การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมตามหลักของเมนเดล

ครูสุดารัตน์ คำผา วิชาชีววิทยา 4 ว30244

ในสถานการณ์ปัจจุบันจะเห็นได้ว่ามีการกล่าวถึงเรื่องราวเกี่ยวกับพันธุศาสตร์มากขึ้นโดยผ่านทางสื่อสิ่งพิมพ์ต่างๆ ตลอดจนโลกออนไลน์ เช่น ความผิดปกติต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับพันธุ์พืชหรือพันธุ์สัตว์ การพัฒนาของเทคโนโลยีการดัดแปลงพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต ซึ่งได้ก่อให้เกิดประโยชน์ทางการเกษตรและทางการแพทย์เป็นอย่างมาก การศึกษาสื่อประกอบการสอนในหัวข้อเรื่องความน่าจะเป็นและกฎแห่งการแยกจะเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการทาความเข้าใจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี เพราะจะทำให้ผู้เรียนเข้าใจกระบวนการของการถ่ายทอดทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตได้ดียิ่งขึ้น

พันธุศาสตร์ (Genetics)

พันธุศาสตร์ คือ ศาสตร์ หรือวิชาที่ศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบของการถ่ายทอดทางพันธุกรรมจากชั่วรุ่นหนึ่งไปยังอีกชั่วรุ่นหนึ่ง รวมทั้งการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างและหน้าที่ของสารพันธุกรรมในระดับโมเลกุล และศึกษาการแปรผันทางพันธุกรรมในประชากรที่จะเชื่อมโยงไปสู่การเกิดวิวัฒนาการ

พันธุกรรม (Heredity)

พันธุกรรม คือ การถ่ายทอดลักษณะจากบรรพบุรุษมายังลูกหลาน เช่น ลักษณะของสีดอกไม้ ลักษณะรูปร่างของเมล็ดถั่ว ลักษณะสีผิวของโค ลักษณะของหงอนไก่ เป็นต้น

เกรเกอร์ โจฮัน เมนเดล (Gregor Johann Mendel)

เกรเกอร์ โจฮัน เมนเดล (รูปที่ 1) เป็นชาวออสเตรีย มีชีวิตอยู่ในช่วงระหว่าง ปี ค.ศ. 1822 ถึง 1884 เมนเดลเกิดในครอบครัวเกษตรกรซึ่งมีฐานะปานกลาง และเมื่อบิดาถึงแก่กรรมครอบครัวก็เริ่มมีความเป็นอยู่ที่ยากลำบากมากขึ้น เมนเดลจึงตัดสินใจบวชและได้รับอนุญาตให้ไปเรียนหนังสือ ณ มหาวิทยาลัยเวียนนา ในสาขาวิชาฟิสิกส์ คณิตศาสตร์และธรรมชาติวิทยาเพื่อจะได้กลับมาเป็นครูสอนหนังสือที่โบสถ์ ในขณะที่เป็นครูสอนหนังสืออยู่นั้นเมนเดลซึ่งมีพื้นฐานการปลูกพืชเป็นอย่างดีเพราะเกิดและเติบโตในครอบครัวเกษตรกรได้ปลูกพืชหลายชนิดภายในโบสถ์ เมนเดลได้สังเกตเห็นลักษณะต่างๆ ของพันธุ์ไม้ที่ปลูกทำให้เกิดความสนใจในการศึกษาการถ่ายทอดลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้นจึงได้เริ่มทำการทดลองจากการผสมพันธุ์ถั่ว garden pea (*Pisum sativum* L.) โดยผสมพันธุ์ถั่วระหว่างต้นที่มีลักษณะที่แตกต่างกันแล้วดูลักษณะของลูกผสมที่เกิดขึ้นในชั่วรุ่นต่อๆ มาซึ่งเมนเดลได้ค้นพบความสัมพันธ์บางลักษณะของลูกผสมที่เกิดขึ้น และรวบรวมเป็นรายงานผลการศึกษา พร้อมทั้งได้

นาเสนอผลการศึกษา ในที่ประชุมสมาคมธรรมชาติวิทยา (Natural History Society) ณ เมืองบรุน ประเทศออสเตรีย ในปี ค.ศ. 1865 ในชื่อเรื่อง **Experiments in Plant Hybridization**

รูปที่ 1 ภาพวาดของ เกรเกอร์ โจฮัน เมนเดล (Gregor Johann Mendel)

แต่อย่างไรก็ตาม ผลงานดังกล่าวของเมนเดลไม่ได้รับความสนใจมากนัก จนเวลาล่วงเลยมาถึง 16 ปีหลังจากเมนเดลเสียชีวิต ในปี ค.ศ. 1900 จากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยเกี่ยวกับการผสมพันธุ์พืชของนักพฤกษศาสตร์ ชาวฮอลแลนด์ H. DeVries ชาวเยอรมันนี C. Correns และชาวออสเตรีย E. Von Tschermak-Seysenegg จึงได้มีการค้นพบงานของเมนเดลที่ได้เผยแพร่ไว้หลังจากนั้นก็มีผู้ทำการทดลองในแบบเดียวกับของเมนเดลอีกหลายท่านที่สำคัญ คือ W. Bateson และ L. Cuenot ในปี ค.ศ. 1902 ซึ่งผลการทดลองที่ได้ออกมานั้นเป็นไปตามที่เมนเดลกล่าวไว้ทุกประการ ทำให้ผลงานการศึกษาการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่เมนเดลศึกษาไว้เป็นที่ยอมรับกันในที่สุด จนเป็นที่มาของการยอมรับยกย่องให้เมนเดลเป็น "บิดาของพันธุศาสตร์"

พันธุกรรมของลักษณะถั่วที่เมนเดลได้รายงานเอาไว้มีอยู่ด้วยกัน 7 ลักษณะ คือ สีของดอก ตำแหน่งของดอก สีเมล็ด รูปร่างเมล็ด รูปร่างของฝัก สีของฝัก และลักษณะความสูงของต้น

จากการเก็บข้อมูลอย่างละเอียดนั้น ทำให้เมนเดลพบความเชื่อมโยงบางอย่างเกิดขึ้น เช่น เมื่อผสมพันธุ์ถั่วต้นสูงกับต้นเตี้ย ลูกรุ่นแรกที่ได้เป็นต้นสูงทั้งหมด ในทางพันธุศาสตร์ใช้สัญลักษณ์ F_1 หมายถึงลูกชั่วรุ่นแรก ซึ่ง F มาจากคาว่า Filial เป็นภาษาลาตินแปลว่าชั่วรุ่นลูก และเมื่อให้ลูก F_1 ผสมตัวเองลูก F_2 ที่ได้จะมีทั้งต้นสูงและต้นเตี้ยปรากฏออกมาในอัตราส่วน ต้นสูง : ต้นเตี้ย เท่ากับ 3 : 1 แสดงให้เห็นว่าลักษณะต้นเตี้ยที่ไม่แสดงในลูกชั่วรุ่นแรกไม่ได้หายไปไหนแต่ถูกปิดบังไว้และมาแสดงออกในลูก F_2

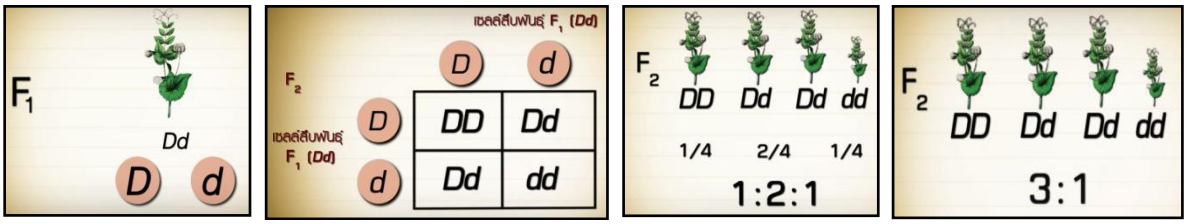
นอกจากนี้ เมนเดลยังได้ทดลองผสมพันธุ์ถั่วในแบบเดียวกันกับลักษณะอื่นๆ อีก 6 ลักษณะ ได้แก่ สีดอก ตำแหน่งของดอก สีเมล็ด รูปร่างเมล็ด รูปร่างของฝัก และสีของฝัก เมื่อพิจารณาอัตราส่วน พบว่าแต่ละลักษณะที่ผสมพันธุ์กันในลูกรุ่น F_2 ที่ได้ล้วนแต่มีอัตราส่วน ที่ใกล้เคียงกันทั้งหมด นั่นคือ ลักษณะเด่นต่อลักษณะด้อย เป็น 3 : 1 โดยประมาณในทุกลักษณะ (ตารางที่ 1) การผสมพันธุ์พิจารณาเพียงลักษณะเดียว แบบนี้เรียกว่า **monohybrid cross**

เมนเดลอธิบายว่าในถั่วมี "แฟกเตอร์ " บางอย่างที่ควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมและเรียกแฟกเตอร์ที่แสดงออกใน F_1 ว่า **dominant** หรือ **เด่น** เรียกลักษณะที่ถูกข่มไว้ไม่แสดงออกว่า **recessive** หรือ **ด้อย** โดยที่แฟกเตอร์ ดังกล่าวอยู่กันเป็นคู่ๆ ลูก F_1 จะได้รับแฟกเตอร์มาจากพ่อและแม่ฝ่ายละ 1 แฟกเตอร์ ต่อมาภายหลังใช้คำว่า "ยีน" แทนแฟกเตอร์

ตารางที่ 1 ลักษณะในถั่ว garden pea ลูกชั่วรุ่น F_2 ที่เกิดจากการผสมตัวเองของลูกชั่วรุ่น F_1 7 ลักษณะในถั่ว

Character	Dominant Trait	×	Recessive Trait	F_2 Generation Dominant:Recessive	Ratio
Flower color	Purple	×	White	705:224	3.15:1
Flower position	Axial	×	Terminal	651:207	3.14:1
Seed color	Yellow	×	Green	6022:2001	3.01:1
Seed shape	Round	×	Wrinkled	5474:1850	2.96:1
Pod shape	Inflated	×	Constricted	882:299	2.95:1
Pod color	Green	×	Yellow	428:152	2.82:1
Stem length	Tall	×	Dwarf	787:277	2.84:1

ในการอธิบายรูปแบบของการถ่ายทอดยีน เมนเดลใช้สัญลักษณ์อักษรตัวพิมพ์ใหญ่แทนยีนเด่น (dominant) และอักษรตัวพิมพ์เล็กแทนยีนด้อย (recessive) ปัจจุบันนิยมใช้ตัวอักษรย่อของคำจากลักษณะด้อย เช่น ต้นสูง ใช้ตัว *D* และต้นเตี้ย ใช้ตัว *d* ซึ่งมาจากคำว่า dwarf ซึ่งในทางพันธุศาสตร์ เรียกรูปแบบของยีนที่แตกต่างกัน ณ ตำแหน่งใด ตำแหน่งหนึ่งบนโครโมโซมว่า **แอลลีล (allele)** เช่น allele D หรือ allele d เป็นต้น องค์ประกอบทางพันธุกรรมที่ประกอบด้วยคู่ของแอลลีล เรียกว่า **จีโนไทป์ (genotype)** และผลที่เกิดขึ้นจากการแสดงออกของยีน เรียกว่า **ฟีโนไทป์** (**phenotype**) เช่น ลักษณะความสูงของต้นถั่วและลักษณะรูปร่างของเมล็ดเป็นต้น ส่วนจีโนไทป์รุ่นพ่อแม่ (parent, P) ที่เป็นต้นสูง DD เรียกว่าเป็น homozygous dominant และเรียกรุ่นพ่อแม่ที่เป็นต้นเตี้ย dd ว่า homozygous recessive ส่วนลูก F_1 ที่เป็น Dd เรียกว่า heterozygous เช่น การผสมพันธุ์ถั่วต้นสูงกับถั่วต้นเตี้ย ถั่วต้นสูงที่มีจีโนไทป์ เป็น DD จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์โดยการแบ่งเซลล์แบบไมโอซีส (meiosis) ได้แบบเดียวคือ D ส่วนถั่วต้นเตี้ยที่มี จีโนไทป์ เป็น dd ก็จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้แบบเดียวเช่นกันคือ d และเมื่อเซลล์สืบพันธุ์จากต้นสูงและต้นเตี้ยปฏิสนธิกันแล้วจะได้ลูก F_1 เป็นต้นสูงทั้งหมดโดยจะมีจีโนไทป์ เป็น Dd เมื่อให้ลูก F_1 ผสมตัวเองลูก F_1 จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ 2 แบบ คือ D และ d ซึ่งจะแยกออกจากกันไปเข้าสู่เซลล์สืบพันธุ์คนละเซลล์ ซึ่งต่อมาภายหลังทราบว่าการแยกออกจากกันนั้นเกิดขึ้นในกระบวนการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ที่มีการแบ่งเซลล์แบบ meiosis เมื่อเซลล์สืบพันธุ์มารวมกันทำให้ได้ลูก F_2 เป็นต้นสูงและต้นเตี้ยในอัตราส่วน 3 : 1 ในขณะที่อัตราส่วนจีโนไทป์ เท่ากับ 1 : 2 : 1



ก ข ค ง

รูปที่ 2 (ก) การแยกออกจากกันของคู่ยีน D, d ไปอยู่คนละเซลล์สืบพันธุ์

(ข) การรวมกันของเซลล์สืบพันธุ์ D และ d จากรุ่นพ่อแม่

(ค) ลูก F_2 มีจีโนไทป์ DD : Dd : dd ในอัตราส่วน 1 : 2 : 1

(ง) ลูก F_2 มีฟีโนไทป์ ต้นสูง : ต้นเตี้ย ในอัตราส่วน 3 : 1

การผสมพันธุ์ระหว่างถั่วต้นสูงและถั่วต้นเตี้ยนี้ เป็นการผสมแบบ monohybrid cross ซึ่งหมายถึงการผสมพันธุ์ที่พิจารณาเพียงลักษณะเดียวการเกิดลูก F_2 ในอัตราส่วน 3 : 1 แสดงว่ายีนอยู่กันเป็นคู่จะต้องแยกออกจากกันไปอยู่คนละเซลล์สืบพันธุ์ สมมติฐานดังกล่าวจึงเกิดเป็นกฎการถ่ายทอดทางพันธุกรรมข้อที่หนึ่งของเมนเดลที่รู้จักกันคือ **กฎแห่งการแยก (Law of Segregation)** ที่มีใจความว่า ยีนที่อยู่กันเป็นคู่จะแยกออกจากกันไปเข้าสู่คนละเซลล์สืบพันธุ์

ในทางชีววิทยาจะเห็นว่ากฎข้อที่ 1 ของเมนเดลหรือกฎแห่งการแยกนั้นสอดคล้องกับกระบวนการแยกตัวของโครโมโซมในการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส (meiosis) ซึ่งการแบ่งเซลล์จากเซลล์ตั้งต้นซึ่งมีจำนวนโครโมโซม 2 ชุด (2 n) ได้เซลล์ลูกที่มีโครโมโซมเพียง 1 ชุด (n) หรือ haploid cell โดยประกอบด้วย 2 ระยะ ได้แก่ meiosis I และ meiosis II

กฎแห่งการแยกของเมนเดลจะสอดคล้องกับการแยกออกจากกันของโครโมโซมคู่เหมือน (homologous chromosome) ยีนที่อยู่กันเป็นคู่บนโครโมโซมจะแยกออกจากกันในแอนนาเฟส ระยะแรก (anaphase I) และเมื่อถึงระยะ meiosis II จะเป็นเพียงการแยกออกจากกันของ sister chromatid ในระยะแอนนาเฟส ระยะที่สอง (anaphase II) เมื่อสิ้นสุดการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสจะได้เซลล์ใหม่ 4 เซลล์ ซึ่งมีจำนวนโครโมโซม 1 ชุด และแต่ละเซลล์จะมีข้อมูลทางพันธุกรรมที่แตกต่างกัน

เมื่อโครโมโซมคู่เหมือนที่มีแอลลีล *A* และแอลลีล *a* มาเข้าคู่กันแล้วในระยะ prophase I และ ข เมื่อเข้าสู่ระยะ anaphase I โครโมโซมคู่เหมือนนี้จะแยกออกจากกัน เป็นผลให้แอลลีล *A* และแอลลีล *a* แยกออกจากกันดังแผนภาพ

A ⟸ ***Aa*** ⟹ ***a***

เมื่อสิ้นสุด meiosis I ก่อนเริ่มเข้าสู่ meiosis II แอลลีล *A* และแอลลีล *a* จะอยู่ต่างเซลล์กัน และเมื่อสิ้นสุด meiosis II จะได้เซลล์ 4 เซลล์ ที่เป็นแอลลีล *A* จำนวน 2 เซลล์ และแอลลีล *a* จำนวน 2 เซลล์ เนื่องจากในระยะ anaphase II จะเป็นการแยกออกจากกันของ sister chromatid

ความน่าจะเป็น (Probability)

ความน่าจะเป็น หมายถึง โอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ใดเหตุการณ์หนึ่งจากเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมด กฎของความน่าจะเป็นสามารถนามาใช้อธิบายหรือหาความน่าจะเป็นของการเกิดลูกแบบต่างๆ จากคู่ผสมพันธุ์ ซึ่งกฎของความน่าจะเป็นที่นามาใช้มี 2 ข้อ คือ

ข้อที่ 1 กฎการบวก (Addition Law)

กฎการบวก คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์หนึ่งหรืออีกเหตุการณ์หนึ่งเท่ากับผลบวกของความน่าจะเป็นของแต่ละเหตุการณ์เมื่อเหตุการณ์ทั้งหมดเป็นอิสระต่อกัน และความน่าจะเป็นของทุกเหตุการณ์รวมกันมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ ดังนั้น กฎข้อนี้จะใช้กับเหตุการณ์ที่ไม่สามารถเกิดขึ้นพร้อมกันได้ ซึ่งจะสังเกตได้จากคำถามมักจะใช้คำว่า **"หรือ"** ตัวอย่างเช่น การโยนเหรียญ 1 เหรียญ มีโอกาสในการเกิดขึ้นได้เพียง 2 เหตุการณ์ คือ เหรียญออกหัว หรือออกก้อย ดังนั้นความน่าจะเป็นที่เหรียญออกหัวเท่ากับ ½ หรือออกก้อยเท่ากับ ½ โดยที่เหตุการณ์ทั้งสองอย่างนี้จะเกิดขึ้นพร้อมกันไม่ได้

ดังนั้น โอกาสที่จะเกิดหัว หรือ ก้อย = 1/2 + 1/2 = 1

ทำนองเดียวกัน ในการผสมพันธุ์ระหว่าง genotype *Aa* และ *Aa* มีโอกาสที่จะได้ลูกที่มี genotype ได้ 3 แบบ คือ *AA Aa* หรือ *aa* โดยมีความน่าจะเป็นของแต่ละเหตุการณ์ดังนี้

โอกาสที่ลูกมี genotype *AA* = 1/4

โอกาสที่ลูกมี genotype *Aa* = 2/4

โอกาสที่ลูกมี genotype *aa* = 1/4

ดังนั้น หากต้องการถามว่า ในการผสมพันธุ์ระหว่าง genotype *Aa* X *Aa* จงหาโอกาสที่จะได้ลูกที่มี genotype *AA* **หรือ** *Aa* จึงเท่ากับ

= โอกาสที่ลูกมี genotype *AA* + โอกาสที่ลูกมี genotype *Aa*

= 1/4 + 2/4

= 3/4

นั่นคือ โอกาสที่จะได้ลูกที่มี genotype *AA* **หรือ** *Aa* จึงเท่ากับ 3/4

ข้อที่ 2 กฎการคูณ (Multiplication Law)

กฎการคูณ คือความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์หลายเหตุการณ์พร้อมๆ กันมีค่าเท่ากับ ผลคูณของแต่ละเหตุการณ์ เมื่อแต่ละเหตุการณ์เป็นอิสระต่อกัน จะสังเกตเห็นว่าส่วนใหญ่มักมีคาว่า **"และ"** ในคำถามตัวอย่างเช่น เมื่อทดลองโยนเหรียญ 1 เหรียญ

โอกาสที่เหรียญจะออกหัว = 1/2

โอกาสที่เหรียญจะออกก้อย = 1/2

ดังนั้น เมื่อทดลองโยนเหรียญ 1 เหรียญ จำนวน 2 ครั้ง

โอกาสที่ครั้งที่ 1 เหรียญออกหัว และ ครั้งที่ 2 เหรียญออกหัว = 1/2 × 1/2 = 1/4

โอกาสที่ครั้งที่ 1 เหรียญออกหัว และ ครั้งที่ 2 เหรียญออกก้อย = 1/2 × 1/2 = 1/4

โอกาสที่ครั้งที่ 1 เหรียญออกก้อย และ ครั้งที่ 2 เหรียญออกหัว = 1/2 × 1/2 = 1/4

โอกาสที่ครั้งที่ 1 เหรียญออกก้อย และ ครั้งที่ 2 เหรียญออกก้อย = 1/2 × 1/2 = 1/4

เช่นเดียวกับกรณีที่เมื่อโยนเหรียญ 2 เหรียญพร้อมๆ กัน มีโอกาสที่จะเกิดขึ้นได้ทั้งหมด 4 เหตุการณ์ คือ หัวหัว หัวก้อย ก้อยหัว ก้อยก้อย ดังนั้น

โอกาสที่เหรียญออก หัวและหัว = 1/2 × 1/2 = 1/4

โอกาสที่เหรียญออก หัวและก้อย = 1/2 × 1/2 = 1/4

โอกาสที่เหรียญออก ก้อยและหัว = 1/2 × 1/2 = 1/4

โอกาสที่เหรียญออก ก้อยและก้อย = 1/2 × 1/2 = 1/4

ในที่นี้จะถือว่าเหตุการณ์ที่ออกหัวและก้อย กับ เหตุการณ์ที่ออกก้อยและหัว เป็นรูปแบบเดียวกัน คือออกหัว 1 และออกก้อย 1 เพราะฉะนั้นจะสรุปได้ว่า

เหตุการณ์ หัวหัว : (หัวก้อย + ก้อยหัว) : ก้อยก้อย

โอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ (1/2)(1/2) : [(1/2)(1/2) + (1/2)(1/2)] : (1/2)(1/2)

1/4 : (1/4 + 1/4) : 1/4

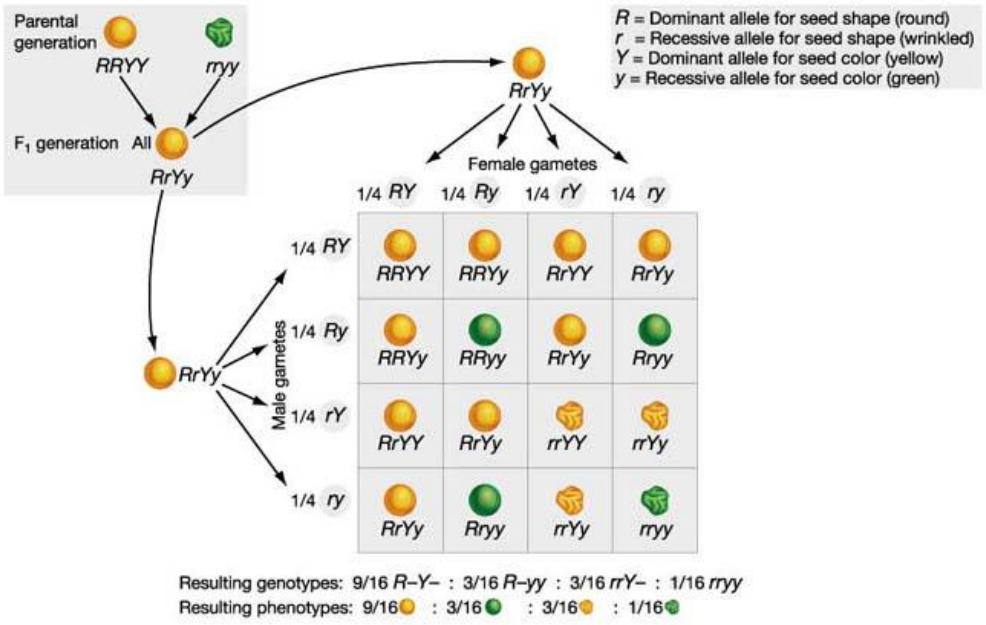
1/4 : 2/4 : 1/4

อัตราส่วน 1 : 2 : 1

จะเห็นว่าอัตราส่วนนี้ตรงกับอัตราส่วนของ genotype ของลูก F2 ในการผสมแบบ monohybrid cross สมมุติว่าโยนเหรียญที่ด้านหนึ่งของเหรียญเป็น *D* ที่ควบคุมลักษณะต้นสูง ในขณะที่เหรียญอีกด้านเป็น *d* ที่ควบคุมลักษณะต้นเตี้ยจะได้อัตราส่วนของลูก F2 เท่ากับ 1/4 *DD* : 2/4 *Dd* : 1/4 *dd* (ที่มาของตัวเลขอัตราส่วน 1/4 *DD* และ 1/4 *dd* มาจากกฎการคูณ ในขณะที่ตัวเลข 2/4 *Dd* มาจากกฎการคูณและกฎการบวก) จาก genotype ของลูก F2 จะแสดง phenotype เป็น ต้นสูง : ต้นเตี้ย ในอัตราส่วน 3 : 1 โดยที่เป็นการใช้กฎการบวกของ 1/4 *DD* + 2/4 *Dd* เท่ากับ 3/4 *D* - เส้นขีดหลัง *D* นั้นในความหมายทางพันธุศาสตร์หมายความว่า ณ ตำแหน่งนั้นเป็นได้ทั้ง เด่นและด้อย หรือ *D* หรือ *d* จึงเป็นที่มาของอัตราส่วน phenotype ต้นสูง : ต้นเตี้ย = 3 : 1 หรือ 3/4 *D*- : 1/4 *dd* นั่นเอง

ในการผสมพันธุ์ที่พิจารณาพร้อมกันสองลักษณะ หรือ **dihybrid cross** เช่น การผสมพันธุ์ระหว่างต้นถั่วที่มีเมล็ดกลมและสีเหลือง กับ ต้นถั่วที่มีเมล็ดย่นและสีเขียว สมมุติว่าถั่วต้นพ่อแม่พันธุ์ ที่ฝ่ายหนึ่งมีเมล็ดกลมสีเหลือง มี genotype *RRYY* และอีกฝ่ายหนึ่งมีเมล็ดย่นสีเขียว มี genotype *rryy* ซึ่งในการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ของถั่วต้น ที่มี genotype *RRYY* จะสามารถสร้างเซลล์สืบพันธุ์ ได้เป็น *RY* เพียงรูปแบบเดียว ในขณะที่ถั่วต้นที่มี genotype *rryy* ก็จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ ได้เป็น *ry* เพียงแบบเดียว เช่นกัน ซึ่งจะส่งผลให้ลูก F_1 จะมี genotype เป็น heterozygous ของยีน 2 ตำแหน่ง คือ *RrYy* เรียกว่า **ลูกผสมสองลักษณะ** หรือ **dihybrid** ที่มีลักษณะเมล็ดกลมสีเหลืองทั้งหมด และหลังจากนั้นเมื่อปล่อยให้ลูกรุ่น F_1 ผสมตัวเองลูก F_1 จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้ 4 แบบ คือ *RY* : *Ry* : *rY* : *ry* ในสัดส่วนเท่าๆ กัน คือ 1 : 1 : 1 : 1

genotype และ phenotype ของ F_2 สามารถหาได้โดยการสร้างตาราง Punnett square (รูปที่ 3) ดังนี้



รูปที่ 3 การหาgenotype และ phenotype ของลูก F_2 โดยการสร้างตาราง Punnett square

จะเห็นได้ว่า เซลล์สืบพันธุ์ของฝ่ายหนึ่งในทุกแบบมีโอกาสที่จะปฏิสนธิกับเซลล์สืบพันธุ์ของอีกฝ่ายหนึ่งได้ทุกแบบและเมื่อรวมจำนวนลักษณะที่แสดงออกเหมือนกันสรุปรวมเป็นอัตราส่วน phenotype เท่ากับ เมล็ดกลมสีเหลือง : เมล็ดกลมสีเขียว : เมล็ดย่นสีเหลือง : เมล็ดย่นสีเขียว เท่ากับ 9 : 3 : 3 : 1 ดังรูปที่ 4

นอกจากนี้เพื่อให้ง่ายในการทำความเข้าใจ ยังมีอีกแนวทางหนึ่งที่จะสามารถวิเคราะห์ผลของการผสมพันธุ์แบบ dihybrid cross โดยการแยกพิจารณาทีละลักษณะแบบ monohybrid cross ดังนี้ ลักษณะที่ 1 คือ ลักษณะรูปร่างเมล็ด เช่น รุ่นพ่อแม่มีเมล็ดกลมผสมกับเมล็ดย่น ได้ลูกรุ่น F_1 ที่มีรูปร่างเมล็ดกลมทั้งหมด และเมื่อปล่อยให้ F_1 ผสมตัวเองก็จะได้ลูก F_2 ซึ่งมีสัดส่วนเมล็ดกลมเท่ากับ ¾ และเมล็ดย่นเท่ากับ ¼ ดังนั้น อัตราส่วนระหว่างเมล็ดกลม ต่อ เมล็ดย่น จึงเท่ากับ 3 : 1

Phenotype	Genotype	Genotypic ratio	Phenotypic ratio
เมล็ดกลม สีเหลือง	RRYY	1	9
	RRYy, RRYy	2	
	RrYY, RrYY	2	
	RrYy, RrYy, RrYy, RrYy	4	
เมล็ดกลม สีเขียว	RRyy	1	3
	Rryy, Rryy	2	
เมล็ดย่น สีเหลือง	rrYY	1	3
	rrYy, rrYy	2	
เมล็ดย่น สีเขียว	rryy	1	1

รูปที่ 4 genotype และ phenotype พร้อมทั้งอัตราส่วนของ F_2 จากการผสมแบบ dihybrid cross

เช่นเดียวกันกับอีกลักษณะหนึ่งที่พ่อแม่มีเมล็ดสีเหลืองผสมพันธุ์กับเมล็ดสีเขียว ได้ลูกรุ่น F_1 เป็นเมล็ดสีเหลืองทั้งหมด และเมื่อปล่อยให้ F_1 ผสมตัวเองก็จะได้ลูกรุ่น F_2 มีสัดส่วนเมล็ดสีเหลือง เท่ากับ ¾ และเมล็ดสีเขียวเท่ากับ ¼ ก็จะได้สัดส่วนระหว่าง เมล็ดสีเหลืองต่อเมล็ดสีเขียว เท่ากับ 3 : 1 เช่นกัน

เมื่อพิจารณาพร้อมกันสองลักษณะ โดยการนำผลของทั้งสองลักษณะมาคูณกัน อัตราส่วนเมล็ดกลมสีเหลือง : เมล็ดกลมสีเขียว : เมล็ดย่นสีเหลือง : เมล็ดย่นสีเขียว เท่ากับ 9 : 3 : 3 : 1 ซึ่งเท่ากับการรวมกันของสอง

monohybrid คือ $(3 + 1)^2$ จะเท่ากับ 9 + 3 + 3 + 1 หรือโอกาสที่สองเหตุการณ์ที่ไม่ขึ้นแก่กัน จะมีโอกาสเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน จะมีค่าเท่ากับผลคูณของโอกาสที่จะเกิดแต่ละเหตุการณ์ตามกฎของการคูณ

เมื่อผลการศึกษาการผสมพันธุ์สองลักษณะออกมาดังนี้ แสดงว่าคู่ของแอลลีลของยีนที่ควบคุมลักษณะเมล็ดเมื่อแยกออกจากกันไปรวมกลุ่มกับคู่ของแอลลีลที่ควบคุมลักษณะสีเมล็ดที่แยกออกจากกันเช่นกันอย่างเป็นอิสระ เมนเดลจึงได้นำเสนอกฎการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมข้อที่ 2 ซึ่งมีชื่อว่า **กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ (law of independent assortment)** ซึ่งมีใจความว่า "คู่ของแอลลีลของยีนหนึ่งจะแยกออกจากกันไปรวมกลุ่มอย่างอิสระกับอีกแอลลีลหนึ่งของยีนอีกคู่หนึ่งที่แยกออกจากกัน" ซึ่งจากกฎข้อที่ 1 ของเมนเดลกล่าวว่ายีนจะอยู่กันเป็นคู่ และจะแยกออกจากกันไปยังเซลล์แต่ละเซลล์สืบพันธุ์ ในขณะที่กฎข้อ 2 ก็กล่าวว่าแต่ละแอลลีลของแต่ละคู่ยีนนั้นจะเข้ารวมกลุ่มกับอีกแอลลีลของอีกคู่ยีนเป็นไปอย่างอิสระ ดังนั้นจึงสามารถสร้างเซลล์สืบพันธุ์ของลูก F_1 ที่มี genotype *RrYy* โดยแอลลีล *R* กับ *r* แยกออกจากกัน ในขณะที่อีกคู่คือแอลลีล *Y* ก็จะแยกออกจาก *y* เช่นกัน และ *R* ก็จะไปเข้าคู่ได้ทั้งกับ *Y* และ *y* เช่นเดียวกันกับ *r* ก็จะไปเข้าคู่ได้ทั้งกับ *Y* และ *y* เช่นเดียวกันจึงได้เซลล์สืบพันธุ์ 4 แบบ คือ *RY Ry rY ry* ในสัดส่วนเท่าๆ กัน

ความสัมพันธ์ระหว่างกฎข้อที่ 2 ของเมนเดลและการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส

จากการศึกษาเรื่องกฎข้อที่ 2 ของเมนเดลนี้ ถ้าเรามองในแง่มุมทางชีววิทยาเช่นเดียวกับกฎข้อที่ 1 ของเมนเดลจะเห็นว่า กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระนี้ สอดคล้องกับกระบวนการแบ่งไมโอซิส ด้วยเช่นกัน คือ ในระยะ anaphase I โครโมโซมคู่เหมือนที่แยกออกจากกัน จะสามารถเข้าสู่ขั้วเซลล์โดยสุ่ม ขึ้นกับ centromere จะหันไปทางขั้วใด ยกตัวอย่างเช่น โครโมโซมคู่ที่ 1 แท่งสีเหลือง ที่มียีน *A* อยู่นั้น อาจแยกไปกับ โครโมโซมคู่ที่ 2 แท่งสีเหลือง ที่มียีน *B* หรืออาจแยกไปด้วยกันกับโครโมโซมแท่งสีเขียว ที่มียีน *b* อยู่ เป็นต้น ดังนั้น จึงมีโอกาสได้เซลล์สืบพันธุ์ 4 แบบ คือ *AB ab Ab* และ *aB* ในสัดส่วนเท่าๆ กัน คือ 1 : 1 : 1 : 1

การประยุกต์ใช้กฎของเมนเดล

การหาชนิดและอัตราส่วนของเซลล์สืบพันธุ์

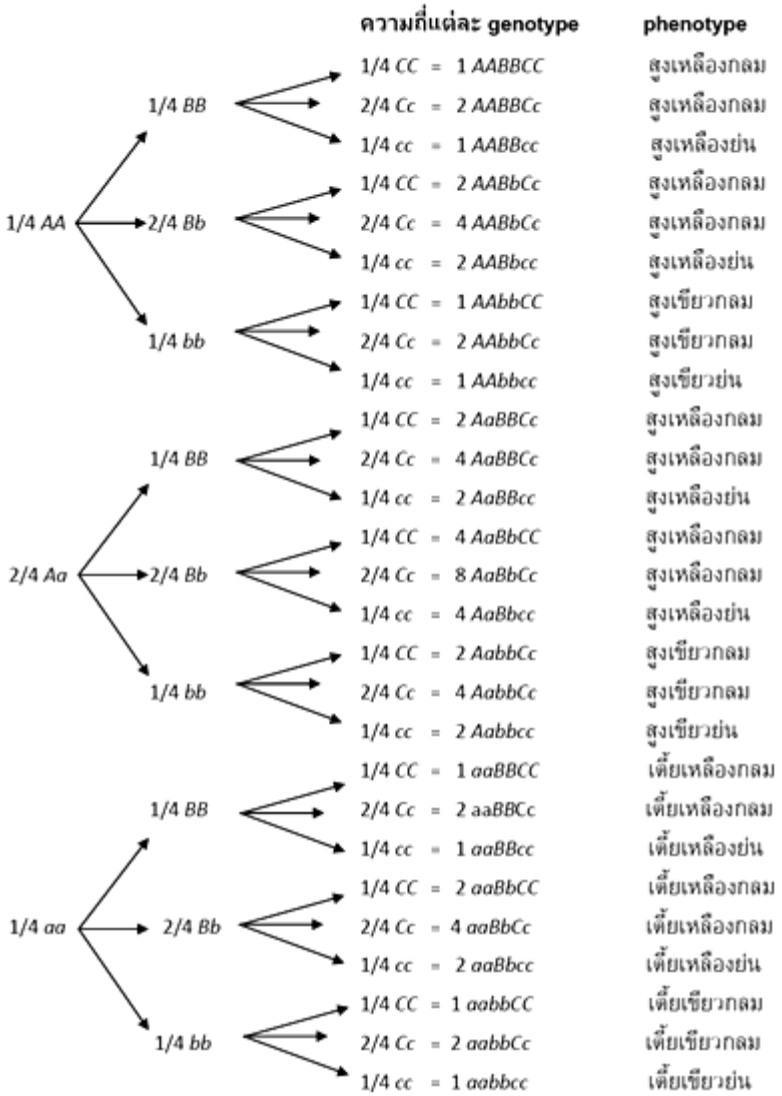
เมื่อผู้เรียนได้เข้าใจกฎเกณฑ์การถ่ายทอดทางพันธุกรรมตามกฎของเมนเดลแล้ว จากหลักการนี้สามารถนำมาดัดแปลงใช้กับการหาผลลัพธ์ของการผสมพันธุ์ในรูปแบบต่าง ๆ ได้ เช่น ในกรณีที่มียีน 3 คู่ สมมติว่าเป็น AABbCc การหาเซลล์สืบพันธุ์ก็จะใช้หลักการเดียวกันโดยการทำ **branching** คือ ยีนคู่ AA จะแยกออกได้รูปแบบเดียวคือ A ซึ่งจะไปรวมกลุ่มได้ทั้ง B และ b เช่นเดียวกับ คู่ A และ B ก็จะสามารถไปรวมกลุ่มได้ทั้ง C และ c เพราะฉะนั้น AABbCc สร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้ 4 แบบ คือ ABC ABc AbC Abc ในสัดส่วนเท่าๆ กัน

การคำนวณหาอัตราส่วน genotype และ phenotype

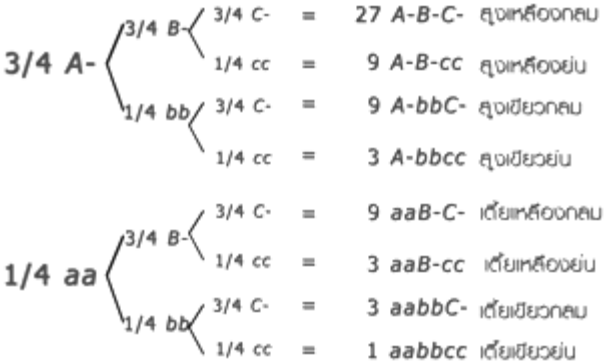
ในการคำนวณหาอัตราส่วน genotype และ phenotype สามารถทำได้ด้วยการพิจารณาที่ละลักษณะ ตัวอย่างเช่น การผสมพันธุ์ระหว่าง *AABBCC* กับ *aabbcc* ลูก F_1 ที่ได้คือ *AaBbCc* เมื่อนำลูก F_1 ผสมกันเอง ก็จะมี 3 คู่ monohybrid cross คือ คู่ของ *Aa* กับ *Aa* ก็จะได้ genotype 1/4 *AA* : 2/4 *Aa* : 1/4 *aa* และ phenotype

3 *A* - : 1 *aa* คู่ของ *Bb* กับ *Bb* จะได้ genotype 1/4 *BB* : 2/4 *Bb* : 1/4 *bb* และ phenotype 3 *B* - : 1 *bb* คู่ของ *Cc* กับ *Cc* จะได้ genotype 1/4 *CC* : 2/4 *Cc* : 1/4 *cc* และ phenotype 3 *C* - : 1 *cc* โดยที่ในตำแหน่งของ phenotype ที่มีการขีดเส้นไว้นั้นหมายถึงเป็นได้ทั้ง dominant gene หรือ recessive gene

หากกำหนดให้ยีน *A* ควบคุมต้นสูง ยีน *a* ควบคุมต้นเตี้ย ยีน *B* ควบคุมเมล็ดสีเหลือง ยีน *b* ควบคุมเมล็ดสีเขียว ยีน *C* ควบคุมเมล็ดกลม และยีน *c* ควบคุมเมล็ดย่น เมื่อนา monohybrid cross ของยีนทั้ง 3 คู่นี้จากรูปที่ 10 11 และ 12 มาหาความถี่ของแต่ละ genotype และ phenotype โดยวิธี **branching** หรือ **foke line** ได้ดังนี้



หากต้องการทราบเฉพาะอัตราส่วน phenotype โดยไม่ต้องการทราบอัตราส่วน genotype สามารถทำได้ด้วยวิธีการนี้ เช่นกันคือนำเฉพาะอัตราส่วน phenotype มาทำ branching ดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะทำให้ใช้ระยะเวลาน้อยลงได้พอสมควร ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 genotype และ phenotype พร้อมทั้งอัตราส่วนของ F_2 จากการผสมแบบ dihybrid cross

ที่มา

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2554. **หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติม ชีววิทยา เล่ม 3**. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ สกสค. กรุงเทพฯ.

http://courseware.sc.chula.ac.th/online/

http://faculty.uca.edu/johnc/mendel1440.htm

คำถาม

1. เหตุผลหรือองค์ประกอบที่สำคัญที่ทำให้การศึกษาของเมนเดลที่เกี่ยวกับการถ่าย ทอดลักษณะทางพันธุกรรมของต้นถั่วประสบความสำเร็จ คืออะไร
2. แสดงวิธีการหาอัตราส่วน genotype และอัตราส่วน phenotype โดยการหาจากยีนที่ละคู่ จากการผสมพันธุ์ระหว่าง *AaBb* X *AaBb*
3. แสดงวิธีการหาอัตราส่วน genotype ที่ได้ โดยวิธีที่ย่อเฉพาะอัตราส่วน phenotype จากการผสมพันธุ์ระหว่าง *AaBb* X *AaBb*
4. ในการผสมพันธุ์หนูที่มีขนสีดำคู่หนึ่งได้ลูกเป็น ขนสีดำ 18 ตัว ขนสีขาว 6 ตัว จงหาว่าลักษณะสีขนของหนู ลักษณะใดเป็นลักษณะเด่น ลักษณะใดเป็นลักษณะด้อย และลูก F_2 จะมี genotype และ phenotype เป็นอย่างไร ในอัตราส่วนเท่าใด
5. จงหาโอกาสที่จะเป็นไปได้ทั้งหมดที่ครอบครัวหนึ่งจะมีลูกสามคน เป็นลูกชาย 2 คน ลูกหญิง 1 คน
6. ในการผสมพันธุ์พืชระหว่างพืชที่มีลักษณะ dominant ลูกที่ได้มีลักษณะเป็นด้อย จงหาว่าพืชที่เป็น dominant จะมี genotype เป็นแบบใด
7. สิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่ง มีจีโนไทป์ AaBbCc จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ที่มียีนต่างกันได้กี่แบบ
8. ถ้าผสมถั่วเล็ดเรียบสีเหลืองที่เป็น homozygous dominance กับถั่วเมล็ดขรุขระสีเขียวที่เป็น homozygous recessive จะได้ลูก F_1 ถ้านำ F_1 ผสมกันเอง จงหา F_2 genotype และ F_2 phenotype
9. สิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่งมี genotype เป็น MmNnOoPPQq
   - สร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้กี่ชนิด อะไรบ้าง
   - สิ่งมีชีวิตชนิดนี้เมื่อผสมตัวเองได้ genotype และ phenotype กี่แบบ
   - สิ่งมีชีวิตชนิดนี้เมื่อผสมตัวเองได้ลูกผสมที่เป็น homozygous dominance กี่เปอร์เซ็นต์
10. จากการผสมพันธุ์พืชคู่หนึ่ง ได้ลูก F_1 ที่มี genotype AaBbCc อยากทราบว่าเมื่อให้ลูก F_1 ผสมตัวเอง ลูก F_2 ที่มี genotype AABbCc จะมีอัตราส่วนเท่าไร