

## บทที่ 4

### การสืบทอดของชีวิต

### Continuity of Life

#### วัตถุประสงค์การเรียนรู้

เมื่อศึกษาบทเรียนนี้แล้วนักศึกษาสามารถ

1. บอกความหมายคำศัพท์ทางพันธุศาสตร์ได้
2. คำนวณการเกิดลักษณะต่าง ๆ ในรุ่นลูกที่ถ่ายทอดจากพ่อแม่ตามกฎการถ่ายทอดลักษณะของเมนเดล โดยใช้หลักการของโอกาส (probability) ได้
3. อธิบายโครงสร้างสารพันธุกรรม DNA และ RNA ได้
4. อธิบายโครงสร้างของโครโมโซมได้
5. อธิบายกระบวนการสร้างโปรตีนได้
6. อธิบายกระบวนการและประโยชน์ของพันธุศาสตร์เทคโนโลยีได้
7. คำนวณความถี่ของยีนและยีนโอบีในหมู่ประชากร เพื่อคาดคะเนโอกาสการเกิดลักษณะบางอย่างในหมู่ประชากร
8. อธิบายกลไกการเกิดวิวัฒนาการในหมู่ประชากรของสิ่งมีชีวิตได้

บนโลกเก่าแก่ไปนี้เป็นที่อาศัยของสิ่งมีชีวิตที่หลากหลายชนิดจำนวนมากมาเป็นเวลาช้านาน สิ่งมีชีวิตเหล่านี้เกิดมาอย่างไร เมื่อไร และสืบทอดกันมาได้อย่างไร เป็นสิ่งที่อยู่ในความสนใจของนักวิทยาศาสตร์ทุกยุคทุกสมัย มีการค้นหาความจริงและสั่งสมเป็นความรู้มาจนปัจจุบัน ซึ่งเป็นยุคที่วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเจริญก้าวหน้าถึงที่สุด ยอมรับกันว่าสิ่งมีชีวิตสามารถสามารถถ่ายทอดลักษณะจากรุ่นหนึ่งไปสู่รุ่นหนึ่งได้ด้วยสารพันธุกรรมพวก DNA ในกระบวนการสืบพันธุ์ และความแปรผันทางพันธุกรรมในกระบวนการมิวเทชันทำให้เกิดสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยมา ซากเหลือของสิ่งมีชีวิตในชั้นหินที่มีอายุต่าง ๆ กันเป็นหลักฐานยืนยันว่าสิ่งมีชีวิตปัจจุบันได้ผ่านกระบวนการวิวัฒนาการมาจากบรรพบุรุษดั้งเดิมรุ่นต่อรุ่นมาเนิ่นนานหลายร้อยล้านปีมาแล้วทั้งสิ้น

การศึกษาพันธุศาสตร์จึงเป็นการศึกษาเรื่องของการสืบทอดลักษณะของสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นเสมือนการสืบทอดมรดกทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต การศึกษาเรื่องราวของวิวัฒนาการซึ่งเป็นสิ่งที่มีจริงโดยอาศัยความรู้จากซากโบราณและสนับสนุนด้วยข้อมูลทางชีวโมเลกุลเป็นสิ่งที่ยอมรับได้

#### 4.1 พันธุศาสตร์ (Genetic)

##### การถ่ายทอดทางพันธุกรรมที่เป็นไปตามกฎของเมนเดล

เมนเดล ทำการทดลองผสมพันธุ์ถั่วลันเตาโดยเลือกศึกษาลักษณะที่แตกต่างกัน 7 ลักษณะ แต่ละลักษณะใช้พ่อแม่พันธุ์แท้แล้วนำลูก ( $F_1$ ) มาผสมกันเอง แล้วนำเมล็ดไปเพาะหาอัตราส่วนของลูกรุ่นที่ 2 ( $F_2$ ) พบว่าทุกลักษณะมีอัตราส่วนของลูกรุ่นที่ 2 เป็น 3 : 1 ผลการทดลองอธิบายในสมมติฐานของเมนเดล ซึ่งเป็นกฎการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม คือ

##### 1. กฎการแยกตัวของยีน (law of segregation of gene)

ลักษณะของสิ่งมีชีวิตถูกควบคุมโดยยีน ซึ่งปรากฏอยู่เป็นคู่ ในการสร้างหน่วยสืบพันธุ์ ยีนที่อยู่เป็นคู่จะแยกจากกันเข้าสู่หน่วยสืบพันธุ์ หน่วยละ 1 ยีน และเมื่อมีการผสมระหว่างหน่วยสืบพันธุ์ยีนจะกลับมาอยู่เป็นคู่เช่นเดิม

การศึกษาพันธุศาสตร์จะใช้อักษรภาษาอังกฤษเป็นสัญลักษณ์แทนยีน โดยใช้ตัวพิมพ์ใหญ่แทนยีนเด่น และตัวพิมพ์เล็กแทนยีนด้อย เช่น T แทนยีนต้นสูง t แทนยีนต้นเตี้ย

แต่ละลักษณะจะมียีนควบคุมเป็นคู่ในแบบต่าง ๆ เช่น TT Tt tt ยีนที่เข้าคู่กันจะอยู่บนโฮโมโลกัสโครโมโซมตำแหน่งเดียวกัน เรียกยีนนั้นว่าเป็นอัลลีล (alleles) กัน เช่น Tt ประกอบด้วย allele T กับ allele t ทั้ง T และ t เป็นอัลลีลต่อกัน

ยีนหรือคู่ของยีนที่กำหนดลักษณะซึ่งไม่ปรากฏให้เห็นเรียกว่า จีโนไทป์ (genotype) ยีนอัลลีลเดียวกันเข้าคู่กันเรียกว่า homologous gene เช่น TT หรือ tt เรียกว่า พันธุ์แท้ (pure line) ส่วนยีนต่างอัลลีลมาเข้าคู่กันเรียกว่า heterozygous gene เช่น Tt เป็นพวกลูกผสมหรือพันธุ์ทาง (hybrid)

ลักษณะที่ปรากฏให้เห็นจากภายนอกหรือจากผลการวิเคราะห์เรียกว่า phenotype เช่น ลักษณะต้นสูง ต้นเตี้ย หมูเลือด เอ บี โอ

จากการทดลองผสมพันธุ์ถั่วของเมนเดลเขียนแผนผังการถ่ายทอดลักษณะต่าง ๆ ได้ดังนี้

เช่น การผสมพันธุ์ถั่วต้นสูงกับต้นเตี้ย

รุ่นพ่อแม่ (Parent generation , P)

หน่วยสืบพันธุ์ (gamete)

รุ่นลูก (First Fielial generation , F<sub>1</sub>)

F<sub>1</sub> × F<sub>1</sub> (Self-fertilization)

หน่วยสืบพันธุ์

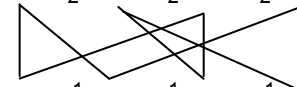
รุ่นหลาน (Second Fielial generation , F<sub>2</sub>)

TT × tt

(T) ↓ (t)  
Tt

Tt × Tt

$\frac{1}{2}$  (T),  $\frac{1}{2}$  (t)     $\frac{1}{2}$  (T),  $\frac{1}{2}$  (t)



$\frac{1}{4}$  TT     $\frac{1}{4}$  Tt     $\frac{1}{4}$  Tt     $\frac{1}{4}$  tt

การทดลองของเมนเดลอธิบายโดยใช้ความน่าจะเป็นหรือโอกาส (probability) ในการเกิดลูกรุ่น 2 (F<sub>2</sub>) ดังนี้

ถั่วลันเตารุ่น F<sub>2</sub> มี genotype Tt จะผลิตหน่วยสืบพันธุ์ได้ 2 ชนิด คือ (T) และ (t) แต่ละชนิดมีโอกาส (P) =  $\frac{1}{2}$  และเมื่อทำการผสมระหว่าง Tt × Tt ซึ่งแต่ละฝ่ายจะผลิตหน่วยสืบพันธุ์ (T) และ (t) ดังนั้นเหตุการณ์ที่แต่ละฝ่ายจะได้หน่วยสืบพันธุ์ชนิดใดย่อมเป็นเหตุการณ์ที่เป็นอิสระแก่กัน โอกาสที่จะได้ลูกที่มี genotype ชนิดใดจึงหาได้จากการคูณกันของอัตราส่วนของหน่วยสืบพันธุ์ที่มาเข้าคู่กัน เช่น

$$P (TT) = P (T) \times P (T) = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$$

อัตราส่วนของถั่วลันเตาในรุ่น F<sub>2</sub> เกิดจากผสมพันธุ์อย่างสุ่ม (Random) ระหว่างละอองเกสร (เพศผู้) กับไข่ (เพศเมีย) คือหน่วยสืบพันธุ์ของแม่ทุกชนิดมีโอกาสเข้าคู่กับหน่วยสืบพันธุ์ของพ่อทุกชนิด โอกาสของไซโกตชนิดต่าง ๆ เป็นดังนี้

ละอองเกสร (หน่วยสืบพันธุ์ของพ่อ)

	(T) (P = $\frac{1}{2}$ )	(t) (P = $\frac{1}{2}$ )
(T) (P = $\frac{1}{2}$ ) ไข่ (หน่วยสืบพันธุ์ของแม่)	$TT, P = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$ $= \frac{1}{4}$	$Tt, P = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$ $= \frac{1}{4}$
(t) (P = $\frac{1}{2}$ )	$tT, P = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$ $= \frac{1}{4}$	$tt, P = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$ $= \frac{1}{4}$

การผสมระหว่าง Tt × Tt ทำให้ได้ไซโกตชนิดต่าง ๆ เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นคนละครั้ง คือเมื่อ t ของละอองเกสรผสมกับ T ของไข่ ได้ไซโกต tT ก็จะไม่มีโอกาสได้ Tt ดังนั้นโอกาสที่จะได้ tT หรือ Tt =  $\frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{2}{4}$  และโอกาสที่จะได้ถั่วต้นสูง (TT และ Tt) เท่ากับ

$$\frac{1}{4} + \frac{2}{4} + \frac{1}{4} = \frac{3}{4}$$

### การทดสอบจีโนไทป์

เมนเดลทำการทดสอบจีโนไทป์เพื่อบอกชนิดของจีโนไทป์ 2 วิธี

1. การผสมตัวเองของพืชที่ต้องการตรวจสอบ ถ้าลูกผสมมีลักษณะเหมือนต้นเดิม หรือมีอัตราส่วน 1 : 0 แสดงว่าพืชนั้นมี genotype เป็น homozygous dominant ถ้าลูกผสมมี 2 พวก ในอัตราส่วน 3 : 1 แสดงว่าพืชนั้นมี genotype เป็น heterozygous

2. การผสมทดสอบ (Test cross) นำพืชที่ต้องการตรวจสอบ genotype ไปผสมกับต้นที่มียีนสภาพด้อยทั้งคู่ ถ้าลูกผสมเป็นพวกเดียวกันคือ อัตราส่วน 1 : 0 แสดงว่ายีนมี genotype เป็น homozygous dominant ถ้าลูกผสมมี 2 พวกในอัตราส่วน 1 : 1 แสดงว่าพืชนั้นเป็น heterozygous

การผสมกลับ (Back cross) หมายถึงการผสมระหว่างลูกกับพ่อหรือแม่มีวัตถุประสงค์เพื่อการปรับปรุงพันธุ์

## 2. กฎการจับคู่อย่างอิสระของยีน (Law of independent assortment)

ในการสร้างหน่วยสืบพันธุ์ยีนสภาพไตสภาพหนึ่ง (allele) ของยีนคู่หนึ่งจะเข้าสู่หน่วยสืบพันธุ์เดียวกันกับยีนสภาพไตของยีนอีกคู่หนึ่งได้อย่างอิสระ

กฎการจับคู่อย่างอิสระของยีนได้จากการผสมถั่ว 2 ลักษณะ (dihybrid cross) ดังที่เมนเดลทำการผสมถั่วพันธุ์เมล็ดเรียบ สีเหลืองกับพันธุ์เมล็ดย่น สีเขียว ยีนควบคุมผิวเรียบสีเหลืองข้ามยีนควบคุมผิวย่นสีเขียว ได้ลูกที่มีเมล็ดผิวเรียบสีเหลืองทั้งหมด เมื่อให้รุ่นลูกผสมตัวเองได้ ลูกรุ่น 2 จำนวน 556 เมล็ด แยกเป็น 4 พวก คือ เมล็ดเรียบสีเหลือง 315 เมล็ดเรียบสีเขียว 108 เมล็ดย่นสีเหลือง 101 และเมล็ดย่น สีเขียว 32 ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วน 9 : 3 : 3 : 1

เมื่อตรวจสอบโดยแยกทีละลักษณะ จะได้ผลดังนี้

รุ่น	ลักษณะผิวเมล็ด	ลักษณะสีของเมล็ด
พ่อแม่	เมล็ดเรียบ × เมล็ดย่น	เมล็ดสีเหลือง × เมล็ดสีเขียว
ลูก F <sub>1</sub>	เมล็ดเรียบ ⊗	เมล็ดสีเหลือง ⊗
ลูก F <sub>2</sub>	เมล็ดเรียบ 423 เมล็ดย่น 133	เมล็ดสีเหลือง 416 เมล็ดสีเขียว 140

จะเห็นได้ว่า แต่ละลักษณะจะให้ลูกผสม F<sub>2</sub> ในอัตราส่วน 3 : 1 จึงเป็นไปได้ว่าอัตราส่วน 9 : 3 : 3 : 1 เกิดจากการคูณกันระหว่างอัตราส่วน 3 : 1 ของ 2 ลักษณะ ดังนี้

	$\frac{3}{4}$ (เรียบ)	$\frac{1}{4}$ (ย่น)
$\frac{3}{4}$ (เหลือง)	$\frac{9}{16}$ (เรียบ-เหลือง)	$\frac{3}{16}$ (ย่น-เหลือง)
$\frac{1}{4}$ (เขียว)	$\frac{3}{16}$ (เรียบ-เขียว)	$\frac{1}{16}$ (ย่น-เขียว)

จากการคูณอัตราส่วนของสองลักษณะ พบว่ามีอัตราส่วนของลักษณะที่ต่างไปจากรุ่นพ่อแม่ 2 กลุ่ม คือ เมล็ดเรียบสีเขียว กับ เมล็ดย่นสีเหลือง ซึ่งสอดคล้องกับการผสมถั่ว 2 ลักษณะทุกประการ แสดงว่ายีนที่ควบคุมลักษณะรูปร่าง (เมล็ดผิวเรียบ, ผิวย่น) และยีน

ที่ควบคุมสีผิว (สีเหลือง, สีเขียว) ของเมล็ดเป็นอิสระแก่กัน สามารถแยกจากกันได้  
 อิสระในการสร้างหน่วยสืบพันธุ์ เมินเดลจึงตั้งเป็นกฎการจับคู่อย่างอิสระของยีนวิธีการหา  
 อัตราส่วนของลูกผสม F<sub>2</sub>

การหาอัตราส่วนของลูกผสม F<sub>2</sub> ทำได้ 2 วิธี

1. วิธีสร้างตารางหมากรุก (Checker board หรือ Punnett square) ทำโดยการ  
 สร้างตารางที่มีขนาดตามจำนวนหน่วยสืบพันธุ์ (gamete) ชนิดของ genotype และชนิด  
 ของ phenotype ของคู่ผสม เช่น คู่ผสมที่เป็น heterozygous ของยีน 2 คู่ คือ RrYy ×  
 RrYy แต่ละฝ่ายจะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้ 4 ชนิด คือ  $\frac{1}{4}$  (RY)  $\frac{1}{4}$  (Ry)  $\frac{1}{4}$  (rY)  $\frac{1}{4}$  (ry) จะหา  
 อัตราส่วนของลูกผสมโดยการสร้างตาราง 4 × 4 ของ gamete

	$\frac{1}{4}$ (RY)	$\frac{1}{4}$ (Ry)	$\frac{1}{4}$ (rY)	$\frac{1}{4}$ (ry)
$\frac{1}{4}$ (RY)	$\frac{1}{16}$ RRYy			
$\frac{1}{4}$ (Ry)		$\frac{1}{16}$ RRyy		
$\frac{1}{4}$ (rY)			$\frac{1}{16}$ rrYY	
$\frac{1}{4}$ (ry)				$\frac{1}{16}$ rryy

ถ้าใช้ตารางกับ genotype ทำโดยการแยกการผสมเป็น 2 ลักษณะ แต่ละลักษณะ  
 จะมี genotype 3 ชนิด ลูกผสม F<sub>2</sub> จึงหาได้จากการสร้างตาราง 3 × 3 ของ genotype

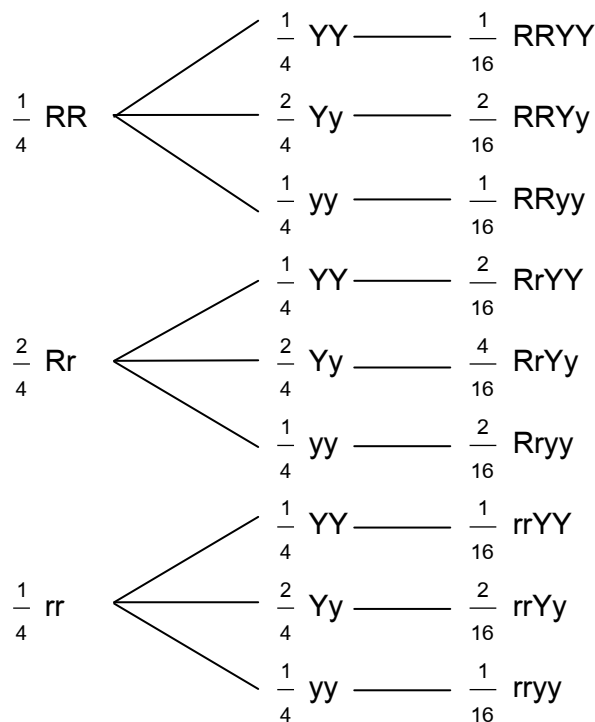
	$\frac{1}{4}$ (RR)	$\frac{2}{4}$ (Rr)	$\frac{1}{4}$ (rr)
$\frac{1}{4}$ YY	$\frac{1}{16}$ RRYy		
$\frac{2}{4}$ Yy		$\frac{4}{16}$ RrYy	
$\frac{1}{4}$ yy			$\frac{1}{16}$ rryy

ถ้าใช้ตารางกับ genotype ทำโดยการแยกการผสมเป็น 2 ลักษณะ แต่ละลักษณะ  
 จะมี phenotype 2 ชนิด ลูกผสม F<sub>2</sub> จึงหาได้จากการสร้างตาราง 2 × 2 ของ genotype

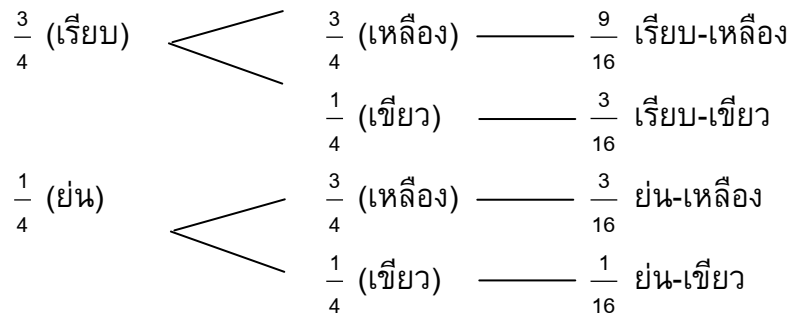
	$\frac{3}{4}$ (เรียบ)	$\frac{1}{4}$ (ย่น)
$\frac{3}{4}$ (เหลือง)	$\frac{9}{16}$ เรียบ-เหลือง	
$\frac{1}{4}$ (เขียว)		$\frac{1}{16}$ ย่น-เขียว

## 2. วิธีแตกแขนง (Branching System)

2.1 วิธีแตกแขนงสามแฉกกับ genotype ทำโดยจัดยีนทั้ง 2 คู่ให้เข้าสู่ genotype ได้ทุกวิถีทาง เช่น การผสมระหว่าง RrYy × RrYy แยกผสมทีละลักษณะเป็นจัด genotype ของยีนทั้ง 2 คู่เข้าสู่ชุดดังนี้



2.2 วิธีแตกแขนง 2 แฉกกับ phenotype ทำโดยนำ phenotype และอัตราส่วนของ phenotype ของการผสมลักษณะเดียวมาเข้าสู่ชุดกัน เช่น



การผสมที่มีความแตกต่างของยีน heterozygote มากคู่ชนิดของหน่วยสืบพันธุ์ genotype และ phenotype ย่อมมีมากขึ้น ซึ่งอาจสรุปผลการผสมตั้งแต่ heterozygote คู่เดียว จนถึง n คู่ ดังนี้

จำนวนคู่ของยีน (heterozygote)	ชนิดของ หน่วยสืบพันธุ์	จำนวน genotype	จำนวน phenotype	ขนาดของ ประชากร
1	2	3	2	4
2	4	9	4	16
3	8	27	8	32
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
10	1,024	59,049	1,024	1,048,576
n	2 <sup>n</sup>	3 <sup>n</sup>	2 <sup>n</sup>	4 <sup>n</sup>

### ลักษณะพันธุกรรมที่ไม่เป็นไปตามกฎของเมนเดล

การผสมสองลักษณะและลูกผสมมีอัตราส่วน 9 : 3 : 3 : 1 ของเมนเดลเรียกอัตราส่วนนี้ว่า อัตราส่วนหลัก (classical ratio) หรืออัตราส่วนเมนเดล ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เมื่อยีน 1 คู่ควบคุม 1 ลักษณะ และยีนที่แสดงอาการข่มจะข่มคู่ที่เป็นอัลลีลได้อย่างสมบูรณ์ ลักษณะทางกรรมพันธุ์ที่นอกเหนือจากกฎของเมนเดล ลูกผสมจะมีอัตราส่วนเป็นอย่างอื่นได้ เรียกว่า ความแปรปรวนของอัตราส่วนลูกผสม ซึ่งอาจเกิดได้ในกรณีต่าง ๆ ดังนี้



1. ลักษณะเด่นไม่สมบูรณ์ (Incomplete dominant) เมื่อยีนอัลลีลหนึ่งไม่สามารถข่มคู่ของมันได้ ลูกผสมที่มี genotype เป็น heterozygote จะแสดง phenotype อยู่ระหว่าง genotype ที่เป็น homozygote ของพ่อและแม่ เช่น การผสมระหว่างต้นดอกบานเย็นดอกสีแดงกับดอกสีขาวพันธุ์แท้ จะได้ลูก F<sub>1</sub> มีดอกสีชมพูทั้งหมด เมื่อให้ลูก F<sub>1</sub> ผสมตัวเองจะได้ลูก F<sub>2</sub> เป็น 3 แบบ คือ ดอกสีแดง : ชมพู : ขาว ในอัตราส่วน 1 : 2 : 1 ดอกสีชมพูจะมี genotype เป็น heterozygote อัลลีลสีแดงและอัลลีลสีขาวจะแสดงออกมารวมกันเป็นสีชมพู

ลักษณะข่มไม่สมบูรณ์ที่พบในมนุษย์มีหลายอย่าง เช่น ลักษณะผมหยิก และผมเหยียดตรง จะมี genotype เป็น homozygote ส่วนพวก heterozygote จะมีลักษณะเส้นผมหยิก อีกตัวอย่างคือ hypercholesterolemia เป็นอาการของคนที่มีระดับคอเลสเตอรอลในเลือดสูงจนเป็นอันตราย ซึ่งคนปกติจะมี genotype เป็น homozygote dominant (HH) ส่วน genotype ที่เป็น homozygote recessive (hh) จะมีระดับคอเลสเตอรอลสูงกว่าคนปกติ 2 เท่า คอเลสเตอรอลจะเกาะที่ผนังเส้นเลือดอาร์เตอรีทำให้ขัดขวางการไหลเวียนของเลือดและอาจเป็นสาเหตุของโรคหัวใจล้มเหลวได้

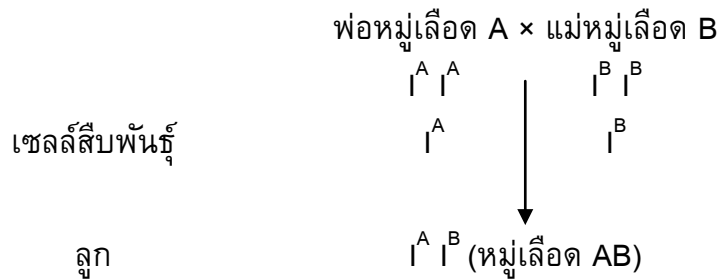
คนที่มี genotype HH สามารถสร้างโปรตีน LDL receptor ที่ผิวเซลล์ ซึ่งเป็นตัวจับ LDL (Low – density lipoprotein) ซึ่งเป็นหน่วยบรรจุคอเลสเตอรอล นำไปในเซลล์เพื่อทำการย่อยคอเลสเตอรอล เป็นการป้องกันการสะสมคอเลสเตอรอลในเส้นเลือดแดง คนที่มี genotype hh จะไม่มีการสร้าง LDL receptor จึงทำให้คอเลสเตอรอลสะสมในเส้นเลือดแดงมีมาก ส่วนคนที่มี genotype Hh จะมีการสร้าง LDL receptor เป็นปริมาณครึ่งหนึ่งของคนปกติ

2. การข่มข้ามคู่ (Epistasis) เป็นการทำงานร่วมกันของยีน 2 คู่ โดยยีนคู่หนึ่งมีอิทธิพลยับยั้งการแสดงออกของยีนอีกคู่หนึ่ง เช่น หนูตะเภาชนิดหนึ่งสีขนควบคุมด้วยยีน 2 คู่ โดยยีนคู่หนึ่งควบคุมการสร้างสารสี คือ เมลานิน ไปมีอิทธิพลต่อยีนอีกคู่ที่ควบคุมการสะสมสารสี

อัลลีลเด่น (C) ควบคุมให้มีการสร้างสารสี อัลลีล B ควบคุมการสะสมสารสีมาก (ขนสีดำ) ข่มอัลลีล b ซึ่งควบคุมการสะสมสารสีปานกลาง (ขนสีน้ำตาล)

genotype cc มีอิทธิพลบดบังการทำงานของยีนคู่ที่สอง ดังนั้นใน genotype ที่มี cc อยู่ด้วยจะทำให้หนูมีขนสีขาว





5. มัลติเปิลอัลลีล (multiple alleles) คือยีนหลายสภาพ (มากกว่า 2 อัลลีล) ที่อยู่บนตำแหน่ง (Locus) เดียวกันของโฮโมโลกัสโครโมโซม มีการถ่ายทอดไปพร้อมกันและมีผลควบคุมลักษณะเดียวกัน

ตัวอย่าง ได้แก่ ยีนควบคุมสีขนของกระต่ายซึ่งควบคุมด้วยยีน 1 คู่ ที่มีถึง 4 อัลลีล ทำให้กระต่ายมีสีขน 4 ชนิด คือ 1) สีน้ำตาลเทา (agouti) โดยเส้นขนมีสีเทา ตอนกลางสีเหลือง และปลายขนเป็นสีน้ำตาลหรือดำ 2) สีเทาอ่อน (chinchilla) 3) สีฮิมาลายัน (himalayan) ขนที่ลำตัวเป็นสีขาว ขนบริเวณปลายเท้า จมูก หู ปลายหางเป็นสีดำ 4) สีขาว (albino) มีขนสีขาวตลอดทั้งตัว

สีน้ำตาลเป็นสีปกติ สีอื่น ๆ เป็นสีผิดปกติ จากการผสมกระต่ายสีปกติกับกระต่ายสีอื่น ๆ จะทำให้ลูก F<sub>1</sub> และ F<sub>2</sub> ดังนี้

P	agouti × chinchilla	agouti × himalayan	agouti × albino
	↓	↓	↓
F <sub>1</sub>	agouti ⊗	agouti ⊗	agouti ⊗
	↙ ↘	↙ ↘	↙ ↘
F <sub>2</sub>	$\frac{3}{4}$ agouti $\frac{1}{4}$ chinchilla	$\frac{3}{4}$ agouti $\frac{1}{4}$ himalayan	$\frac{3}{4}$ agouti $\frac{1}{4}$ albino

จากคู่ผสมแต่ละพวกจะให้อัตราส่วนของลูก F<sub>2</sub> เป็น 3 : 1 แสดงว่าสีขนของกระต่ายควบคุมด้วยยีน 1 ตำแหน่ง และยีนสีปกติจะข่มยีนสีอื่น ๆ เมื่อผสมพันธุ์กระต่ายสีอื่น ๆ ครบทุกคู่จะได้ลูก F<sub>1</sub> และ F<sub>2</sub> ดังนี้

P	chinchilla × himalayan	chinchilla × albino	himalayan × albino
F <sub>1</sub>	chinchilla ⊗	chinchilla ⊗	himalayan ⊗
F <sub>2</sub>	$\frac{3}{4}$ chinchilla $\frac{1}{4}$ himalayan	$\frac{3}{4}$ chinchilla $\frac{1}{4}$ albino	$\frac{3}{4}$ himalayan $\frac{1}{4}$ albino

ผลจากการผสมระหว่างยีนทุกคู่แสดงให้เห็นว่า ยีนควบคุมสีต่าง ๆ นั้นเป็นคู่กัน (เป็น allelic ต่อกัน) โดยอยู่บนตำแหน่งที่ตรงกันของโฮโมโลกส์โครโมโซม ยีนในตำแหน่งนี้จึงมีมากกว่า 2 อัลลีล

ถ้าให้  $C^+$   $C^{ch}$   $C^h$   $C$  แทนยีนควบคุมสี agouti chinchilla himalayan และ albino ตามลำดับ การข่มกันของยีนจะมีลำดับเป็น  $C^+ > C^{ch} > C^h > C$  และมี genotype ดังนี้

Phenotype	Genotype
agouti	$C^+ C^+$ , $C^+ C^{ch}$ , $C^+ C^h$ , $C^+ C$
chinchilla	$C^{ch} C^{ch}$ , $C^{ch} C^h$ , $C^{ch} C$
himalayan	$C^h C^h$ , $C^h C$
albino	CC

เมื่อยีนแสดงการข่มสมบูรณ และ n แทนจำนวน multiple alleles ชุดหนึ่ง จำนวน genotype =  $(n + 1) \frac{n}{2}$

มัลติเปิลอัลลีลส์ ที่พบในคนคือ หมู่เลือด ABO หมู่เลือดระบบ ABO แบ่งเป็น 4 กลุ่ม โดยใช้ชนิดของสารแอนติเจน (antigen) ที่ผิวเซลล์เม็ดเลือดแดงเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง ซึ่งเมื่อเม็ดเลือดแดงมี antigen ชนิดใดแล้วก็จะไม่มีสารโปรตีนที่เป็น antibody ของ antigen ชนิดนั้นอยู่ในน้ำเลือด ระบบเลือด ABO จึงแบ่งเป็น 4 หมู่ ดังนี้

หมู่เลือด	ชนิดของ antigen (เม็ดเลือดแดง)	ชนิดของ antibody (น้ำเลือด)
A	Antigen A	Anti - A
B	Antigen B	Anti - B
AB	Antigen A , Antigen B	ไม่มี Anti - A และ B
O	ไม่มี Antigen A และ B	Anti - A , Anti - B

หมู่เลือดระบบ ABO ควบคุมด้วยยีน 3 อัลลีล คือ  $I^A$   $I^B$  และ  $i$  โดยยีน  $I^A$  และ  $I^B$  ไม่แสดงการข่มต่อกันแต่ทั้ง  $I^A$  และ  $I^B$  แสดงการข่มยีน  $i$  ดังนั้น genotype ของหมู่เลือดระบบ ABO เป็นดังนี้

หมู่เลือด (Phenotype)	Genotype
A	$I^A I^A$ , $I^A i$
B	$I^B I^B$ , $I^B i$
AB	$I^A I^B$
O	$ii$

6. โพลียีน (poly gene) คือลักษณะที่ควบคุมโดยยีนมากกว่า 1 คู่ เป็นลักษณะที่ไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างกันได้อย่างชัดเจน เช่น ลักษณะสีผิว และความสูงของคน ซึ่งมีหลายระดับ เป็นลักษณะที่มีความแปรปรวนอย่างต่อเนื่องในประชากร เป็นลักษณะที่แสดงออกตามจำนวนอัลลีล เช่น สีผิวของคนควบคุมด้วยยีน 3 คู่ โดยยีน A B และ C ควบคุมสีเข้มแสดงลักษณะเป็น incomplete dominant ต่อยีน a b และ c ดังนั้นคนที่มี genotype AABBCC มีสีผิวเข้มที่สุดขณะที่คนที่มี genotype aabbcc มีสีผิวเข้มน้อยที่สุด และคนที่มี genotype AaBbCc จะมีสีผิวอยู่กึ่งกลางระหว่างสีเข้มที่สุดกับน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากคนที่มียีนเด่นมากจะสามารถผลิตสารสีได้ในปริมาณที่มากกว่าคนที่มียีนเด่นน้อยกว่า ลักษณะโพลียีนจะมีอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมอยู่เหนี่ยวน เป็นลักษณะพันธุกรรมที่มีการแปรผันต่อเนื่อง (continuous variation trait) และสามารถตรวจวัดเชิงปริมาณได้ เป็นลักษณะเชิงปริมาณ (quantitative trait)

7. พลีโอโทรปี (Pleiotropy) คือยีน 1 คู่ ควบคุมมากกว่า 1 ลักษณะ เช่น โรคโลหิตจางที่เกิดจากความผิดปกติของเม็ดเลือดแดง (sickle – cell anemia) ซึ่งเกิดจากความผิดปกติของยีนเพียงยีนเดียว ทำให้เม็ดเลือดแดงมีรูปร่างคล้ายเคียว ร่างกายจะทำลายเซลล์เม็ดเลือดที่ผิดปกติอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณเม็ดเลือดแดงลดต่ำลง เกิดอาการต่าง ๆ ตามมา เช่น ร่างกายอ่อนแอ เซลล์เม็ดเลือดไม่สามารถไหลเวียนได้สะดวก ทำให้มีอาการไข้ บางเวลา บางเวลา มีความเจ็บปวดรุนแรง มีอันตรายต่ออวัยวะต่าง ๆ รวมถึง หัวใจ สมอง และไต รักษาโดยการถ่ายเลือด ร่วมกับยา แต่ไม่สามารถรักษาหายขาดได้ มีผู้เสียชีวิตด้วยโรคนี้ประมาณปีละแสนคน คนที่เป็นโรคนี้จะมีอัลลีลผิดปกติเป็น homozygote ถ้าเป็น heterozygote คือมีอัลลีลผิดปกติ 1 อัลลีล จะมีสุขภาพปกติ

8. ลีทอลยีน (Lethal gene) คือยีนทำให้ตาย หรือทำให้มีโอกาสอยู่รอดลดน้อยลง ลีทอลยีนเป็นได้ทั้งสภาพข่ม (Dominant Lethal) คือ เป็นอันตรายต่อ genotype ที่เป็น homozygote dominant (AA) และ heterozygote (Aa) และสภาพด้อย (Recessive lethal) ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อพวก homozygote recessive เท่านั้น เช่น ยีน a เป็น ลีทอลยีน genotype aa จะได้รับอันตราย

ลีทอลยีนทั้ง 2 ประเภท ถ้าเป็นลีทอลยีนในสภาพข่มจะถูกขจัดไปจากประชากรทันที จึงไม่ปรากฏยีนนี้ในประชากร ส่วนลีทอลยีนในสภาพด้อยจะซ่อนยีนไว้ในพวก heterozygote จึงตรวจพบได้เฉพาะลีทอลยีนพวกที่เป็นสภาพด้อยเท่านั้น

### ลักษณะพันธุกรรมที่เกี่ยวกับเพศ

#### การกำหนดเพศในสิ่งมีชีวิต (Sex-determination)

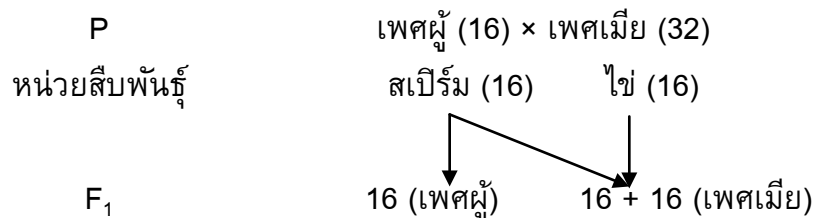
สัตว์ทั่วไปมีการกำหนดเพศโดยโครโมโซมเพศ (Sex-chromosome) ดังนี้

1. ระบบ xo พบในแมลงพวกตั๊กแตนและจิ้งหรีด เพศผู้มีโครโมโซมเพศ xo คือ มีโครโมโซม x แห่งเดียว เพศเมียมีโครโมโซมเพศ xx เพศผู้จึงสร้างสเปิร์ม 2 ชนิด คือ  $\frac{1}{2}$  (x) และ  $\frac{1}{2}$  (o) สเปิร์มจึงมีความสำคัญในการตัดสินใจว่าไซโกตจะเป็นเพศใด

2. ระบบ xy เป็นการกำหนดเพศในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมและแมลงบางชนิด เช่น แมลงหวี่ โดยเพศผู้มีโครโมโซมเพศ 1 คู่ ที่มีขนาดไม่เท่ากัน คือ xy ส่วนเพศเมียมีโครโมโซมเพศ 1 คู่ ที่เท่ากัน คือ xx

3. ระบบ zw พบในสัตว์บางชนิด เช่น ปลา ผีเสื้อ และนก เพศผู้มีโครโมโซมเพศ เป็น zz เพศเมียเป็น zw ดังนั้น ไข่จึงเป็นตัวตัดสินว่าไซโกตจะเป็นเพศอะไร

สัตว์บางชนิดไม่มีโครโมโซมเพศ เช่น มดและผึ้ง การกำหนดเพศขึ้นอยู่กับ จำนวนชุดของโครโมโซม โดยตัวเมียเกิดจากการพัฒนาของไข่ที่ได้รับการผสมจากอสุจิ จึงมีโครโมโซม 2 ชุด คือ จำนวนดิพลอยด์ (diploid, 2n) ส่วนเพศผู้พัฒนามาจากไข่ที่ไม่ได้รับการผสม จึงมีโครโมโซมเพียงชุดเดียว คือ จำนวนแฮพลอยด์ (haploid, n) ทั้งนี้ เนื่องจากการสร้างไข่มีการแบ่งไมโอซิสตามปกติ ส่วนการสร้างสเปิร์มมีการแบ่งไมโอซิสที่ ผิดปกติ โดยโครโมโซมที่แยกได้เคลื่อนไปรวมอยู่ที่ขั้วเดียวกันทั้งหมด เช่น ผึ้งเพศเมียมีโครโมโซม 32 เพศผู้มี 16 มีการผสม ดังนี้



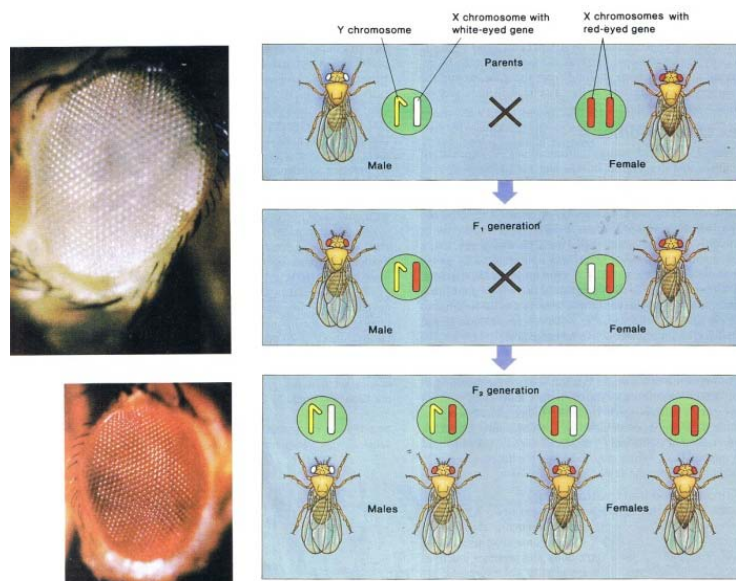
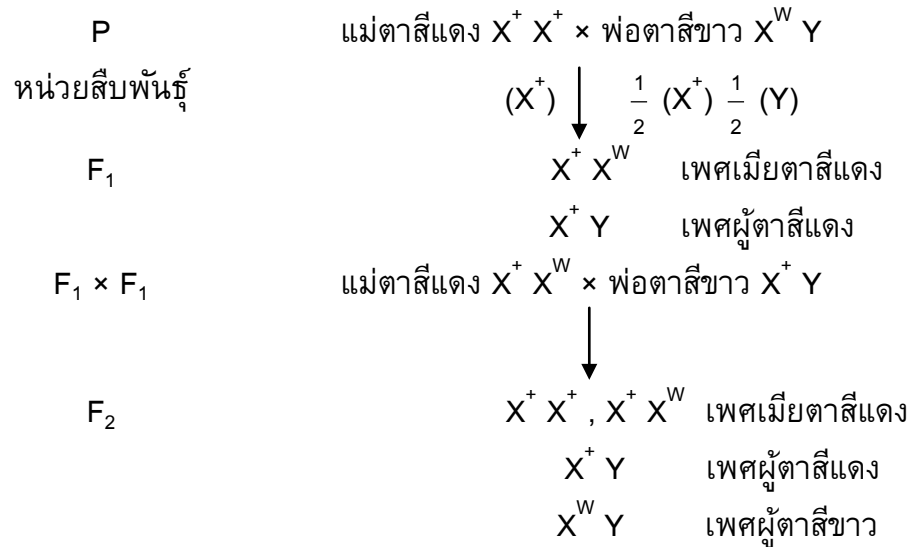
ในพืชมีระบบเพศแตกต่างกัน พืชบางชนิดมีดอกตัวผู้และดอกตัวเมียแยกกันคนละต้น (dioecious plant) มีระบบเพศ xy เช่น ปาล์ม ผักขม หน่อไม้ฝรั่ง (asparagus) บางชนิดมีระบบ zw เช่น สตรอเบอร์รี่ แต่พืชส่วนใหญ่เกือบทั้งหมด สร้างเซลล์สืบพันธุ์ทั้ง 2 เพศในต้นเดียวกัน (monoecious plant)

### ลักษณะซึ่งควบคุมโดยยีนบนโครโมโซมเพศ (Sex-linkage)

ยีนจำนวนมากอยู่บนโครโมโซมร่างกาย (autosome) และมีการถ่ายทอดยีนเป็นไปตามกฎเมนเดล และนอกเหนือจากกฎเมนเดล แต่มียีนจำนวนหนึ่งอยู่บนโครโมโซมเพศ (Sex-chromosome) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คือ ยีนที่อยู่บนโครโมโซม x ซึ่งจะมีความสำคัญต่อทั้งสองเพศ

T.H. Morgan เป็นผู้พบลักษณะซึ่งควบคุมโดยยีนบนโครโมโซมเพศ x ของแมลงหวี่ คือ ลักษณะตาสีขาวที่ควบคุมโดยยีนด้อย (w) ต่อลักษณะตาสีแดง ซึ่งเป็นลักษณะปกติ (wild type) เมื่อผสมแมลงหวี่ตัวผู้ตาสีขาวกับตัวเมียตาสีแดงได้ลูก F<sub>1</sub> ที่มีตาสีแดงทั้งหมด เมื่อลูก F<sub>1</sub> ผสมกันเองจะได้ F<sub>2</sub> ที่มีตาสีแดงและสีขาวในอัตราส่วน 3 : 1 แต่เมื่อพิจารณาเพศพบว่า ลูกเพศเมียมีตาสีแดงทั้งหมด ส่วนเพศผู้มีตาสีแดงและสีขาวอย่างละ

ครึ่ง Morgan อธิบายว่าการที่สีตาของแมลงหวี่ เกี่ยวข้องกับชนิดของเพศ เป็นเพราะ ลักษณะดังกล่าวถูกควบคุมโดยยีนซึ่งอยู่บนโครโมโซม x ดังนี้



รูปที่ 4.1.1 การผสมพันธุ์ระหว่างแมลงหวี่เพศผู้ตาขาวกับเพศเมียตาสีแดง (จาก George B. Johnson, 1997)



เมื่อทำการผสมกลับกัน (reciprocal cross) คือให้แม่ตาสีขาวผสมกับพ่อตาสีแดง ได้ลูก F<sub>1</sub> ตัวเมียตาสีแดง ตัวผู้ตาสีขาว ส่วนลูก F<sub>2</sub> ที่เกิดจากลูก F<sub>1</sub> ผสมตัวเอง จะมีตาสีขาและสีแดงอย่างละครึ่งไม่ว่าจะเป็นเพศผู้หรือเพศเมีย

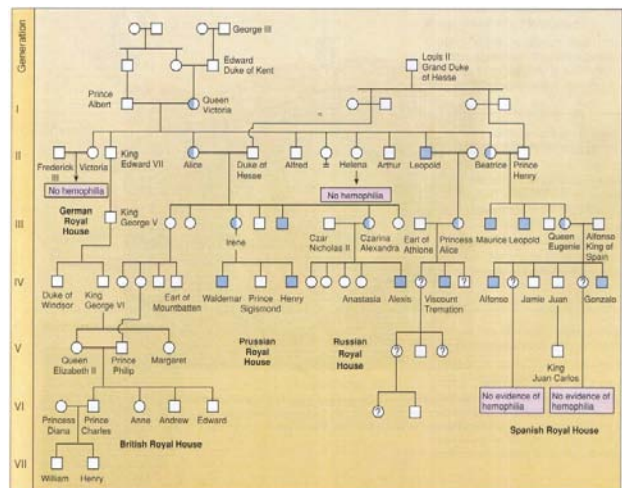
Sex-linkage ในคน ในโครโมโซม x มียีนที่จำเป็นกับทั้งเพศหญิงและเพศชายอยู่มาก ในขณะที่โครโมโซม y ซึ่งเป็นท่อนสั้น เป็นส่วนที่มียีนอยู่น้อยเพียง 1-2 ยีนเท่านั้น ลักษณะที่ถูกควบคุมโดยยีนบนโครโมโซม x ของคนมีมากกว่า 120 ลักษณะที่รู้จักกันมากคือ ลักษณะตาบอดสี โรคเลือดฮีโมฟีเลีย เรียกลักษณะที่ควบคุมว่าลักษณะที่เกี่ยวข้องกับเพศ (Sex-linked traits หรือ x-linked traits)

ตาบอดสี (color blindness) ควบคุมโดยยีนลักษณะด้อยบนโครโมโซม x โอกาสที่ลูกสาวจะตาบอดสีคือ มีพ่อตาบอดสีและแม่ตาบอดสีหรือเป็นพาหะ ส่วนลูกชายจะมีโอกาสตาบอดสีเมื่อมีแม่ตาบอดสีหรือเป็นพาหะ ตาบอดสีเป็นลักษณะที่ไม่สามารถแยกสีแดงกับสีเขียวได้

ฮีโมฟีเลีย (hemophilia) เป็นโรคเลือดไหลไม่หยุด เมื่อมีบาดแผล เลือดจะไม่แข็งตัว เป็นลักษณะที่ควบคุมด้วยยีนด้อยบน x-chromosome ทำให้ไม่สามารถสร้างโปรตีนที่เป็นแฟคเตอร์ที่ช่วยในการแข็งตัวของเลือด



รูปที่ 4.1.2 พันธประวัติฮีโมฟีเลียของราชวงศ์อังกฤษ (จาก George B. Johnson, 1997)



ภาวะพร่องเอ็นไซม์ G-6-PD (glucose-6-phosphate dehydrogenase deficiency) ควบคุมด้วยยีนด้อยบน x-chromosome ทำให้ไม่สามารถสร้างเอ็นไซม์ G-6-PD จะมีอาการแพ้ยาบางชนิด ยารักษาโรคมalaria เร็ว ยาปฏิชีวนะ ยาแก้ปวด และแพ้อาหารบาง

ชนิด เช่น ถั่วปากอ้า อาการอื่น ๆ คือ โลหิตจาง ตัวเหลืองซีด อ่อนเพลีย ปวดศีรษะ ปวดท้อง คลื่นไส้ ปัสสาวะมีสีดำ

โรคนุชย์หมาป่า (Congenital generalize hypertrichosis) ควบคุมโดยยีนเด่นบน x-chromosome มีลักษณะขนยาวรุงรังบนใบหน้า ลำตัว แขนขา

### อิทธิพลของเพศต่อการแสดงออกของยีน (Sex-influenced gene)

ยีนบนโครโมโซมร่างกาย (autosome) บางชนิดมีการแสดงออกโดยขึ้นอยู่กับชนิดของเพศ คือ จะแสดงอาการข่มในเพศหนึ่ง แต่มีสภาพด้อยในอีกเพศหนึ่ง พบในสัตว์ชั้นสูงที่มีฮอร์โมนเพศซึ่งจัดเป็นสิ่งแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อการแสดงออกของยีนในสัตว์เพศผู้ และเพศเมียแตกต่างกัน ดังนั้นผู้ชายหรือผู้หญิงที่มี genotype เหมือนกันอาจมี phenotype แตกต่างกันได้ เช่น ลักษณะศีรษะล้านในคนที่ควบคุมโดยยีนจะแสดงลักษณะที่แน่นอนคือ ล้วนด้านหน้า และด้านบนศีรษะแต่มีผมด้านข้างรอบศีรษะ ยีนที่เกี่ยวข้องกับศีรษะล้านในผู้ชายจะแสดงลักษณะเด่น แต่จะแสดงลักษณะด้อยในเพศหญิง ถ้า  $B_1$  เป็นอัลลีลควบคุมศีรษะล้าน  $B_2$  เป็นอัลลีลศีรษะไม่ล้าน genotype และ phenotype ของลักษณะศีรษะล้านเป็นดังนี้

genotype	phenotype	
	ชาย	หญิง
$B_1 B_1$	ล้าน	ล้าน
$B_1 B_2$	ล้าน	ไม่ล้าน
$B_2 B_2$	ไม่ล้าน	ไม่ล้าน

ในเพศชายอัลลีล  $B_1$  จะแสดงอาการข่มต่ออัลลีล  $B_2$  แต่ในเพศหญิงจะกลับกัน คือ  $B_2$  จะแสดงอาการข่มต่ออัลลีล  $B_1$  ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า อัลลีล  $B_1$  จะแสดงอาการข่มเมื่อมีฮอร์โมนเพศชาย แต่อัลลีล  $B_2$  จะแสดงอาการข่มเมื่อมีฮอร์โมนเพศหญิง

### ลักษณะพันธุกรรมจำกัดเพศ (Sex-limited trait)

ลักษณะพันธุกรรมที่ควบคุมโดยยีนบนโครโมโซมร่างกาย (autosome) ที่แสดงออกเฉพาะเพศใดเพศหนึ่ง เนื่องจากมีสิ่งแวดล้อมภายในร่างกาย เช่น ฮอร์โมนเพศสนับสนุนหรือบังคับให้ยีนดังกล่าวแสดงออกหรือไม่แสดงออกมา เช่น สัตว์พวกนก เพศผู้และเพศ

เมียจะมีขนที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ทั้งรูปร่าง ความยาว และสี โดยเพศผู้จะมีขนแบบเพศผู้ (cock-feathered) คือ ขนคอและหางมีลักษณะยาว ปลายแหลม ส่วนเพศเมียจะมีขนแบบเพศเมีย (hen-feathered) คือ ขนคอ และหางมีลักษณะสั้น ทุ่ ปลายมน ลักษณะขนถูกควบคุมโดยยีน 1 คู่ คือ H , h ลักษณะขนแบบเพศเมียควบคุมโดยยีน H ส่วนขนแบบเพศผู้ควบคุมด้วยอัลลีลด้อย คือ h

เมื่อผสมไก่รุ่น F<sub>1</sub> ที่เป็น heterozygote (Hh) ได้ลูก F<sub>2</sub> ตัวเมียทั้งหมดมีขนแบบเพศเมีย ส่วนลูกตัวผู้มีขนแบบตัวเมีย : ขนแบบตัวผู้ในอัตราส่วน 3 : 1 ดังนี้

genotype	phenotype	
	เพศผู้	เพศเมีย
HH	hen-feathered	hen-feathered
Hh	hen-feathered	hen-feathered
hh	cock-feathered	hen-feathered

จากลักษณะดังกล่าวแสดงว่าลักษณะขนไก่ถูกควบคุมโดยยีนบนโครโมโซมร่างกาย และขนแบบเพศผู้จำกัดอยู่ในเพศผู้เท่านั้น การแสดงผลของยีนควบคุมขนไก่ดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับฮอร์โมนเพศ เมื่อตอนไก่เพศผู้หรือเพศเมีย ไก่ตอนพวกนี้จะให้ขนแบบเพศผู้เมื่อผลัดขนครั้งต่อไป ไม่ว่าไก่จะมี genotype แบบใด จึงอาจสรุปได้ว่า อัลลีล H จะทำให้ไก่มีขนแบบเพศเมียได้ ไม่ว่าไก่นั้นจะมีฮอร์โมนเพศผู้หรือเพศเมีย แต่ถ้าไม่มีฮอร์โมนชนิดใดเลย จะทำให้ไก่มีขนแบบเพศผู้

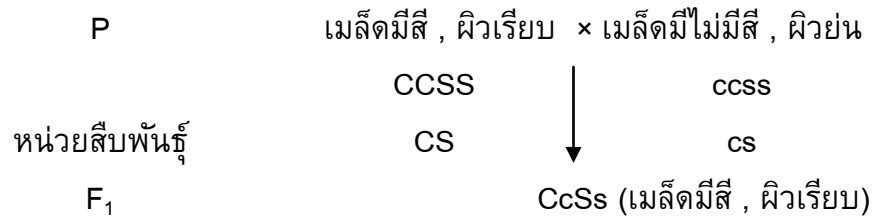
อัลลีล h จะทำให้ไก่มีขนแบบเพศผู้ ถ้าไม่มีฮอร์โมนเพศเมีย แต่จะทำให้ไก่มีขนแบบเพศเมีย ถ้ามีฮอร์โมนเพศเมีย

จะเห็นได้ว่า ฮอร์โมนเพศมีความสำคัญต่อการที่ไก่จะมีขนแบบเพศใดเพศหนึ่ง แม้ว่าไก่จะมี genotype เหมือนกันก็ตาม ลักษณะหลายอย่างในคนที่แตกต่างระหว่างเพศชาย หญิง ก็เกิดจากฮอร์โมนเพศ เช่น ยีนควบคุมการผลิตน้ำนมจะ แสดงออกเฉพาะเพศหญิง ซึ่งมีฮอร์โมนเพศหญิง ยีนควบคุมการมีหนวดเครา เสียงห้าว หน้าอกกว้าง จะแสดงออกในเพศชาย ซึ่งมีฮอร์โมนเพศชาย เป็นต้น

## ยีนบนโครโมโซมเดียวกันที่ถ่ายทอดไปด้วยกัน (Linkage gene)

Linkage gene คือความสัมพันธ์ของยีนต่าง ๆ ที่อยู่ใกล้ชิดกันบนโครโมโซมแท่งเดียวกันและถ่ายทอดไปด้วยกันเสมอ เช่น AB/ab หมายถึง ยีน A และ B อยู่บนโครโมโซมเดียวกัน ยีน a และ b อยู่บนโครโมโซมเดียวกัน เมื่อมีการแยกกันของยีนเข้าสู่เซลล์สืบพันธุ์ ยีน A และ B จะไปด้วยกัน และ a กับ b จะไปด้วยกัน ซึ่งสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้ 2 ชนิด คือ AB และ ab และถ้าทำการผสมทดสอบจะได้อัตราส่วนของลูกผสมเท่ากับ 1 : 1

Hutchinson wu linkage gene ในข้าวโพดโดยทำการทดลองผสมข้าวโพด เมล็ดมีสีผิวเรียบ (colored , Full) กับเมล็ดไม่มีสีผิวย่น (colored , Shrunken) (ลักษณะเมล็ดมีสีแสดงอาการขมลักษณะเมล็ดไม่มีสี และลักษณะผิวเรียบแสดงอาการขมลักษณะผิวย่น) ได้ลูก F<sub>1</sub> เมล็ดมีสีผิวเรียบดังนี้



จากการผสม F<sub>1</sub> × F<sub>1</sub> ปรากฏว่าได้ลูก F<sub>2</sub> ที่มีเมล็ดชนิดต่าง ๆ ดังนี้

เมล็ดยีนมีสีผิวเรียบ	4,038 เมล็ด	เมล็ดยีนมีสีผิวย่น	149 เมล็ด
เมล็ดยีนไม่มีสีผิวเรียบ	152 เมล็ด	เมล็ดยีนไม่มีสีผิวย่น	4,035 เมล็ด
รวมทั้งหมด 8,368 เมล็ด ในจำนวนนี้แบ่งเป็น 2 พวก คือ			

1. มีลักษณะพ่อแม่ (Parental combination) มีจำนวน 4,038 + 4,035 = 8,073

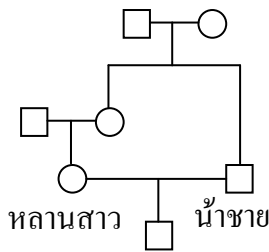
หรือ  $\frac{8,073}{8,368} \times 100 = 96.4\%$

2. มีลักษณะใหม่ (Recombination) มีจำนวน 149 + 152 = 301 หรือ

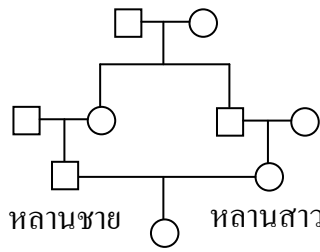
$\frac{301}{8,368} \times 100 = 3.6\%$

จะเห็นได้ว่า ยีน C-c และ S-s ที่นำลักษณะสีเมล็ดและผิวเมล็ดของข้าวโพดไม่เป็นอิสระต่อกันโดย ยีน C และ S , ยีน c และ s จะปรากฏอยู่ด้วยกันถึง 96.4% ส่วนที่เหลือ 3.6% เป็นเซลล์สืบพันธุ์ที่เป็นผลมาจาก crossing over ที่เกิดขึ้นระหว่างยีนทั้งสองชนิดใน

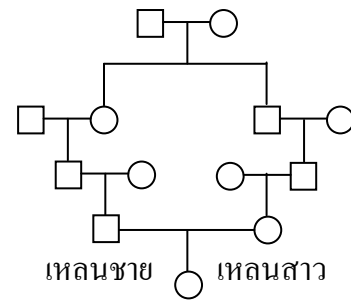
ไมโอซิส เพราะถ้า ยีน C และ S เป็นอิสระหรือไม่ได้อยู่บนโครโมโซมเดียวกัน และเป็นไปตามกฎการแยกตัวของยีน ของเมนเดลลูก F<sub>1</sub> ก็จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้ 4 ชนิด คือ CS Cs cS และ cs ซึ่งเมื่อทำการผสมทดสอบจะได้อัตราส่วนลูกผสมเป็น 1 : 1 : 1 : 1 แต่จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ลูก F<sub>2</sub> ซึ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ที่เหมือนกับพ่อแม่ (ร้อยละ 96.4)



ก. การแต่งงานระหว่าง  
น้ากับหลาน



ข. การแต่งงานระหว่าง  
ลูกพี่ลูกน้องชั้นต้น  
(first cousin)



ค. การแต่งงานระหว่าง  
ลูกพี่ลูกน้องชั้นที่สอง  
(second cousin)

ซึ่งการผสมทดสอบจะได้อัตราส่วนเป็น 1 : 1 แสดงให้เห็นว่ายีนที่ควบคุมลักษณะสีของเมล็ด และยีนที่ควบคุมลักษณะผิวของเมล็ดข้าวโพดอยู่บนโครโมโซมเดียวกัน และใกล้ชิดกันมากจึงถ่ายทอดไปด้วยกัน เมื่อมีการแยกยีนเพื่อเข้าสู่เซลล์สืบพันธุ์

### การผสมเลือดชิดและการผสมต่างสายพันธุ์ (Inbreeding and Outbreeding)

การผสมเลือดชิดหรือการผสมในสายพันธุ์ (inbreeding) หมายถึงการสืบพันธุ์ระหว่างเพศผู้และเพศเมียที่มีบรรพบุรุษร่วม (common ancestor) การผสมในสายพันธุ์จะใกล้ชิดกันมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับจำนวนบรรพบุรุษร่วมที่เกี่ยวข้องในสายพันธุ์นั้น การผสมในสายพันธุ์เป็นการเพิ่มจำนวนโฮโมไซโกตให้กับประชากร โอกาสแสดงออกของยีนด้อยจึงมีมากขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่ยีนด้อยจะควบคุมลักษณะที่ทำให้เกิดผลเสีย และยังพบว่ายีนด้อยที่แฝงอยู่ในเฮเทอโรไซโกตมีความต้านทานสูง สามารถอยู่ในสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าพวกโฮโมไซโกต การผสมในสายพันธุ์มักพบในคน สัตว์ และพืช ที่ไม่มีการเคลื่อนย้ายถิ่นฐาน

การแต่งงานกันในหมู่เครือญาติเป็นการผสมในสายพันธุ์ เช่น น้าชายกับหลานสาว หลานกับหลาน และเหลนกับเหลน จะมีผลทำให้ลูกที่เกิดจากการแต่งงานแต่ละแบบมี

โอกาสเป็นโฮโมไซโกตเพิ่มขึ้นเป็น  $\frac{1}{8}$  หรือ  $(\frac{1}{2})^3$ ,  $\frac{1}{16}$  หรือ  $(\frac{1}{2})^4$  และ  $\frac{1}{64}$  หรือ  $(\frac{1}{2})^5$

ตามลำดับ

รูปที่ 4.1.3 พันธุ์ประวัติของการผสมในสายพันธุ์แบบต่าง ๆ

การผสมต่างสายพันธุ์ (outbreeding) เป็นการผสมระหว่างเพศผู้และเพศเมียที่มีบรรพบุรุษแยกกัน ทำให้ลูกที่เกิดมามีลักษณะที่มีความต้านทานสูง แข็งแรงขึ้น สามารถปรับตัวเพื่อความอยู่รอดได้ดีกว่าพ่อแม่ เกิดขึ้นจากพ่อหรือแม่มีลักษณะที่ไม่ต้องการเป็นโฮโมไซโกตของยีนด้อยที่มีจีโนไทป์ต่างกัน แต่ทั้งคู่ต่างก็มียีนเด่นที่จะไปข่มยีนด้อยของกันและกันได้ เช่น พ่อแม่มีจีโนไทป์ดังนี้

พ่อ AAbbCCdd x แม่ aaBBccDD



ลูก AaBbCcDd

ในกรณีนี้จะเห็นว่าลูกได้รับยีนที่เป็นลักษณะเด่นและลักษณะด้อยมาทุกลักษณะ แต่ยีนด้อยจะถูกข่มไม่ให้เห็นแสดงออก ลูกจึงจีโนไทป์เป็นเฮเทอโรไซโกตซึ่งมีลักษณะดีกว่าพ่อแม่ เรียกลักษณะเช่นนี้ว่า overdominance และเรียกเฮเทอโรไซโกตของลักษณะที่ต้องการว่า heterozygote advantage เช่น ลักษณะของเฮเทอโรไซโกตสำหรับอัลลีลด้อยของโรคโลหิตจางในกลุ่มคนแอฟริกาที่มีความต้านทานโรคมาลาเรียได้ดีกว่าคนที่มีจีโนไทป์เป็นโฮโมไซโกตสำหรับยีนเด่นที่ไม่เป็นโรคโลหิตจาง แต่จะมีความต้านทานโรคมาลาเรียต่ำ เป็นต้น

### สารพันธุกรรม

นักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจและทำการศึกษาค้นคว้าสารที่ทำหน้าที่ถ่ายทอดลักษณะในสิ่งมีชีวิต จนค้นพบสารพันธุกรรม โดยในปี ค.ศ. 1928 Federick Griffith ได้ทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าสารพันธุกรรมสามารถที่จะถ่ายทอดจากสิ่งมีชีวิตหน่วยหนึ่งไปยังอีกหน่วยหนึ่งได้ โดยทดลองกับแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคปอดบวม (*Diplococcus pneumoniae*) 2 สายพันธุ์ คือ smooth type (S) ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่สร้างแคปซูลได้ และทำให้เกิดโรค

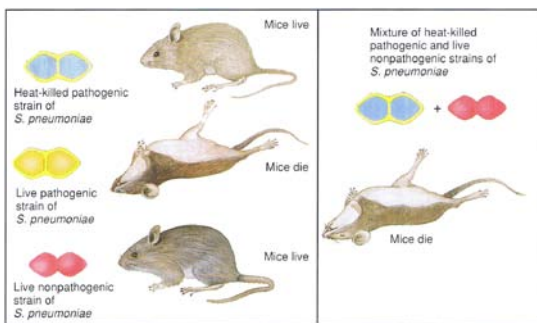
และ rough type (R) ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่ไม่สร้างแคปซูลและไม่ทำให้เกิดโรคปอดบวม ทำการทดลอง ดังนี้

1. นำ S-type ที่มีชีวิต  $\xrightarrow{\text{ฉีด}}$  หนู  $\longrightarrow$  หนูตาย  
 เมื่อนำเลือดของหนูที่ตายไปเพาะเชื้อเพื่อตรวจหาเชื้อแบคทีเรีย พบว่า เป็น

ชนิด S-type

2. นำ R-type ที่มีชีวิต  $\xrightarrow{\text{ฉีด}}$  หนู  $\longrightarrow$  หนูไม่ตาย

3. นำ S-type ที่ถูกฆ่าด้วยความร้อน  $\xrightarrow{\text{ฉีด}}$  หนู  $\longrightarrow$  หนูไม่ตาย



รูปที่ 4.1.4 การทดลองเพื่อพิสูจน์การถ่ายทอดสารพันธุกรรมของ Griffith (จาก George B. Johnson, 1997 The Living World. p. 138)

จากการทดลอง แสดงว่า แคปซูลของ S-type ช่วยป้องกันการถูกจับกิน (phagocytosis) ของเม็ดเลือดขาว หรือป้องกันการถูกทำลายด้วย antibody ของหนูได้ จึงเพิ่มจำนวนทำให้เกิดความรุนแรงของโรคและทำให้หนูตาย ส่วน R-type ไม่มีแคปซูล จึงถูกทำลายได้ง่าย

Griffith ได้ทำการทดลองใหม่ โดยนำ S-type ที่ถูกฆ่าด้วยความร้อนผสมรวมกับ R-type ที่มีชีวิต ฉีดให้หนู แล้วพบว่า หนูตาย เมื่อนำเลือดหนูที่ตายไปเพาะเชื้อเพื่อตรวจหาเชื้อแบคทีเรีย พบว่า มีแบคทีเรียสายพันธุ์ R-type ที่สร้างแคปซูลอยู่ด้วย แสดงให้เห็นว่า S-type ที่ถูกฆ่าด้วยความร้อน มีสารพันธุกรรมบางอย่างถ่ายทอดไปให้ R-type ได้ จึงทำให้ R-type ที่เกิดใหม่บางเซลล์มีแคปซูลเหมือนกับ S-type และมีความรุนแรงของโรคจนทำให้หนูตาย Griffith ได้ตั้งชื่อสารพันธุกรรมนี้ว่า transforming particle

ในปี ค.ศ. 1940 นักวิทยาศาสตร์ค้นพบว่า โครโมโซมของเซลล์พุกยูกาเรียอิตประกอบด้วย DNA และโปรตีน นักวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่เชื่อว่าโปรตีนเป็นองค์ประกอบสำคัญของยีน เพราะโปรตีนประกอบด้วยกรดอะมิโนที่เป็นหน่วยพื้นฐานถึง 20 ชนิด ในขณะที่ DNA ประกอบด้วย นิวคลีโอไทด์เพียง 4 ชนิดเท่านั้น ข้อสงสัยว่า กรดนิวคลีอิกคือ DNA และ RNA หรือ โปรตีน สารชนิดใดเป็นสารพันธุกรรมได้ถูกเปิดเผยโดยการ

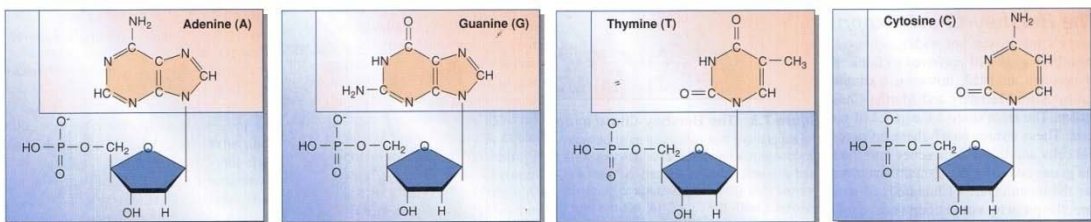
ทดลองของ Avery, Mac Lead และ Mc Carty ในปี ค.ศ. 1944 ทำให้พบว่า transforming particle นั้นคือ DNA การทดลองมีดังนี้

1. นำ S-type ที่ฆ่าด้วยความร้อน + R-type ที่มีชีวิต + DNase  $\xrightarrow{\text{ฉีด}}$  หนู  $\rightarrow$  ไม่ตาย
2. นำ S-type ที่ถูกฆ่าด้วยความร้อน + R-type ที่มีชีวิต + RNase  $\xrightarrow{\text{ฉีด}}$  หนู  $\rightarrow$  ตาย  
เมื่อนำเลือดหนูที่ตายมาเพาะเชื้อ พบทั้ง R-type ชนิดที่มีแคปซูลและไม่มีแคปซูล
3. นำ S-type ที่ฆ่าด้วยความร้อน + R-type ที่มีชีวิต + proteinase  $\xrightarrow{\text{ฉีด}}$  หนู  $\rightarrow$  ตาย  
เมื่อนำเลือดหนูมาเพาะเชื้อ พบทั้ง R-type ชนิดมีแคปซูลและไม่มีแคปซูล

จากผลการทดลอง เป็นการยืนยันว่าสารที่ถ่ายทอดทางพันธุกรรม คือ DNA เนื่องจาก DNase เป็นเอนไซม์ที่ย่อย DNA RNase เป็นเอนไซม์ย่อย RNA และ proteinase เป็นเอนไซม์ย่อยโปรตีน ดังนั้นเมื่อฉีดเอนไซม์ชนิดใดที่ผสมกับ R-type ที่มีชีวิต และ S-type ที่ไม่มีชีวิตให้หนูแล้ว ปรากฏหนูไม่ตาย ย่อมแสดงว่า เอนไซม์ชนิดนั้นจะไปทำปฏิกิริยากับสารพันธุกรรม ทำให้สารพันธุกรรมเสื่อมคุณภาพ เมื่อฉีดให้หนูจึงไม่ตาย นอกจากนี้ DNA ยังเป็นสารที่สามารถสกัดออกมาได้ และไม่ถูกทำลายด้วยความร้อน ความร้อนจะไปทำลายเฉพาะแคปซูลเท่านั้น

### DNA (Deoxyribonucleic acid)

โมเลกุลของ DNA เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ nucleotide จำนวนมาก DNA บางโมเลกุล อาจมีถึง 200,000 nucleotide โครงสร้างของ nucleotide ประกอบด้วย น้ำตาล deoxyribose Nitrogenous base และ phosphate เบสมี 4 ชนิด คือ Adenine (A) Guanine (G) Thymine (T) และ Cytosine (C) ดังนั้น DNA จึงมี nucleotide ได้ 4 ชนิด คือ deoxyadenylate deoxyguanylate deoxythymidilate และ deoxycytidilate

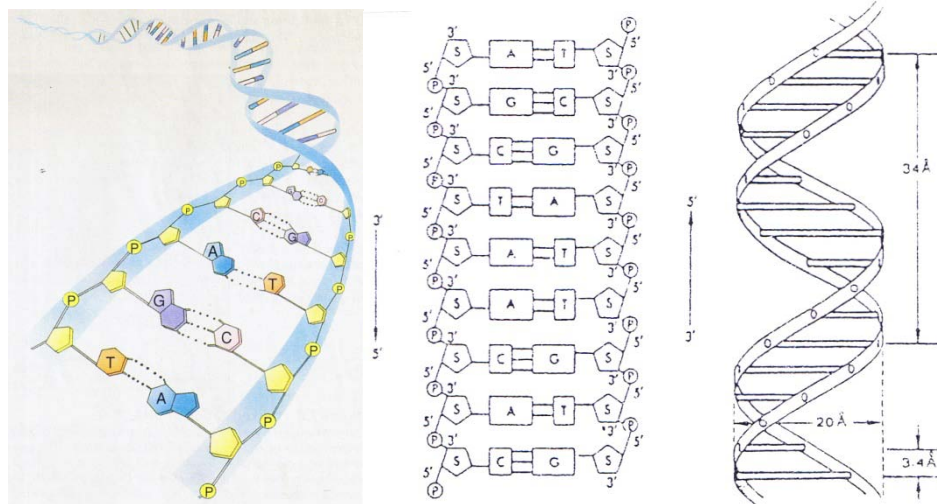


รูปที่ 4.1.5 โครงสร้างโมเลกุลของ nucleotide 4 ชนิด (จาก George B. Johnson, 1997)

ปี ค.ศ. 1953 J.D Watson และ F.H.C Crick ได้เสนอโครงสร้างโมเลกุลของ DNA ว่าประกอบด้วย nucleotide 2 สายพันเป็นเกลียวแบบบันไดเวียน (Double helix) ทั้ง 2



สายยึดกันด้วยเบส purine กับ Pyrimidine วางซ้อนกันเหมือนขั้นบันได เกลียวของสาย nucleotide หมุนไปทางขวา ความกว้างของเกลียว 20 Å ความห่างระหว่างชั้น nucleotide 3.4 Å เกลียวจะหมุนกลับมาที่เดิมทุก ๆ 34 Å ความยาวของสาย nucleotide เกิดจากการจับกันของ ฟอสเฟต กับ น้ำตาลไปตลอด ทางด้านกว้างเกิดจากการจับกันระหว่าง adenine กับ thymine ด้วยพันธะคู่ของไฮโดรเจน (A=T) และ Guanine กับ Cytosine ด้วยพันธะ 3 ของไฮโดรเจน (G≡C) สาย nucleotide 2 สาย วางในทิศทางที่กลับกัน คือ ถ้าสายหนึ่ง เป็นสาย 3'-5' phosphodiester อีกสายจะเป็นสาย 5'-3' phosphodiester

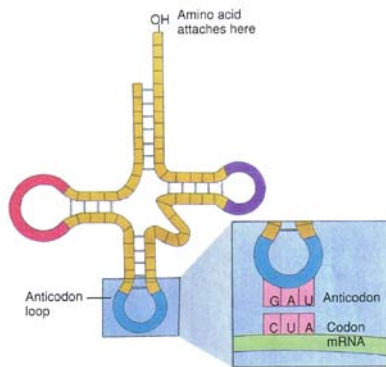


รูปที่ 4.1.6 โครงสร้างโมเลกุล DNA (จาก George B. Johnson, 1997)

### RNA (Ribonucleic acid)

องค์ประกอบทางเคมีของ RNA คล้ายกับ DNA แต่ต่างกันที่เป็นน้ำตาล Ribose กับเบสที่ต่างกัน 1 ชนิด คือ มี Uracil (U) แทน thymine (T) และมีโมเลกุลเป็นสายเดี่ยว RNA แบ่งตามรูปร่างและหน้าที่ได้ 3 ชนิด ได้แก่

1. Ribosomal RNA (rRNA) มีอยู่ในเซลล์ประมาณ 85-90% ของ RNA ทั้งหมด ส่วนใหญ่เป็นส่วนประกอบของ Ribosome ซึ่งเป็นออร์แกเนลล์ที่เป็นแหล่งสร้างโปรตีน
2. Messenger RNA (mRNA) มีอยู่ประมาณ 2-4% ของ RNA ทั้งหมดในเซลล์ ทำหน้าที่เป็นตัวนำรหัสพันธุกรรม (genetic code) ที่ปรากฏบน DNA ไปยัง Ribosome เพื่อทำการสังเคราะห์โปรตีน mRNA มีขนาดโมเลกุลเท่าความยาวหนึ่งยีน ซึ่งรวบรวมรหัสของ polypeptide ได้หนึ่งชนิด



รูปที่ 4.1.7 โครงสร้างของ tRNA  
(จาก George B. Johnson, 1997  
The Living World. p. 145)

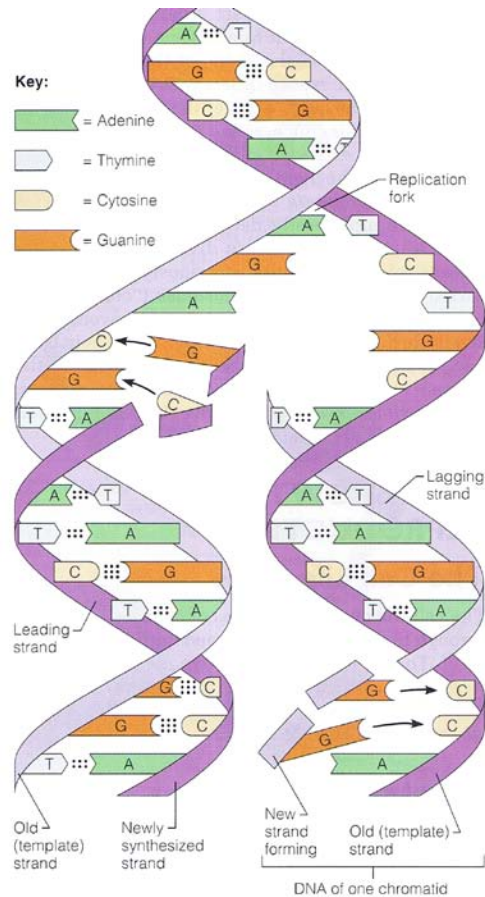
3. Transfer RNA (tRNA) มีอยู่ประมาณ 10% ของ RNA ทั้งหมด ขนาดโมเลกุลตั้งแต่ 75-85 nucleotide ทำหน้าที่นำกรดอะมิโนไปที่ Ribosome เพื่อให้ Ribosome นำกรดอะมิโนเหล่านั้นมาต่อกันเป็น polypeptide กรดอะมิโนแต่ละชนิดจะมี tRNA เฉพาะ อย่างน้อย 1 ชนิด

tRNA เป็น RNA สายเดี่ยวที่มีการขดเป็นรูปร่างคล้ายดอกจิก เรียกว่า cloverleaf model คือ โป่งออกเป็นห่วง 3 ห่วง ห่วงตรงกลางมีหมู่ของ 3 นิวคลีโอไทด์ เรียกว่า ตัว

ถอดรหัส (anticodon) ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของ tRNA ซึ่งจะจับคู่ได้พอดีกับสูตรรหัส (codon) ซึ่งเป็น 3 นิวคลีโอไทด์ที่ใช้เลือกกรดอะมิโนอยู่บน mRNA ที่ปลาย 3' ของ tRNA มีหมู่เบส 3 ชนิดเรียงต่อกันเป็นแถวในลำดับ C-C-A โดยมี A อยู่ปลายสุด ซึ่งเป็นจุดที่ใช้จับกับกรดอะมิโน

### การสังเคราะห์ DNA (DNA Replication)

การสร้าง DNA โมเลกุลใหม่ เกิดจากสายนิวคลีโอไทด์ที่เป็นคู่กัน แยกออกจากกัน ที่ตำแหน่งพันธะไฮโดรเจนที่ยึดเบส แล้วแต่ละเส้นนิวคลีโอไทด์จะมีแขนเลือกจับกับนิวคลีโอไทด์ใหม่ที่สอดคล้องกับสายเดิม เมื่อจับครบทุกคู่แล้วจะเกิดเป็น DNA ใหม่ 2 โมเลกุลที่มีลักษณะเหมือนกับโมเลกุลเดิมทุกประการ ดังนั้น DNA ที่สร้างขึ้นใหม่จึงประกอบด้วย polynucleotide ใหม่และเก่าอย่างละสาย เป็นการจำลองตัวเองของ DNA ด้วยวิธีกึ่งอนุรักษ์ (DNA semiconservative replication)



รูปที่ 4.1.8 การจำลองตัวเองของ DNA

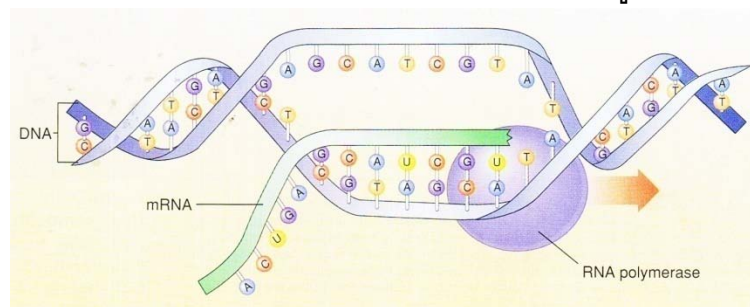
(จาก Elaine N. Marieb, 1998)

### การสังเคราะห์โปรตีน (Protein Synthesis)

การสังเคราะห์โปรตีน ต้องมีองค์ประกอบที่สำคัญ ดังนี้

1. กรดอะมิโน เป็นวัตถุดิบที่เป็นหน่วยพื้นฐานของโปรตีน
2. ไรโบโซม เป็นออร์แกเนลล์ที่เป็นแหล่งสร้างโปรตีน
3. mRNA เป็นสารนำรหัสพันธุกรรมสำหรับ polypeptide
4. tRNA เป็นสารที่จับกับกรดอะมิโนจำเพาะ เพื่อนำมาสร้างพันธะ peptide
5. เอนไซม์ เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเคมี
6. ATP เป็นสารที่ให้พลังงาน
7. GTP เป็นสารที่ใช้สังเคราะห์พันธะเปปไทด์
8. อีออนชนิดต่าง ๆ เช่น  $Mg^{++}$   $NH_4^+$   $K^+$  เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมี

กระบวนการสังเคราะห์โปรตีนเริ่มจากการพิมพ์รหัส (Transcription) โดย DNA คลายเกลียวเพื่อให้นิวคลีโอไทด์สายหนึ่งทำหน้าที่เป็นแม่พิมพ์ (Template) ในการสร้าง mRNA โดยมีเอนไซม์ RNA polymerase เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา mRNA ที่สร้างขึ้นมาจะมี ชนิดและลำดับของเบสในนิวคลีโอไทด์เหมือนกับสายนิวคลีโอไทด์ที่เป็นคู่ของแบบพิมพ์ แต่จะมีเบส Uracil (U) แทน Thymine (T) การลอกรหัสพันธุกรรมมีทิศทางจากปลาย 3' ไปปลาย 5' ของ DNA ดังนั้นโมเลกุล mRNA จึงเริ่มจาก ปลาย 5' ไปปลาย 3' เมื่อ mRNA สร้างเสร็จแล้วจะเคลื่อนที่ออกจากนิวเคลียสมาอยู่ในไซโทพลาสซึมไปยังไรโบโซม เพื่อแจ้งรหัสในการสร้างโปรตีน ส่วน DNA จะบิดเกลียวกลับคืนสู่สภาพเดิม



รูปที่ 4.1.9 การพิมพ์รหัสพันธุกรรมของ mRNA จากแบบพิมพ์ DNA  
(จาก George B. Johnson, 1997 The Living World. p. 143)

### การนำส่งกรดอะมิโน

กรดอะมิโน เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์โปรตีน โดยมี tRNA ทำหน้าที่ลำเลียง มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ ได้เป็น polypeptide กรดอะมิโนแต่ละชนิดมี tRNA เฉพาะ อย่างน้อย 1 ชนิด ก่อนที่กรดอะมิโนจะจับกับ tRNA จะต้องได้รับการกระตุ้นด้วย พลังงานจาก ATP โดยมีเอนไซม์ amino-acyl tRNA Synthetase เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ เป็น AA-AMP และ Pi กรดอะมิโนที่ได้รับการกระตุ้นจะจับกับ tRNA ที่ปลาย CCA

### สูตรรหัส (Codon)

การสร้าง polypeptide แต่ละชนิดจะมี mRNA เฉพาะชนิดนั้น ดังนั้นในไซโทพลาสซึม จึงมี mRNA ชนิดต่าง ๆ ลำดับของนิวคลีโอไทด์บน DNA และ mRNA ได้บรรจุรหัส (Code) สำหรับแปล เป็นกรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ แต่ละรหัสมี 3 นิวคลีโอไทด์ (Triple code) เรียกว่า สูตรรหัส (Codon) เช่น mRNA มีสูตรรหัส GUC แปลเป็น Valine และ UAU แปล

เป็น tyrosine เป็นต้น สูตรรหัสบน mRNA จะจับคู่ได้พอดีกับ 3 นิวคลีโอไทด์ บน tRNA ที่นำกรดอะมิโนชนิดนั้น 3 นิวคลีโอไทด์บน tRNA เรียกว่า ตัวถอดรหัส (anticodon) เช่น สูตรรหัสบน mRNA คือ GUC จะจับคู่กับตัวถอดรหัสบน tRNA คือ CAG ความสัมพันธ์ระหว่างสูตรรหัสกับตัวถอดรหัสจึงมีบทบาทในการควบคุมการเรียงลำดับของกรดอะมิโนใน polypeptide ตารางสูตรรหัสมีดังนี้

		Second Base				
		U	C	A	G	
U	UUU	UCU	UAU	UGU	U C A G	
	UUC	UCC	UAC	UGC		
	UUA	UCA	UAA	UGA		
	UUG	UCG	UAG	UGG		
C	CUU	CCU	CAU	CGU	U C A G	
	CUC	CCC	CAC	CGC		
	CUA	CCA	CAA	CGA		
	CUG	CCG	CAG	CGG		
A	AUU	ACU	AAU	AGU	U C A G	
	AUC	ACC	AAC	AGC		
	AUA	ACA	AAA	AGA		
	AUG	ACG	AAG	AGG		
G	GUU	GCU	GAU	GGU	U C A G	
	GUC	GCC	GAC	GGC		
	GUA	GCA	GAA	GGA		
	GUG	GCG	GAG	GGG		

รูปที่ 4.1.10 ตารางสูตรรหัส

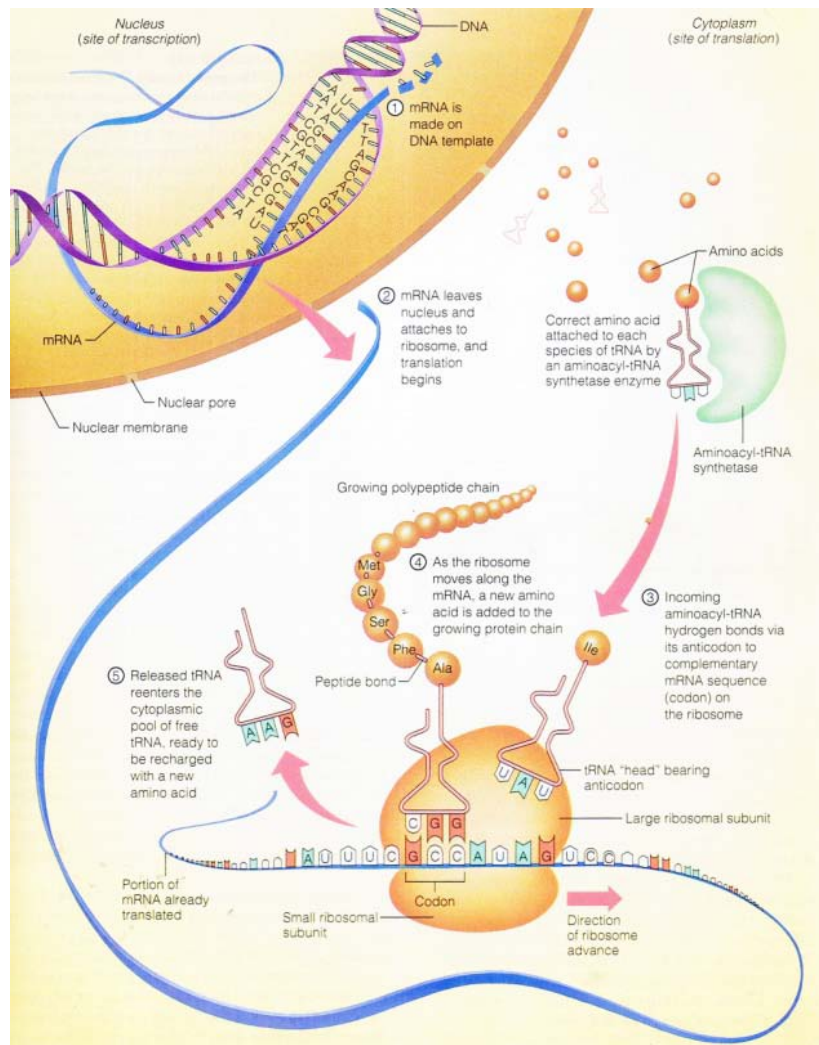
(จาก Elaine N. Marieb, 1998 Human Anatomy physiology p. 100)

สูตรรหัสนี้มี 64 ชนิด ใช้กับกรดอะมิโน 20 ชนิด สูตรรหัสหลายสูตรแปลเป็นกรดอะมิโนชนิดเดียวกันได้ เช่น ACU ACC ACA และ ACG เป็นสูตรรหัสของ threonine เป็นต้น สูตรรหัสบางสูตรทำหน้าที่อย่างอื่น เช่น เป็นรหัสบอกการเริ่มต้น หรือหยุดการสร้าง polypeptide สูตรรหัสนี้มีความเป็นสากล (Universality) ที่สิ่งมีชีวิตทุกชนิดใช้แปลเป็นกรดอะมิโนชนิดเดียวกัน ดังนั้นไวรัสที่เข้าไปอยู่ในสิ่งมีชีวิตอื่นจึงสามารถใช้กรดอะมิโนของเจ้าบ้าน (host) สร้าง polypeptide ของตนเองได้ โดยใช้สูตรรหัสเดียวกัน

## การสร้างพันธะเปปไทด์

การสร้างพันธะเปปไทด์ เริ่มจาก mRNA เข้าจับกับไรโบโซม tRNA ที่นำกรดอะมิโนตัวแรกมาจะเข้าจับกับไรโบโซมตรงร่องระหว่างหน่วยย่อย (sub unit) บนไรโบโซมซึ่งมีตำแหน่งให้ tRNA เกาะ (binding site) อยู่ 2 จุด คือ peptidyl site (P) เป็นจุดที่ให้กรดอะมิโนมาต่อกันเป็น polypeptide และ aminoacyl site (A) เป็นจุดที่ให้ tRNA นำกรดอะมิโนโมเลกุลใหม่เข้ามาเกาะ tRNA ที่นำกรดอะมิโนที่ 1 จะเกาะที่ P tRNA ที่นำกรดอะมิโนที่ 2 จะเกาะที่ A พร้อมกับสร้างพันธะเปปไทด์เชื่อมระหว่างกรดอะมิโนที่ 1 และ 2 โดยมีเอนไซม์และ GTP ช่วย เมื่อสร้างพันธะเสร็จแล้วจะมีเอนไซม์มาตัด กรดอะมิโนที่ 1 ออกจาก tRNA และ tRNA จะหลุดออกจาก P เพื่อไปรับกรดอะมิโนได้อีก ขณะเดียวกันไรโบโซมจะเคลื่อนผ่าน mRNA จนจุด A ของ tRNA ที่ 2 เคลื่อนไปอยู่ที่ P สูตรรหัสชุดใหม่จะเคลื่อนเข้ามาที่จุด A ใหม่ และ tRNA ที่นำกรดอะมิโนที่ 3 เข้ามาเกาะ และสร้างพันธะเปปไทด์ระหว่างกรดอะมิโน 2 และ 3 ขบวนการนี้จะเกิดซ้ำกับตอนแรกไปเรื่อย ๆ จนสิ้นสุดการสังเคราะห์ polypeptide ชนิดนั้น การเคลื่อนที่ของไรโบโซมมีทิศทางเคลื่อนจากปลาย 5' ไปปลาย 3' ของ mRNA ดังนั้นการสังเคราะห์ polypeptide จึงสร้างจากปลาย 5' ไปปลาย 3'





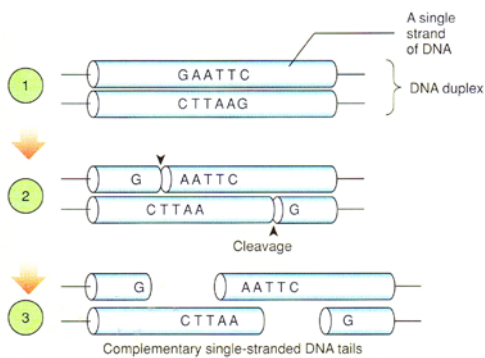
รูปที่ 4.1.11 การนำกรดอะมิโนมาแปลรหัสและสร้างพันธะเปปไทด์บนไรโบโซม  
(จาก Elaine N. Marieb, 1998)

การสังเคราะห์ polypeptide เกิดขึ้นได้รวดเร็ว เนื่องจากมีไรโบโซมจำนวนมากเข้ามาช่วยในกระบวนการแปลรหัส เมื่อไรโบโซมโมเลกุลแรกเคลื่อนที่ไป ไรโบโซมใหม่จะเข้ามาแทนที่ ทำให้สาย mRNA 1 โมเลกุล มีไรโบโซมเกาะเป็นจำนวนมาก เรียกว่า โพลีโซม (polysome) ด้วยเหตุนี้เซลล์จึงสามารถสังเคราะห์ polypeptide ได้อย่างต่อเนื่องและมีปริมาณมาก

## เทคโนโลยีพันธุวิศวกรรม (Genetic Engineering Technology)

พันธุวิศวกรรม (Genetic Engineering) คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงสารพันธุกรรม เพื่อให้ได้สิ่งมีชีวิตที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ มักใช้วิธีการเพิ่ม DNA เข้าสู่เซลล์ แล้วทำให้เซลล์เปลี่ยนคุณสมบัติไปตามลักษณะของ DNA ที่เพิ่มเข้าไป เช่น การเปลี่ยนสารพันธุกรรมของแบคทีเรีย โดยการตัดต่อเข้ากับยีนของคน ทำให้แบคทีเรียนั้นสร้างโปรตีนของคนได้ พันธุวิศวกรรมโดยการตัดต่อ DNA หรือ การสร้าง DNA โมเลกุลผสม (recombinant DNA) มีขั้นตอนสำคัญ ได้แก่

1. ตัดต่อ DNA สองชนิด เข้าเป็นชิ้นเดียวกัน (recombinant DNA)
2. นำ DNA โมเลกุลผสม เข้าสู่เซลล์เจ้าบ้าน (host organism)
3. เลือกเซลล์เจ้าบ้านที่ได้รับ DNA โมเลกุลผสม และมีคุณสมบัติตามที่ต้องการนำไปเลี้ยงเพิ่มจำนวน



รูปที่ 4.1.12 เอนไซม์ตัดเฉพาะ  
(จาก George B. Johnson, 1997  
The Living World. p. 157)

ความสำเร็จในการสร้าง DNA โมเลกุลผสม เป็นผลมาจากการค้นพบเอนไซม์พิเศษในแบคทีเรีย คือ เอนไซม์ตัดเฉพาะ (restriction enzyme) ซึ่งทำหน้าที่เป็นกรรไกรตัดสารพันธุกรรม ที่สามารถตัด DNA ในตำแหน่งเฉพาะ เอนไซม์ตัดเฉพาะแต่ละชนิดจะตัด DNA ได้ในตำแหน่งเฉพาะที่แตกต่างกัน เนื่องจาก DNA เป็นเกลียวคู่ และแต่ละสายจะมีทิศทางสลับกัน เอนไซม์จะตัด DNA ทั้ง 2 สายโดยสมมาตรกัน ทำให้ปลายที่ถูกตัดเป็นสาย DNA สายเดี่ยว ที่เข้าคู่กับอีกสายหนึ่งได้ เรียกปลายทั้งสองว่า Sticky end ซึ่งจะเข้าคู่กับสาย DNA

ของสิ่งมีชีวิตอื่นที่ถูกตัดด้วยเอนไซม์ชนิดเดียวกันได้ DNA ที่มาต่อกันจะเชื่อมกันด้วยเอนไซม์ DNA ligase เทคโนโลยีการสร้าง DNA โมเลกุลผสม นำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์มากมายทั้งด้านเกษตรกรรม คือ การผลิตยา การแพทย์ และการเกษตร



## 4.2 วิวัฒนาการ (Evolution)

สิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ ที่ดำรงชีวิตอยู่บนโลกได้ ต้องมีการปรับตัวที่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมที่อาศัยอยู่ในช่วงเวลาที่มันมีชีวิต มีกระบวนการเปลี่ยนแปลงลักษณะพันธุกรรมของสปีชีส์ที่สืบทอดจากรุ่นบรรพบุรุษ และถ่ายทอดสู่รุ่นลูกหลาน ต่อเนื่องกันไปไม่มีที่สิ้นสุด

### การศึกษาวิวัฒนาการ

นักวิทยาศาสตร์ในศตวรรษที่ 18 ได้ให้ความสนใจเรื่องวิวัฒนาการกันมาก แสดงความคิดเห็นที่ลบล้างความเชื่อเดิมที่ว่า สรรพสิ่งบนโลกเกิดขึ้นจากความประสงค์ของพระเจ้า มีผลงานวิวัฒนาการที่มีหลักฐานอ้างอิงได้ทางวิทยาศาสตร์มากขึ้น มีทฤษฎีวิวัฒนาการที่ได้รับการเชื่อถือมาก 2 ทฤษฎี ได้แก่

1. ทฤษฎีการใช้และไม่ใช้ (Law of use and disuse) เสนอโดยลามาร์ค (Jean Lamarck, ค.ศ. 1744-1829) มีสาระสำคัญว่า สิ่งแวดล้อมย่อมมีผลต่อรูปร่างของสัตว์ อวัยวะที่ใช้มากย่อมขยายใหญ่ขึ้น ส่วนอวัยวะที่ไม่ค่อยใช้จะอ่อนแอและเสื่อมสลายไป และลักษณะเหล่านี้จะคงอยู่และถ่ายทอดต่อไปโดยการสืบพันธุ์

จากทฤษฎี สามารถแยกเป็นประเด็นสำคัญได้ 2 ประเด็น คือ กฎของการใช้และไม่ใช้ (Law of use and disuse) และ กฎแห่งการถ่ายทอดลักษณะที่เกิดขึ้นใหม่ (Law of inheritance of acquired characteristics) ลามาร์คอธิบายโดยยกตัวอย่างเรื่องยีราฟว่า แต่เดิมมีแต่ยีราฟพันธุ์คอสั้น ที่กินหญ้าเป็นอาหาร ในเวลาต่อมาเกิดสภาวะขาดแคลนอาหาร จึงต้องกินใบไม้แทนหญ้า ทำให้ต้องยืดคอและเขย่งขาอยู่เป็นประจำ เมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ จึงทำให้คอและขายาวขึ้น ลูกหลานของยีราฟพวกนี้จึงมีคอและขายาว นอกจากนี้ ลามาร์คยังอธิบายเรื่องของงูไม่มีขาว่า เกิดจากงูเป็นสัตว์ที่อาศัยอยู่ในที่รก การเคลื่อนที่ด้วยการเดินจึงไม่สะดวกเท่ากับการใช้ลำตัวเลื้อยไป เมื่อขาไม่ได้ถูกใช้ในการเดินเป็นเวลานาน ๆ จึงค่อย ๆ หดหายไป ทำให้ลูกหลานที่เกิดมาไม่มีขา

ประเด็นการใช้และไม่ใช้นั้นมีความเป็นไปได้ แต่การที่จะถ่ายทอดลักษณะที่เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงในส่วนของเซลล์ร่างกายไม่ใช่เซลล์สืบพันธุ์ จึงไม่น่าจะถ่ายทอดไปสู่รุ่นลูกได้

2. ทฤษฎีการคัดเลือกโดยธรรมชาติ (Theory of Natural Selection) เสนอโดย ดาร์วิน (Charles Darwin, ค.ศ. 1809-1882) ดาร์วินมีโอกาสเดินทางไปกับเรือสำรวจ ชายฝั่งอเมริกาใต้ของอังกฤษ ทำให้ได้ศึกษาธรรมชาติในบริเวณที่ผ่านไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการได้สังเกตสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ ที่อาศัยอยู่บนเกาะกาลาปากอส เป็นแรงบันดาลใจให้เขาศึกษาค้นคว้าการเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติอย่างจริงจัง ดาร์วิน สังเกตพบว่า แม้แต่สัตว์ชนิดเดียวกัน มีรูปร่างเหมือนกัน ก็ยังมีอวัยวะบางอย่างแตกต่างกันได้ เช่น นกฟินช์ (Finch) ที่มีลักษณะของปากที่แตกต่างกันหลายแบบ ประกอบกับการได้ศึกษาบทความของโทมัส มาลธัส (Thomas Malthus) ที่กล่าวถึงการเพิ่มของประชากรว่า มีอัตราการเพิ่มเร็วกว่าอาหารหลายเท่า เพราะประชากรจะเพิ่มในอัตราเรขาคณิต ส่วนอาหารเพิ่มแบบอัตราเลขคณิต

จากบทความของมาลธัส ทำให้ดาร์วินคิดว่าสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ จะมีการเพิ่มจำนวนมากขึ้นในรุ่นลูกหลาน แต่จากการสังเกตสัตว์บนเกาะกาลาปากอสในเวลาที่ผ่านไปหลายปี พบว่า จำนวนสิ่งมีชีวิตไม่ได้เพิ่มขึ้นมาก แต่มีจำนวนเกือบคงที่ จึงน่าจะมีปัจจัยควบคุมจำนวนประชากรของสิ่งมีชีวิตชนิดนั้น ๆ แต่สิ่งที่ดาร์วินสังเกตเห็นว่ามีเปลี่ยนแปลง คือ ลักษณะของพื้นดินที่สอดคล้องกับบทความของไลเอลล์ (Charles Lyell, (1797-1875) นักธรณีวิทยาชาวอังกฤษที่เชื่อว่าโลกมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ แล้วส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของสิ่งมีชีวิตด้วย

จากการศึกษาบทความและการสังเกตสิ่งต่าง ๆ ในธรรมชาติ ดาร์วินจึงตั้งทฤษฎีการคัดเลือกโดยธรรมชาติ ซึ่งมีสาระสำคัญดังนี้

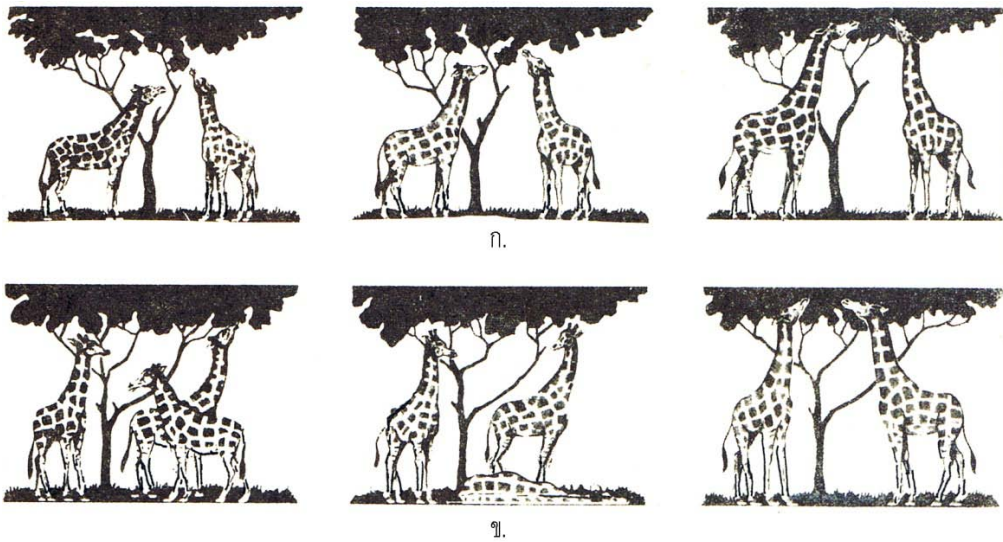
1) การแปรผัน (Variation) ของลักษณะต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิต คือ สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดจะมีลักษณะที่แตกต่างกันเล็กน้อย เกิดจากการควบคุมของยีน ลักษณะที่แปรผันนี้ทำให้เกิดการคัดเลือกให้อยู่รอดได้ ถ้าลักษณะที่แปรผันนั้นเหมาะสมกับสิ่งแวดล้อม แต่ถ้าไม่เหมาะสมก็จะตายไป

2) สมดุลธรรมชาติ (Balance of Nature) สิ่งมีชีวิตที่เกิดมามีจำนวนมากนั้นถ้าการอยู่รอดมีน้อย ก็จะทำให้จำนวนสิ่งมีชีวิตไม่เพิ่มจำนวนขึ้น

3) การต่อสู้เพื่อยังชีพ (Struggle for existence) ลูกหลานของสิ่งมีชีวิตชนิดเดียวกัน ต้องมีการต่อสู้ดิ้นรนเพื่อการมีชีวิตรอด ตัวที่อ่อนแอจะไม่สามารถมีชีวิตรอดอยู่ได้ ตัวที่แข็งแรง หลบหลีกอันตรายได้ดีกว่าจะมีชีวิตรอดอยู่ได้

4) การอยู่รอดในสภาพที่เหมาะสม (The Survival of the fittest) สิ่งมีชีวิตที่เกิดขึ้นมาแล้ว จะต้องปรับตัวให้เหมาะสมกับสิ่งแวดล้อมจึงจะดำรงชีวิตอยู่ได้

ดาร์วิน อธิบายทฤษฎีการคัดเลือกโดยธรรมชาติของยีราฟว่า ในอดีตมียีราฟ ทั้งชนิดคอสั้นและชนิดคอยาวอยู่ปะปนกัน เมื่อเกิดสภาวะขาดแคลนอาหาร ยีราฟพันธุ์คอยาวจะได้เปรียบพันธุ์คอสั้น เนื่องจากยังสามารถกินยอดไม้ที่อยู่สูง ๆ ได้ ทำให้ยีราฟคอยาวมีโอกาสอยู่รอดมากกว่าและแพร่พันธุ์ต่อมาได้ ขณะที่ยีราฟคอสั้นจะขาดอาหารและล้มตาย ทำให้มีจำนวนลดลงไปเรื่อย ๆ และเมื่อสถานการณ์รุนแรงมากขึ้น ทำให้ยีราฟคอสั้นสูญพันธุ์ไป จึงเหลือแต่ยีราฟคอยาวเท่านั้น



รูปที่ 4.2.1 เปรียบเทียบวิวัฒนาการของยีราฟตามทฤษฎีของลามาร์ค (ก) และดาร์วิน (ข)



รูปที่ 4.2.2 ซากดึกดำบรรพ์ของนก  
อาร์คีออปเทอริกซ์ (จาก George B. Johnson,  
1997 The Living World. p. 175)

## หลักฐานทางวิวัฒนาการ

1. หลักฐานจากซากดึกดำบรรพ์ของ  
สิ่งมีชีวิต ซากของสิ่งมีชีวิตโบราณที่พบอยู่ใน  
ชั้นหิน หรือ หินตะกอน สามารถบอกความ  
สัมพันธ์ของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ได้ เช่น ความ  
สัมพันธ์ระหว่างเฟิร์นกับพืชมีเมล็ด ทราบจาก  
การพบซากเฟิร์นชนิดหนึ่งมีเมล็ด ซึ่งสูญพันธุ์  
ไปแล้ว ซากของม้าที่แสดงถึงวิวัฒนาการของ  
ม้าปัจจุบัน พบซากของม้าบรรพบุรุษที่มีความ  
สูงเพียง 11 นิ้วเท่านั้น และซากของม้าในแต่  
ละยุคจะมีความสูงเพิ่มขึ้น จนถึงม้าในปัจจุบัน  
ที่มีความสูงถึง 60 นิ้ว ซากนกโบราณอาร์คี

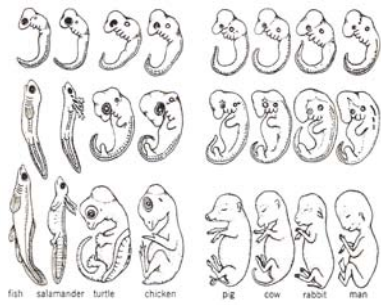
ออปเทอริกซ์ (Archaeopteryx) ที่มีขนาดเล็ก ซากกรวยยาว มีฟัน ปีกมีนิ้ว 4 นิ้ว ที่ปลาย  
นิ้วมีเล็บ แข็งมีเกล็ด กระดูกหางยาวต่อกันเป็นข้อ ๆ ซากนกนี้แสดงถึงความสัมพันธ์  
ระหว่างนกและสัตว์เลื้อยคลาน

2. หลักฐานความคล้ายคลึงของโครงสร้าง จากการศึกษากายวิภาคเปรียบเทียบ  
กับการศึกษาซากดึกดำบรรพ์ พบว่า โครงสร้างของสิ่งมีชีวิตมี 2 แบบ ได้แก่

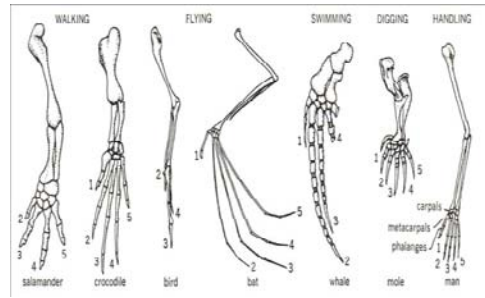
1) โครงสร้างแบบโฮโมโลกัส (Homologous Structure) หมายถึง อวัยวะที่มีจุด  
กำเนิดจากเนื้อเยื่อเดียวกัน แต่มีพัฒนาการเปลี่ยนแปลงไป เพื่อใช้ทำหน้าที่ต่างกัน เช่น  
แขนคน ครีบคู้หน้าของวาฬ ขาหน้าของสัตว์ ปีกนก ปีกค้างคาว เป็นต้น

2) โครงสร้างแบบอะนาโลกัส (Analogous Structure) หมายถึง อวัยวะที่มี  
จุดกำเนิดมาจากเนื้อเยื่อต่างกัน แต่มีการปรับตัวให้มาทำหน้าที่เหมือนกัน เช่น ปีกนก กับ  
ปีกแมลง ปีกนกเปลี่ยนแปลงมาจากรยางค์คู้หน้า แต่ปีกแมลงเกิดจากเนื้อเยื่อบริเวณอก  
ส่วนรยางค์คู้หน้ายังคงเป็นขา

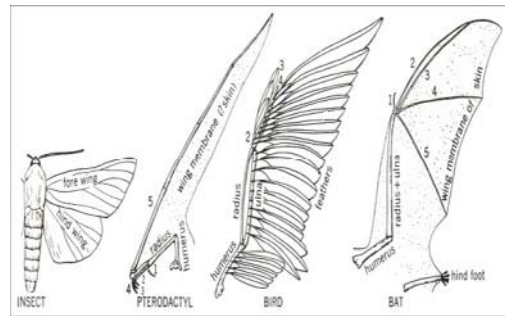
สัตว์ที่มีโครงสร้างแบบโฮโมโลกัสจะมีความใกล้ชิด ตามสายวิวัฒนาการมากกว่าใน  
พวกที่มีโครงสร้างแบบอะนาโลกัส



รูปที่ 4.2.5 แบบแผนการเจริญเติบโตของ  
ตัวอ่อนสัตว์มีกระดูกสันหลัง  
(จาก Tracy I. storrer & Robert L.

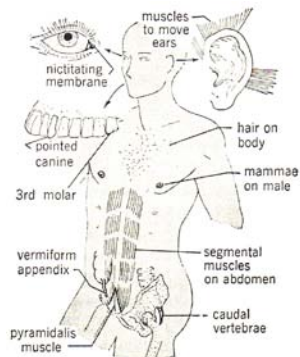


ก.



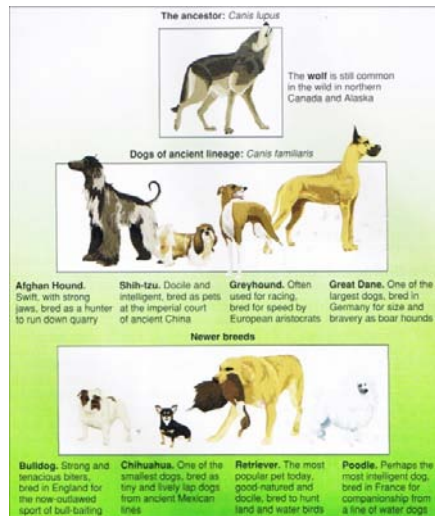
ข.

รูปที่ 4.2.3 โครงสร้างแบบโฮโมโลกัส (ก) และอะนาโลกัส (ข)  
(จาก Tracy I. storrer & Robert L. Usinger, 1965)



รูปที่ 4.2.4 อวัยวะซากที่ไม่มีหน้าที่ในร่างกายสัตว์  
(จาก Tracy I. storrer & Robert L. Usinger, 1965)

3. หลักฐานซากอวัยวะในร่างกายของสัตว์ อวัยวะบางอย่างในร่างกายของสัตว์ไม่ได้ทำหน้าที่แล้ว แต่ยังคงเหลือเป็นซากเล็ก ๆ เป็นสิ่งที่แสดงร่องรอยของอวัยวะที่มาจากบรรพบุรุษเดียวกัน เช่น ซากกระดูกขาของงู ใต้ง่ามของคน และกระดูกหางของคน เป็นต้น



รูปที่ 4.2.6 สุนัขที่เกิดจากการปรับปรุงพันธุ์

(จาก George B. Johnson, 1997

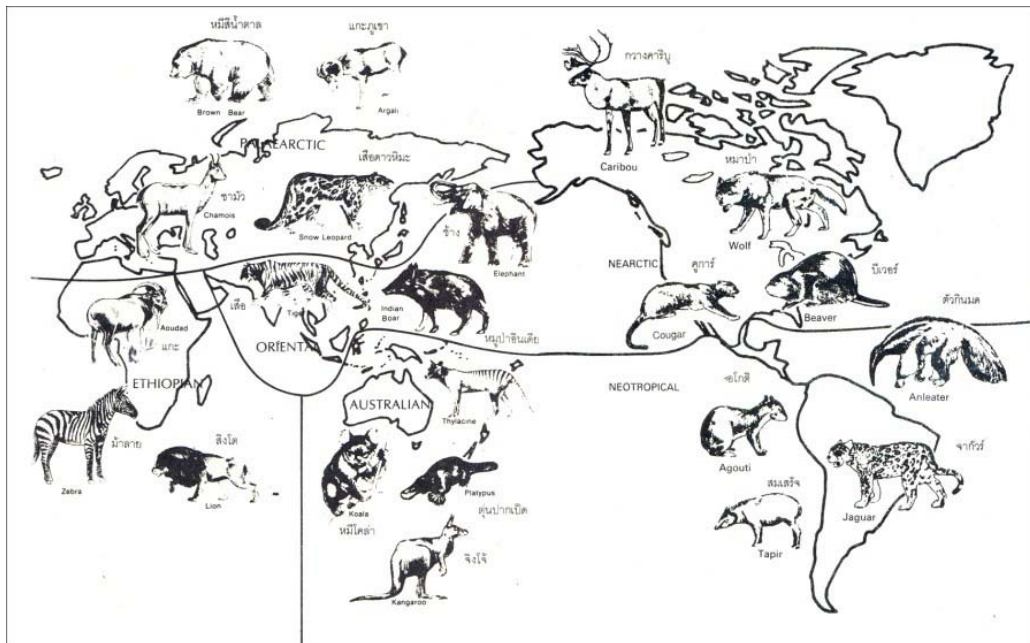
The Living World. p. 192)

4. หลักฐานการเจริญเติบโตของเอมบริโอ การเจริญเติบโตของสัตว์จากไซโกตไปเป็นตัวอ่อน ถึงตัวเต็มวัย จะแสดงลักษณะที่เหมือนกันกับวิวัฒนาการของบรรพบุรุษ สัตว์ที่มีความสัมพันธ์กันจึงมีรูปแบบการพัฒนาของตัวอ่อนที่คล้ายกัน เช่น สัตว์มีกระดูกสันหลัง ตัวอ่อนระยะแรกจะมีลักษณะเหมือนกัน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีรีแคปิตูเลชัน (Theory of Recapitulation) ที่เสนอโดย Haeckel (ค.ศ. 1841-1991) อธิบายว่า การเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตจะทบทวนลักษณะต่าง ๆ ของบรรพบุรุษเสมอ

5. หลักฐานการปรับปรุงพันธุ์พืชและสัตว์ การผสมพันธุ์เพื่อการคัดเลือกหรือปรับปรุงพันธุ์พืชหรือสัตว์ของมนุษย์ ก่อให้เกิดพืชและสัตว์ชนิดที่มีลักษณะแปลกแตกต่างไปจากพันธุ์ดั้งเดิม แสดงว่ามีความแปรผัน (variation) ของพันธุ์เดิม ถ้าสิ่งมีชีวิตนั้นมีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมก็จะมีชีวิตรอดอยู่ได้ เช่น สุนัขพันธุ์ต่างที่เกิดจากการผสมพันธุ์โดยมนุษย์

6. หลักฐานการแพร่กระจายของพืชและสัตว์ ในธรรมชาติพบว่า สัตว์ที่อาศัยอยู่บนแผ่นดินที่เป็นขอบทวีป หรือบนแผ่นดินใหญ่กับเกาะ มักมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าสัตว์พวกนี้น่าจะเป็นชนิดเดียวกันมาก่อน และอาศัยอยู่บนแผ่นดินใหญ่ร่วมกัน ต่อมาเมื่อแผ่นดินแยกออกจากกัน ทำให้สัตว์ต้องแยกจากกันไป และปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมใหม่ จนกลายเป็นคนละสปีชีส์ การกระจายพันธุ์ของพืชก็เช่นเดียวกันกับสัตว์





รูปที่ 4.2.7 การแพร่กระจายของพืชและสัตว์ตามสภาพภูมิศาสตร์  
(ปรีชา สุวรรณพันธ์ และนงลักษณ์ สุวรรณพันธ์, 2537)

7. หลักฐานทางด้านชีววิทยาระดับโมเลกุล จากการศึกษาเนื้อเยื่อและของเหลวในสิ่งมีชีวิตพบว่า มีความคล้ายคลึงกัน เช่น น้ำย่อย ฮอร์โมน เลือดของคน มีลักษณะคล้ายกับสัตว์มีกระดูกสันหลังอื่น ๆ แสดงถึงการเหมือนกันของ DNA หรือโปรตีนของสิ่งมีชีวิตในกลุ่มที่มีบรรพบุรุษใกล้ชิดกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นสมาชิกในกลุ่มพี่น้องจะมีความเหมือนของสารดังกล่าวมากกว่ากลุ่มอื่น นักวิทยาศาสตร์ด้านอนุกรมวิธานใช้การตรวจสอบความเหมือนกันของลำดับเบสใน DNA หรือลำดับกรดอะมิโนของโปรตีน เพื่อทำการเปรียบเทียบความใกล้ชิดกันของสิ่งมีชีวิต ถ้าสิ่งมีชีวิตมี DNA หรือโปรตีนที่เหมือนกันในเปอร์เซ็นต์สูง หรือต่างกันน้อยที่สุด ย่อมแสดงว่าสิ่งมีชีวิตนั้นมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกันในเชิงวิวัฒนาการ เช่น การศึกษา วิเคราะห์ ลำดับกรดอะมิโนในสารไซโตโครม ซี (Cytochrome C) ของคน ลิงรีซัส ม้า และกระต่าย พบว่า สัตว์ทั้ง 4 ชนิด มีจำนวนกรดอะมิโนในไซโตโครม ซี แตกต่างกัน ดังนี้ : คนต่างกับลิงรีซัส กระต่าย และม้า อยู่ 19 และ 12 ตามลำดับ ลิงรีซัสต่างกับกระต่ายและม้าอยู่ 8 และ 10 ตามลำดับ และกระต่ายต่างกับม้า 3 แสดงให้เห็นว่าคนกับลิงรีซัส น่าจะมีความสัมพันธ์ทางวิวัฒนาการใกล้ชิดกันมากกว่าคนกับลิง และกระต่ายใกล้ชิดกับม้ามากกว่าลิง นอกจากนี้ด้านมิวเทชัน (mutation) ยังพบว่าการเกิดมิวเทชันของ DNA ตามธรรมชาตินั้นมีอัตราต่ำมาก DNA จึงเป็นสารที่ค่อนข้าง

คงที่ การเปลี่ยนแปลงของกรดอะมิโนแต่ละโมเลกุลจะต้องใช้เวลาหลายล้านปี เช่น การเปลี่ยนแปลงลำดับของกรดอะมิโนในไซโตโครม ซี ที่ต่างกัน 1 โมเลกุล ต้องใช้เวลาประมาณ 17 ล้านปี

ปัจจุบัน การวิเคราะห์หาลำดับเบสในนิวคลีโอไทด์ของ DNA สามารถทำได้สะดวกและรวดเร็ว จึงทำให้ตรวจสอบได้ว่า สัตว์ที่มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกันทางวิวัฒนาการจะมีความแตกต่างของลำดับเบสในนิวคลีโอไทด์ของ DNA น้อยตำแหน่ง เช่น คนกับลิงชิมแปนซี ขณะนี้ ลิงโลกเก่า ลิงโลกใหม่ และลิงลม มีความแตกต่างกันของเบสใน DNA อยู่ร้อยละ 2.5 5.1 9.0 15.8 และ 42 ตามลำดับ แสดงว่าคนกับลิงชิมแปนซีมีวิวัฒนาการมาจากบรรพบุรุษที่ใกล้ชิดกันมากกว่าลิงชนิดอื่น ๆ

หลักฐานด้านชีววิทยาระดับโมเลกุล มีความน่าเชื่อถือมาก เพราะความสัมพันธ์ทางวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต แสดงเป็นปริมาณความแตกต่างของจำนวนกรดอะมิโนในโปรตีนชนิดเดียวกันได้ คือ บอกความแตกต่างของลำดับเบสใน DNA นั้นเอง

จากหลักฐานต่าง ๆ แสดงว่า วิวัฒนาการนั้นเกิดได้จริง โดยลักษณะของบรรพบุรุษจะเป็นลักษณะดั้งเดิม มักเป็นลักษณะโบราณ (Primitive) หรือลักษณะทั่วไป (Generalized) ส่วนลักษณะของสิ่งมีชีวิตรุ่นหลังซึ่งเปลี่ยนไปจากเดิมถือว่าเป็นลักษณะที่เจริญหรือก้าวหน้า (Advanced) หรือลักษณะพิสดาร (Specialized) สิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวจัดเป็นพวก primitive สิ่งมีชีวิตหลายเซลล์จัดเป็นพวก advanced การสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศจัดเป็นแบบ primitive และการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศเป็นแบบ advanced

### **พันธุศาสตร์ประชากร (Population Genetics)**

ประชากร คือ กลุ่มสิ่งมีชีวิตสืบชีส์เดียวกันที่อาศัยอยู่ร่วมกันในที่แห่งหนึ่งในเวลาหนึ่ง ลักษณะพันธุกรรมหรือยีนเป็นกลุ่มยีนของประชากร เรียกว่า ยีนพูล (gene pool) ซึ่งมีลักษณะที่เหมือนกันมากกว่าประชากรอื่นในสืบชีส์เดียวกัน วิวัฒนาการจะเกิดขึ้นได้ในระดับประชากรเท่านั้น การศึกษาวิวัฒนาการจึงต้องศึกษาเรื่องของพันธุศาสตร์ประชากร ซึ่งจะทำให้รู้ถึงความแตกต่างของการแปรผันทางพันธุกรรมของประชากรแหล่งต่าง ๆ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตใน แต่ละชั่วรุ่น



## การแปรผันทางพันธุกรรมในประชากร

ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันว่าทฤษฎีวิวัฒนาการของดาร์วินเป็นหลักการของการเกิดวิวัฒนาการ โดยความแตกต่างของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดเกิดจากความแปรผันในกลุ่มประชากร แต่ดาร์วินไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างลักษณะความแปรผันที่เกิดโดยอิทธิพลของสิ่งแวดล้อม กับความแปรผันที่เป็นลักษณะของการถ่ายทอดโดยกรรมพันธุ์ได้ ปัจจุบันเป็นที่รู้กันว่ามิวเทชัน (mutation) เป็นปัจจัยพื้นฐานสำคัญของ วิวัฒนาการ โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับยีนและโครโมโซม พร้อมกับมีการแลกเปลี่ยนสารประกอบทางพันธุกรรม (genetic recombination) ในกระบวนการสืบพันธุ์ที่อาศัยเพศ กระบวนการดังกล่าวก่อให้เกิดการแปรผันทางพันธุกรรม (genetic variation) ขึ้นในกลุ่มประชากร

## ความถี่ของยีนและความถี่ของยีนไทป์กับวิวัฒนาการ

ทฤษฎีวิวัฒนาการสมัยใหม่ยอมรับหลักการเรื่องความถี่ของยีนและความถี่ของยีนไทป์ ที่อธิบายด้วยกฎของ Hardy & Weinberg ซึ่งเสนอโดย G.H Hardy และ W. Weinberg ในปี ค.ศ. 1906 มีสาระสำคัญว่าในประชากรที่มีขนาดใหญ่ ถ้ามีการผสมพันธุ์ระหว่างสมาชิกอย่างสุ่ม และไม่มีอิทธิพลจากภายนอกมาทำให้อัตราส่วนของยีนเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนของฟีชีและอัตราส่วนของยีนไทป์ของประชากรนี้จะคงที่ตลอดไปทุก ๆชั่วรุ่น ประชากรที่มีอัตราส่วนของยีนและอัตราส่วนของยีนไทป์คงที่นี้เรียกว่า ประชากรมีความสมดุล (equilibrium population)

ประชากรอยู่ในสมดุลตาม Hardy & Weinberg หมายถึง ประชากรมีสมาชิกมากพอสมควร ไม่มีการอพยพ ไม่เกิดมิวเทชัน มีการผสมพันธุ์แบบสุ่ม และไม่มีการคัดเลือกตามธรรมชาติ

กฎของ Hardy & Weinberg อธิบายได้ดังนี้

ในยีน 1 คู่ ที่มี 2 อัลลีล เช่น อัลลีล A และอัลลีล a ถ้ายีน A มีอัตราส่วน p และยีน a มีอัตราส่วน q

ประชากรที่มียีนคู่ Aa จะผลิตหน่วยสืบพันธุ์ได้ 2 ชนิด คือ (A) และ (a) ในอัตราส่วน p และ q ตามลำดับ ดังนั้นผลรวมของยีนในเซลล์สืบพันธุ์ คือ  $p + q = 1$

การผสมพันธุ์อย่างสุ่มของประชากร เป็นการผสมอย่างสุ่มของหน่วยสืบพันธุ์ คือหน่วยสืบพันธุ์แต่ละชนิดของพันธุ์พ่อ มีโอกาสเข้าผสมกับหน่วยสืบพันธุ์ทุกชนิดของพันธุ์

แม่ได้ทุกกรณีเท่า ๆ กัน ดังนั้นอัตราส่วนของยีนโตนไพบ์ในรุ่นลูกจึงได้จากการคูณกันระหว่างอัตราส่วนของหน่วยสืบพันธุ์ของพ่อกับแม่ หรือสมการกำลังสองนั่นเอง

$$[p(A) + q(a)]^2 = 1$$

$$p^2 AA + 2pqAa + q^2 aa = 1$$

จากสมการหมายความว่า ยีนโตนไพบ์ AA , Aa และ aa มีอัตราส่วนเป็น  $p^2$  ,  $2pq$  และ  $q^2$  ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนของยีนโตนไพบ์นี้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของยีนในรุ่นพ่อแม่ เช่น เมื่อความถี่ของ  $p = 0.5$  และ  $q = 0.5$  อัตราส่วนของยีนโตนไพบ์จะเป็น  $\frac{1}{4}$  AA ,  $\frac{2}{4}$  Aa และ  $\frac{1}{4}$  aa

### การใช้กฎ Hardy & Weinberg ในการคำนวณ

กฎของ Hardy & Weinberg แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของยีนจะไม่เกิดในประชากรที่สมดุล คือ สภาวะแวดล้อมของประชากรสมบูรณ์และคงที่จึงสามารถคำนวณหาความถี่ของลักษณะที่ควบคุมด้วยยีนบางอย่าง โดยเฉพาะยีนที่ควบคุมลักษณะโรคทางพันธุกรรม ซึ่งเป็นยีนไม่พึงประสงค์ได้

ตัวอย่าง โรคโลหิตจางพันธุกรรมชนิดหนึ่งในประเทศไทย มีการถ่ายทอดโดยยีนด้อยบนออโตโซม มีอัตราความชุกชุมของโรค 1 : 500 อยากทราบว่าจะมีประชากรไทยที่เป็นพาหะ (Carrier) ของโรคนี้อยู่ประมาณเท่าไร

คำนวณความถี่ของยีนโตนไพบ์ที่เป็นพาหะ (heterozygote) ได้ดังนี้

ให้ A เป็นยีนปกติ a เป็นยีนที่นำลักษณะโรคโลหิตจาง

$$\text{ความถี่ยีนโตนไพบ์ } aa = q^2 = \frac{1}{500}$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{500}} = \sqrt{0.002} = 0.04$$

$$p = 1 - q = 1 - 0.04 = 0.96$$

$$\begin{aligned}
\text{ความถี่ยีนโตนไทป์แบบ heterozygote} &= 2pq = 2 \times 0.04 \times 0.96 \\
&= 0.0768 \\
&= 0.0768 \times 100 \% \\
&= 7.68 \%
\end{aligned}$$

จากการศึกษาทำให้ทราบว่าประเทศไทยมีคนที่เป็นพาหะของโรคโลหิตจางชนิดนี้ สูงถึง ร้อยละ 7.68

### กลไกการเกิดวิวัฒนาการ

กลไกที่แท้จริงในกระบวนการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต ต้องเป็นวิวัฒนาการระดับจุลภาค (microevolution) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงพันธุกรรมที่เป็นโครงสร้างประชากรอย่างค่อยเป็นค่อยไป ในประชากรที่อยู่ในสมดุล Hardy & Weinberg ถ้าไม่มีปัจจัยสำคัญมาทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของยีนประชากรของสิ่งมีชีวิตจะอยู่ในสภาพคงที่ตลอดไปและไม่เกิดวิวัฒนาการ ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของยีน ที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างของประชากร ซึ่งก่อให้เกิดวิวัฒนาการระดับจุลภาค ได้แก่ การคัดเลือกโดยธรรมชาติ มิวเทชันและความแปรผันทางพันธุกรรม การอพยพและการเคลื่อนย้ายประชากร การเปลี่ยนแปลงพันธุกรรมอย่างรวดเร็ว และรูปแบบของการผสมพันธุ์

#### 1. การคัดเลือกโดยธรรมชาติ

ในธรรมชาติประชากรของสิ่งมีชีวิต จะมีความแตกต่างทางพันธุกรรม ยีนบางสภาพอาจทำให้มีชีวิตอยู่ได้น้อยกว่า เช่น ยีนด้อยที่ทำให้เกิดโรค หรือความผิดปกติเมื่อมียีนโตนไทป์แบบโฮโมไซกัส ก็จะทำให้มีอายุสั้น ไม่สามารถมีลูกหลานได้ ความถี่ของยีนด้อยก็จะลดลง เช่น โรคฮีโมฟีเลียที่ควบคุมด้วยยีนด้อย เป็นโรคที่เลือดไม่แข็งตัวเมื่อเกิดบาดแผล ผู้ป่วยโรคนี้จึงมักตายตั้งแต่อายุยังน้อย ไม่มีโอกาสแต่งงาน

ตัวอย่างเช่นในประชากรกลุ่มหนึ่งมีอัตราส่วนของประชากรเป็น 9AA : 42Aa : 49aa ถ้าอัลลีล a เป็นยีนที่ทำให้เป็นโรคฮีโมฟีเลีย ประชากรที่มียีนโตนไทป์ aa จะไม่มีโอกาสอยู่รอดจนสืบพันธุ์ได้ ดังนั้น aa จะถูกคัดทิ้ง อัตราส่วนของประชากรในรุ่นถัดไปจะเปลี่ยนแปลงดังนี้

$$p(A) = \frac{9 + (42)\frac{1}{2}}{51} = 0.59$$

$$q(a) = 1 - 0.59 = 0.41$$

ยีนโตนีของประชากรรุ่นถัดจะมีอัตราส่วนเป็น 35AA : 48Aa : 17aa

จากอัตราส่วนของยีนโตนีจะเห็นได้ว่าความถี่ของยีนเด่นจะเพิ่มขึ้น ขณะที่ยีนด้อยจะลดลง แต่เหตุที่ยังมีคนเป็นโรคนี้อยู่ เนื่องจากคนปกติที่มียีนของโรคแฝงอยู่ (Aa) ยังคงดำรงชีวิตอยู่ได้ตามปกติ

ดังนั้นการคัดเลือกตามธรรมชาติจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะที่เหมาะสมกับสิ่งแวดล้อมสามารถมีชีวิตรอดและผลิตลูกหลานได้มาก และเป็นปัจจัยที่ทำให้ความถี่ของยีนในกลุ่มประชากรเปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดวิวัฒนาการในกลุ่มประชากรได้

## 2. มิวเทชันและความแปรผันทางพันธุกรรม

มิวเทชัน (mutation) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของยีนจากสภาพเดิมไปเป็นสภาพใหม่ และสามารถถ่ายทอดไปสู่ลูกหลานได้ การเปลี่ยนแปลงสภาพของยีนเช่นนี้อาจเรียกว่า gene mutation หรือ point mutation เป็นการเปลี่ยนแปลงในโมเลกุลของ DNA คือ nucleotide ชนิดหนึ่งเข้าไปแทนที่ nucleotide อีกชนิดหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงของยีนอาจเปลี่ยนจากสภาพข่มไปเป็นสภาพด้อย (A  $\longrightarrow$  a) หรือในทิศทางกลับกัน (reverse mutation) (a  $\longrightarrow$  A) ก็ได้ ในธรรมชาติมิวเทชันมีอัตราการเกิดต่ำมาก จึงทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของยีนน้อย ยีนที่เปลี่ยนแปลง (mutant gene) ที่เป็นสภาพด้อยจะแสดงผลของยีน เมื่อเป็น homozygous recessive ซึ่งโดยทั่วไปจะมีผลในทางเสียม แต่ถ้าอยู่ในสภาพที่เป็น heterozygous จะซ่อนผลของยีนไว้ พบว่ายีนโตนีในสภาพที่เป็น heterozygous นี้ปรับตัวให้อยู่ในสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้ดีกว่ายีนในสภาพ homozygous dominant ด้วยเหตุนี้มิวเทชันจึงเป็นปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิดวิวัฒนาการ คือ ยีนทั้งสภาพข่มและสภาพด้อยต่างก็มีผลดีในสภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน ดังตัวอย่างการเกิดโรคโลหิตจาง (Sickle-cell anemia) ในแอฟริกา โรคโลหิตจางควบคุมด้วยยีนสภาพด้อยในดินแดนที่มีมาลาเรียระบาด พบว่า คนที่มียีนโตนีแบบ heterozygous ของโรคโลหิตจาง สามารถต้านทานโรคมมาลาเรียที่สูงกว่าคนที่มียีนโตนีแบบ homozygous สภาพข่ม ในกรณีเช่นนี้ทำให้ผลรวมของอิทธิพลของอัตราการ

เปลี่ยนแปลงของยีนกับการคัดเลือก 2 ทาง ทำให้ยีนทั้งสภาพข่มและสภาพด้อยอยู่ในสภาวะสมดุลตลอดเวลา เมื่อสภาพแวดล้อมยังคงเดิม อย่างไรก็ตามมิวเทชันก็เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดยีน หรือโครโมโซมรูปแบบใหม่ขึ้นในกลุ่มประชากร ย่อมจะมีผลต่อวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตด้วย

### 3. การอพยพและการเคลื่อนย้ายประชากร

ในประชากรขนาดใหญ่ และถูกจำกัดให้อยู่แยกจากประชากรกลุ่มอื่น ความถี่ของยีนจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ในประชากรกลุ่มใหญ่ก็ยังประกอบด้วยประชากรกลุ่มย่อย ๆ ซึ่งประชากรกลุ่มย่อยนี้ยังมีการอพยพไปมาในระหว่างกลุ่มย่อยนี้อยู่เสมอ ทำให้มีการเคลื่อนย้ายยีนไปด้วย เรียกว่า ยีนโฟลว์ (gene flow) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของยีนในประชากรกลุ่มใหญ่ได้ โอกาสของการเบี่ยงเบนความถี่ของยีนไปจากสภาวะสมดุลจึงเกิดขึ้นได้ เมื่อมีการอพยพเข้าหรือออกของประชากร

### 4. การเปลี่ยนแปลงพันธุกรรมอย่างรวดเร็ว (genetic drift)

ในประชากรที่ลดขนาดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้มีสมาชิกน้อย จะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของยีนอย่างรวดเร็ว โดยอาจทำให้ยีนบางสภาพสูญหายไปจากประชากรนั้น หรืออาจทำให้ประชากรมียีนบางสภาพเพิ่มเป็น 100 % ภายในไม่กี่ชั่วรุ่นได้ เหตุการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นโดยบังเอิญ หรือเหตุใดก็ตามในกลุ่มประชากรที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ไม่สามารถคาดเดา หรือทำนายความถี่ของยีนในอนาคตได้ มักเกิดในสภาพที่สิ่งมีชีวิตมีการแยกกันอยู่โดยสภาพทางภูมิศาสตร์ เช่น บนพื้นดินแห่งหนึ่งมีสิ่งมีชีวิตที่ผสมพันธุ์ได้เพียง 2 คู่ และมีเพียง 1 ตัวที่มียีนสภาพด้อย (a) ที่มียีนโนไทป์แบบ heterozygous (Aa) ส่วนที่เหลืออีก 3 ตัว มียีนโนไทป์แบบ homozygous สภาพข่ม (AA)

ถ้า คู่แรกเป็น AA × Aa และมีลูก 6 ตัว ที่มียีนโนไทป์ Aa 5 ตัว AA 1 ตัว

คู่ที่ 2 เป็น AA × AA มีลูก 4 ตัว มียีนโนไทป์ AA

กรณีเช่นนี้ ลูกที่มียีน a อยู่ในยีนโนไทป์ถึง 50 % ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมในรุ่นพ่อแม่ ซึ่งมีอยู่ 25 % แสดงว่าในรุ่นต่อไปจะมีลูกที่มียีน a เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าคู่แรกไม่มีลูก Aa เลย ในรุ่นต่อไปก็จะมีลูกที่มียีน a ดังนั้นลูกในรุ่นถัดไปจะมียีน A เป็น 100 % ซึ่งใช้เวลาเพียงลูกรุ่นเดียวเท่านั้น

### 5. รูปแบบของการผสมพันธุ์

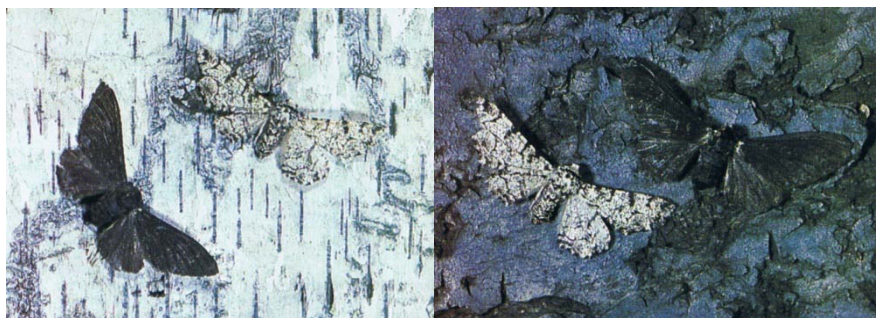
โดยธรรมชาติการเลือกคู่ผสมพันธุ์มักพิจารณาจากคุณสมบัติและฟีโนไทป์ ไม่ว่าจะเป็นการผสมในหมู่เครือญาติ (inbreeding) หรือนอกกลุ่มเครือญาติ (out breeding)

ย่อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มยีน (gene pool) ของประชากรเสมอ แต่การผสมพันธุ์ในกลุ่มเครือญาติเป็นแบบไม่สุ่ม มีโอกาสเกิดยีนโตนไทป์แบบ homozygous สูงในเวลาอันรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ภายในประชากรได้อย่างรวดเร็ว

## วิวัฒนาการในโลกที่กำลังพัฒนา

ปัจจุบันความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีส่วนช่วยส่งเสริมให้เกิดการคัดเลือกโดยธรรมชาติได้เร็วยิ่งขึ้น มีตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจน คือ การเปลี่ยนสีลำตัวจากสีอ่อนเป็นสีเข้มที่มีปัจจัยจากอุตสาหกรรม (Industrial Melanism) และความต้านทานยาปฏิชีวนะในแบคทีเรีย

1. เมลานิซึมของผีเสื้อกลางคืน ในประเทศอังกฤษ เคยมีผีเสื้อกลางคืน *Biston betularia* ชนิดสีเทาอ่อนอยู่จำนวนมาก อาศัยอยู่ตามต้นไม้ที่มีไลเคนส์เกาะ ในเวลาต่อมาพบมีผีเสื้อตัวสีดำเพิ่มขึ้นในเขตเมืองอุตสาหกรรม เช่น เมืองแมนเชสเตอร์ที่ต้นไม้มีเปลือกเป็นสีดำ ซึ่งเกิดจากควันจากโรงงานทำให้ไลเคนส์ตายหมด ผีเสื้อสีเทาอ่อนจึงถูกจับกินได้ง่ายกว่าพันธุ์สีดำ ในเวลาไม่นานผีเสื้อสีดำก็เพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วจนมีผีเสื้อสีดำถึง 99 % ในเวลาไม่ถึง 100 ปี จึงตั้งชื่อผีเสื้อสีดำเป็นสปีชีส์ใหม่ คือ *Biston carbonaria* ซึ่งพบมากในเขตอุตสาหกรรม ส่วนเขตที่ไม่เกิดมลภาวะยังคงมีผีเสื้อกลางคืนสีเทาอ่อนอยู่มาก



รูปที่ 4.2.8 เมลานิซึมของผีเสื้อกลางคืน *Biston* sp.

(จาก George B. Johnson, 1997 *The Living World*. p. 192)

2. ความต้านยาปฏิชีวนะในแบคทีเรีย ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 เป็นต้นมา นักวิทยาศาสตร์พบว่า แบคทีเรียบางพวกสามารถต้านทานยาปฏิชีวนะได้โดยเกิดจากการเปลี่ยนแปลงยีน

ปกติ ไปเป็นยีนที่ทนต่อยาปฏิชีวนะบางอย่าง และได้รับการคัดเลือกให้อยู่รอดใน  
สิ่งแวดล้อมที่มียาปฏิชีวนะได้ดี เกิดเป็นแบคทีเรียสายพันธุ์ใหม่

## แบบฝึกหัดท้ายบท

1. ผสมมะเขือเทศสองชนิด คือ ไบหยัก ต้นสูง กับไบเรียบ ต้นเตี้ย เมื่อนำเมล็ดไปเพาะปรากฏว่าในรุ่นลูกได้มะเขือเทศลักษณะต่าง ๆ ดังนี้ : ไบหยัก ต้นสูง 60 ต้น ไบหยัก ต้นเตี้ย 60 ต้น ไบเรียบ ต้นสูง 20 ต้น ไบเรียบ ต้นเตี้ย 19 ต้น ไบหยักเป็นยีนเด่น A ไบเรียบเป็นยีนด้อย a ต้นสูงเป็นยีนเด่น B ต้นเตี้ยเป็นยีนด้อย b genotype ของรุ่นพ่อแม่เป็นอย่างไร
2. สัตว์ชนิดหนึ่งมี genotype เป็น RrYy เมื่อนำเอาสัตว์ชนิดนี้มาผสมกันเอง สัตว์ชนิดนี้จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้กี่ชนิด
3. ในยีนที่ควบคุมลักษณะต้นสูง (T) ข่มยีนที่ควบคุมลักษณะต้นเตี้ย (t) ยีนที่ควบคุมลักษณะผลกลม (R) ข่มยีนที่ควบคุมลักษณะผลรี (r) ยีนทั้งสองคู่ที่อยู่ชิดกันมากในโครโมโซม เมื่อผสมพันธุ์ระหว่างมะเขือเทศ  $TtRr \times ttrr$  คาดว่าจะพบลูกพันธุ์ผสมที่มีลักษณะต้นเตี้ยผลรี อยู่ประมาณร้อยละเท่าใด
4. ถ้าทั้งพ่อและแม่เป็น heterozygous สำหรับยีนที่ควบคุมลักษณะเผือก (albino) ซึ่งอยู่ในออโตโซม โอกาสที่จะมีลูกหญิงเป็นคนเผือกเท่าใด
5. ในต้นบานเย็นดอกสีแดง เป็นลักษณะเด่นไม่สมบูรณ์ต่อดอกสีขาว เมื่อผสมกันจะได้ลูกผสมดอกสีชมพู และลักษณะใบกว้าง เป็นลักษณะเด่นไม่สมบูรณ์ต่อใบแคบ ซึ่งเมื่อผสมกันจะได้ลูกผสมใบกว้างปานกลาง ถ้าผสมกันระหว่างดอกสีแดงใบกว้าง กับดอกสีขาวใบแคบ แล้วให้ลูกรุ่น  $F_1$  ผสมกันเองจะได้ลูกผสมรุ่น  $F_2$  ที่มีลักษณะดอกสีชมพู - ใบกว้างปานกลางเท่าใด
6. ถ้าพ่อมีเลือดหมู่ A แม่มีหมู่เลือด B ลูกคนแรกมีเลือดหมู่ O โอกาสที่ลูกคนที่สองจะเป็นชายและมีเลือดหมู่ O เป็นเท่าใด
7. โรค G 6 PD เป็นลักษณะกรรมพันธุ์ที่เกี่ยวข้องกับเพศ ถ้าภรรยาเป็นพาหะสำหรับยีนผิดปกตินี้ และสามีเป็นโรค G 6 PD โอกาสที่สามีภรรยาคู่นี้จะมีลูกคนแรกเป็นโรคนี้อยู่ร้อยละเท่าใด
8. ศีรษะล้านในวัยหนุ่ม เป็นลักษณะทางพันธุกรรมประเภทลักษณะเด่นที่แสดงออกเฉพาะในเพศชาย หญิงที่มีพ่อศีรษะล้านแต่งงานกับชายศีรษะไม่ล้าน ลูกชายจะมีโอกาสศีรษะล้านในวัยหนุ่มเท่าใด



9. หญิงตาปกติคนหนึ่งแต่งงานกับชายตาปกติ บุตรชายที่เกิดมาตาบอดสี ต่อมาสามีตาย และหญิงคนนี้แต่งงานใหม่กับชายตาบอดสี ลูกที่เกิดมาจะมีลักษณะอย่างไร เป็นอัตราส่วนเท่าใด

10. ถ้าชายผิวเผือกคนหนึ่งแต่งงานกับหญิงปกติ แต่บิดาเป็นโรค Hemophilia และมารดามีผิวเผือก สามีภรรยาผู้นี้จะมีบุตรที่มีลักษณะอย่างไรบ้าง

11. ในการสังเคราะห์ glycine ถ้า mRNA มีรหัสเป็น GGU ดังนั้นรหัสที่ปลายของ tRNA ที่จะนำกรดอะมิโนไปที่ไรโบโซม คืออะไร

12. ในโมเลกุลของ DNA ถ้าสายหนึ่งเป็น ATGGAC อีกสายหนึ่งจะเป็นอย่างไร

13. เอนไซม์ชนิดหนึ่งที่สกัดจากสิ่งมีชีวิต มีลำดับกรดอะมิโน ดังนี้

Lys - Arg - Phe - Val ถ้าวรหัส tRNA ของกรดอะมิโนแต่ละโมเลกุล คือ UUC สำหรับ lysine AAA สำหรับ phenylalanine GCC สำหรับ arginine CAA สำหรับ Valine DNA แม่แบบที่กำหนดโครงสร้างของเอนไซม์จะมีลำดับเบสอย่างไร

14. ถ้าเบสบางตัวในโมเลกุล DNA ของยีนที่ควบคุมการสร้างเอนไซม์ชนิดหนึ่งเกิดหลุดหายไป (ลูกศรชี้)

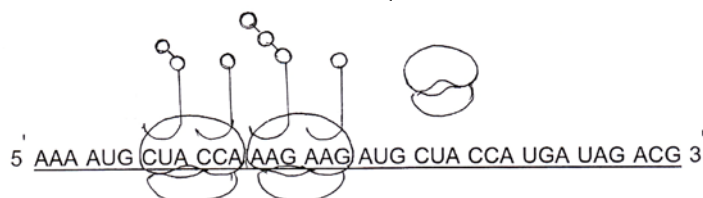


เอนไซม์ที่ถูกสร้างมาใหม่ จะประกอบด้วยกรดอะมิโนจำนวนเท่าใด และความผิดปกติของกรดอะมิโนเริ่มปรากฏตั้งแต่ตัวที่เท่าใด

15. ถ้า DNA สายหนึ่งมีเบส เรียงลำดับ เป็น CAGTAATGTA ลำดับเบสของ mRNA ที่สร้างมาจาก DNA สายนี้จะเป็นอย่างไร

16. ถ้ายึดสายโมเลกุล DNA ออกจะได้โครงสร้างเหมือนกับบันได ส่วนที่เปรียบกับขั้นบันได คือ ส่วนใด

17. จากโมเลกุลของ mRNA มี codon ดังในภาพ และมี 3 Ribosome เข้ามาจับเพื่อทำการแปลรหัสในครั้งเดียวกัน เมื่อเสร็จการแปลรหัสแล้วจะได้ polypeptide จำนวนกี่สาย และแต่ละสายประกอบด้วยกรดอะมิโนกี่โมเลกุล



18. DNA ที่สกัดได้จากไซโตพลาสซึมของเซลล์กล้ามเนื้อของเด็กชายคนหนึ่งจะมีลำดับเบสเหมือนกับบุคคลใดมากที่สุด ในวงศ์เครือญาติต่อไปนี้ คือ ปู่ ย่า ตา และยายเพราะอะไร

19. ลำดับเบสของ DNA เส้นหนึ่งเป็น ดังนี้ : 3' TAC AAG TAC TTG TTT ATT ATC 5' เมื่อมีการสังเคราะห์โปรตีน กรดอะมิโนที่ควบคุมโดย DNA เส้นนี้จะมีจำนวนเท่าใด

20. อินซูลินเป็นฮอร์โมนซึ่งประกอบด้วยกรดอะมิโน จำนวน 51 โมเลกุล อยากทราบว่า ยีนที่ทำหน้าที่ควบคุมการสังเคราะห์อินซูลินมีความยาวกี่แองสตรอม (Å)

21. ลำดับเบสของ DNA ต่อไปนี้จะสามารถสร้าง polypeptide ที่มีกรดอะมิโนกี่หน่วย

5' ATA CAT GAA TAG TTA ATA 3'

3' TAT GTA CTT ATC AAT TAT 5'

22. เอนไซม์ตัดเฉพาะชนิดหนึ่งมีจุดตัดจำเพาะตามตำแหน่งลูกศรชี้ ดังภาพ

5' ----- G AATTC ----- 3'

3' ----- CTTAA G ----- 3'

ถ้าเอาเอนไซม์นี้มาตัด DNA เส้นต่อไปนี้จะได้ DNA เส้นคู่จำนวนกี่ท่อน แต่ละท่อนมีลักษณะอย่างไร

5' GGCATCGAATTCTGA 3'

3' CCGTAGCTTAAGCT 5'

23. ฝั่เสื่อกลางคืน ลักษณะสีเทาควบคุมด้วยยีน b ลักษณะสีดำควบคุมด้วยยีน B ในการสำรวจฝั่เสื่อกลางคืนในบริเวณหนึ่งพบสีเทา 360 ตัว และสีดำ 640 ตัว ถ้าประชากรนี้อยู่ในสมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก จำนวนฝั่เสื่อกลางคืนสีดำที่เป็น heterozygous มีอยู่เท่าใด

24. กำหนดให้ยีน h ควบคุมลักษณะลำตัวมีขน b ควบคุมลักษณะลำตัวสีดำ และมีตำแหน่งอยู่กันคนละโครโมโซม จากการสำรวจ ประชากรแมลงหวี่ในห้องถื่นหนึ่ง ซึ่งมีการผสมพันธุ์กันแบบสุ่ม พบว่ามีแมลงหวี่ที่มีลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

ลำตัวสีเทา, ไม่มีขน 9.19 %

ลำตัวสีเทา, มีขน 9.31 %

ลำตัวสีดำ, ไม่มีขน 41.31 %

ลำตัวสีดำ, มีขน 39.69 %

ความถี่ของยีน h และ b มีค่าเป็นเท่าใด

25. ประชากรกระท่อมมีสีด้าพันธุ์แท้ (AA) เพศผู้ 30 ตัว สีด้าพันธุ์ไม่แท้ (Aa) เพศเมีย 30 ตัว ส่วนสีขาพันธุ์แท้ (aa) มี 20 คู่ เมื่อปล่อยให้ผสมอิสระ โอกาสที่จะได้กระท่อมสีขาในรุ่นถัดไปมีประมาณร้อยละเท่าใด

26. ถ้าประชากรมีคุณสมบัติตามหลัก ฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก มีอัลลีลควบคุมลักษณะเผือกประมาณร้อยละ 4 จะมีคนเผือกในประชากรนี้ประมาณร้อยละเท่าไร

27. ในประชากรจำนวนหนึ่ง พบว่า มีบุคคลที่มีติงหู (A-) ร้อยละ 91 และไม่มีติงหู (aa) อีกร้อยละ 9 อยากทราบวาปริมาณของยีนที่นำลักษณะมีติงหูและไม่มีติงหูในประชากรนี้อย่างละกี่เปอร์เซ็นต์

28. หลักฐานที่ยืนยันว่าวิวัฒนาการเป็นเรื่องที่มีความจริง ได้แก่อะไรบ้าง

29. ทฤษฎีวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตของ Jean B. Lamarck และ Charles Darwin ที่กล่าวถึง ยีราฟพันธุ์คอยาว เหมือนหรือแตกต่างกัน อย่างไร

30. ความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีอิทธิพลต่อการเกิดวิวัฒนาการอย่างไร