หน่วยการเรียนรู้ที่ 3

กระบวนการถ่ายทอดทางพันธุกรรม

เรื่อง กระบวนการถ่ายทอดทางพันธุกรรม

หัวข้อ

- การทดลองของเมนเดล
- กฎพันธุกรรมของเมนเดล (Mendel’s Laws)
- ระดับการข่มกันของยีนแบบต่างๆ
- มัลติเปิล แอลลีล (Multiple Alleles)
- การกลายพันธุ์ (Mutation)

พันธุกรรม (Heredity)

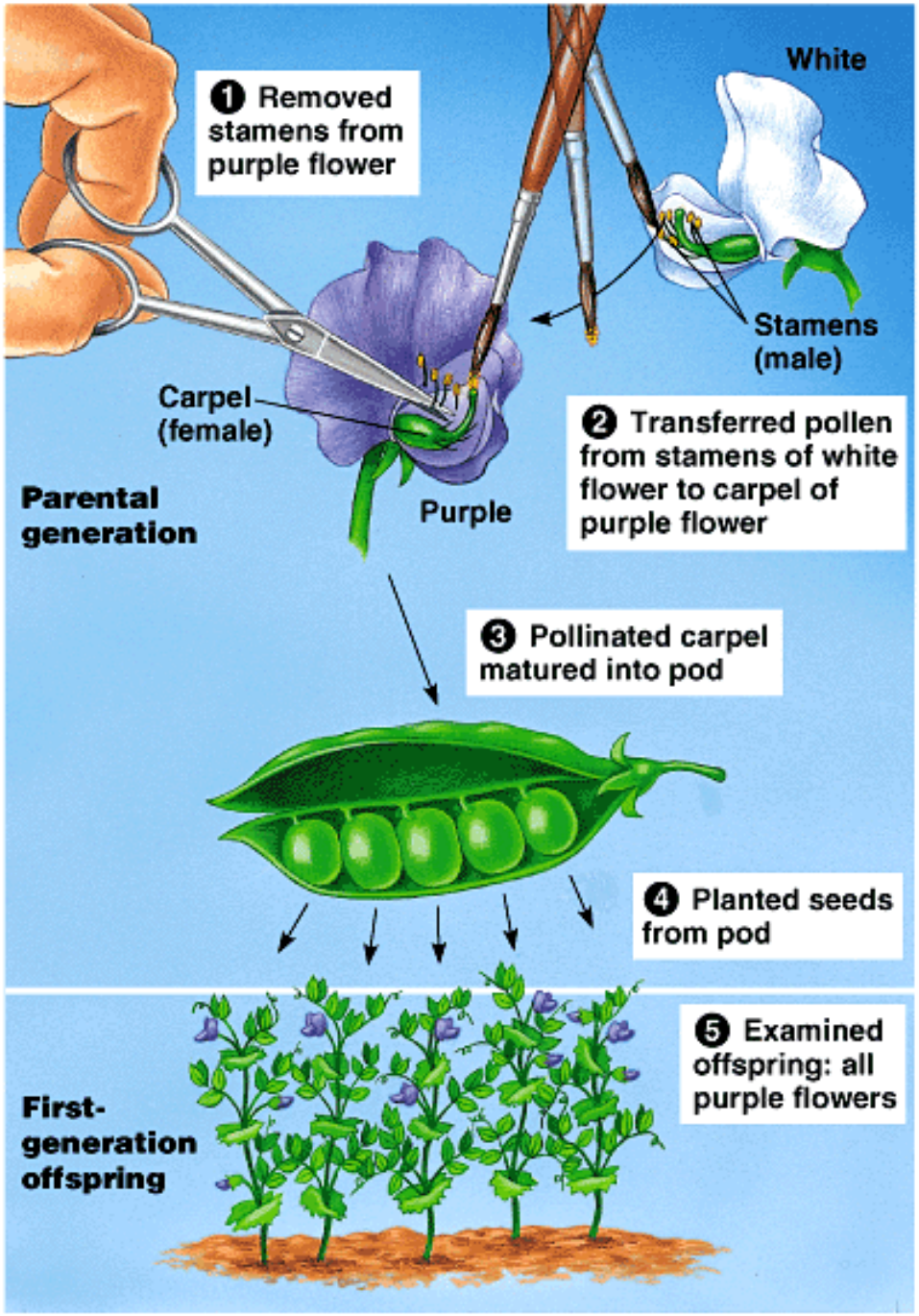
พันธุกรรม (Heredity) คือ การถ่ายทอดลักษณะต่าง ๆ จากรุ่นสู่รุ่น หรือจากบรรพบุรุษไปสู่ลูกหลาน โดยอาศัยเซลล์สืบพันธุ์ ซึ่งพันธุกรรมบางอย่างอาจไม่ปรากฏในรุ่นลูก แต่ไปปรากฏในรุ่นหลานได้

พันธุศาสตร์ (Genetics) เป็นการศึกษาการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม และความหลากหลายทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต และยังมีความหมายรวมถึงความรู้ทางวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับหลักเกณฑ์ในการถ่ายทอดลักษณะของสิ่งมีชีวิตจากรุ่นสู่รุ่น

Gregor Johann Mendel

เกรเกอร์ โยฮันน์ เมนเดล (Gregor Johann Mendel, 2365-2427) บุคคลแรกที่ค้นพบกฎเกณฑ์การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากถั่วลันเตา จึงได้รับการยกย่องให้เป็น **บิดาแห่งพันธุศาสตร์ (genetics)**

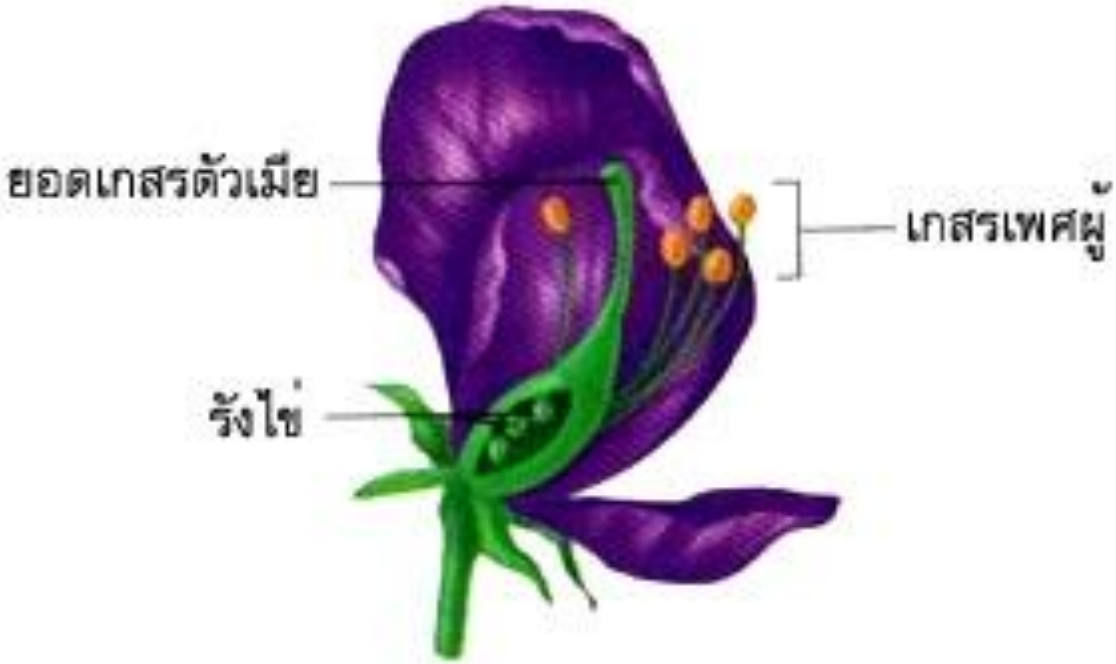
การทดลองของเมนเดล



Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

คัดเลือกพ่อพันธุ์-แม่พันธุ์ ด้วยการผสมเกสรตัวผู้และเกสรตัวเมียจากดอกแบบเดียวกันจนได้พันธุ์แท้

ดอกถั่วลันเตา



สาเหตุที่เมนเดลเลือกใช้ถั่วลันเตา (*Pisum sativum*) ในการศึกษาด้านพันธุศาสตร์

1. **เป็นพืชที่มีดอกสมบูรณ์เพศ/ผสมตัวเอง (self- fertilized)** ซึ่งสามารถสร้างพันธุ์แท้ได้ง่าย หรือจะทำการผสมข้ามพันธุ์ (cross-fertilized) เพื่อสร้างลูกผสมก็ทำได้ง่าย โดยวิธีผสมโดยใช้มือช่วย (hand pollination)

2. **เป็นพืชที่หาได้ง่าย ปลูกง่าย ไม่ต้องทำนุบำรุงรักษามากนัก** ใช้เวลาปลูกตั้งแต่ปลูก จนถึงเก็บเกี่ยวภายในหนึ่งฤดูปลูก (growing season) หรือประมาณ 3 เดือนเท่านั้น และยังให้เมล็ดในปริมาณที่มากด้วย

3. **เป็นพืชที่มีลักษณะทางพันธุกรรมที่แตกต่างกันชัดเจนหลายลักษณะ** ซึ่งในการทดลองดังกล่าว เมนเดลได้นำมาใช้ 7 ลักษณะด้วยกัน

ลักษณะทางพันธุกรรมของถั่วลันเตา 7 ประการ

เมล็ด		ดอก	รูปร่างของถั่วที่แก่เต็มที่		ลำต้น	
รูปร่างเมล็ด	สีของเนื้อเมล็ด	สีของดอก	รูปร่างและสีของฝักถั่ว		ตำแหน่งของดอก	ความสูงลำต้น
กลม	เหลือง	สีขาว	อวบ	เหลือง	ที่กิ่ง	สูง
ขรุขระ	เขียว	สีม่วง	แฟบ	เขียว	ที่ยอด	เตี้ย
1	2	3	4	5	6	7

การทดลองด้วยเมล็ดถั่วพันธุ์แท้ที่คัดเลือกมาแล้ว

Parent Generation (รุ่น P)

	Flower color	Flower position	Seed color	Seed shape	Pod shape	Pod color	Stem length
P	Purple × White	Axial × Terminal	Yellow × Green	Round × Wrinkled	Inflated × Constricted	Green × Yellow	Tall × Dwarf
F_1	Purple	Axial	Yellow	Round	Inflated	Green	Tall

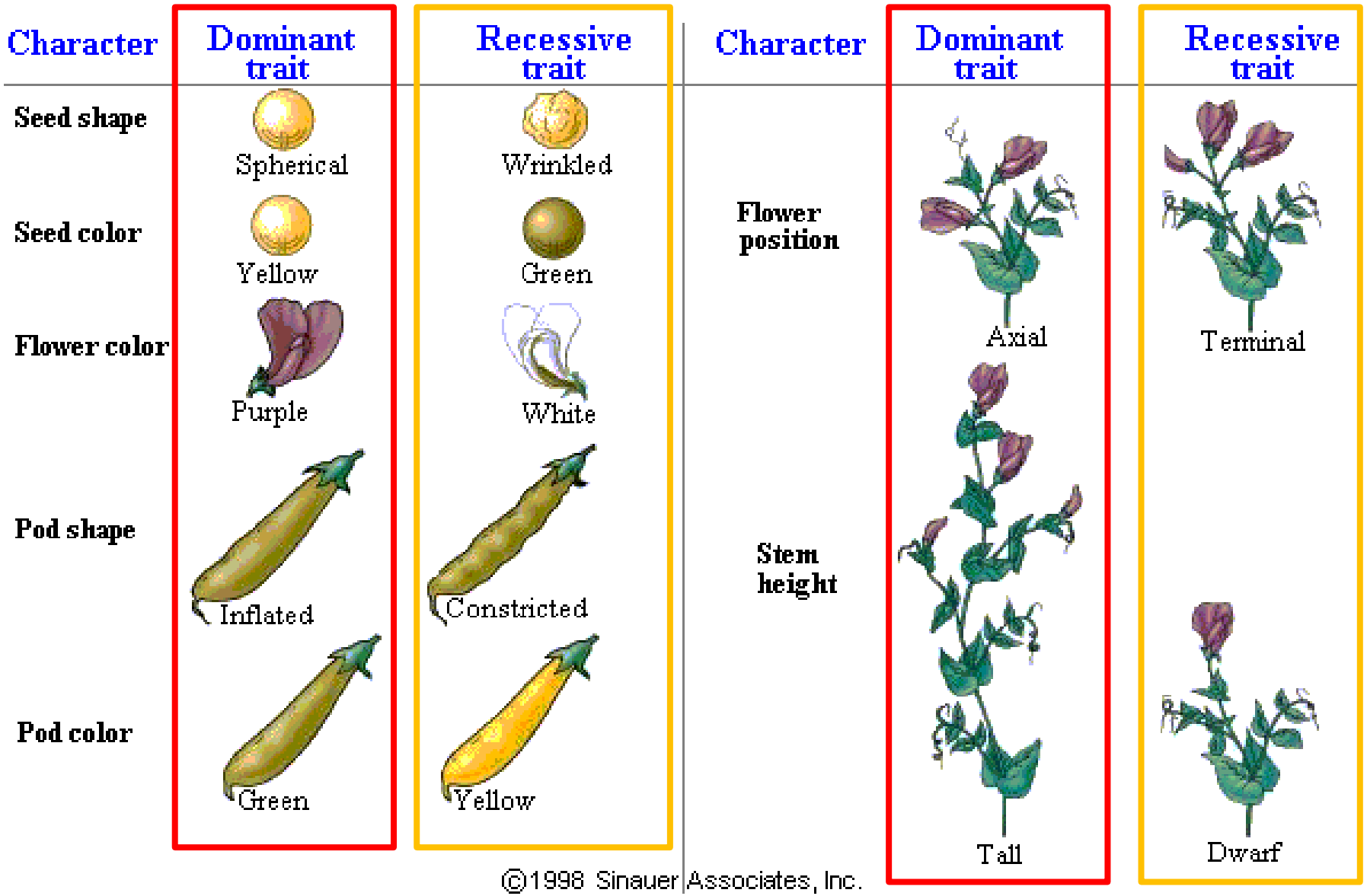
First filial generation (F1: ลูกรุ่นที่ 1)

การทดลองด้วยเมล็ดถั่วพันธุ์แท้ที่คัดเลือกมาแล้ว

Second filial generation (F2: ลูกรุ่นที่ 2)

ลักษณะที่ศึกษา	รุ่นพ่อแม่ (P)	รุ่นลูก (F_1)	รุ่นหลาน (F_2) ลักษณะที่พบในรุ่นหลาน (F_2)	อัตราส่วนลักษณะ
รูปร่างเมล็ด	กลม × ขรุขระ	กลมทั้งหมด	กลม (5,474) ขรุขระ (1,850)	2.94 : 1
สีเมล็ด	เหลือง × เขียว	เหลืองทั้งหมด	เหลือง (6,022) เขียว (2,001)	3.01 : 1
สีดอก	สีม่วง × สีขาว	สีม่วงทั้งหมด	สีม่วง (705) สีขาว (224)	3.15 : 1
รูปร่างฝัก	อวบ × แฟบ	อวบทั้งหมด	อวบ (882) แฟบ (299)	2.92 : 1
สีฝัก	เขียว × เหลือง	เขียวทั้งหมด	เขียว (428) เหลือง (152)	2.82 : 1
ตำแหน่งดอก	ที่กิ่ง × ที่ยอด	ที่กิ่งทั้งหมด	ที่กิ่ง (615) ที่ยอด (207)	3.14 : 1
ความสูงลำต้น	สูง × เตี้ย	สูงทั้งหมด	สูง (787) แคระ (277)	2.94 : 1

ลักษณะเด่น (Dominant) - ลักษณะด้อย (Recessive)



©1998 Sinauer Associates, Inc.

อัตราส่วนของลักษณะเด่น : ลักษณะด้อย ในรุ่น F1 และ F2

F_1 → 1 : 0

F_2 → 3 : 1

ลักษณะในรุ่นพ่อแม่	ลักษณะในรุ่น F_1	ลักษณะและจำนวนในรุ่น F_2	
		จำนวนต้นหรือเมล็ด	อัตราส่วน
ต้นสูง (*TT*) x ต้นเตี้ย (*tt*)	ต้นสูง (*Tt*)	787 ต้นสูง 277 ต้นเตี้ย	2.84 : 1
ดอกสีม่วง (*PP*) x ดอกสีขาว (*pp*)	ดอกสีม่วง (*Pp*)	705 ดอกสีม่วง 224 ดอกสีขาว	3.15 : 1
ดอกตามซอก (*AA*) x ดอกตามยอด (*aa*)	ดอกตามซอก (*Aa*)	651 ดอกตามซอก 207 ดอกตามยอด	3.14 : 1
เมล็ดสีเหลือง (*YY*) x เมล็ดสีเขียว (*yy*)	เมล็ดสีเหลือง (*Yy*)	6,022 เมล็ดสีเหลือง 2,001 เมล็ดสีเขียว	3.01 : 1
เมล็ดกลม (*RR*) x เมล็ดขรุขระ (*rr*)	เมล็ดกลม (*Rr*)	5,474 เมล็ดกลม 1,850 เมล็ดขรุขระ	2.96 : 1
ฝักสีเขียว (*GG*) x ฝักสีเหลือง (*gg*)	ฝักสีเขียว (*Gg*)	428 ฝักสีเขียว 152 ฝักสีเหลือง	2.82 : 1
ฝักอวบ (*II*) x ฝักแฟบ (*ii*)	ฝักอวบ (*Ii*)	882 ฝักอวบ 299 ฝักแฟบ	2.95 : 1

รูปแบบของยีนเรียกว่า **‘แอลลีล (Allele)’** มี 2 ลักษณะ คือ

1. **แอลลีลเด่น (dominant allele)** คือ แอลลีลที่ควบคุมลักษณะเด่นและแสดงลักษณะนั้นๆ ออกมาได้ อาจเรียกว่า **‘ยีนเด่น’** มักเขียนแทนด้วยอักษรพิมพ์ใหญ่ เช่น **T**

2. **แอลลีลด้อย (recessive allele)** คือ แอลลีลที่ควบคุมลักษณะด้อย ไม่สามารถแสดงลักษณะออกมาได้ อาจเรียกว่า **‘ยีนด้อย’** มักเขียนแทนด้วยอักษรพิมพ์เล็ก เช่น **t**

แอลลีลที่เป็น**คู่เหมือนกัน** เช่น TT หรือ tt เรียกว่า **Homozygous** (พันธุ์แท้)

แอลลีลทั้ง**คู่ต่างกัน** เช่น Tt เรียกว่า **Heterozygous** (ลูกผสม หรือพันทาง)

การผสมพันธุ์ระหว่างถั่วลันเตาดอกสีม่วงและดอกสีขาว

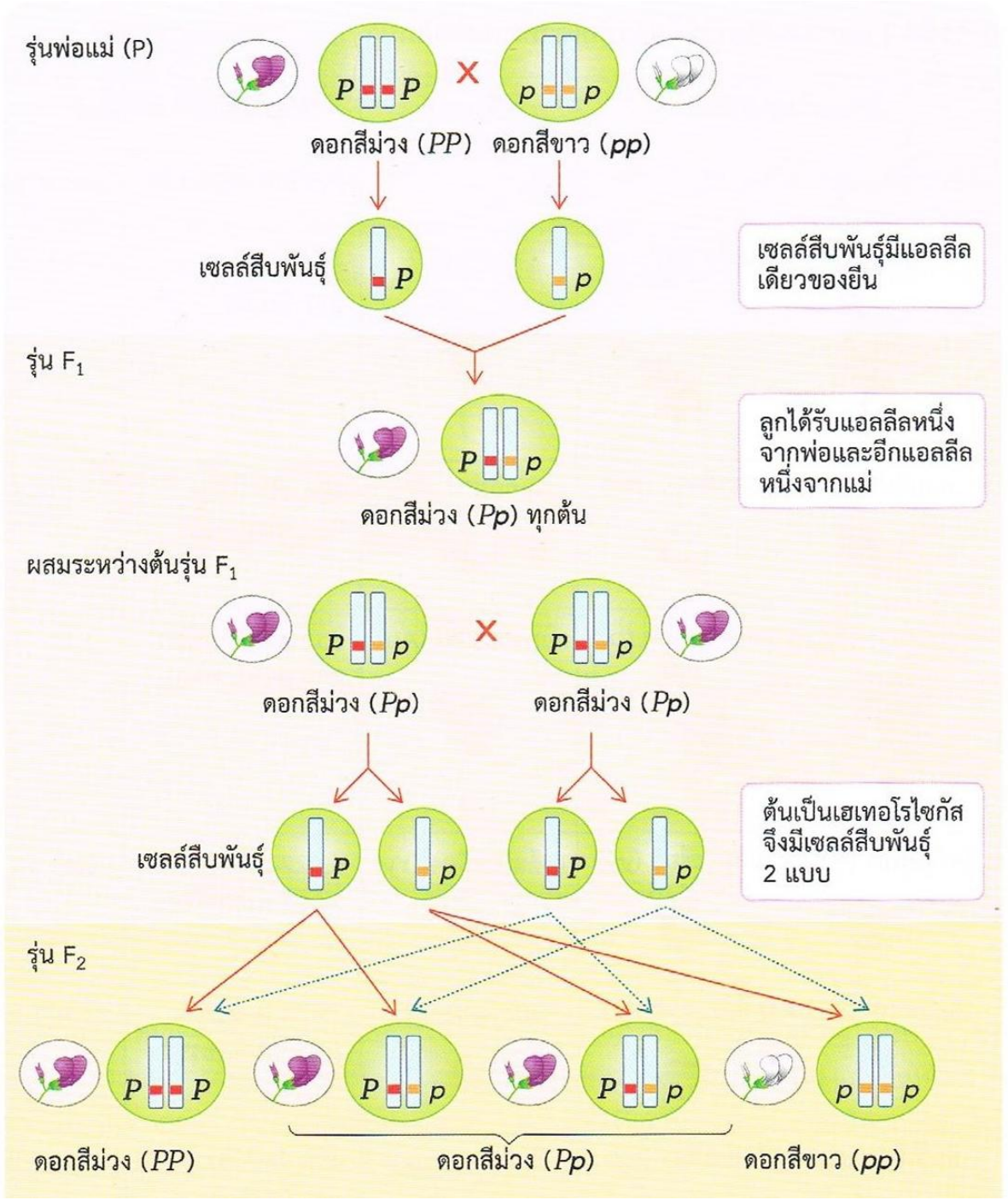
<u>จีโนไทป์</u> (Genotype)

PP: *Pp*: *pp* =1: 2: 1

<u>ฟีโนไทป์</u> (Phenotype)

ดอกสีม่วง: ดอกสีขาว =3:1

หรือสีม่วง 75% สีขาว 25%



กฎพันธุกรรมของเมนเดล (Mendel's Laws) 2 ข้อ

กฎข้อที่ 1 กฎแห่งการแยก (Law of Segragation)

กฎข้อที่ 2 กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ (Law of Independent Assortment)

กฎพันธุกรรมของเมนเดล (Mendel's Laws) มี 2 ข้อ

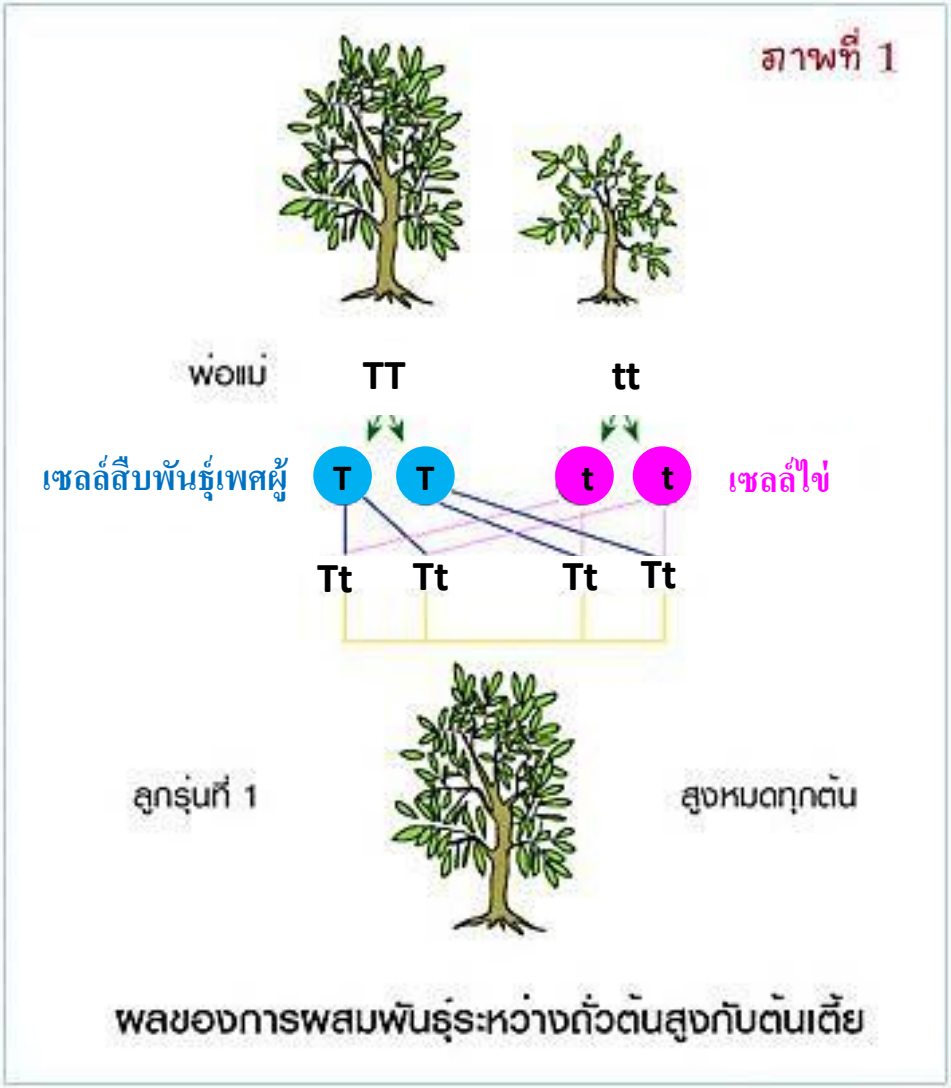
กฎข้อที่ 1 กฎแห่งการแยก (Law of Segragation) การที่ยีนที่เป็นแอลลีลแยกออกจากกันเพื่อสร้างเซลล์สืบพันธุ์ (gamate)

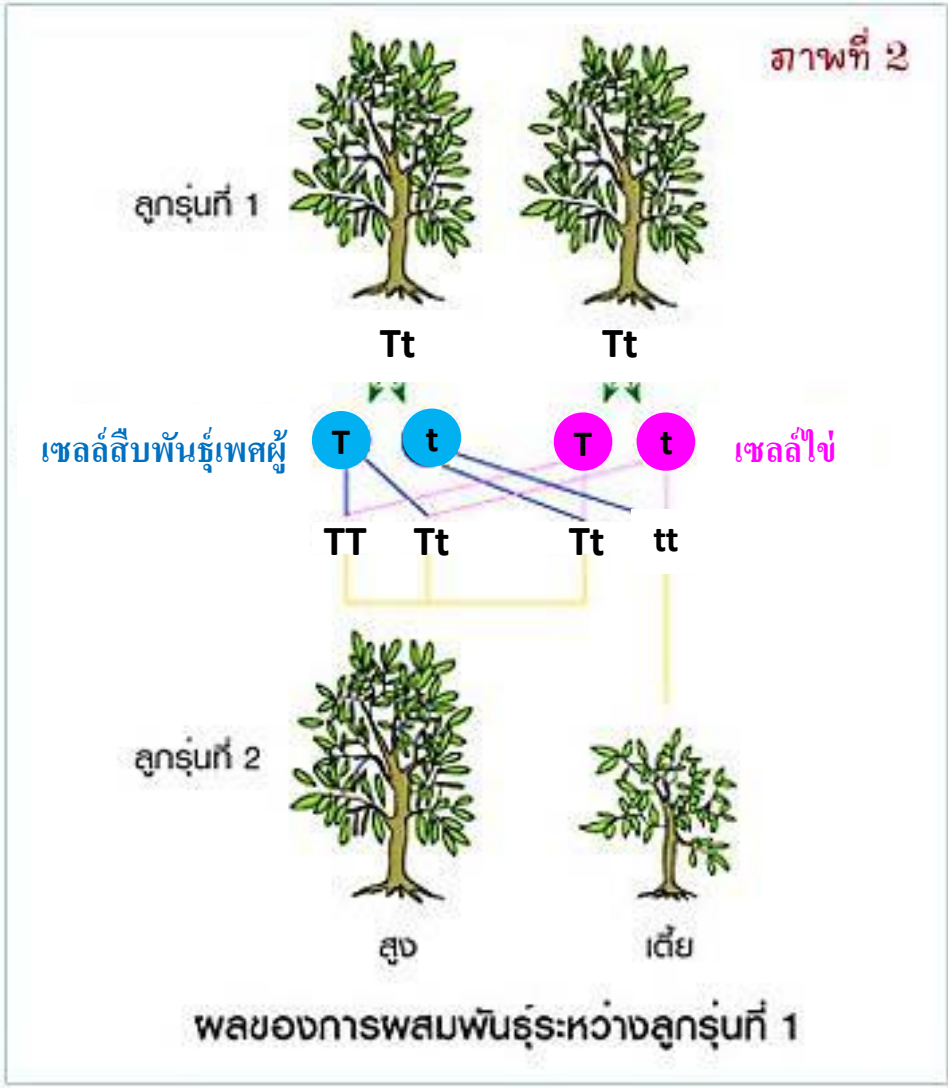
- การผสมพันธุ์ที่พิจารณาเพียง**ลักษณะเดียวจากการเกิดลูกรุ่น F_2 อัตราส่วนลักษณะเด่นต่อด้อย คือ 3: 1** แสดงว่ายีนแต่ละคู่จะต้องแยกออกจากกันไปอยู่กันคนละเซลล์สืบพันธุ์ เรียกว่า **การผสมโดยพิจารณายีนคู่เดียว (monohybrid cross)**
- ทำให้ทราบจีโนไทป์ของ F_2 คือ 1: 2: 1

(Homozygous dominant : Heterozygous : Homozygous recessive)

TT **Tt** **tt**

การผสมพันธุ์ระหว่างถั่วลันเตาต้นสูงกับถั่วลันเตาต้นเตี้ย





กฎพันธุกรรมของเมนเดล (Mendel's Laws) มี 2 ข้อ

กฎข้อที่ 2 กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ (Law of Independent Assortment) เมื่อยีนที่เป็นแอลลีลแยกออกจากกันแล้ว แต่ละยีนจะไปรวมกับยีนอื่นได้อย่างอิสระ เพื่อสร้างเซลล์สืบพันธุ์ (gamate)

- เมนเดลได้ศึกษาการถ่ายทอด**ลักษณะ**โดย**พิจารณาจากยีน 2 คู่ (dihybrid cross)** เซลล์สืบพันธุ์จะมีการรวมกลุ่มของหน่วยพันธุกรรมของลักษณะต่าง ๆ อย่างอิสระ จึงทำให้สามารถทำนายผลที่เกิดขึ้นในรุ่นลูกรุ่นหลานได้
- เราสามารถใช้สูตรหาชนิดเซลล์สืบพันธุ์ คือ $\mathbf{2^n}$

  (n = จำนวนคู่ของ heterozygous gene หรือ ยีนที่แตกต่างกัน)

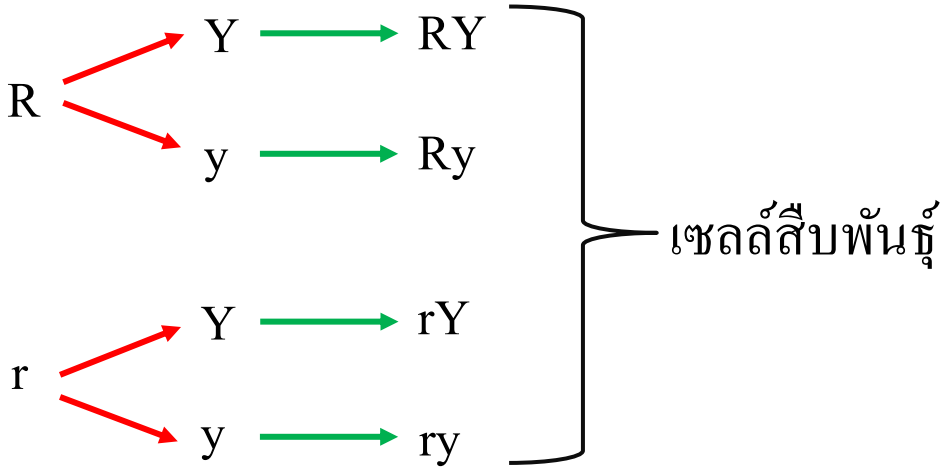
กฎพันธุกรรมของเมนเดล (Mendel's Laws) มี 2 ข้อ

กฎข้อที่ 2 กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ (Law of Independent Assortment)

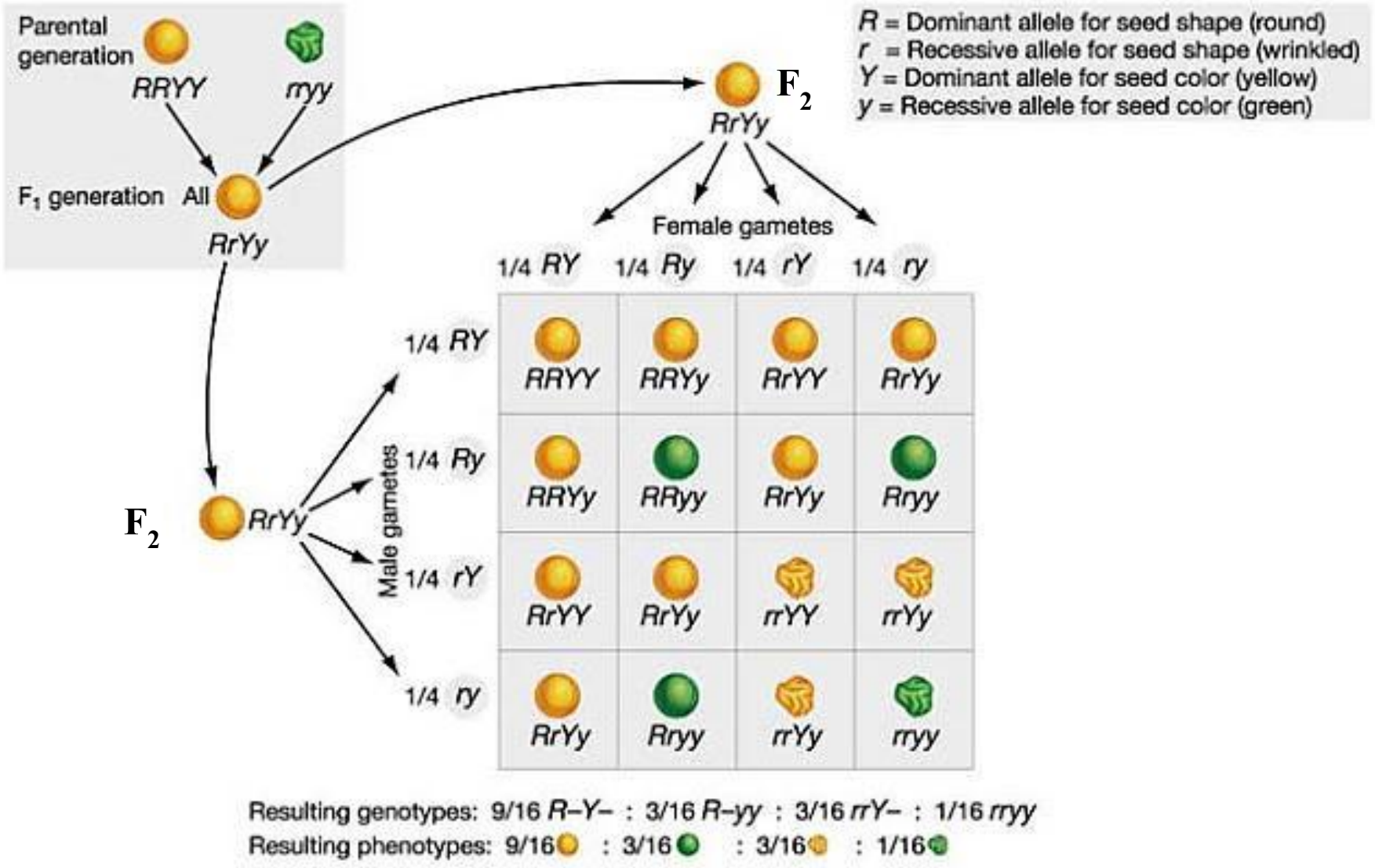
ตัวอย่าง ถั่วลันเตามีจีโนไทป์ RrYy จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ที่มียีนต่างกันได้กี่แบบ

วิธีที่ 1 ใช้สูตรชนิดเซลล์สืบพันธุ์ $2^n = 2^2 = 4$ ชนิด

วิธีที่ 2 ใช้กฎแห่งการรวมกลุ่มโดยอิสระ



เมื่อผสมพันธุ์ถั่วลันเตาพันธุ์แท้ ลักษณะเมล็ดสีเหลือง เมล็ดกลม กับ ลักษณะเมล็ดสีเขียว ขรุขระ จะได้ลูกรุ่น F_1 และ F_2 ดังภาพ



ความน่าจะเป็น (Probability)

ความน่าจะเป็น หมายถึง โอกาศที่จะเกิดเหตุการณ์ใดเหตุการณ์หนึ่งจากเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมด

ความน่าจะเป็นสามารถนำมาใช้อธิบายหรือหาความน่าจะเป็นของการเกิดลูกแบบต่าง ๆ จากคู่ผสมพันธุ์ กฎความน่าจะเป็นที่นำมาใช้มี 2 ข้อ

ข้อที่ 1 กฎการบวก (Addition Law)

ข้อที่ 2 กฎการคูณ (Multiplication Law)

ความน่าจะเป็น (Probability)

ข้อที่ 1 กฎการบวก (Addition Law) คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์หนึ่งหรืออีกเหตุการณ์หนึ่ง เท่ากับผลบวกของความน่าจะเป็นของแต่ละเหตุการณ์ เมื่อเหตุการณ์ทั้งหมดเป็นอิสระต่อกัน และความน่าจะเป็นของทุกเหตุการณ์รวมกันมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ

- ใช้กับเหตุการณ์ที่***ไม่สามารถเกิดขึ้นพร้อมกันได้*** เช่น การโยนเหรียญ สามารถเกิดได้ 2 เหตุการณ์ คือ หัว หรือก้อย ดังนั้น หัวจะมีมีโอกาศเกิด ½ ส่วนก้อยมีโอกาศเกิด ½

$$\text{หัว หรือ ก้อย} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$$

ตัวอย่าง การผสมพันธุ์ของถั่วลันเตาที่มี genotype Yy และ Yy มีโอกาศที่จะได้ลูกที่มี genotype 3 แบบ คือ YY Yy และ yy โดยมีความน่าจะเป็น ดังนี้

$$\text{Genotype YY} = \frac{1}{4}$$

$$\text{Genotype Yy} = \frac{2}{4}$$

$$\text{Genotype yy} = \frac{1}{4}$$

ความน่าจะเป็น (Probability)

ข้อที่ 2 กฎการคูณ (Multiplication Law) คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์หลาย ๆ เหตุการณ์พร้อม ๆ กัน มีค่าเท่ากับผลคูณของแต่ละเหตุการณ์ เมื่อแต่ละเหตุการณ์เป็นอิสระต่อกัน

- เมื่อทดลองโยนเหรียญ 1 เหรียญ จำนวน 2 ครั้ง

ครั้งที่ 1 ออกหัว และครั้งที่ 2 ออกหัว $= \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$

ครั้งที่ 1 ออกหัว และครั้งที่ 2 ออกก้อย $= \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$

ครั้งที่ 1 ออกก้อย และครั้งที่ 2 ออกหัว $= \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$

$\frac{2}{4}$

ครั้งที่ 1 ออกก้อย และครั้งที่ 2 ออกก้อย $= \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$

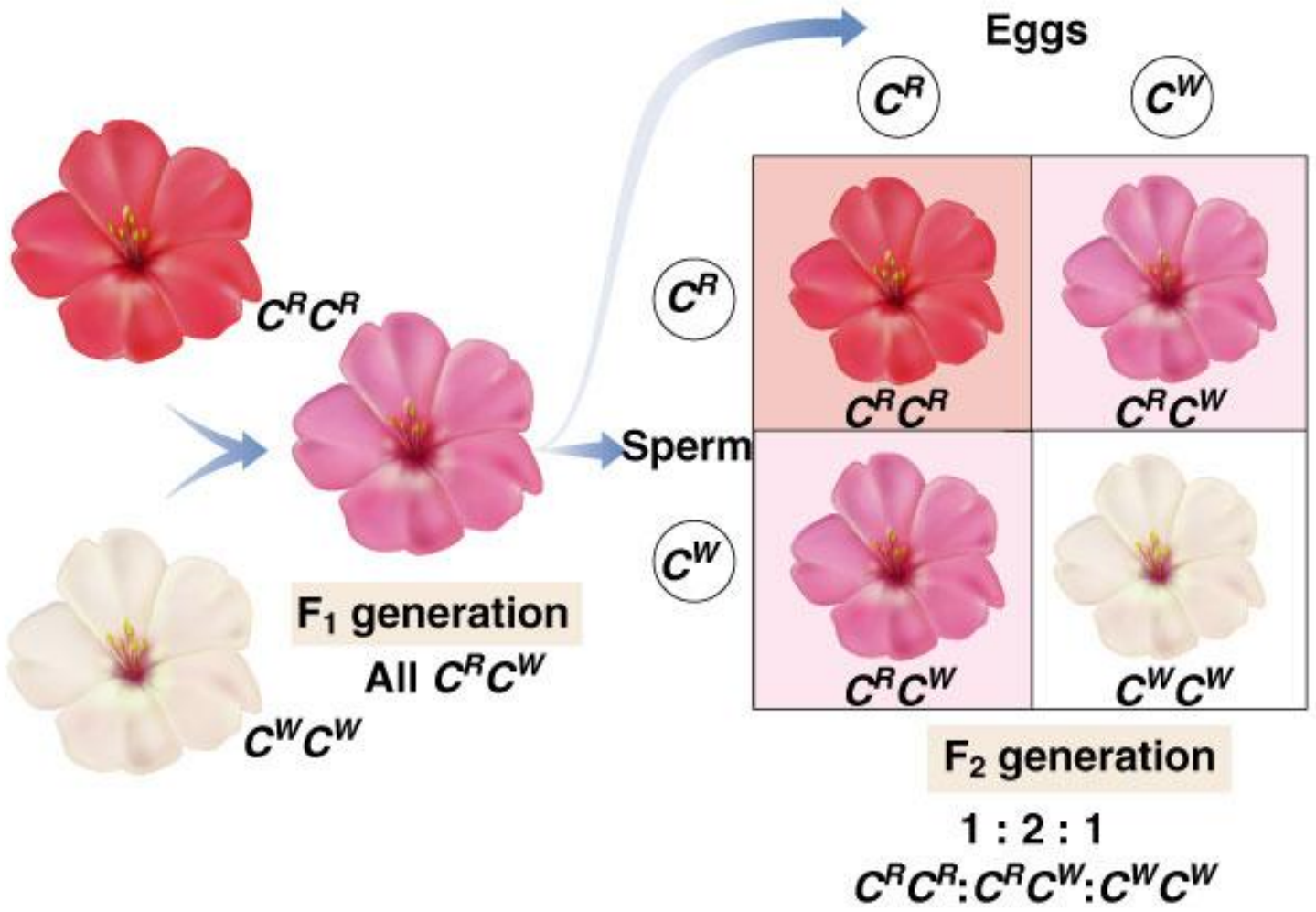
ตรงกับอัตราส่วนของ genotype ในรุ่น F_2: monohybrid cross

ระดับการข่มกันของยีนแบบต่างๆ

1. **การข่มสมบูรณ์ (Complete dominance)** homozygous และ heterozygous ที่แสดงลักษณะเด่น และการถ่ายทอดของเมลเดล คือ
   - AA และ Aa แสดงลักษณะเด่นเช่นเดียวกัน
   - ส่วน aa เป็น homozygous ที่แสดงลักษณะด้อย เช่น ถั่วลันเตาทั้ง 7 ลักษณะ
2. **การข่มไม่สมบูรณ์ (Incomplete dominance)** heterozygous แสดงลักษณะกลางระหว่าง 2 แอลลีล **อยู่นอกเหนือการถ่ายทอดแบบเมนเดล** คือ
   - Aa เด่น 50% ด้อย 50% เช่น สีของดอกคาร์เนชั่น สีของดอกลิ้นมังกร
3. **การข่มร่วมกัน (Codominance)** heterozygous แสดงลักษณะของแอลลีลทั้งสองออกมาพร้อมกัน **อยู่นอกเหนือการถ่ายทอดแบบเมนเดล** เช่น หมู่เลือด A B O คือ
   - I^AI^A , I^Ai , I^BI^B , I^Bi , I^AI^B เด่น 100%
   - ii ด้อย 100%

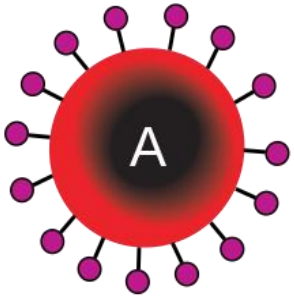
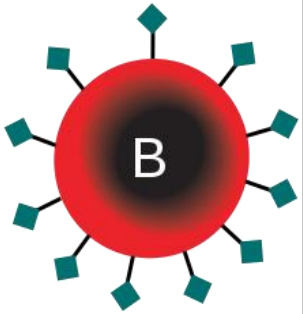
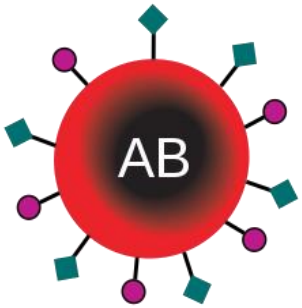
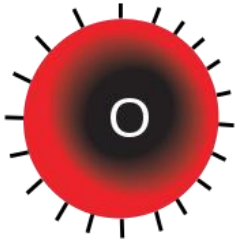
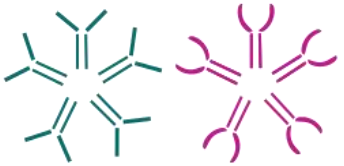
การข่มไม่สมบูรณ์ (Incomplete dominance)

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



การข่มร่วมกัน (Codominance)

หมู่เลือด

	Group A	Group B	Group AB	Group O
Red blood cell type				
Antibodies in Plasma	Anti-B	Anti-A	None	 Anti-A and Anti-B
Antigens in Red Blood Cell	A antigen	B antigen	A and B antigens	None

หมู่เลือด

Mother's Blood Type	Father's Blood Type: A	Father's Blood Type: B	Father's Blood Type: AB	Father's Blood Type: O
A	A or O	A,B,AB or O	A,B,or AB	A or O
B	A,B,AB or O	B or O	A,B,or AB	B or O
AB	A,B,or AB	A,B,or AB	A,B,or AB	A or B
O	A or O	B or O	A or B	O

Child's Blood Type

รุ่น P หมู่เลือด A × หมู่เลือด B

I^AI^A I^BI^B

เซลล์สืบพันธุ์ I^A I^B

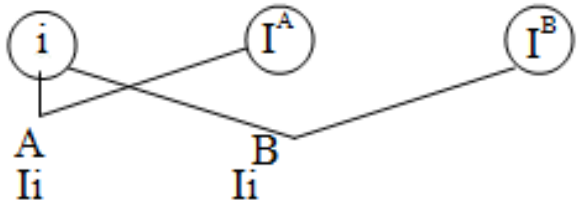
รุ่น F_1 I^AI^B

หมู่เลือด AB

P: รุ่นพ่อแม่ พ่อหมู่เลือด O × แม่หมู่เลือด AB

ii I^AI^B

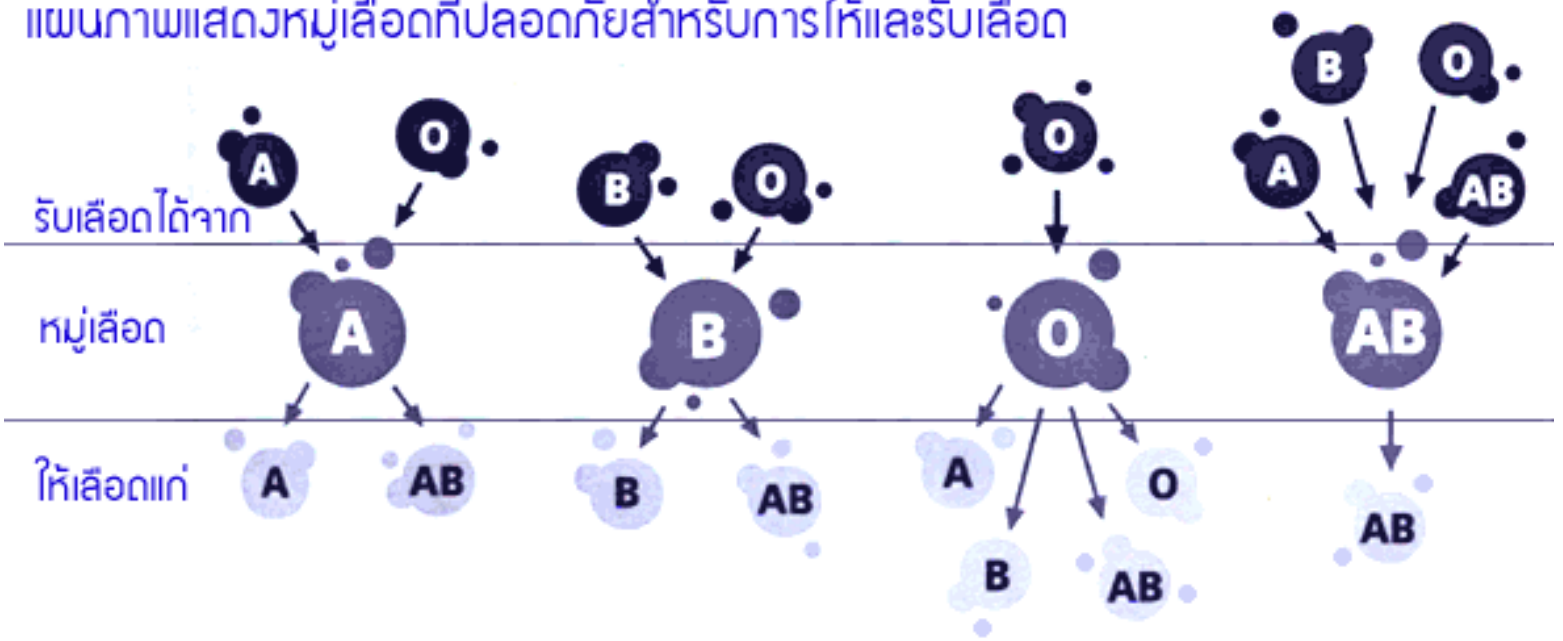
เซลล์สืบพันธุ์



หมู่เลือด

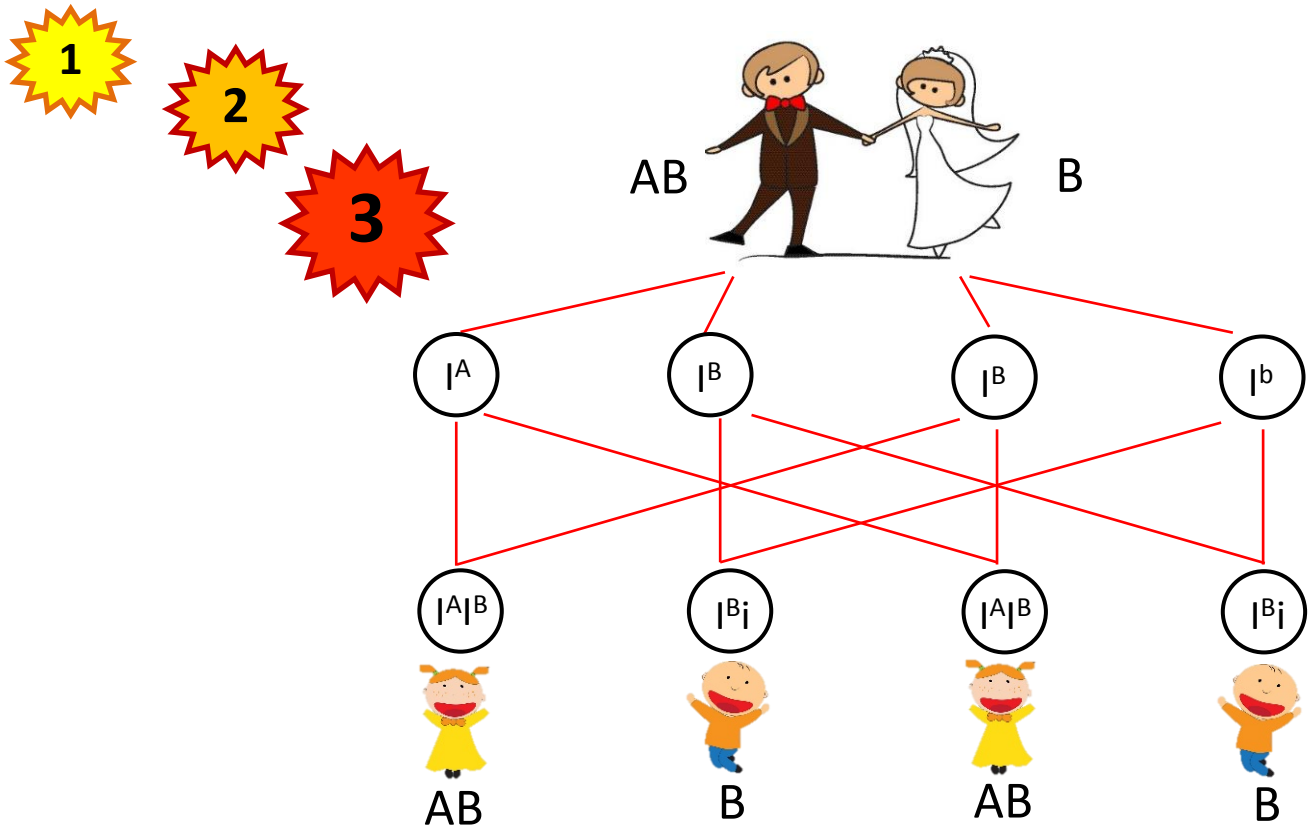
Blood type of cells	Genotype	Antibodies made by body	Reaction to added antibodies	
			Anti-A	Anti-B
A	I^AI^A or I^Ai^O	Anti-B		
B	I^BI^B or I^Bi^O	Anti-A		
AB	I^AI^B	Neither anti-A nor anti-B		
O	i^Oi^O	Both anti-A and anti-B		

แผนภาพแสดงหมู่เลือดที่ปลอดภัยสำหรับการให้และรับเลือด

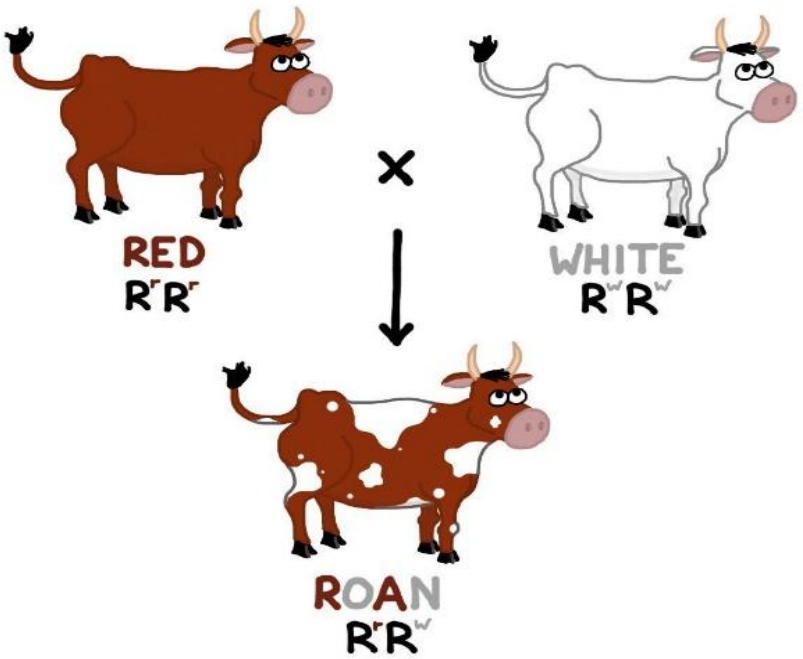


กิจกรรมตอบคำถาม

ถ้าพ่อมีกรุ๊ปเลือด AB โดยมีจีโนไทป์เป็น I^AI^B และแม่มีกรุ๊ปเลือดเป็น B โดยมีจีโนไทป์เป็น I^Bi ลูกมีโอกาสเกิดออกมาเป็นกรุ๊ปเลือดอะไรบ้าง



การข่มร่วมกัน (Codominance)



มัลติเปิล แอลลีล (Multiple Alleles)

- **Multiple Alleles คือ ลักษณะที่ถูกควบคุมด้วยแอลลีล มากกว่า 2 แอลลีล อยู่ในตำแหน่งเดียวกันบนโครโมโซม**
- **เช่น**
  - Multiple Alleles ควบคุมสีขนของกระต่ายมี 4 แอลลีล
  - หมู่เลือด ABO ของคนมี 3 แอลลีล

Multiple Alleles ควบคุมสีขนของกระต่ายมี 4 แอลลีล

C = สีน้ำตาลปนเทา (wild type)

c^{ch} = สีเทาเงิน (chinchilla)

c^{h} = ส่วนลำตัวสีขาว แต่ปลายจมูกเท้า และหางสีดำ (himalayan)

c = สีขาวทั้งตัว (albino)

สีขนของกระต่ายมีลักษณะเด่นสมบูรณ์ตามลำดับ คือ $C > c^{ch} > c^{h} > c$

พ่อแม่

สีน้ำตาลปนเทา C C

×

สีขาวทั้งตัว cc

F_1

สีน้ำตาลปนเทา C c

F_2

สีน้ำตาลปนเทา : สีขาวทั้งตัว

CC, Cc, Cc : cc

3 : 1

พ่อแม่

สีเทาเงิน $c^{ch}c^{ch}$

×

สีขนลำตัวสีขาว ปลายจมูก เท้าและหางสีดำ $c^{h}\ c^{h}$

F_1

สีเทาเงิน $c^{ch}\ c^{h}$

F_2

สีเทาเงิน : สีขนลำตัวสีขาว ปลายจมูก เท้าและหางสีดำ

$c^{ch}c^{ch}$, $c^{ch}c^{h}$, $c^{ch}c^{h}$: $c^{h}c^{h}$

3 : 1

พ่อแม่

สีเทาเงิน $c^{ch}c^{ch}$

สีขาวทั้งตัว cc

F_1

สีเทาเงิน c^{ch} c

F_2

3 สีเทาเงิน : 1 สีขาวทั้งตัว

พ่อแม่

สีขนลำตัวสีขาว ปลายจมูก เท้าและหางสีดำ $c^h c^h$

×

สีขาวทั้งตัว cc

F_1

สีขนลำตัวสีขาว ปลายจมูก เท้าและหางสีดำ $c^h c$

F_2

3 สีขนลำตัวสีขาว ปลายจมูก เท้าและหางสีดำ : 1 สีขาวทั้งตัว

ฟีโนไทป์	จีโนไทป์
สีน้ำตาลปนเทา	CC, Cc^{ch}, Cc^{h}, Cc
สีเทาเงิน	$c^{ch}c^{ch}$, $c^{ch}c^{h}$, $c^{c}h^{c}$
สีขนลำตัวสีขาว ปลายจมูก เท้าและหางสีดำ	$c^{h}c^{h}$, $c^{h}c$
สีขาวทั้งตัว	cc

หมู่เลือด ABO ของคนมี 3 แอลลีล

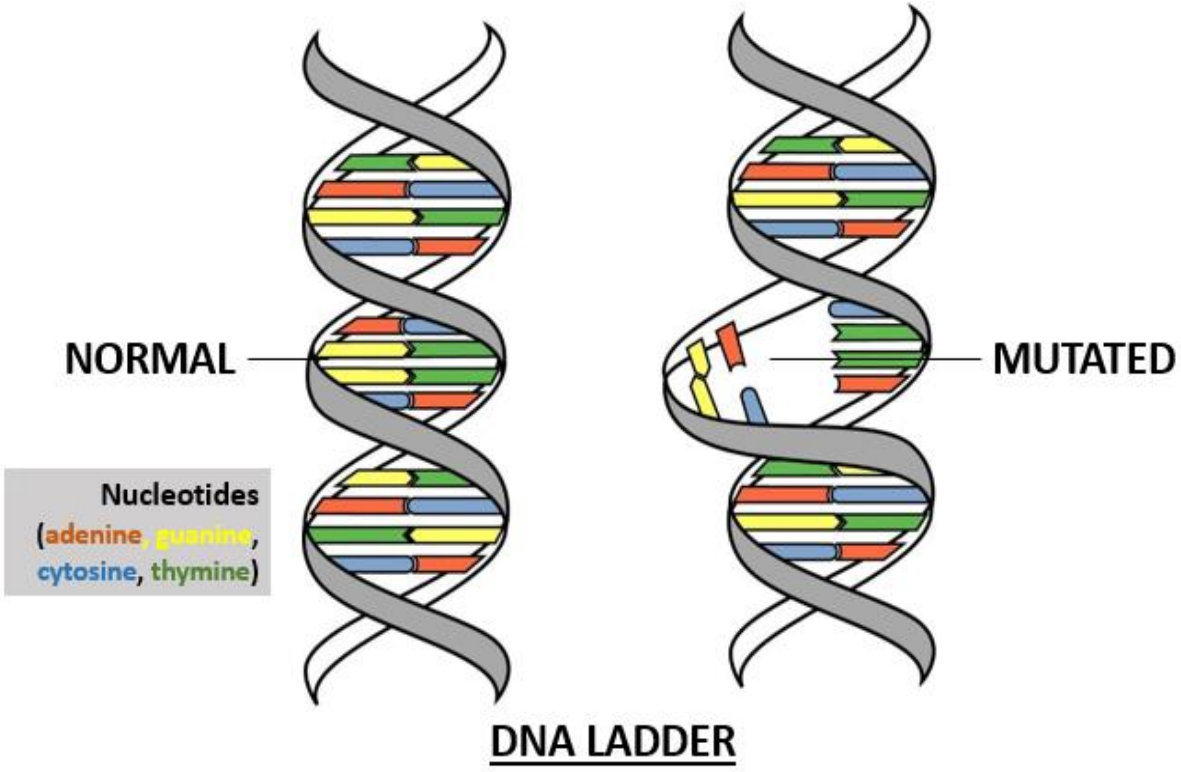
Genotype	Antigen	Phenotype
I^AI^A	A	A
I^Ai	A	
I^BI^B	B	B
I^Bi	B	
I^AI^B	A,B	AB
ii	Neither	O

Parents		Potential Offspring			
Phenotypes	Genotypes	A	B	AB	O
A x A	I^Ai x I^Ai	3/4	-	-	1/4
B x B	I^bi x I^Bi	-	3/4	-	1/4
O x O	ii x ii	-	-	-	all
A x B	I^Ai x I^Bi	1/4	1/4	1/4	1/4
A x AB	I^Ai x I^AI^B	1/2	1/4	1/4	-
A x O	I^Ai x ii	1/2	-	-	1/2
B x AB	I^Bi x I^AI^B	1/4	1/2	1/4	-
B x O	I^Bi x ii	-	1/2	-	1/2
AB x O	I^AI^B x ii	1/2	1/2	-	-
AB x AB	I^AI^B x I^AI^B	1/4	1/4	1/2	-

Mutation

การกลายพันธุ์ (Mutation)

การกลายพันธุ์ หรือ **การผ่าเหล่า (Mutation)** คือ สภาพของสิ่งมีชีวิตที่เกิดมีการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมจากเดิมที่เคยเป็น โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของยีน



ระดับของการกลายพันธุ์ที่เกิดขึ้นในสิ่งมีชีวิต มี 2 ระดับ คือ

1. การกลายพันธุ์ในระดับโครโมโซม (Chromosomal Mutation)
2. การกลายพันธุ์ในระดับยีนหรือโมเลกุลของดีเอ็นเอ (DNA Gene Mutation)

การกลายพันธุ์มี 2 ลักษณะ

1. การกลายพันธุ์ที่เซลล์ร่างกาย (Somatic Cell) จะเกิดกับยีนในเซลล์ของร่างกาย เช่น เกิดเนื้องอก โรคมะเร็ง เป็นต้น

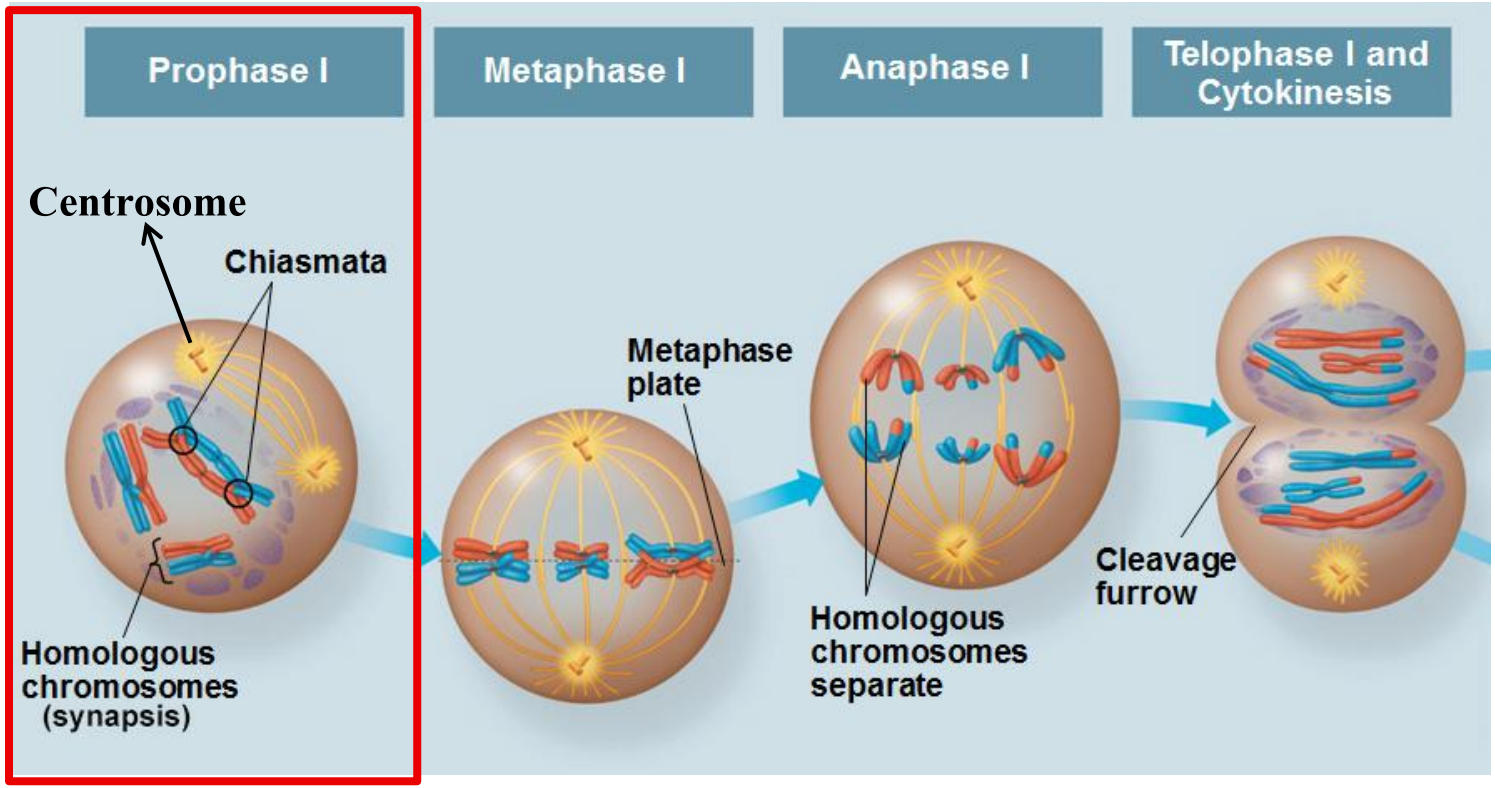
2. การกลายพันธุ์ที่เซลล์สืบพันธุ์ (Gamete) จะเกิดกับยีนในเซลล์สืบพันธุ์ และสามารถถ่ายทอดไปสู่ลูกหลานได้

กระบวนการไขว้เปลี่ยนของโครโมโซม (Crossing Over)

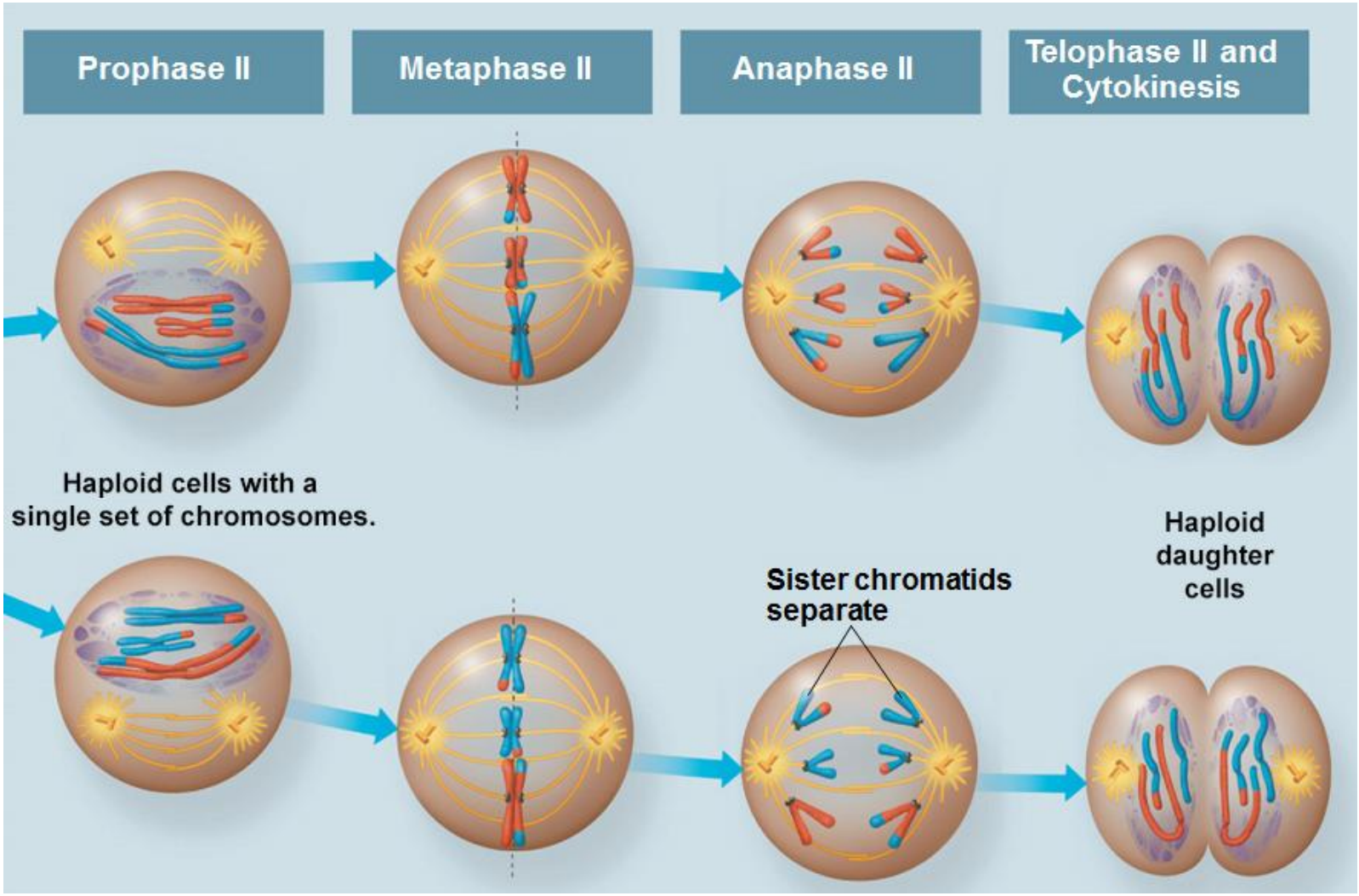
Crossing Over คือ ปรากฏการณ์ที่โครมาติดของโครโมโซมเส้นหนึ่งแลกเปลี่ยนกับโครมาติดของโครโมโซมอีกเส้นหนึ่ง ซึ่งเป็นโฮโมโลกัสกัน

- เกิดขึ้นในขั้นตอน **Prophase I** ของการแบ่งเซลล์แบบ **Meiosis**

Meiosis I

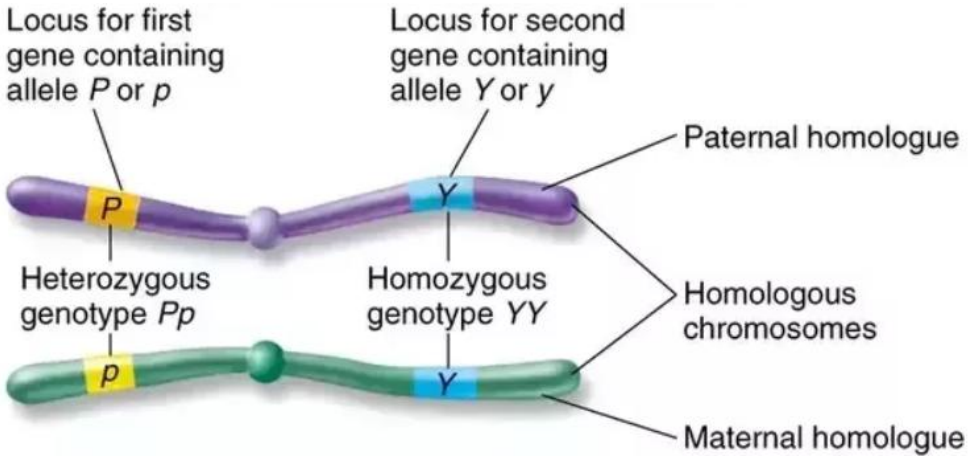


Meiosis II

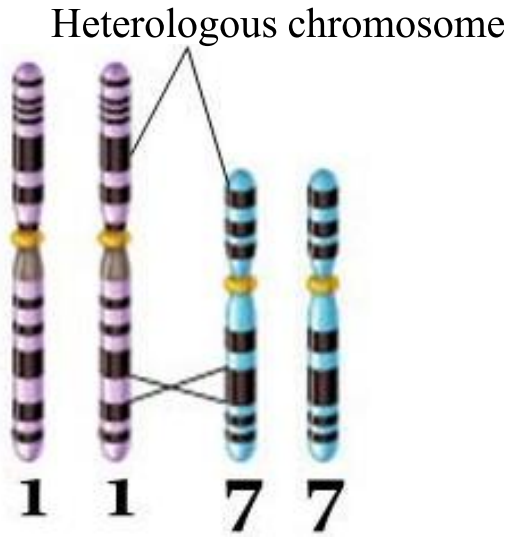

Prophase II
Metaphase II
Anaphase II
Telophase II and Cytokinesis
Haploid cells with a single set of chromosomes.
Sister chromatids separate
Haploid daughter cells

Chromosome

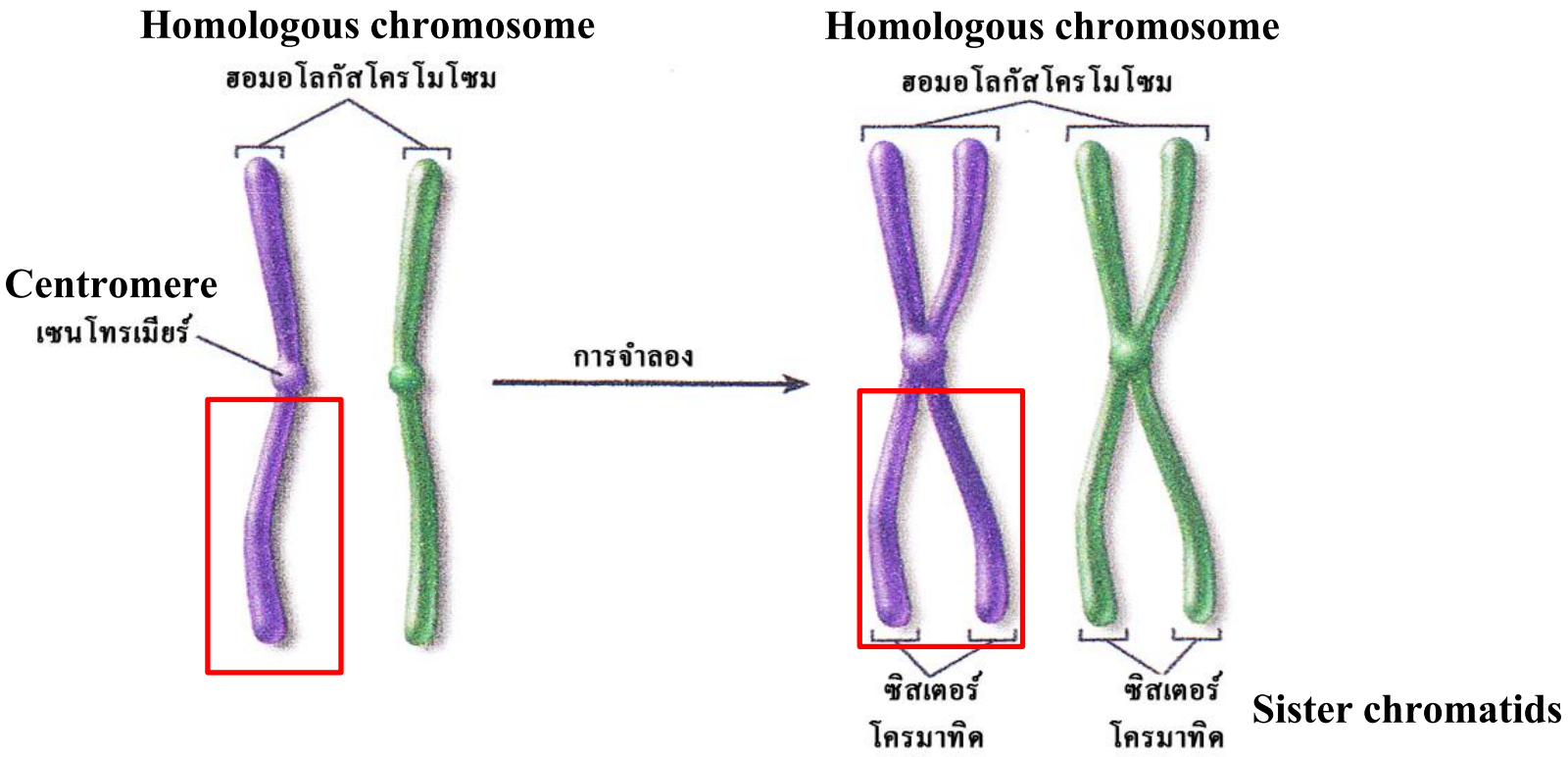
- Homologous Chromosome คือ โครโมโซมที่เป็นคู่ที่เหมือนกัน มียีนที่ควบคุมลักษณะเดียวกันอยู่บนตำแหน่งเดียวกันบนโครโมโซมที่เป็นคู่กัน



- Heterologous chromosome หรือ Non-homologous chromosome คือ โครโมโซมที่มียีนไม่เหมือนกัน ไม่ได้เป็นคู่กัน



Chromosome & Chromatid



โครโมโซมเพียง 1 ชุด

2 แท่ง (n = 2)

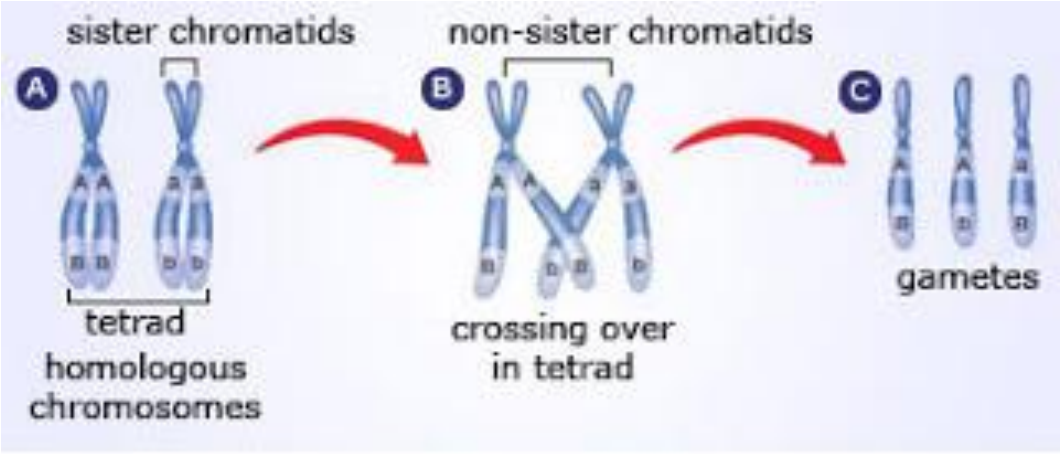
แต่ละแท่งมี**โครมาทิด 1 แขน**

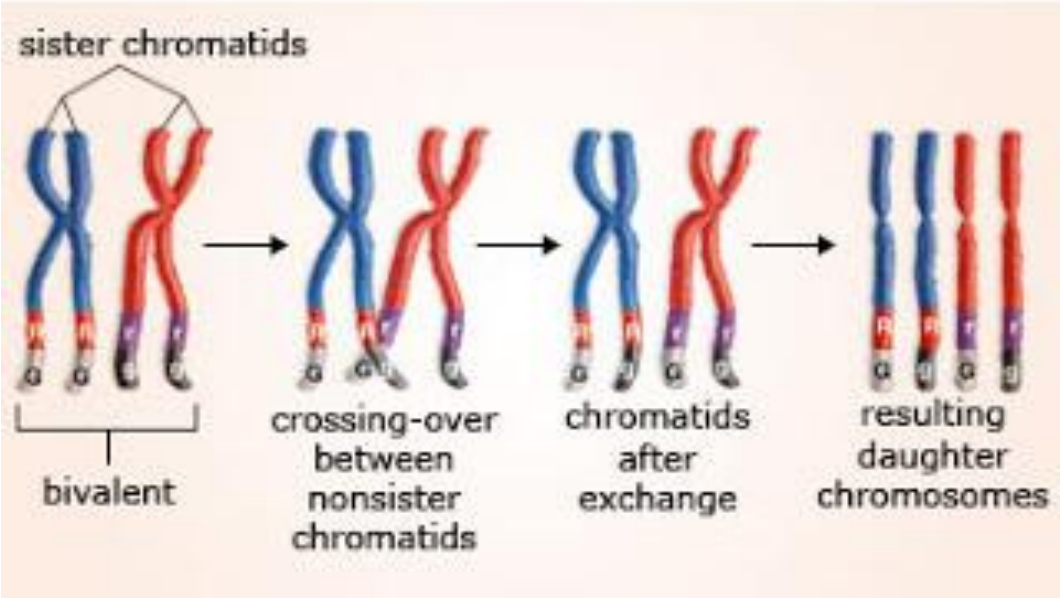
โครโมโซมเหมือนกัน 2 ชุด

2 แท่ง (2n = 4)

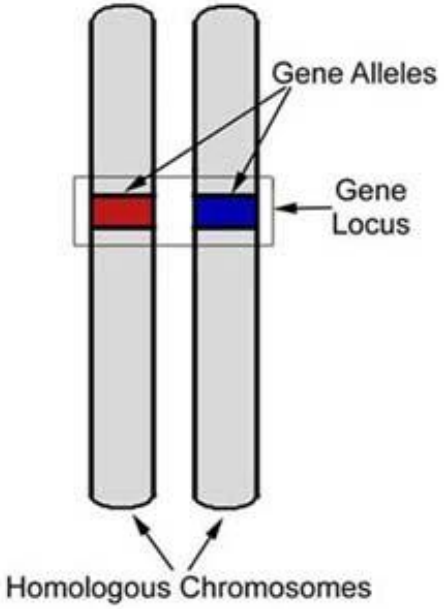
แต่ละแท่งมี**โครมาทิด 2 แขน**

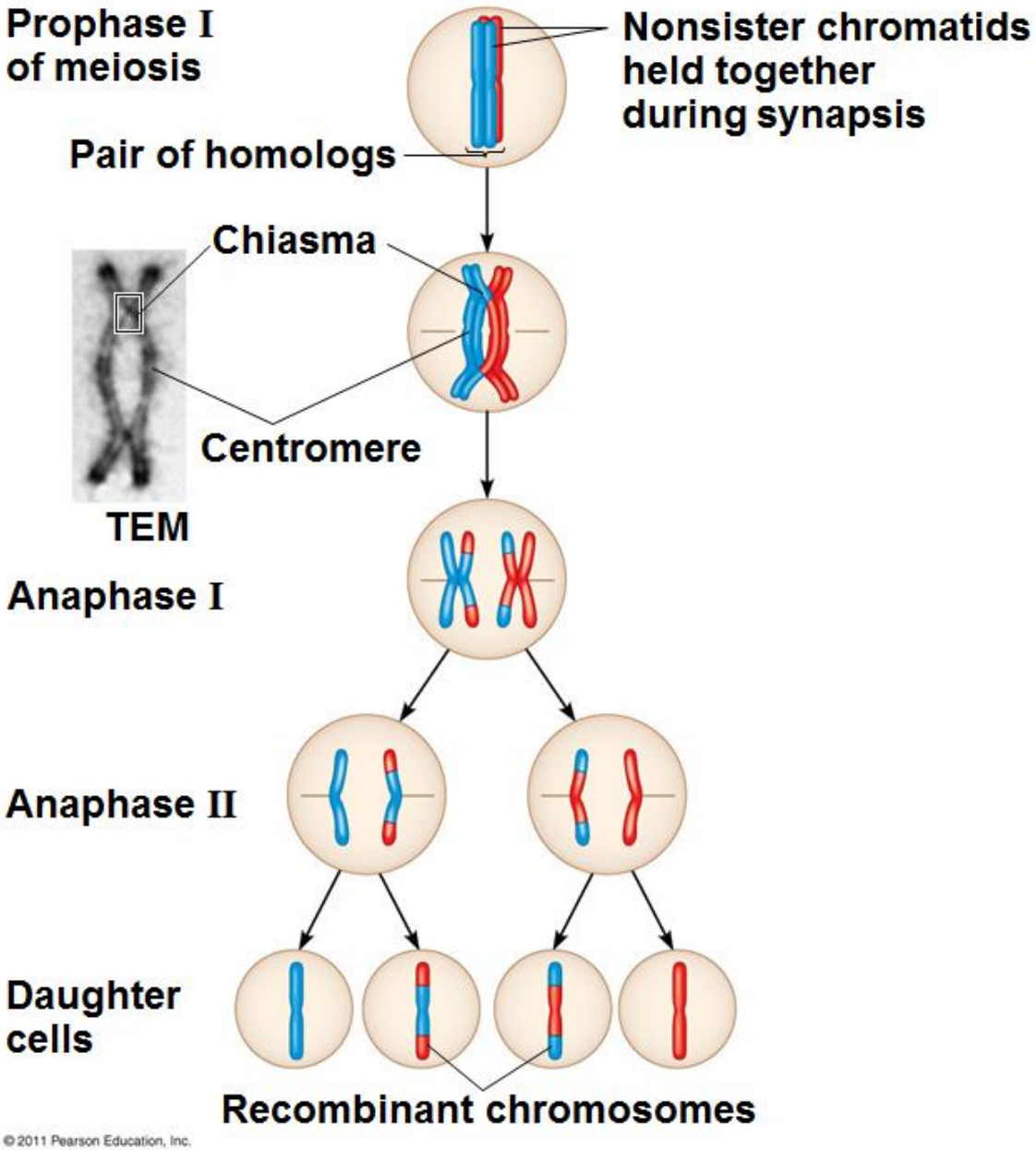
กระบวนการไขว้เปลี่ยนของโครโมโซม (Crossing Over)





1. โครมาตินหดตัวเข้ามาเป็นโครโมโซมที่เป็นคู่กัน (homologous chromosome)
2. เกิดการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนระหว่าง Sister chromatids





© 2011 Pearson Education, Inc.

Next is Genetic disorder