

บทที่ 1

พันธุศาสตร์ตามหลักของเมนเดล

(Mendelian Genetics)

1.1 เมนเดลกับการถ่ายทอดพันธุกรรม

เกรเกอร์ เมนเดล (Gregor Mendel) เป็นนักบวช และทำหน้าที่สอนฟิสิกส์ (รูปที่ 1.1) มีความสนใจการผสมพันธุ์พืช และการถ่ายทอดกรรมพันธุ์ แต่เมนเดลมีความเชื่อว่าการศึกษานี้ควรทำโดยมีค่าปริมาณ หรือตัวเลขเกี่ยวข้องจะช่วยให้เข้าใจปรากฏการณ์ธรรมชาติได้ดีขึ้นกว่าการบรรยายถึงคุณภาพทั่วไปของสิ่งมีชีวิต



รูปที่ 1.1 เกรเกอร์ เมนเดล บิดาของวิชาพันธุศาสตร์

(แหล่งที่มา: <http://www.carampangue.cl/Biocarampangue/2-Mendel-jardin.jpg>)

1.2 การทดลองผสมพันธุ์ถั่วลันเตา

1.2.1 การพิจารณาลักษณะกรรมพันธุ์ที่ละคู่

เมนเดลเลือกใช้ถั่วลันเตา ซึ่งเป็นพืชพวกดิพลอยด์ ($2n$) และมีการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ นอกจากนี้เมนเดลยังคัดเลือกพันธุ์แต่ละลักษณะต่างๆ ของถั่วลันเตาทั้ง 7 ลักษณะ

Character	Dominant trait	Recessive trait	Character	Dominant trait	Recessive trait
Seed shape	 Spherical	 Wrinkled	Flower position	 Axiel	 Terminal
Seed color	 Yellow	 Green		 Tall	 Dwarf
Flower color	 Purple	 White			
Pod shape	 Inflated	 Constricted			
Pod color	 Green	 Yellow			

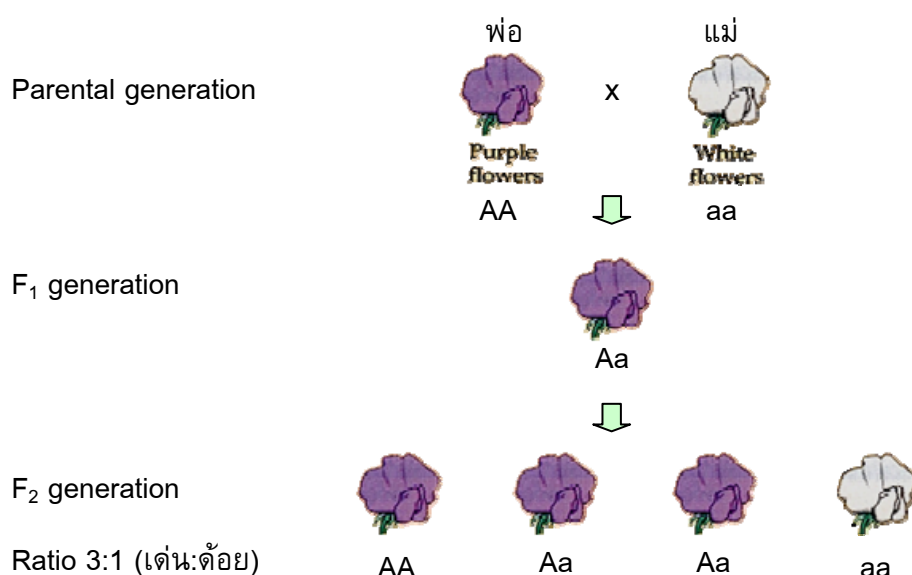
รูปที่ 1.2 ลักษณะถั่วลันเตา 7 ลักษณะที่เมนเดลใช้ทดลองผสมพันธุ์ถั่วลันเตา
(แหล่งที่มา: Life: The Science of Biology, Seventh Edition, 2004)

ดอกถั่วลันเตาดอกหนึ่ง มีทั้งเกสรตัวผู้ และเกสรตัวเมีย โดยเกสรตัวผู้ (stamen) สร้างละอองเรณู (pollen) ซึ่งทำหน้าที่เหมือนสเปิร์ม ในขณะที่เกสรตัวเมีย (pistil) ซึ่งอยู่บริเวณกลางดอก ภายในมีรังไข่ (ovary) ซึ่งทำหน้าที่สร้างไข่ (egg)

ดังนั้นถั่วลันเตาจึงสามารถเกิดปฏิสนธิระหว่างละอองเรณูกับไข่ได้ภายในดอกเดียวกัน ซึ่งเรียกการปฏิสนธิแบบนี้ว่า self - fertilization นอกจากนี้ยังสามารถทำการผสมข้ามดอก หรือที่เรียกว่า cross – fertilization ได้อีกด้วย

เมื่อกระบวนการผสมพันธุ์ และการเจริญเป็นเมล็ดเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จะได้รุ่นลูกผสม ซึ่งเรียกว่า รุ่น F_1 (first - filial generation) และเมื่อลูกผสมรุ่น F_1 ผสมกันเองภายในดอกเดียวกัน หรือภายในต้นเดียวกัน จะได้รุ่นลูกผสม ซึ่งเรียกว่า รุ่น F_2 (second - filial generation)

จากข้อมูลข้างต้นทำให้เมนเดลได้ทำการทดลองผสมพันธุ์ถั่วลิ้นเต่า โดยพิจารณา ลักษณะกรรมพันธุ์ที่ละคู่ ซึ่งเรียกว่า การผสมแบบโมโนไฮบริด (monohybrid cross) เมนเดล ทำการผสมพันธุ์ดอกสีม่วงเข้มกับพันธุ์ดอกสีขาวของถั่วลิ้นเต่า โดยนำเกสรตัวผู้จากพันธุ์ดอกสีขาวโรยใส่เข้าไปในเกสรตัวเมียของพันธุ์ดอกสีม่วงเข้มที่ถูกตัดเอายอดเกสรตัวผู้ออกจากดอกก่อนแล้ว นอกจากนี้เมนเดลยังทดลองผสมข้ามดอกในทางตรงกันข้าม (reciprocal cross) โดยเอาเกสรตัวผู้จากดอกสีม่วงเข้มใส่ในเกสรตัวเมียดอกสีขาวที่ถูกตัดเกสรตัวผู้ออกไปแล้ว หลังจากการรอคอยการผสมพันธุ์ และการเจริญเป็นเมล็ดลูกผสมรุ่น F_1 แล้วจึงนำเมล็ดลูกผสมรุ่น F_1 ไปเพาะปลูกจนได้เป็นต้นใหม่ พบว่าต้นถั่วลิ้นเต่ารุ่น F_1 ทุกต้น มีดอกสีม่วงเกิดขึ้นเท่านั้น ดังนั้นจึงไม่พบต้นที่มีดอกสีขาว แต่เมื่อนำต้นถั่วลิ้นเต่ารุ่น F_1 มาผสมกันเองภายในดอกเดียวกัน จากนั้นรอคอยการผสมพันธุ์ และการเจริญเป็นเมล็ดลูกผสมรุ่น F_2 แล้วจึงนำเมล็ดลูกผสมรุ่น F_2 ไปเพาะปลูกจนได้เป็นต้นใหม่ พบว่าต้นถั่วลิ้นเต่ารุ่น F_2 มีอัตราส่วนของดอกสีม่วง : ดอกสีขาวเป็น 3:1 เสมอ (รูปที่ 1.3)

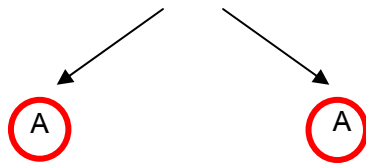


รูปที่ 1.3 การทดลองการผสมพันธุ์ระหว่างพันธุ์ดอกสีม่วงเข้มกับพันธุ์ดอกสีขาวของถั่วลิ้นเต่า

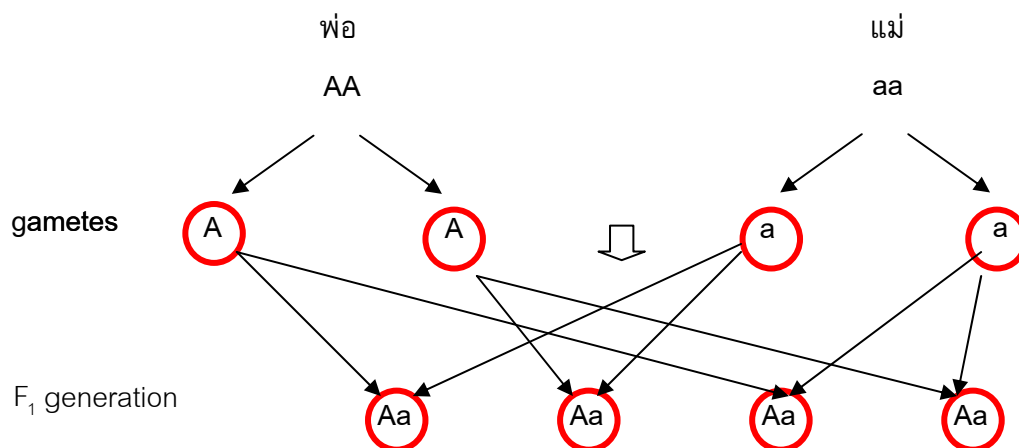
จากผลการทดลองทำให้เมนเดลคิดว่าต้องมีสิ่งที่ทำหน้าที่ควบคุมลักษณะกรรมพันธุ์ เช่น สีของดอก สีของเมล็ด นอกจากนี้สิ่งนี้น่าจะเป็นหน่วยเฉพาะที่อยู่ในสิ่งมีชีวิต และสามารถถ่ายทอดต่อไปรุ่นลูกได้ ดังนั้นจึงเรียกหน่วยเฉพาะดังกล่าวนี้ว่า แฟกเตอร์ (factor) ต่อมาเรียกว่า ยีน (gene) นอกจากนี้ยีนที่เป็นคู่เดียวกัน และมีตำแหน่งโลกัสเดียวกันบนโฮโมโลกัสโครโมโซม (homologous chromosome) เช่น AA aa และ Aa ซึ่งเรียกว่า แอลลีล (allele) สำหรับพวกที่มีคู่แอลลีลเหมือนกัน เรียกว่า โฮโมไซกัส (homozygous) แต่พวกที่มีคู่แอลลีลต่างกัน เรียกว่า เฮเทโรไซกัส (heterozygous) ลักษณะกรรมพันธุ์ที่แสดงออกมาให้เห็น เรียกว่า ฟิโนไทป์ (phenotype) ส่วนองค์ประกอบของยีน หรือคู่แอลลีลที่อยู่ภายในเซลล์ เรียกว่า จีโนไทป์ (genotype) สำหรับยีนที่มีคุณสมบัติสามารถข่มยีนคู่ตรงข้ามได้ เรียกว่า ยีนเด่น (dominant gene) มักแทนด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่ เช่น A หรือ B เป็นต้น ส่วนยีนที่ถูกข่ม เรียกว่า ยีนด้อย (recessive gene) มักแทนด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวเล็ก เช่น a หรือ b เป็นต้น

ข้อสำคัญของแฟกเตอร์ คือ อย่างน้อยต้องมีแฟกเตอร์ 1 คู่ ที่ทำหน้าที่ควบคุมลักษณะกรรมพันธุ์หนึ่งลักษณะ ดังนั้นเมื่อถั่วลิ้นเตาสรางเซลล์สืบพันธุ์ แฟกเตอร์ที่มีอยู่เป็นคู่ๆ จะแยกออกจากกันไปอยู่ในเซลล์สืบพันธุ์แต่ละเซลล์ (รูปที่ 1.4) จากนั้นเมื่อเซลล์สืบพันธุ์จากต่างเพศมาผสมกัน และเกิดการปฏิสนธิ จะส่งผลให้แฟกเตอร์ที่เคยแยกออกจากกันมาเข้าคู่กันใหม่ในไซโกต และเจริญไปเป็นต้นใหม่ (รูปที่ 1.5) เรียกหลักการถ่ายทอดกรรมพันธุ์ข้อแรกนี้ว่า กฎการแยกยีน (law of segregation)

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าต้นถั่วลิ้นเตารุ่น F_1 ทุกต้นมีจีโนไทป์ Aa และแสดงลักษณะฟีโนไทป์เป็นดอกสีม่วง แสดงว่ายีน A ซึ่งเป็นยีนเด่นสามารถข่มยีน a ซึ่งเป็นยีนด้อยได้ จึงทำให้ดอกถั่วลิ้นเตาแสดงลักษณะเด่นออกมาเป็นดอกสีม่วงทั้งหมด แต่เมื่อถั่วลิ้นเตารุ่น F_1 ผสมกันเองภายในดอกเดียวกัน และรอคอยการผสมพันธุ์และการเจริญเป็นต้นใหม่ของลูกผสมรุ่น F_2 พบว่าต้นถั่วลิ้นเตารุ่น F_2 มีจีโนไทป์ AA Aa Aa และ aa สำหรับต้นถั่วลิ้นเตาที่มีจีโนไทป์ AA ซึ่งแสดงลักษณะฟีโนไทป์เป็นดอกสีม่วง เนื่องจากมีเฉพาะยีนเด่นเท่านั้นที่อยู่ในจีโนไทป์ สำหรับต้นถั่วลิ้นเตาที่มีจีโนไทป์ Aa ซึ่งแสดงลักษณะฟีโนไทป์เป็นดอกสีม่วง เนื่องจากยีน A ซึ่งเป็นยีนเด่นสามารถข่มยีน a ซึ่งเป็นยีนด้อยได้ ในขณะที่ต้นถั่วลิ้นเตาที่มีจีโนไทป์ aa ซึ่งแสดงลักษณะฟีโนไทป์เป็นดอกสีขาว เนื่องจากมีเฉพาะยีนด้อยเท่านั้นที่อยู่ในจีโนไทป์ ดังนั้นอัตราส่วนของดอกสีม่วง : ดอกสีขาวในต้นถั่วลิ้นเตารุ่น F_2 จึงเป็น 3:1 เสมอ



รูปที่ 1.4 เมื่อมีการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ แพลกเตอร์ที่มีอยู่เป็นคู่ๆ จะแยกออกจากกันไปอยู่ในเซลล์สืบพันธุ์แต่ละเซลล์



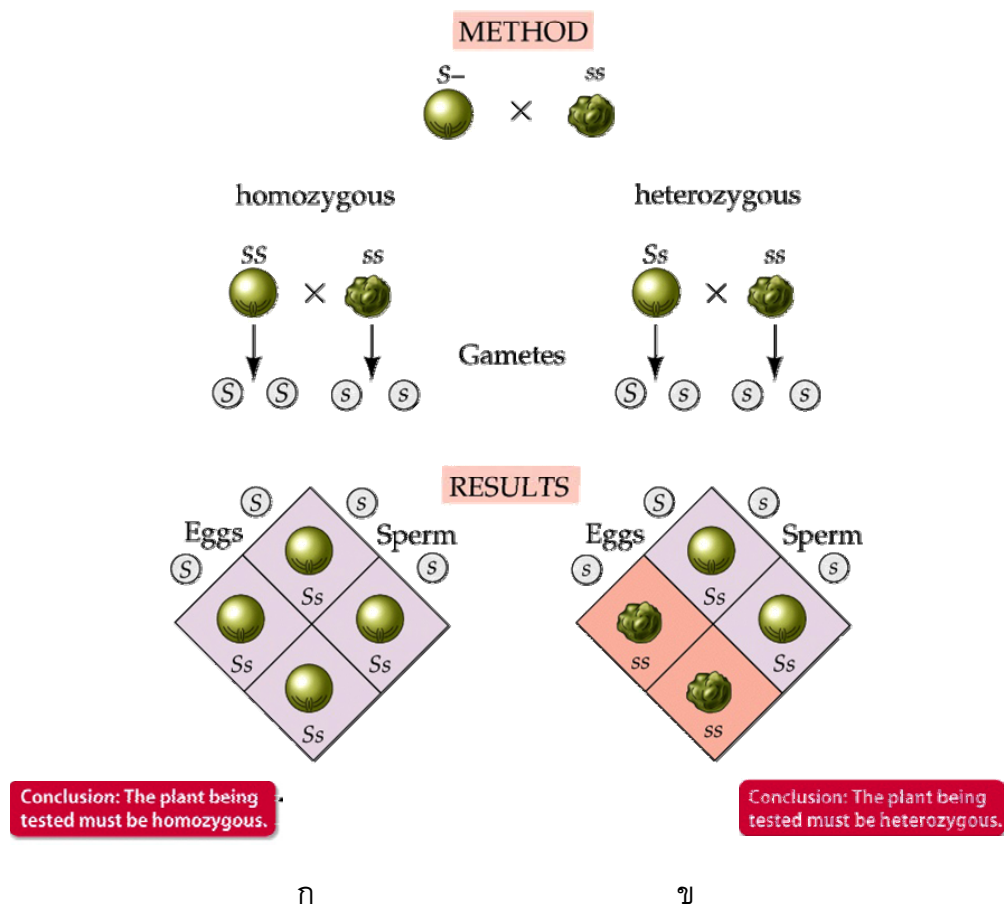
รูปที่ 1.5 เซลล์สืบพันธุ์จากต่างเพศมาผสมกัน และเกิดการปฏิสนธิ จะส่งผลให้แพลกเตอร์ที่เคยแยกออกจากกันมาเข้าคู่กันใหม่ในไซโกต และเจริญไปเป็นต้นใหม่ (A เป็นยีนเด่นที่ควบคุมการเกิดดอกสีม่วงในต้นถั่วลิ้นเตา และ a เป็นยีนด้อยที่ควบคุมการเกิดดอกสีขาวในต้นถั่วลิ้นเตา)

1.2.2 การผสมพันธุ์ทดสอบ (test cross)

การผสมพันธุ์ระหว่างต้นถั่วลิ้นเตาที่มีฟีโนไทป์เป็นลักษณะเด่น แต่ไม่ทราบลักษณะของจีโนไทป์ที่แน่นอน (unknown genotype) กับต้นถั่วลิ้นเตาที่มีฟีโนไทป์เป็นลักษณะด้อย (recessive tester) เช่น การผสมพันธุ์ระหว่างเมล็ดถั่วลิ้นเตาผิวเรียบกับเมล็ดถั่วลิ้นเตาผิวขรุขระ (S เป็นยีนเด่นที่ควบคุมการเกิดเมล็ดผิวเรียบในต้นถั่วลิ้นเตา และ s เป็นยีนด้อยที่ควบคุมการเกิดเมล็ดผิวขรุขระในต้นถั่วลิ้นเตา) (รูปที่ 1.6) ซึ่งผลจากการทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 พบว่าเมล็ดถั่วลิสงเตาทั้งหมดในรุ่น F_1 แสดงลักษณะฟีโนไทป์เป็นผิวเรียบทั้งหมด แสดงว่าเมล็ดถั่วลิสงเตาที่ผิวเรียบที่นำมาทดสอบนั้นมีจีโนไทป์เป็น SS เนื่องจากจีโนไทป์ SS มาผสมกับจีโนไทป์ ss จะได้รุ่นลูก F_1 ที่มีเฉพาะจีโนไทป์ Ss ซึ่งแสดงลักษณะฟีโนไทป์เป็นผิวเรียบทั้งหมด (รูปที่ 1.6 ก)

กรณีที่ 2 พบว่าเมล็ดถั่วลิสงเตาทั้งหมดในรุ่น F_1 แสดงลักษณะฟีโนไทป์เป็นผิวเรียบ : ผิวขรุขระ ในอัตราส่วน 1:1 แสดงว่าเมล็ดถั่วลิสงเตาที่ผิวเรียบที่นำมาทดสอบนั้นมีจีโนไทป์เป็น Ss เนื่องจากจีโนไทป์ Ss มาผสมกับจีโนไทป์ ss จะได้รุ่นลูก F_1 ที่มีจีโนไทป์ Ss และ ss ซึ่งแสดงลักษณะฟีโนไทป์เป็นผิวเรียบ และผิวขรุขระ ตามลำดับ (รูปที่ 1.6 ข)



รูปที่ 1.6 การผสมพันธุ์ระหว่างเมล็ดถั่วลิสงเตาผิวเรียบที่ไม่ทราบจีโนไทป์กับเมล็ดถั่วลิสงเตาผิวขรุขระ (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 2

(แหล่งที่มา: Life: The Science of Biology, Seventh Edition, 2004)

1.2.3 การพิจารณาลักษณะที่แตกต่างกัน 2 คู่พร้อมกัน

การพิจารณาลักษณะที่แตกต่างกัน 2 คู่พร้อมกัน เรียกว่า การผสมแบบไดไฮบริด (dihybrid cross) เช่น การผสมพันธุ์ถั่วลันเตาพันธุ์แท้ลักษณะเมล็ดผิวเรียบ และมีสีเหลือง ซึ่งมีจีโนไทป์เป็น SSYY กับพวกพันธุ์แท้ลักษณะเมล็ดผิวขรุขระ และมีสีเมล็ดสีเขียว ซึ่งมีจีโนไทป์เป็น ssyy (รูปที่ 1.7) (S เป็นยีนเด่นที่ควบคุมการเกิดเมล็ดผิวเรียบในต้นถั่วลันเตา และ s เป็นยีนด้อยที่ควบคุมการเกิดเมล็ดผิวขรุขระในต้นถั่วลันเตา และ Y เป็นยีนเด่นที่ควบคุมการเกิดเมล็ดสีเหลืองในต้นถั่วลันเตา และ y เป็นยีนด้อยที่ควบคุมการเกิดเมล็ดสีเขียวในต้นถั่วลันเตา)

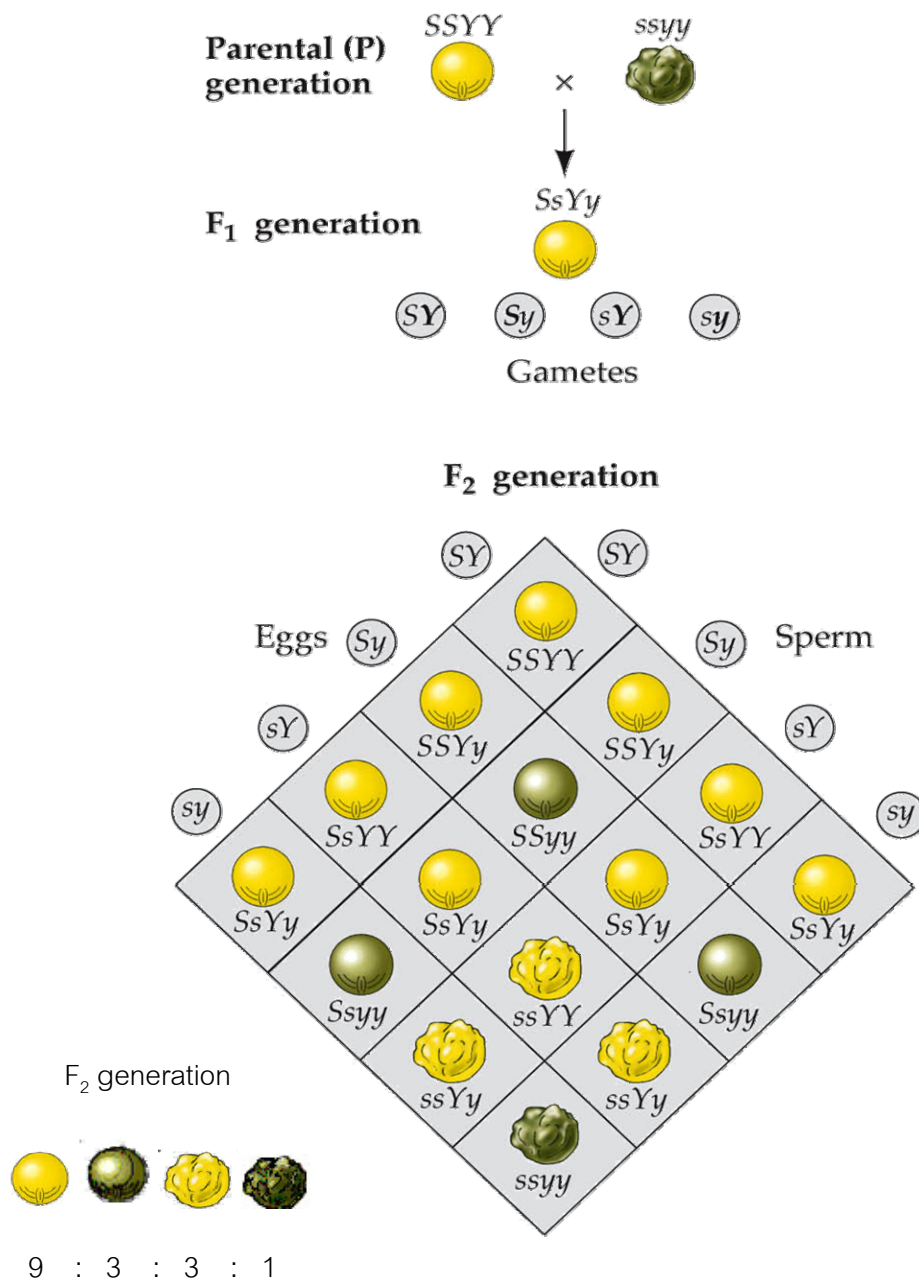
จากผลการทดลองพบว่าลูกผสมรุ่น F_1 มีจีโนไทป์ SsYy แสดงลักษณะฟีโนไทป์ของเมล็ดเป็นผิวเรียบ และมีสีเหลืองทั้งหมด แต่เมื่อถั่วลันเตารุ่น F_1 ผสมกันเองภายในดอกเดียวกัน และรอคอยการผสมพันธุ์และการเจริญเป็นต้นใหม่ของลูกผสมรุ่น F_2 ซึ่งมีจีโนไทป์ของลูกผสมรุ่น F_2 ทั้งหมดสามารถคิดได้จากการทำตารางพุนเนตต์ (Punnett square) ซึ่งพัฒนาโดยนักพันธุศาสตร์ชาวอังกฤษ คือ อาร์ ซี พุนเนตต์ (R. C. Punnett) (รูปที่ 1.7) ตารางนี้คิดได้จากการนำเซลล์สืบพันธุ์ที่ได้จากลูกผสมรุ่น F_1 ทั้งหมดมาจับคู่กัน พบว่าต้นถั่วลันเตารุ่น F_2 มีจีโนไทป์ 9 แบบ คือ

- | | | |
|---------|---------|---------|
| 1. RRYy | 2. RrYY | 3. RrYy |
| 4. RRYy | 5. RRyy | 6. Rryy |
| 7. rrYY | 8. rrYy | 9. rryy |

แต่มีลักษณะฟีโนไทป์ 4 แบบ คือ

1. เมล็ดผิวเรียบ และมีสีเหลือง (จีโนไทป์ คือ RRYy, RrYY, RrYy และ RRYy)
2. เมล็ดผิวเรียบ และมีสีเขียว (จีโนไทป์ คือ RRyy และ Rryy)
3. เมล็ดผิวขรุขระ และมีสีเหลือง (จีโนไทป์ คือ rrYY และ rrYy)
4. เมล็ดผิวขรุขระ และมีสีเขียว (จีโนไทป์ คือ rryy)

จากการทดลองทำให้ทราบว่าจีโนไทป์ของคู่ยีนทั้ง 2 คู่ คือ ยีน R และ ยีน Y อยู่แยกกันอย่างอิสระในการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ และการปฏิสนธิระหว่างเซลล์สืบพันธุ์จากต่างเพศเป็นไปอย่างอิสระด้วย จึงเรียกกฎข้อนี้ว่า การแยก และการรวมกันใหม่ของยีนอย่างอิสระ (law of independent assortment of gene)



รูปที่ 1.7 การผสมพันธุ์ถั่วลันเตาพันธุ์แท้ลักษณะเมล็ดผิวเรียบ และเนื้อเมล็ดสีเหลือง กับพวกพันธุ์แท้ลักษณะเมล็ดผิวขรุขระ และเนื้อเมล็ดสีเขียว
(แหล่งที่มา: Life: The Science of Biology, Seventh Edition, 2004)

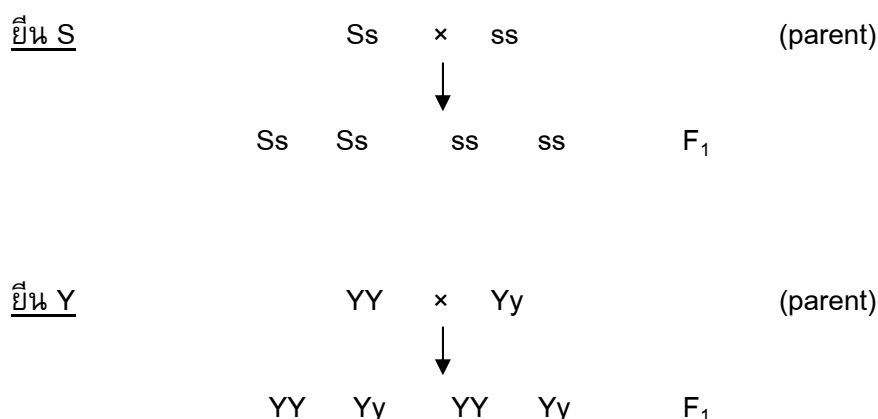
นอกจากวิธีคิดตามหลักของพุนเนตต์ในการวิเคราะห์จีโนไทป์ที่เกิดขึ้น ยังมีอีกวิธีหนึ่งที่ใช้วิเคราะห์หาความถี่ของจีโนไทป์ที่ต้องการว่าจะมีโอกาสเกิดขึ้นเท่าไร ซึ่งวิธีนี้จะเป็นการพิจารณาที่ละยีนของจีโนไทป์นั้นๆ

ตัวอย่าง การผสมพันธุ์ถั่วลันเตา ซึ่งมีจีโนไทป์ SsYY กับ ssYy และต้องการทราบว่าความถี่ของจีโนไทป์ ssYy ในรุ่นลูกผสมจะมีค่าเท่าไร

หลักการวิเคราะห์มีดังนี้

1. พิจารณาที่ละยีนของจีโนไทป์นั้นๆ

จากโจทย์จะพบว่ามียีนที่เกี่ยวข้องในการผสมครั้งนี้ 2 ยีน คือ ยีน S และยีน Y (ยังไม่ต้องคิดเรื่องตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่ หรือตัวเล็ก) จากนั้นพิจารณาการผสมพันธุ์ถั่วลันเตาที่ละยีน คือ



2. ดูคำถามจากโจทย์ และวิเคราะห์โอกาสที่จะเกิดยีนดังกล่าวที่ละยีน ในตัวอย่างนี้ถามว่าความถี่ของจีโนไทป์ ssYy ในรุ่นลูกผสมจะมีค่าเท่าไร

2.1 วิเคราะห์ค่าความถี่ของยีน S ว่ามีโอกาสการเกิดจีโนไทป์ ss เท่าไรจากการผสมพันธุ์ครั้งนี้ จากการคิดในข้อ 1 พบว่าโอกาสการเกิดจีโนไทป์ ss มีค่าเท่ากับ $2/4 = 1/2$

2.2 วิเคราะห์ค่าความถี่ของยีน Y ว่ามีโอกาสการเกิดจีโนไทป์ Yy เท่าไรจากการผสมพันธุ์ครั้งนี้ จากการคิดในข้อ 1 พบว่าโอกาสการเกิดจีโนไทป์ Yy มีค่าเท่ากับ $2/4 = 1/2$

3. ยีนแต่ละคู่ของจีโนไทป์ต่างๆ สามารถแยกออกจากกันอย่างอิสระในการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ และการปฏิสนธิระหว่างเซลล์สืบพันธุ์จากต่างเพศเป็นไปอย่างอิสระด้วย ดังนั้นโอกาสการเกิดจีโนไทป์ที่มาจากยีนแต่ละคู่ จึงคำนวณได้โดยการคูณ

ตัวอย่างนี้ถามว่าความถี่ของจีโนไทป์ ssYy ในรุ่นลูกผสมจะมีค่าเท่าไร ดังนั้นคำนวณได้จากโอกาสการเกิดจีโนไทป์ ss คือ $\frac{1}{2}$ คูณกับโอกาสการเกิดจีโนไทป์ Yy คือ $\frac{1}{2}$ มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{4}$ ($\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$)

สรุปกฎของเมนเดลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ข้อ ดังนี้

1. กฎการแยกยีน (law of segregation)

ลักษณะต่างๆ ทางกรรมพันธุ์ จะถูกควบคุมโดยแฟกเตอร์อย่างเฉพาะเจาะจง โดยแฟกเตอร์เหล่านี้จะอยู่เป็นคู่ๆ และเมื่อมีการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ แฟกเตอร์ดังกล่าวจะแยกออกจากกัน และเมื่อเซลล์สืบพันธุ์จากต่างเพศมาผสมกัน และเกิดปฏิสนธิ แฟกเตอร์จะเข้าคู่กันใหม่ในไซโกต ซึ่งจะเจริญไปเป็นต้นใหม่

2. กฎการแยกยีนเพื่อรวมตัวใหม่อย่างอิสระ (law of independent assortment of gene)

ยีนแต่ละคู่แยกกันอย่างอิสระในการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ และการปฏิสนธิระหว่างเซลล์สืบพันธุ์จากต่างเพศเป็นไปอย่างอิสระด้วย

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. จงหาว่าจีโนไทป์ $AaBBCcdd$ จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้กี่ชนิด และถ้าหากจีโนไทป์นี้เกิดการผสมตัวเอง จะมีความถี่ (frequencies) ของการเกิดจีโนไทป์ $aaBBccdd$ และ $AABbCcdd$ ในรุ่นลูกเท่าไร
2. จงหาว่าความถี่ของฟีโนไทป์ $ABCd$ จากการผสมตัวเองของจีโนไทป์ $AaBbCCDd$ ถ้ายีนทุกคู่แสดง complete dominance
3. ถ้าทำการผสมระหว่างจีโนไทป์ $AaBbCcDDEe$ กับ $AAbbCcddEe$ จงหา ความถี่ของจีโนไทป์ $AabbCCDdEE$

