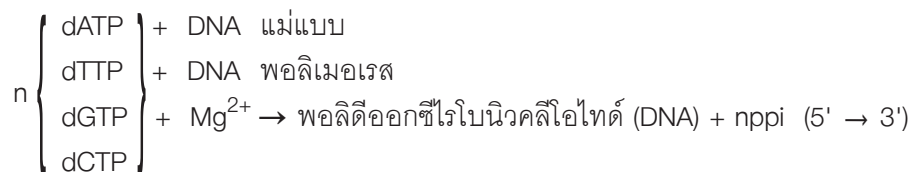
ในปี พ.ศ.2496 วอตสันและคริกเสนอว่าก่อนมีการจำลองตัวเองของ DNA สายพอลินิวคลีโอไทด์ของ DNA ซึ่งเป็นสายคู่จะแยกออกจากกันก่อนโดยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ที่เชื่อมสายทั้งสองแตกออกทำให้สายทั้งสองของ DNA ทั้งสองแยกออกจากกันทำให้เบสในแต่ละสายของ DNA วางอยู่ต่อมาจะมีนิวคลีโอไทด์ (ดีออกซีไรโบนิวคลีโอไทด์) เข้ามาเกาะที่เบสว่างและเกาะต่อกันเรื่อย ๆ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการทำให้ได้ DNA ใหม่ 2 สายซึ่งมีลักษณะเหมือนกัน และได้อธิบายความหมายปรัชญาชีวิตของเซลล์หรือ Central dogma ว่าประกอบด้วย 3 กระบวนการคือ

1. การจำลองตัวเองของ DNA (DNA replication)
2. การถอดรหัสข้อความ (transcription) เป็นการสังเคราะห์ RNA โดยอาศัย DNA เป็นต้นแบบ
3. การสังเคราะห์โปรตีน (translation) จาก RNA มาเป็นโปรตีนโดยการทำงานของไรโบโซม

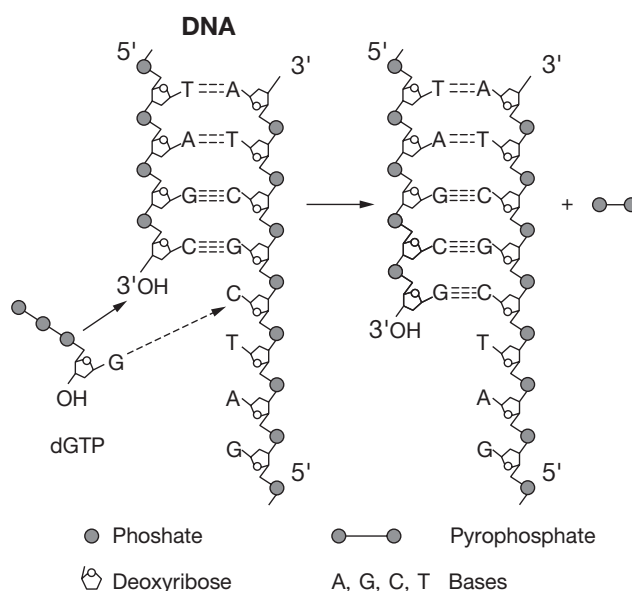
ในปี พ.ศ.2499 อาร์เธอร์ คอร์นเบิร์ก (Arthur Kornberg) นักชีวเคมีชาวอเมริกัน เป็นบุคคลแรกที่สังเคราะห์ DNA จากแบคทีเรีย *E. coli* และพบว่ากระบวนการสังเคราะห์ DNA ต้องประกอบด้วย

1. เอนไซม์ DNA พอลิเมอเรส และ Mg^{2+} เป็นโคแฟกเตอร์
2. DNA แม่แบบ (DNA template)
3. ไตรฟอสเฟตดีออกซีไรโบนิวคลีโอไทด์ คือ dATP, dTTP dGTP และ dCTP
4. การสังเคราะห์จึงทำให้เกิดสายยาว (polymerization) ของดีออกซีไรโบนิวคลีโอไทด์เติมต่อทางด้าน

3' ไฮดรอกซิลซึ่งทำให้การสร้าง DNA เกิดในทิศทางเดียวจากปลาย 5' ไปสู่ปลายด้าน 3' เสมอ

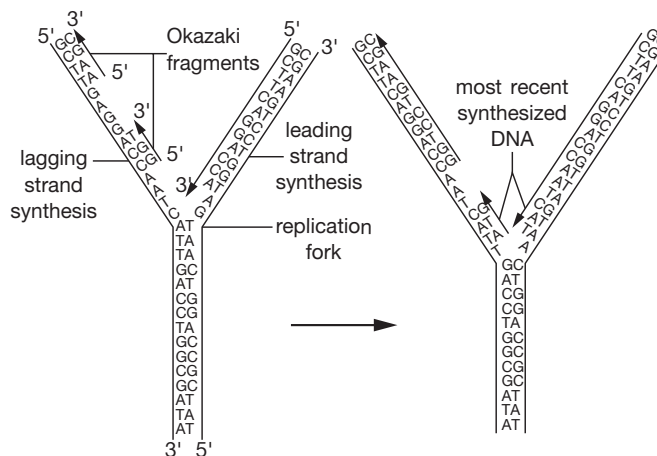


5. การเกิดเกลียวคู่ของ DNA ที่เกิดขึ้นใหม่
6. การหยุดการสังเคราะห์ DNA



รูปที่ 4 - 12 การทำงานของ DNA พอลิเมอเรสในการจำลองตัวเองของ DNA

ในปี พ.ศ. 2511 นักชีวเคมีชาวญี่ปุ่น อาร์ โอคาซากิ (R. Okazaki) พบว่าการสังเคราะห์ DNA มีลักษณะเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ หลายๆ ชิ้นเรียกว่า ชิ้นส่วนโอคาซากิ (Okazaki fragments) มีความยาวประมาณ 1,000 - 2,000 นิวคลีโอไทด์ แล้วชิ้นส่วนสั้นๆ นี้ต่อเข้าด้วยกันเป็นช่วงยาวขึ้น โดยอาศัยเอนไซม์ DNA ไลเกส (DNA ligase) DNA สายหนึ่ง จะสร้างต่อเนื่องกันไปทิศทางเดียวกับการแยกสายของ DNA คู่เดิม (replication fork) DNA ใหม่ที่สร้างโดยวิธีนี้เรียกว่า ลีดิง สแตรนด์ (leading strand) มีทิศทางจาก 5' → 3' ส่วนอีกสายหนึ่งของ DNA จะมีลักษณะการสร้างไม่ต่อเนื่อง แต่จะเป็นช่วงๆ มีทิศทางการสร้างจาก 5' → 3' ทำให้ได้ชิ้นส่วนโอคาซากิหลายๆ ส่วนแล้วถูกเชื่อมต่อกันด้วยเอนไซม์ DNA ไลเกสเป็น DNA สายใหม่และเรียก DNA สายใหม่นี้ว่า แลกกิง สแตรนด์ (lagging strand)



รูปที่ 4 - 13 การสังเคราะห์ DNA ในทิศทาง 5' → 3' และชิ้นส่วนโอคาซากิ

4.3.2 การควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมของ DNA

ตามปรัชญาชีวิตของเซลล์ หรือ central dogma ซึ่งประกอบด้วย DNA เป็นต้นแบบในการสังเคราะห์ RNA และ RNA ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์โปรตีน ดังนั้นโปรตีนจึงเป็นผลของการแสดงออกของ DNA นั่นเอง การควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมของ DNA ก็คือการควบคุมการสังเคราะห์โปรตีนโดย DNA ที่ปกติ สมบูรณ์ก็ควบคุมการสังเคราะห์โปรตีนได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์ โปรตีนนั้นก็ไปทำหน้าที่ได้ถูกต้องสมบูรณ์ด้วยร่างกาย สิ่งมีชีวิตนั้นๆ ก็เป็นปกติสมบูรณ์ดี และถ้าหาก DNA ผิดปกติ ก็เป็นผลให้โปรตีนที่ได้จากการสังเคราะห์ผิดปกติไปด้วย เช่น การค้นพบของ วี เอ็ม อินแกรม (V.M. Ingram) แห่งมหาวิทยาลัย เคมบริดจ์ ประเทศอังกฤษ เมื่อปี พ.ศ. 2500 โดยพบว่าเฮโมโกลบินของคนที่เป็นโรคโลหิตจางชนิดซิกเคิลเซลล์ (sickle cell anemia) แตกต่างจากคนปกติ คือกรดอะมิโนตำแหน่งที่ 6 ของสายเบตาพอลิเพปไทด์ (β - polypeptide) ของคนปกติเป็นกรดกลูตามิก (glutamic acid) แต่คนที่เป็นโรคเป็นกรดอะมิโนวาเลิน (valine) ส่วนกรดอะมิโนตัวอื่นๆ เหมือนกัน การผิดปกติของกรดอะมิโนเพียงตัวเดียวทำให้เฮโมโกลบินผิดปกติ จึงทำให้เซลล์เม็ดเลือดแดงผิดปกติไปด้วย ซึ่งแสดงลักษณะทางพันธุกรรมเป็นโรคโลหิตจางชนิดซิกเคิลเซลล์ซึ่งเป็นอันตรายมาก ดังนั้น ความแม่นยำของ DNA และกระบวนการสังเคราะห์โปรตีน จึงมีความสำคัญต่อการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตเป็นอย่างมาก