

ชีววิทยา

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4

ตามผลการเรียนรู้ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560)
ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551



ผู้เรียบเรียง

ผศ. ดร.เหิร วีระวงษ์
ดร.ชลันท์ เฟื่องสุข
นายเอกรัฐ วงศ์สวัสดิ์

ผู้ตรวจ

ดร.นำชัย ชีววิวรรจน์
ผศ. ดร.ปิวย อุ๋นใจ
ผศ. ดร.ศศิวิมล แสงผล

บรรณาธิการ

ผศ. ดร.น้ำค้าง ศรีวัฒนาโรทัย
นางสาววราภรณ์ นีระพันธ์

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติ

ปีที่พิมพ์ 2567

พิมพ์ครั้งที่ 1

จำนวนพิมพ์ 20,000 เล่ม

ISBN : 978-616-606-065-2

รหัสสินค้า 3418024

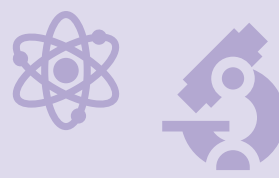
อักษ
www.aksorn.com

จัดพิมพ์และจำหน่ายทั่วประเทศโดย
บริษัท อักษรเจริญทัศน์ อจก. จำกัด
142 ถนนตะนาว เขตพระนคร กรุงเทพมหานคร 10200
โทร. 0 2622 2999 (อัตโนมัติ 20 คู่สาย)
พิมพ์ที่: **บริษัท ไทยรับกล้ำ จำกัด** โทร. 0 2903 9101-6





คำแนะนำในการใช้สื่อ



หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ชีววิทยา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 เล่ม 2 จัดทำขึ้นสำหรับใช้ประกอบการเรียนการสอน ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 โดยดำเนินการจัดทำให้สอดคล้องตามผลการเรียนรู้ในสาระการเรียนรู้เพิ่มเติม กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551 ส่งเสริมการจัดการเรียนรู้เชิงรุก (Active Learning) และทักษะที่จำเป็นสำหรับการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21 เพื่อให้ผู้เรียนรู้เท่าทันการเปลี่ยนแปลงของระบบเศรษฐกิจ สังคม วัฒนธรรม และสภาพแวดล้อม สามารถแข่งขันและอยู่ร่วมกับประชาคมโลกได้

เราจะทราบได้อย่างไรว่า สิ่งใดเป็นสิ่งมีชีวิต

Big Question

คำถามกระตุ้นการเรียนรู้
ก่อนเข้าสู่เนื้อหา เพื่อให้เกิด
กระบวนการสืบเสาะหาความรู้

Check for Understanding

คำถามตรวจสอบความเข้าใจของผู้เรียน
ก่อนเข้าสู่การเรียนการสอน

Prior Knowledge
สิ่งมีชีวิตต่างจาก
สิ่งไม่มีชีวิตอย่างไร

คำถามทบทวนความรู้เดิม
ของผู้เรียน เพื่อเชื่อมโยงสู่
ความรู้ใหม่

กิจกรรม

กิจกรรมให้ผู้เรียนฝึกปฏิบัติเพื่อ
เสริมสร้างทักษะทางวิทยาศาสตร์

Self Check

คำถามเพื่อให้ผู้เรียนตรวจสอบ
ความรู้ ความเข้าใจด้วยตนเอง

แนวข้อสอบ A-Level
แนวข้อสอบเพื่อเข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษา

Summary

สรุปเนื้อหาเพื่อให้ผู้เรียนได้ทบทวนสาระสำคัญ
ประจำหน่วยการเรียนรู้

Unit questions 4

แบบฝึกหัดประจำหน่วยการเรียนรู้ เพื่อใช้
ประเมินผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

กิจกรรม การเรียนรู้เชิงรุก (Active Learning)
กิจกรรมที่เน้นให้ผู้เรียนได้ลงมือ
ปฏิบัติจริง เพื่อให้เกิดการเรียนรู้
และสร้างองค์ความรู้ด้วยตนเอง



H.O.T.S.

คำถามท้าทายการคิดขั้นสูง

คำถามเพื่อให้ผู้เรียนพัฒนา
การคิดวิเคราะห์ คิดสร้างสรรค์
คิดอย่างมีวิจารณญาณ

Biology Focus

ความรู้เสริมจากเนื้อหา
เพื่อขยายความรู้ของผู้เรียน

Biology in Real Life

เชื่อมโยงความรู้ทาง
ชีววิทยาสู่ชีวิตประจำวัน



QR Code

ใช้สมาร์ทโฟนเพื่อสแกนเพื่อดู
สื่อดิจิทัลเพิ่มเติม



เชื่อมโยงสู่แบบฝึกหัดเพื่อให้ผู้เรียน
ฝึกฝนจนเกิดความเชี่ยวชาญ



คำอธิบายรายวิชาเพิ่มเติม

ชีววิทยา เล่ม 2

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4

กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เวลา 60 ชั่วโมง

ศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายทอดทางพันธุกรรม การศึกษาพันธุศาสตร์ของเมนเดล กฎการแยกและกฎการรวม กลุ่มอย่างอิสระ ลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล ศึกษาเกี่ยวกับยีนและโครโมโซม การค้นพบสารพันธุกรรม โครโมโซม ดีเอ็นเอ สมบัติของสารพันธุกรรม การกลาย ศึกษาเกี่ยวกับพันธุศาสตร์และเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ พันธุวิศวกรรม การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ ความปลอดภัยของเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ และมุมมองทางสังคมและจริยธรรม ศึกษาเกี่ยวกับวิวัฒนาการ หลักฐานที่บ่งบอกถึงวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต แนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต พันธุศาสตร์ประชากร กำเนิดของสปีชีส์

โดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ กระบวนการสืบเสาะหาความรู้ การสืบค้นข้อมูล การสังเกต การวิเคราะห์ การทดลอง การอภิปราย การอธิบาย และการสรุป เพื่อให้เกิดความรู้ ความคิด ความเข้าใจ มีความสามารถในการตัดสินใจ สื่อสารสิ่งที่เรียนรู้และนำความรู้ไปใช้ในชีวิตของตนเอง มีจิตวิทยาศาสตร์ จริยธรรม คุณธรรม และค่านิยม

ผลการเรียนรู้

1. สืบค้นข้อมูล อธิบายและสรุปการทดลองของเมนเดลได้
2. อธิบายและสรุปกฎแห่งการแยกและกฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ และนำกฎของเมนเดลนี้ไปอธิบายการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม และใช้ในการคำนวณโอกาสในการเกิดฟีโนไทป์และจีโนไทป์แบบต่าง ๆ ของรุ่น F_1 และ F_2 ได้
3. สืบค้นข้อมูล วิเคราะห์ อธิบาย และสรุปเกี่ยวกับการถ่ายทอดทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดลได้
4. สืบค้นข้อมูล วิเคราะห์ และเปรียบเทียบลักษณะทางพันธุกรรมที่มีการแปรผันไม่ต่อเนื่องและลักษณะทางพันธุกรรมที่มีการแปรผันต่อเนื่องได้
5. อธิบายการถ่ายทอยีนบนโครโมโซมและยกตัวอย่างลักษณะทางพันธุกรรมที่ถูกควบคุมด้วยยีนบนออโตโซมและยีนบนโครโมโซมเพศได้
6. สืบค้นข้อมูล อธิบายสมบัติและหน้าที่ของสารพันธุกรรม โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของ DNA และสรุปการจำลอง DNA ได้
7. อธิบายและระบุขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีนและหน้าที่ของ DNA และ RNA แต่ละชนิดในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีนได้
8. สรุปความสัมพันธ์ระหว่างสารพันธุกรรม แอลลีล โปรตีน ลักษณะทางพันธุกรรม และเชื่อมโยงความรู้เรื่องพันธุศาสตร์เมนเดลได้
9. สืบค้นข้อมูล และอธิบายการเกิดมิวเทชันระดับยีนและระดับโครโมโซม สาเหตุการเกิดมิวเทชัน รวมทั้งยกตัวอย่างโรคและกลุ่มอาการที่เป็นผลของการเกิดมิวเทชันได้
10. อธิบายหลักการสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมโดยใช้ดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์ได้
11. สืบค้นข้อมูล ยกตัวอย่าง และอภิปรายการนำเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอไปประยุกต์ ทั้งในด้านสิ่งแวดล้อม นิติวิทยาศาสตร์ การแพทย์ การเกษตร และอุตสาหกรรม และข้อควรคำนึงถึงด้านชีวจริยธรรมได้
12. สืบค้นข้อมูลและอธิบายเกี่ยวกับหลักฐานที่สนับสนุนและข้อมูลที่ใช้อธิบายการเกิดวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตได้
13. อธิบายและเปรียบเทียบแนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตของมอง ลามาร์ก และทฤษฎีเกี่ยวกับวิวัฒนาการของชาลส์ ดาร์วินได้
14. ระบุสาระสำคัญและอธิบายเงื่อนไขของภาวะสมดูลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีล พร้อมทั้งคำนวณหาความถี่ของแอลลีลและจีโนไทป์ของประชากรโดยใช้หลักฮาร์ดี-ไวน์เบิร์กได้
15. สืบค้นข้อมูล อภิปราย และอธิบายกระบวนการเกิดสปีชีส์ใหม่ของสิ่งมีชีวิตได้

รวม 15 ผลการเรียนรู้

หน่วยการเรียนรู้ที่ 4



การถ่ายทอดทางพันธุกรรม

2-33

การศึกษาพันธุศาสตร์ของเมนเดล 3

กฎการแยกและกฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระ 8

- กฎการแยก 8
- กฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระ 11

ลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล 14

- ความเด่นไม่สมบูรณ์ 14
- ความเด่นร่วม 16
- มัลติเพิลแอลลีล 16
- ลักษณะที่ควบคุมด้วยยีนหลายคู่ 17
- ยีนบนโครโมโซมเพศ 21
- ยีนบนโครโมโซมเดียวกัน 26
- ลักษณะพันธุกรรมที่ขึ้นกับอิทธิพลเพศ 29
- ลักษณะพันธุกรรมที่แสดงออกเฉพาะเพศใดเพศหนึ่ง 29

Unit questions 4 32

แนวข้อสอบ A-Level 33

หน่วยการเรียนรู้ที่ 5



ยีนและโครโมโซม

34-75

การค้นพบทางพันธุกรรมโครโมโซม 35

โครโมโซม 38

- รูปร่าง ลักษณะ และจำนวนโครโมโซม 38
- ส่วนประกอบของโครโมโซม 41

ดีเอ็นเอ 43

- องค์ประกอบทางเคมีของดีเอ็นเอ 43
- โครงสร้างของดีเอ็นเอ 46

สมบัติของสารพันธุกรรม 48

- การสังเคราะห์ดีเอ็นเอ 48
- การควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมของดีเอ็นเอ 51
- ดีเอ็นเอกับการสังเคราะห์โปรตีน 52

การกลาย 62

- การกลายระดับยีน 62
- การกลายระดับโครโมโซม 66

Unit questions 5 74

แนวข้อสอบ A-Level 75

หน่วยการเรียนรู้ที่ 6



พันธุศาสตร์และเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ

76-97

เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ 77

- การสร้างดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์ 77
- การโคลนดีเอ็นเอ 81
- การสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมโดยใช้ดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์ 84

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ 86

- การประยุกต์ใช้ในเชิงการแพทย์ 86
- การประยุกต์ใช้ในเชิงนิติวิทยาศาสตร์ 89
- การประยุกต์ใช้ในเชิงการเกษตร 96
- การประยุกต์ใช้ในเชิงสิ่งแวดล้อม 91
- การประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม 92

Unit questions 6 97

แนวข้อสอบ A-Level 97

หน่วยการเรียนรู้ที่ 7



วิวัฒนาการ

98-138

หลักฐานและข้อมูลที่ใช้ศึกษาวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต 99

- หลักฐานจากซากดึกดำบรรพ์ของสิ่งมีชีวิต 99
- หลักฐานจากกายวิภาคเปรียบเทียบ 103
- หลักฐานจากวิทยาเอ็มบริโอเปรียบเทียบ 104
- หลักฐานด้านชีววิทยาระดับโมเลกุล 105
- หลักฐานทางชีวภูมิศาสตร์ 106
- หลักฐานสนับสนุนการเกิดวิวัฒนาการของมนุษย์ 107

แนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต 110

- แนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของลามาร์ก 110
- แนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของดาร์วิน 112

พันธุศาสตร์ประชากร 117

- การหาความถี่ของแอลลีลในประชากร 117
- กฎของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก 118
- ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีล 121

กำเนิดของสปีชีส์ 128

- ความหมายของสปีชีส์ 128
- การเกิดสปีชีส์ใหม่ 129

Unit questions 7 137

แนวข้อสอบ A-Level 138

กิจกรรมการเรียนรู้เชิงรุก (Active Learning) 139

บรรณานุกรม 140



? เพราะเหตุใด สิ่งมีชีวิต
ชนิดเดียวกันจึงมีลักษณะ
แตกต่างกัน

4

หน่วยการเรียนรู้ที่

การถ่ายทอดทางพันธุกรรม

หากสังเกตบุคคลในครอบครัว จะเห็นว่าเรามีบางลักษณะที่คล้ายคลึงกับพ่อแม่ พี่น้อง หรือบุคคลต่าง ๆ ในเครือญาติ แต่หากสังเกตผู้คนรอบ ๆ ตัว จะเห็นถึงความแตกต่างและความหลากหลายต่าง ๆ ทั้งลักษณะสีตา สีผิว สีผม ซึ่งลักษณะเหล่านี้ล้วนเกิดจากการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากรุ่นหนึ่งไปสู่อีกรุ่นหนึ่ง ทำให้เกิดการแสดงออกของลักษณะต่าง ๆ ที่เหมือนและแตกต่างกันออกไป

Check for Understanding

พิจารณาข้อความตามความเข้าใจของนักเรียนว่าถูกหรือผิด แล้วบันทึกลงในสมุดบันทึก

1. ยีนทำหน้าที่กำหนดลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต	
2. การแบ่งเซลล์แบบไมโทซิสจะได้เซลล์ใหม่ 2 เซลล์ แต่ละเซลล์จะมีจำนวนโครโมโซมเป็นครึ่งหนึ่งของเซลล์เดิม	
3. ระยะแอนาเฟสของการแบ่งเซลล์เหมาะสำหรับการศึกษาโครงสร้างของโครโมโซมมากที่สุด	บันทึกในสมุด
4. ลักษณะทางพันธุกรรมจะถูกส่งผ่านทางเซลล์สืบพันธุ์ของพ่อและแม่ไปสู่ลูก	
5. ความผิดปกติของยีนบนโครโมโซม X จะพบในเพศชายมากกว่าเพศหญิง	

ถูก/ผิด

Prior Knowledge

บิดาแห่งวิชาพันธุศาสตร์
คือใคร

1 การศึกษาพันธุศาสตร์ของเมนเดล

มนุษย์สามารถสังเกตลักษณะต่าง ๆ ที่ถูกถ่ายทอดจากพ่อแม่ไปสู่ลูกหลานได้มาเป็นเวลายาวนาน เพียงแต่ยังไม่มีความรู้พื้นฐานทางวิทยาศาสตร์เข้ามาสนับสนุน จนกระทั่งการทดลองของเกรเกอร์ โยฮันน์ เมนเดล (Gregor Johann Mendel) นำไปสู่การค้นพบทฤษฎีการถ่ายทอดทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต

เกรเกอร์ โยฮันน์ เมนเดล เป็นชาวออสเตรีย เกิดในปี พ.ศ. 2365 บิดามารดาเป็นชาวน ในวัยเด็กเมนเดลมีความสนใจในการเรียนหนังสือมากจึงได้ไปเรียนที่โบสถ์แห่งหนึ่งในกรุงบรินน์ (Brunn) ซึ่งปัจจุบันคือเมืองเบอร์โน (Brno) ในสาธารณรัฐเช็ก ในเวลาต่อมาเมนเดลได้ไปศึกษาต่อที่มหาวิทยาลัยเวียนนา ประเทศออสเตรีย ทางด้านฟิสิกส์ คณิตศาสตร์ เคมี และพฤกษศาสตร์ หลังจากสำเร็จการศึกษาจึงกลับมาเป็นครูสอนวิทยาศาสตร์ และได้ตัดแปลงที่ดินด้านหลังโบสถ์ให้เป็นแปลงทดลองด้านพฤกษศาสตร์ควบคู่กับงานสอนด้านศาสนา



▲ ภาพที่ 4.1 เกรเกอร์ โยฮันน์ เมนเดล
ที่มา : คลังภาพ อจท.

เมนเดลได้เริ่มศึกษาด้านพันธุศาสตร์ โดยทำการทดลองผสมพันธุ์ถั่วลันเตาและสังเกตลักษณะต่าง ๆ ของถั่วลันเตาที่ถ่ายทอดจากรุ่นหนึ่งไปสู่อีกรุ่นหนึ่ง โดยพบว่าบางลักษณะในรุ่นพ่อแม่จะปรากฏออกมาในรุ่นลูกเสมอ และจากการทดลองในหลาย ๆ รุ่นทำให้เมนเดลค้นพบกฎเกณฑ์สำคัญทางพันธุศาสตร์ และสามารถอธิบายหลักการพื้นฐานของการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตได้ จึงทำให้เมนเดลได้รับการยกย่องให้เป็นบิดาแห่งวิชาพันธุศาสตร์

ในการศึกษาพันธุศาสตร์ เมนเดลเลือกทดลองกับถั่วลันเตา (*Pisum sativum* L.) เนื่องจากมีลักษณะที่เหมาะสมหลายประการ ดังนี้

- ถั่วลันเตาเป็นพืชปลูกง่าย เจริญเติบโตเร็ว และให้เมล็ดจำนวนมาก
- ถั่วลันเตาเป็นพืชที่มีหลายพันธุ์ และมีลักษณะทางพันธุกรรมที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน
- ถั่วลันเตามีดอกประเภทสมบูรณ์เพศ จึงสามารถเกิดการถ่ายเรณูภายในดอกหรือต้นเดียวกัน (self-pollination) หรือเกิดการถ่ายเรณูข้ามต้น (cross-pollination) ได้



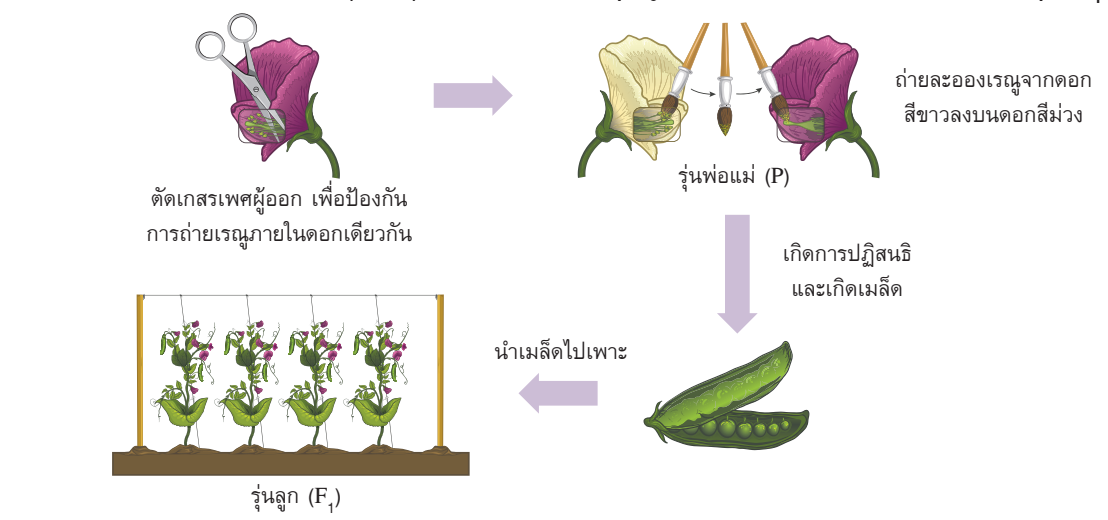
ภาพที่ 4.2 ลักษณะฝักและดอกของถั่วลันเตาที่เมนเดลเลือกมาศึกษา
ที่มา : คลังภาพ อจท.

เมนเดลได้คัดเลือกลักษณะของถั่วลันเตา 7 ลักษณะ (trait) ที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในการทดลองการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม ดังนี้

ตารางที่ 4.1 : เปรียบเทียบถั่วลันเตา 7 ลักษณะที่เมนเดลเลือกมาศึกษา

สีดอก	ตำแหน่งของดอก	สีเมล็ด	ลักษณะของเมล็ด	ลักษณะของฝัก	สีของฝัก	ความสูงของต้น
สีม่วง	กึ่ง	สีเหลือง	กลม	อวบ	สีเขียว	ต้นสูง
สีขาว	ยอด	สีเขียว	ขรุขระ	แฟบ	สีเหลือง	ต้นเตี้ย

เมนเดลผสมพันธุ์ถั่วลันเตา ภายในดอกเดียวกันหลาย ๆ รุ่น จนแน่ใจว่าทุกลักษณะที่เลือกมาศึกษาเป็นพันธุ์แท้ (true-breeding line) คัดเลือกต้นพ่อแม่และต้นแม่ที่มีลักษณะแตกต่างกันอย่างชัดเจนมาผสมกัน โดยพิจารณาการผสมทีละลักษณะ เช่น ลักษณะดอกสีม่วงกับดอกสีขาว โดยต้นถั่วลันเตาที่นำมาผสมกันนี้เรียกว่า **รุ่นพ่อแม่** (parental generation) หรือ **รุ่น P** และต้นถั่วลันเตาต้นใหม่ที่เกิดจากการผสมพันธุ์ของรุ่นพ่อแม่เรียกว่า **รุ่นลูก** (first filial generation) หรือ **รุ่น F₁**



▲ ภาพที่ 4.3 การทดลองผสมพันธุ์ถั่วลันเตาระหว่างดอกสีม่วงกับดอกสีขาวของเมนเดล ที่มา : คลังภาพ อจท.

จากการทดลองข้างต้น เมนเดลเกิดข้อสงสัยว่า “เพราะเหตุใดดอกถั่วลันเตาในรุ่น F₁ จึงมีสีม่วงทั้งหมด และไม่ปรากฏถั่วลันเตาดอกสีขาวออกมา” ซึ่งในเวลาต่อมาเมนเดลทำการทดลองต่อ โดยผสมถั่วลันเตาดอกสีม่วงรุ่น F₁ ภายในดอกเดียวกัน ได้ถั่วลันเตารุ่น F₂ (second filial generation)

แล้วบันทึกผลลักษณะต่าง ๆ ของรุ่น F₂ และหาอัตราส่วนของลักษณะในแต่ละคู่ เช่น ลักษณะสีดอกของถั่วลันเตาในรุ่น F₂ ที่ได้ทั้งหมด 929 ต้น ประกอบด้วยต้นที่มีดอกสีม่วงจำนวน 705 ต้น และดอกสีขาวจำนวน 224 ต้น ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างต้นที่มีดอกสีม่วงต่อดอกสีขาวเป็น 3 : 1 โดยประมาณ

ตารางที่ 4.2 : ผลการผสมพันธุ์ถั่วลันเตาพันธุ์แท้ที่รุ่นพ่อแม่มีลักษณะที่แตกต่างกัน

ลักษณะ	รุ่นพ่อแม่ (P)	ลักษณะรุ่น F ₁	ลักษณะรุ่น F ₂ และจำนวนต้น		อัตราส่วนของลักษณะในรุ่น F ₂
ความสูงของต้น	สูง เตี้ย	สูงทั้งหมด	สูง 787	เตี้ย 277	2.84 : 1
รูปร่างของฝัก	อวบ แฟบ	อวบทั้งหมด	อวบ 882	แฟบ 299	2.95 : 1
รูปร่างของเมล็ด	กลม ขรุขระ	กลมทั้งหมด	กลม 5,474	ขรุขระ 1,850	2.96 : 1
สีเมล็ด	เหลือง เขียว	เหลืองทั้งหมด	เหลือง 6,022	เขียว 2,001	3.01 : 1
ตำแหน่งของดอก	ดอกที่กึ่ง ดอกที่ยอด	ดอกที่กึ่งทั้งหมด	ดอกที่กึ่ง 651	ดอกที่ยอด 207	3.14 : 1
สีของดอก	ม่วง ขาว	ม่วงทั้งหมด	ม่วง 705	ขาว 224	3.15 : 1
สีของฝัก	เขียว เหลือง	เขียวทั้งหมด	เขียว 428	เหลือง 152	2.82 : 1

จากตาราง พบว่า อัตราส่วนรุ่น F_2 ของทุกลักษณะจะใกล้เคียงกันที่ 3 : 1 เมเนเดลจึงสรุปว่าการถ่ายทอดลักษณะของถั่วลันเตาต้องมีหน่วยควบคุมหรือแฟกเตอร์ (factor) ที่ทำหน้าที่ควบคุมและถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม โดยแฟกเตอร์จะปรากฏเป็นคู่ๆ ในรุ่นพ่อแม่และถ่ายทอดไปยังรุ่นลูก ซึ่งจะปรากฏเป็นคู่ๆ เช่นกัน เช่น รุ่นพ่อแม่ มีแฟกเตอร์ดอกสีม่วง 1 คู่ และดอกสีขาว 1 คู่ เมื่อผสมพันธุ์ได้รุ่นลูก F_1 จะปรากฏแฟกเตอร์ 1 คู่ ประกอบด้วย แฟกเตอร์ดอกสีม่วง 1 แฟกเตอร์และดอกสีขาว 1 แฟกเตอร์ แต่ลักษณะที่แสดงออกมาเป็นแฟกเตอร์ดอกสีม่วงเท่านั้น เนื่องจากจะมีเพียงลักษณะเดียวของแฟกเตอร์ใดแฟกเตอร์หนึ่งเท่านั้นที่ปรากฏออกมา โดยลักษณะที่แสดงออกมาในรุ่น F_1 จะเป็นลักษณะเด่น (dominant trait) และลักษณะที่ไม่แสดงออกในรุ่น F_1 แต่จะแสดงออกในรุ่น F_2 จะเป็นลักษณะด้อย (recessive trait) ดังนั้น การปรากฏลักษณะดอกสีขาวในรุ่น F_2 จึงเป็นหลักฐานว่าแฟกเตอร์ที่ถ่ายทอดทางพันธุกรรมของดอกสีขาวไม่ได้หายหรือถูกทำลายลงในรุ่น F_1 แต่ถูกซ่อนไม่ให้แสดงออกเมื่อปรากฏพร้อมกับแฟกเตอร์ที่ถ่ายทอดทางพันธุกรรมของดอกสีม่วง รวมทั้งผลการทดลองของลักษณะอื่นก็ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน

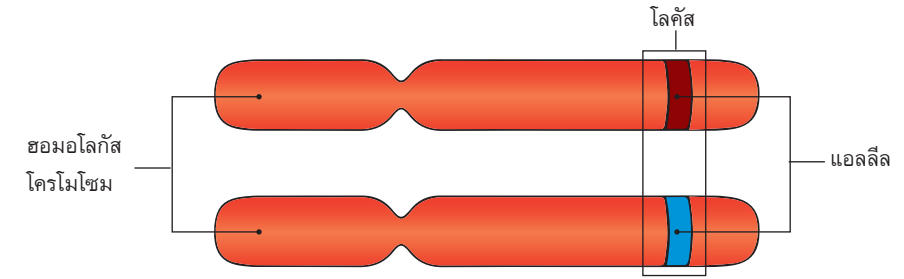
ภายหลังการทดลองของเมเนเดล มีนักวิทยาศาสตร์อีกหลายท่านศึกษาเพิ่มเติม และในปี พ.ศ. 2452 วิลเฮล์ม โจแฮนเซน (Wilhelm Johansen) นักพฤกษศาสตร์ชาวเดนมาร์กได้เปลี่ยนคำว่าแฟกเตอร์มาใช้คำว่า ยีน (gene) ซึ่งเป็นตำแหน่งของหน่วยพันธุกรรม และมีรูปแบบของยีนที่กำหนดลักษณะ เรียกว่า แอลลีล (allele) โดยเรียกแอลลีลที่ควบคุมลักษณะเด่นว่า แอลลีลเด่น (dominant allele) และแอลลีลที่ควบคุมลักษณะด้อยว่า แอลลีลด้อย (recessive allele) โดยลักษณะที่ถูกควบคุมด้วยแอลลีลด้อยจะไม่แสดงออกเมื่อคู่กับแอลลีลเด่น เช่น ลักษณะดอกถั่วลันเตาในรุ่น F_1 จะแสดงออกเพียงลักษณะดอกสีม่วงเท่านั้น จะไม่แสดงลักษณะดอกสีขาวออกมา แม้จะมีแอลลีลควบคุมลักษณะดอกสีขาวก็ตาม เนื่องจากแอลลีลควบคุมลักษณะดอกสีม่วงเป็นแอลลีลเด่น จึงข่มแอลลีลควบคุมลักษณะดอกสีขาวที่เป็นแอลลีลด้อย

สิ่งมีชีวิตมียีนควบคุมลักษณะต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก เช่น มนุษย์มีโครโมโซม 46 แท่ง แต่มียีนมากถึง 25,000 ยีน แสดงว่าโครโมโซม 1 แท่งจะมียีนปรากฏอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งการควบคุมลักษณะใดลักษณะหนึ่งมักมียีนควบคุมเป็นคู่ โดยยีนที่เข้าคู่กันจะปรากฏบนโครโมโซมที่เป็นคู่กันและมีลักษณะเหมือนกัน เรียกโครโมโซมที่เป็นคู่กันว่า โฮโมโลกัสโครโมโซม (homologous chromosome) และจะมีตำแหน่งของยีนที่มีแอลลีลอยู่ในสภาพเป็นคู่กันบนโครโมโซม และตำแหน่งของยีนจะเรียกว่า โลคัส (locus พหูพจน์ loci)

H.O.T.S.

คำถามท้าทายการคิดขั้นสูง

เพราะเหตุใด ยีนจำนวนมากจึงบรรจุอยู่บนโครโมโซมเดียวกัน



▲ ภาพที่ 4.4 โลคัสของยีนที่เป็นแอลลีลกันบนโฮโมโลกัสโครโมโซม
ที่มา : คลังภาพ อจท.

การศึกษาลักษณะสีดอกของถั่วลันเตา หากกำหนดให้ P เป็นแอลลีลเด่นที่ควบคุมลักษณะดอกสีม่วงและ p เป็นแอลลีลด้อยที่ควบคุมลักษณะดอกสีขาว ซึ่งในรุ่น F_1 จะได้ลูกที่มีลักษณะดอกสีม่วงทั้งหมดหรือมีจีโนไทป์ (คู่แอลลีลของยีน) เป็น Pp แสดงว่ายีน P เป็นแอลลีลกับยีน p และเมื่อมีการผสมรุ่น F_1 ด้วยกันเอง จะได้รุ่น F_2 ซึ่งมีโอกาสปรากฏรูปแบบของจีโนไทป์ได้ 3 รูปแบบ คือ PP Pp และ pp โดย PP และ Pp จะแสดงลักษณะดอกสีม่วง แต่ pp จะแสดงลักษณะดอกสีขาวออกมา

คู่ของแอลลีลหรือรูปแบบของยีนที่ปรากฏเป็นคู่กัน เรียกว่า จีโนไทป์ (genotype) โดยจีโนไทป์ที่มีแอลลีล 2 แอลลีลเหมือนกันเรียกว่า โฮโมไซกัสจีโนไทป์ (homozygous genotype) หรือเรียกว่าเป็นพันธุ์แท้ ซึ่งสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 แบบ คือ ความเด่นแท้ (homozygous dominant) เป็นจีโนไทป์ที่มีแอลลีลเด่นทั้งหมด เช่น PP และความด้อยแท้ (homozygous recessive) เป็นจีโนไทป์ที่มีแอลลีลด้อยทั้งหมด เช่น pp ส่วนจีโนไทป์ที่มีแอลลีล 2 แอลลีลต่างกัน เรียกว่า เฮเทอโรไซกัสจีโนไทป์ (heterozygous genotype) หรือเรียกว่าเป็นพันธุ์ทาง เช่น Pp ส่วนลักษณะที่ปรากฏออกมาให้เห็น เช่น ดอกสีขาว ดอกสีม่วง จะเรียกว่า ฟีนไทป์ (phenotype) 

Biology Focus

กฎความน่าจะเป็น

- จากการนำกฎความน่าจะเป็น (probability) มาใช้วิเคราะห์ข้อมูลการทำนายโอกาสของการโยนเหรียญ 2 เหรียญพร้อมกัน ซึ่งมีความเป็นไปได้มี 3 แบบ คือ แบบที่ 1 ออกหัว 2 เหรียญ แบบที่ 2 ออกหัว 1 เหรียญและออกก้อย 1 เหรียญ และแบบที่ 3 ออกก้อย 2 เหรียญ โดยอัตราส่วนของโอกาสแบบที่ 1 : แบบที่ 2 : แบบที่ 3 เท่ากับ 1 : 2 : 1
- เมเนเดลจึงใช้กฎความน่าจะเป็นมาอธิบายอัตราส่วนระหว่างลักษณะเด่นและลักษณะด้อยในรุ่น F_2 ที่เกิดขึ้น การผสมพันธุ์ถั่วลันเตารุ่น F_1 ที่มีฟีโนไทป์เป็นผักสีเขียว และจีโนไทป์เป็น Gg เปรียบได้กับการโยนเหรียญ 2 เหรียญพร้อมกัน โดยแทนด้านหนึ่งเป็น G และอีกด้านเป็น g ทำให้จีโนไทป์ของยีนในรุ่น F_2 เข้าคู่กันได้ 3 แบบ คือ GG Gg และ gg โดยมีอัตราส่วนเท่ากับ 1 : 2 : 1 แต่ลักษณะฟีโนไทป์ที่แสดงออกมาจะมีเพียง 2 แบบเท่านั้น คือ ผักสีเขียวและผักสีเหลือง เนื่องจากจีโนไทป์แบบ Gg จะแสดงลักษณะผักสีเขียวออกมา ดังนั้น อัตราส่วนของผักสีเขียวต่อผักสีเหลือง เท่ากับ 3 : 1



เมนเดลอธิบาย
การถ่ายทอดลักษณะ
ของถั่วลันเตาอย่างไร

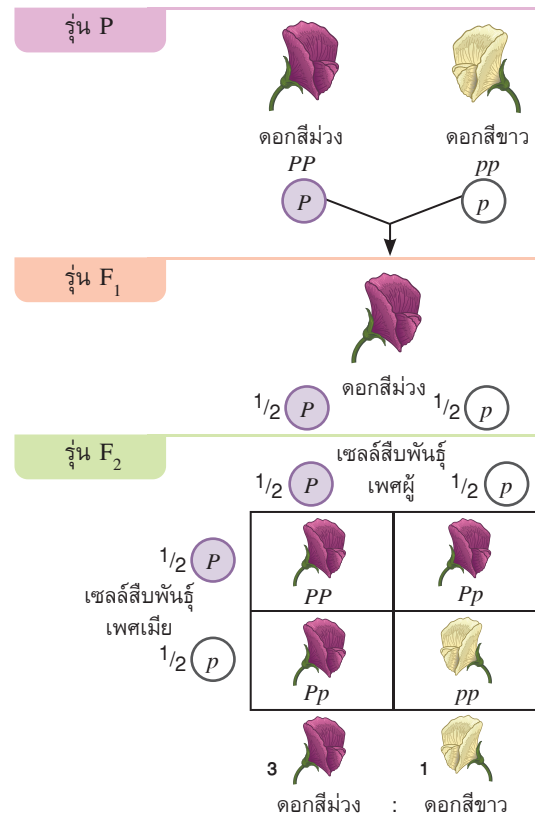
2 กฎการแยกและกฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระ

เมนเดลทำการศึกษา ค้นคว้า และทดลองเพื่อหารูปแบบพื้นฐานของการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม โดยอาศัยถั่วลันเตา

เป็นตัวอย่างของการทดลอง และสามารถสรุปเป็นหลักการสำคัญได้ 2 หลักการ คือ กฎการแยก และกฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระ เพื่ออธิบายกระบวนการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากรุ่นสู่รุ่น

2.1 กฎการแยก

การผสมพันธุ์ถั่วลันเตาในรุ่น F_1 จะได้อัตราส่วนจีโนไทป์ของรุ่น F_2 เท่ากับ 1 : 2 : 1 และอัตราส่วนฟีโนไทป์เท่ากับ 3 : 1 ซึ่งอัตราส่วนนี้เกิดจากการแยกกันของแอลลีล P และ p ไปในเซลล์สืบพันธุ์ในระหว่างการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ เมนเดลจึงได้ข้อสรุป คือ กฎการแยก (law of segregation) ที่มีใจความสำคัญว่า “ลักษณะของสิ่งมีชีวิตถูกควบคุมโดยยีน และยีนจะปรากฏเป็นคู่ ๆ เสมอ ซึ่งยีนจะแยกจากกันเมื่อมีการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ โดยเซลล์สืบพันธุ์แต่ละเซลล์จะได้รับเพียงแอลลีลใดแอลลีลหนึ่ง”

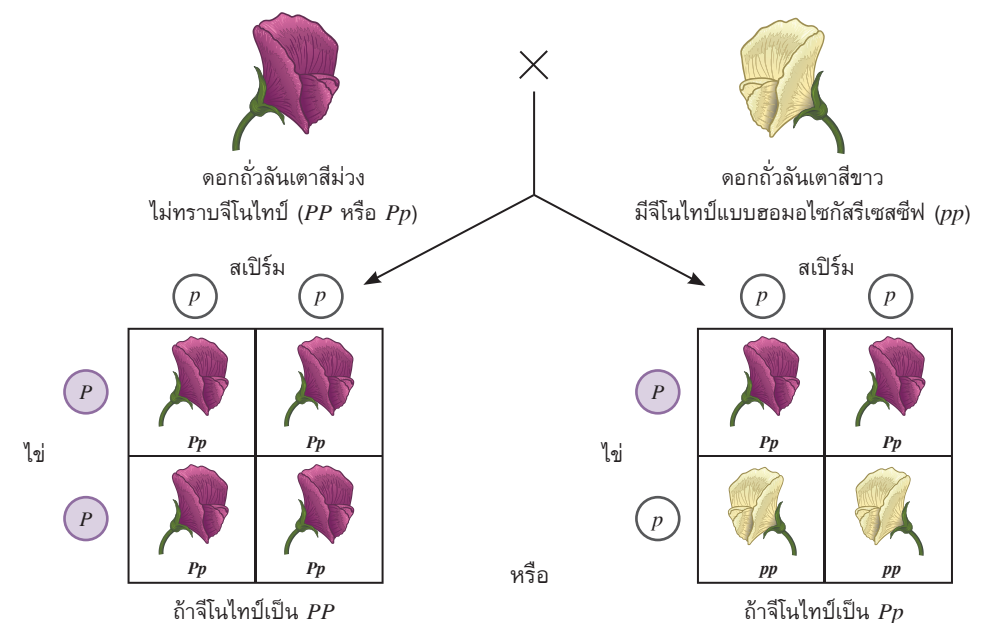


▲ ภาพที่ 4.5 การผสมพันธุ์ถั่วลันเตาดอกสีม่วงกับสีขาวตามกฎการแยกของเมนเดล
ที่มา : คลังภาพ อจท.

จากกฎการแยกสามารถทำนายลักษณะของรุ่น F_1 ได้หากทราบจีโนไทป์ของรุ่นพ่อแม่ เช่น หากพ่อแม่มีจีโนไทป์เป็น PP แสดงลักษณะดอกสีม่วง ผสมพันธุ์กับแม่ที่มีจีโนไทป์เป็น pp แสดงลักษณะดอกสีขาว จะได้รุ่น F_1 มีจีโนไทป์เป็น Pp ซึ่งแสดงลักษณะดอกสีม่วงทั้งหมด เนื่องจากการแยกกันของแอลลีล P ของพ่อที่เป็นคู่กันและแอลลีล p ของแม่ที่เป็นคู่กัน แล้วมารวมกันได้เป็น Pp ในรุ่น F_1 และเมื่อผสมรุ่น F_1 ด้วยกันเอง จะได้รุ่น F_2 มีฟีโนไทป์ 2 แบบ คือ ดอกสีม่วงและดอกสีขาวในอัตราส่วน 3 : 1 แสดงว่าดอกสีขาวเป็นลักษณะด้อย ซึ่งควบคุมด้วยแอลลีลด้อยที่แฝงอยู่ในรุ่น F_1 แต่จะไม่ปรากฏออกมา เนื่องจากถูกแอลลีลเด่นของดอกสีม่วงข่มอยู่ และจะแสดงออกในรุ่น F_2 เมื่อมีการเข้าคู่ของแอลลีลด้อยด้วยกันเอง

อย่างไรก็ตาม ในช่วงเวลานั้นเมนเดลยังไม่ทราบกลไกที่ทำให้แอลลีลของยีนที่เป็นคู่กันแยกออกจากกันในระหว่างที่มีการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ ซึ่งภายหลังจึงทราบกันว่าแอลลีลของยีนที่เป็นคู่กันจะแยกออกจากกันเมื่อมีการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส และแอลลีลของยีนจะกลับมาเข้าคู่กันอีกครั้งเมื่อมีการรวมกันของเซลล์สืบพันธุ์

จากกฎการแยกของเมนเดล สามารถนำมาใช้ตรวจสอบลักษณะจีโนไทป์ของสิ่งมีชีวิตที่แสดงลักษณะเด่นออกมา เนื่องจากลักษณะเด่นสามารถมีจีโนไทป์ทั้งแบบฮอมอไซกัสหรือเฮเทอโรไซกัส จึงต้องมีการตรวจสอบลักษณะจีโนไทป์ที่แสดงลักษณะเด่นออกมา โดยนำสิ่งมีชีวิตที่สงสัยมาผสมกับสิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะด้อยหรือฮอมอไซกัสรีเซสซีฟ แล้วสังเกตลักษณะที่เกิดขึ้นในรุ่น F_1 เรียกวิธีการนี้ว่า **เทสต์ครอสส์ (testcross)** เช่น การตรวจสอบจีโนไทป์ของถั่วลันเตาดอกสีม่วงที่สงสัย โดยนำมาผสมกับถั่วลันเตาดอกสีขาวที่เป็นฮอมอไซกัสรีเซสซีฟ (pp) หากพบว่า รุ่น F_1 มีลักษณะดอกสีม่วงทั้งหมด แสดงว่าถั่วลันเตาดอกสีม่วงในรุ่นพ่อแม่มีจีโนไทป์แบบฮอมอไซกัส (PP) แต่หากรุ่น F_1 มีลักษณะดอกสีม่วงและดอกสีขาวในอัตราส่วน 1 : 1 แสดงว่าถั่วลันเตาดอกสีม่วงในรุ่นพ่อแม่มีจีโนไทป์แบบเฮเทอโรไซกัส (Pp) ดังนี้



▲ ภาพที่ 4.6 การเทสต์ครอสส์เพื่อหาจีโนไทป์ของดอกถั่วลันเตา
ที่มา : คลังภาพ อจท.

นอกจากนั้น ยังมี**แบ็กครอสส์ (back cross)** ที่เป็นการผสมพันธุ์โดยนำลูกผสมรุ่น F_1 ไปผสมพันธุ์กับพ่อพันธุ์หรือแม่พันธุ์ การผสมกลับถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงพันธุ์ให้ได้ลูกผสมตามต้องการ





กิจกรรม

ทักษะกระบวนการวิทยาศาสตร์

• การสังเกต

จิตวิทยาศาสตร์

• ความมีเหตุผล

• ความรอบคอบ

การแก้โจทย์ปัญหาเรื่องพันธุศาสตร์ของเมนเดล

จงตอบคำถามต่อไปนี้

1. จงเติมจีโนไทป์ รูปแบบของจีโนไทป์ รูปแบบของแอลลีลในเซลล์สืบพันธุ์ และโอกาสของการเกิดเซลล์สืบพันธุ์แต่ละแบบลงในตารางต่อไปนี้ให้สมบูรณ์

จีโนไทป์	รูปแบบของจีโนไทป์	รูปแบบของแอลลีลในเซลล์สืบพันธุ์ และโอกาสของการเกิดเซลล์สืบพันธุ์
pp		
	เฮเทอโรไซกัส	$p(1/2)$ และ $p(1/2)$
Yy		
yy		$y(1)$

2. กำหนดให้ถั่วลิสงดอกสีม่วงเป็นลักษณะเด่น และดอกสีขาวเป็นลักษณะด้อย ถ้าผสมถั่วลิสงดอกสีม่วงที่เป็นเฮเทอโรไซกัสกับดอกสีขาวที่เป็นโฮโมไซกัส จงหาว่ารุ่น F_1 ที่เกิดขึ้นจะมีจีโนไทป์ได้กี่แบบ
3. ถ้าให้ L เป็นแอลลีลควบคุมลักษณะปีกยาว และ l เป็นแอลลีลควบคุมลักษณะปีกสั้น เมื่อผสมพันธุ์แมลงหวี่ได้ลูกที่มีปีกยาวและลูกที่มีปีกสั้น ในอัตราส่วน 3 : 1 จงหาจีโนไทป์ของพ่อแม่ และลูก
4. กำหนดให้สุนัขมีขนสีดำเป็นลักษณะเด่น (B) และขนสีขาวเป็นลักษณะด้อย (b) ลูกที่เกิดขึ้นจากการผสมพันธุ์ระหว่างสุนัขดำกับสุนัขสีขาว พบว่ามีเฉพาะสุนัขดำ จงตอบคำถามต่อไปนี้
 - 4.1 จงหาจีโนไทป์ของพ่อแม่ และลูกสุนัขที่ได้จากการผสมพันธุ์
 - 4.2 ถ้าผสมพันธุ์รุ่น F_1 เข้าด้วยกัน จงหาจีโนไทป์รุ่น F_2 และอัตราส่วนของลักษณะเด่นต่อลักษณะด้อย
 - 4.3 ถ้านำรุ่น F_1 ผสมพันธุ์กับรุ่นพ่อแม่ที่มีขนสีขาว โอกาสของลูกที่ได้จะมีขนสีอะไร และอัตราส่วนเท่าใด
5. ถ้าให้ T แทนแอลลีลที่ควบคุมลักษณะต้นสูงของกุหลาบ และ t แทนแอลลีลที่ควบคุมลักษณะต้นเตี้ยของกุหลาบ การผสมพันธุ์ต้นกุหลาบต้นสูงคู่หนึ่ง พบว่าได้กุหลาบทั้งหมด 418 ต้น มีต้นสูง 314 ต้น และต้นเตี้ย 104 ต้น จงตอบคำถามต่อไปนี้
 - 5.1 จงเขียนจีโนไทป์ของต้นกุหลาบในรุ่นพ่อแม่
 - 5.2 ถ้านำต้นกุหลาบต้นเตี้ยในรุ่นลูกผสมกับต้นกุหลาบต้นสูงในรุ่นพ่อแม่ จะได้ลูกมีลักษณะต้นอย่างไรบ้าง และมีอัตราส่วนเท่าไร

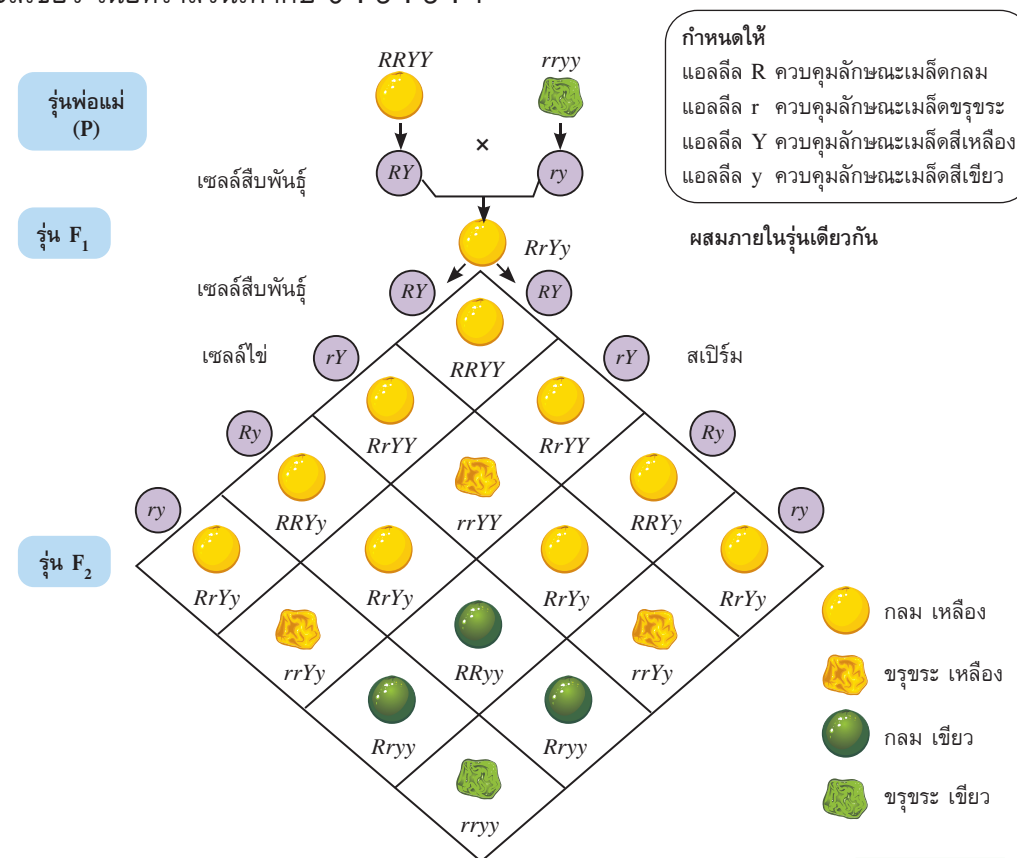
อภิปรายผลกิจกรรม

จากกิจกรรมนี้ จะสามารถทำนายรูปแบบจีโนไทป์และฟีโนไทป์ของลักษณะต่าง ๆ ในแต่ละรุ่นของสิ่งมีชีวิตได้โดยใช้กฎการแยกของเมนเดล ซึ่งยืนยันที่ปรากฏเป็นคู่ ๆ กันจะแยกจากกันเมื่อมีการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ และเซลล์สืบพันธุ์แต่ละเซลล์จะได้รับเพียงแอลลีลใดแอลลีลหนึ่งเท่านั้น และแอลลีลที่แยกจากกันจะกลับมาเข้าคู่กันอีกครั้งเมื่อมีการรวมกันของเซลล์สืบพันธุ์

2.2 กฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระ

การทดลองผสมพันธุ์ถั่วลิสงของเมนเดลที่ผ่านมาเป็นการพิจารณาเพียงลักษณะใดลักษณะหนึ่งเท่านั้น แต่ลักษณะของถั่วลิสงที่เมนเดลเลือกมาศึกษามีถึง 7 ลักษณะ ซึ่งการผสมพันธุ์ในแต่ละครั้งจะมีการถ่ายทอดลักษณะอื่น ๆ ไปพร้อมกันด้วย แต่เมนเดลก็เลือกพิจารณาเฉพาะลักษณะใดลักษณะหนึ่งเท่านั้น ซึ่งการผสมพันธุ์โดยพิจารณาเพียงลักษณะเดียวเรียกว่า การผสมลักษณะเดียว (monohybrid cross) เช่น การผสมระหว่างถั่วลิสงฝักสีเขียวกับฝักสีเหลือง เป็นการพิจารณาเฉพาะลักษณะสีฝัก ในเวลาต่อมาเมนเดลได้ศึกษาการผสมพันธุ์สองลักษณะพร้อมกัน เรียกว่า การผสมสองลักษณะ (dihybrid cross) เช่น ลักษณะรูปร่างของเมล็ดและลักษณะสีของเมล็ด

เช่น การผสมถั่วลิสงเมล็ดกลมสีเหลืองพันธุ์แท้ มีจีโนไทป์เป็น $YYRR$ กับถั่วลิสงเมล็ดขรุขระสีเขียวพันธุ์แท้ มีจีโนไทป์เป็น $yyrr$ จะได้ถั่วลิสงรุ่น F_1 มีลักษณะเมล็ดกลมสีเหลือง มีจีโนไทป์เป็น $YyRr$ ทั้งหมด และเมื่อนำรุ่น F_1 มาผสมกันเอง จะได้รุ่น F_2 ที่มีลักษณะแตกต่างกัน 4 แบบ คือ เมล็ดกลมสีเหลือง : เมล็ดกลมสีเขียว : เมล็ดขรุขระสีเหลือง : เมล็ดขรุขระสีเขียว ในอัตราส่วนเท่ากับ 9 : 3 : 3 : 1



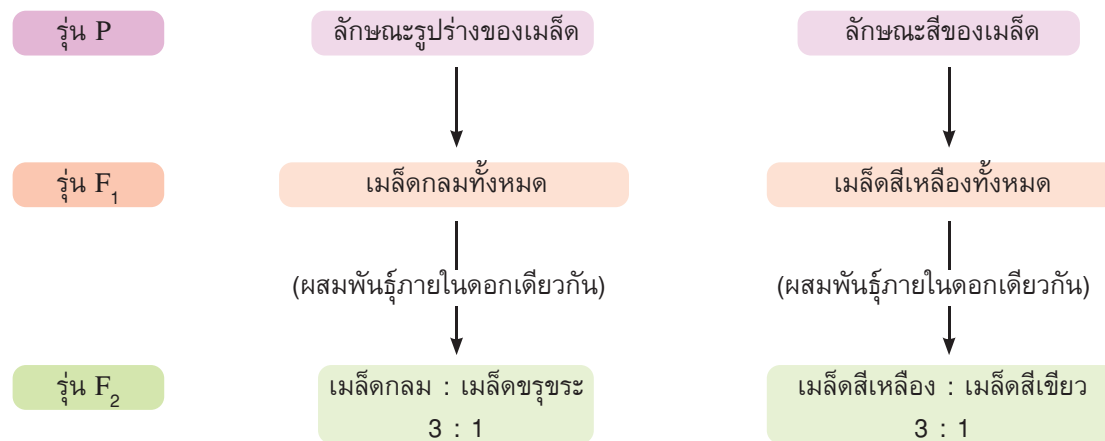
▲ ภาพที่ 4.7 การผสมสองลักษณะของถั่วลิสง
ที่มา : คลังภาพ อจท.



การถ่ายทอด
ลักษณะทาง
พันธุกรรม



จากฟีโนไทป์ของรุ่น F_2 ดังกล่าวทำให้เมนเดลนำลักษณะแต่ละลักษณะมาแยกศึกษา ดังนี้



เมื่อพิจารณาการผสมเฉพาะลักษณะรูปร่างของเมล็ดมีอัตราส่วนฟีโนไทป์ในรุ่น F_2 ของลักษณะเมล็ดกลม : เมล็ดขรุขระ เท่ากับ 3 : 1 และลักษณะสีของเมล็ดมีอัตราส่วนฟีโนไทป์ในรุ่น F_2 ของลักษณะเมล็ดสีเหลือง : เมล็ดสีเขียว เท่ากับ 3 : 1 เช่นกัน เมื่อนำทั้งสองลักษณะมาพิจารณาร่วมกันจะได้ลักษณะเมล็ดกลมสีเหลือง : เมล็ดกลมสีเขียว : เมล็ดขรุขระสีเหลือง : เมล็ดขรุขระสีเขียว ในอัตราส่วน 9 : 3 : 3 : 1 ซึ่งเป็นไปตามกฎการคูณของกฎความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์หนึ่ง ๆ ที่เป็นอิสระต่อกันจะมีโอกาสเกิดขึ้นพร้อมกัน ดังนั้น ยีนควบคุมลักษณะรูปร่างเมล็ดและยีนควบคุมลักษณะสีเมล็ดสามารถแยกออกจากกันเพื่อเข้าสู่เซลล์สืบพันธุ์และรวมกันได้อย่างอิสระ จึงเป็นที่มาของ กฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระ (law of independent assortment) โดยมีใจความสำคัญว่า “แอลลีลของยีนที่เป็นคู่กัน เมื่อแยกออกจากกันจะจัดกลุ่มกันอย่างอิสระกับแอลลีลของยีนอื่น ๆ ซึ่งแยกออกจากคู่เช่นกันเพื่อเข้าไปยังเซลล์สืบพันธุ์” ดังนั้น การผสมถั่วลันเตาในรุ่น F_1 ที่มีจีโนไทป์ $RrYy$ ด้วยกันเอง จะมีการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ 4 ชนิด คือ RY Ry rY และ ry ในอัตราส่วน 1 : 1 : 1 : 1 และเมื่อเซลล์สืบพันธุ์ทั้ง 4 ชนิดของรุ่น F_1 รวมกันจะให้รุ่น F_2 มีอัตราส่วนฟีโนไทป์เท่ากับ 9 : 3 : 3 : 1

จากกฎของเมนเดล แสดงให้เห็นว่า เมนเดลทดลองผสมพันธุ์ถั่วลันเตาด้วยความละเอียด เริ่มจากการเลือกถั่วลันเตาเป็นพืชทดลองซึ่งมีลักษณะที่เหมาะสมหลายประการ ทั้งการมีดอกประเภทสมบูรณ์เพศ มีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน อีกทั้งเมนเดลยังสังเกตผลการทดลองและเก็บข้อมูลลูกผสมถึงรุ่นที่ 2 ทำให้สามารถตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมได้ และเป็นพื้นฐานของการศึกษาการถ่ายทอดทางพันธุกรรมในสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ มาจนถึงปัจจุบัน



กฎแห่งการรวมกลุ่ม
อย่างอิสระของ
เมนเดล



กิจกรรม

ทักษะกระบวนการวิทยาศาสตร์

• การสังเกต

จิตวิทยาศาสตร์

• ความมีเหตุผล

• ความรอบคอบ

การผสมพิจารณาหลายลักษณะ

จงตอบคำถามต่อไปนี้

- จากกฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระของเมนเดล สิ่งมีชีวิตที่มีจีโนไทป์ $AaBBccDd$ จะมีเซลล์สืบพันธุ์ได้กี่แบบ
- การผสมพันธุ์ระหว่างสัตว์ที่มีจีโนไทป์ $AABBcc \times aabbcc$ ถ้าการจัดกลุ่มของยีนแต่ละคู่เป็นไปอย่างอิสระ จงตอบคำถามต่อไปนี้
 - รุ่น F_1 มีจีโนไทป์อย่างไร
 - โอกาสที่จะได้รุ่น F_2 มีจีโนไทป์ $aabbcc$ เป็นเท่าใด
 - โอกาสที่รุ่น F_2 จะมีจีโนไทป์เหมือนพ่อและแม่เป็นเท่าใด
- การทดลองตามหลักพันธุศาสตร์ของเมนเดลปรากฏว่าได้ลูกรุ่น F_2 ออกมามีอัตราส่วนฟีโนไทป์เป็น 9 : 3 : 3 : 1 จงอธิบายว่าอัตราส่วนนี้มีที่มาจากอะไร
- กำหนดให้พืชชนิดหนึ่งมีผลสีแดงเป็นลักษณะเด่น (R) ผลสีเหลืองเป็นลักษณะด้อย (r) และผิวของผลเรียบเป็นลักษณะเด่น (S) ผิวของผลขรุขระเป็นลักษณะด้อย (s) ถ้านำพืชที่มีจีโนไทป์ $RrSS$ ผสมกับพืชที่มีจีโนไทป์ $rrSs$ จงหาอัตราส่วนของจีโนไทป์และฟีโนไทป์ของลูกที่เกิดขึ้น
- กำหนดให้กระต่ายขนสีขาวเป็นลักษณะเด่น (W) ขนสีน้ำตาลเป็นลักษณะด้อย (w) และขนสั้นเป็นลักษณะเด่น (S) ขนยาวเป็นลักษณะด้อย (s) การผสมพันธุ์ระหว่างกระต่ายขนยาวสีขาวที่เป็นฮอมอไซกัสกับกระต่ายขนสั้นสีน้ำตาลที่เป็นฮอมอไซกัส จงตอบคำถามต่อไปนี้
 - จงหาอัตราส่วนจีโนไทป์และฟีโนไทป์ต่าง ๆ ในรุ่น F_1
 - ลูกที่เกิดจากการผสมพันธุ์ระหว่างรุ่น F_1 กับกระต่ายขนยาวสีน้ำตาลมีฟีโนไทป์อะไรบ้าง และอัตราส่วนเป็นเท่าใด
- ถ้านำสิ่งมีชีวิตที่มีจีโนไทป์ $AaBb$ มาผสมกันเอง จงหาว่าในรุ่นลูกจะมีจีโนไทป์และฟีโนไทป์ได้กี่แบบ



อภิปรายผลกิจกรรม

จากกิจกรรมนี้ จะสามารถทำนายลักษณะจีโนไทป์และฟีโนไทป์ของสิ่งมีชีวิตที่มีการผสมพันธุ์มากกว่า 1 ลักษณะพร้อม ๆ กันได้ โดยใช้กฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระของเมนเดล ซึ่งแอลลีลของยีนที่เป็นคู่กันเมื่อแยกออกจากกันจะมีการจัดกลุ่มกันอย่างอิสระกับแอลลีลของยีนอื่น ๆ ที่แยกออกจากคู่เช่นกัน เพื่อเข้าไปยังเซลล์สืบพันธุ์ จึงสามารถทำนายอัตราส่วนของเซลล์สืบพันธุ์ที่มีกลุ่มของยีนต่าง ๆ ได้





▲ ภาพที่ 4.8 ดอกลั่นม้งกรสีชมพูจากการผสมพันธุ์ระหว่างดอกลั่นม้งกรสีแดงกับดอกสีขาว ที่มา : คลังภาพ อจท.

3 ลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล

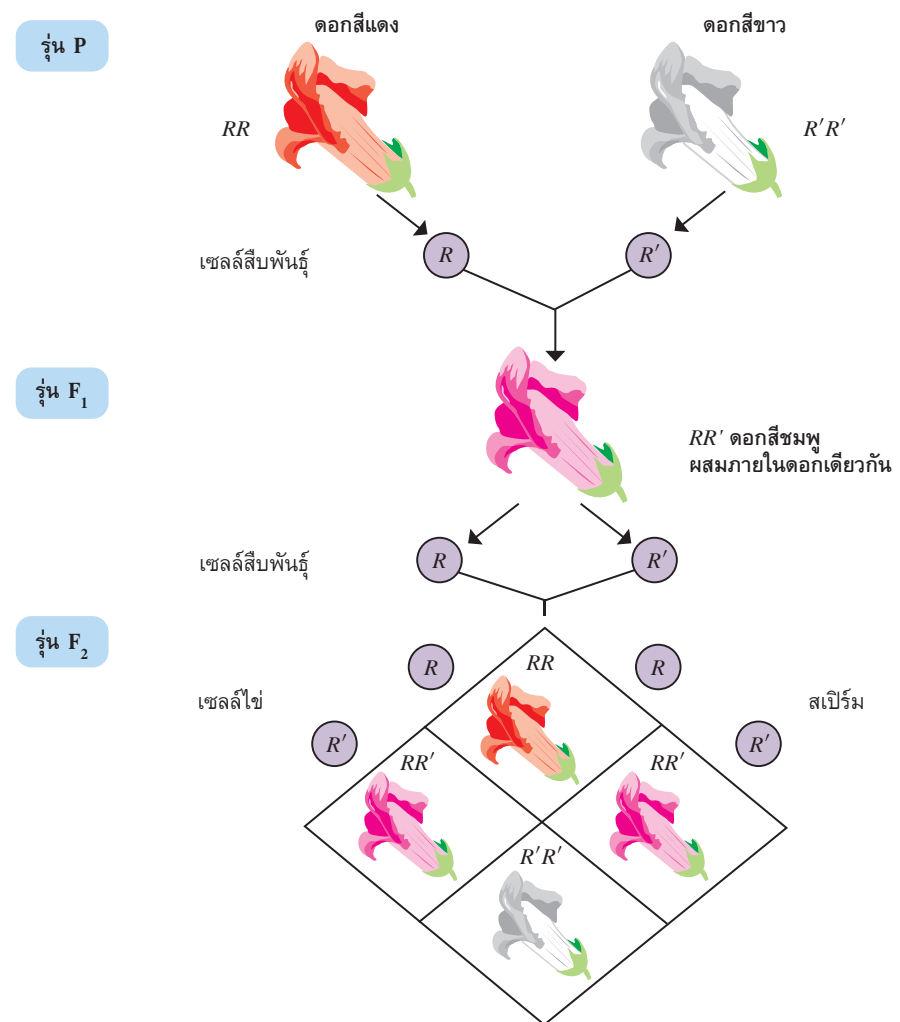
การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของเมนเดลแต่ละลักษณะถูกควบคุมด้วยยีนหนึ่งยีนหรือสองแอลลีลเท่านั้น แต่การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมบางลักษณะไม่ได้ถูกควบคุมการแสดงออกตามกฎของเมนเดล เรียกการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมแบบนี้ว่า ลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล (extensions of Mendelian genetics)

คาร์ล คอร์เรนส์ (Karl Correns) นักพฤกษศาสตร์ชาวเยอรมัน ได้ผสมพันธุ์ต้นบานเย็นดอกสีแดงกับต้นบานเย็นดอกสีขาว พบว่า รุ่น F_1 ที่ได้เป็นดอกบานเย็นสีชมพูทั้งหมด ซึ่งหากพิจารณาตามกฎของเมนเดลแล้ว รุ่นลูก F_1 ควรเป็นดอกบานเย็นสีแดงหรือดอกบานเย็นสีขาวเพียงแบบเดียวเท่านั้น ทำให้เกิดข้อสงสัยว่า “เพราะเหตุใดการผสมพันธุ์ดอกบานเย็นสีแดงกับดอกบานเย็นสีขาวจึงให้ดอกบานเย็นสีชมพูทั้งหมด” ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวไม่เป็นไปตามหลักการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของเมนเดล

3.1 ความเด่นไม่สมบูรณ์

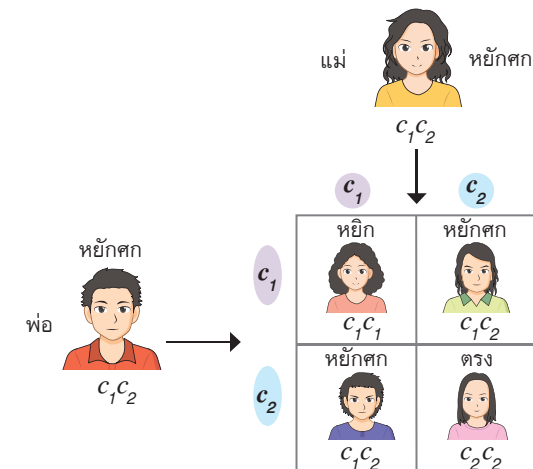
ความเด่นไม่สมบูรณ์ (incomplete dominance) เป็นการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่ถูกควบคุมด้วยยีนเดียว ซึ่งแอลลีลหนึ่งไม่สามารถข่มอีกแอลลีลหนึ่งได้สมบูรณ์ ทำให้ไม่ได้มีลักษณะเด่นหรือด้อยอย่างสมบูรณ์ แต่จะแสดงลักษณะออกมาถึงกลางระหว่างสองลักษณะ เช่น การผสมต้นลั่นม้งกรดอกสีแดงกับดอกสีขาว ซึ่งเป็นพันธุ์แท้ทั้งคู่ จะได้รุ่น F_1 มีดอกสีชมพูทั้งหมด และเมื่อให้รุ่น F_1 ผสมด้วยตัวเอง จะได้รุ่น F_2 มีดอกสีแดง ดอกสีชมพู และดอกสีขาว โดยมีอัตราส่วนเท่ากับ 1 : 2 : 1 จากการศึกษาพบว่า สีของดอกลั่นม้งกรถูกควบคุมด้วยแอลลีล 2 แอลลีล ดังนี้

กำหนดให้	แอลลีล R	ควบคุมดอกลั่นม้งกรสีแดง
	แอลลีล R'	ควบคุมดอกลั่นม้งกรสีขาว
ดังนั้น	จีโนไทป์ RR	จะแสดงลักษณะดอกลั่นม้งกรสีแดง
	จีโนไทป์ RR'	จะแสดงลักษณะดอกลั่นม้งกรสีชมพู
	จีโนไทป์ $R'R'$	จะแสดงลักษณะดอกลั่นม้งกรสีขาว



▲ ภาพที่ 4.9 การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมแบบความเด่นไม่สมบูรณ์ของดอกลั่นม้งกร ที่มา : คลังภาพ อจท.

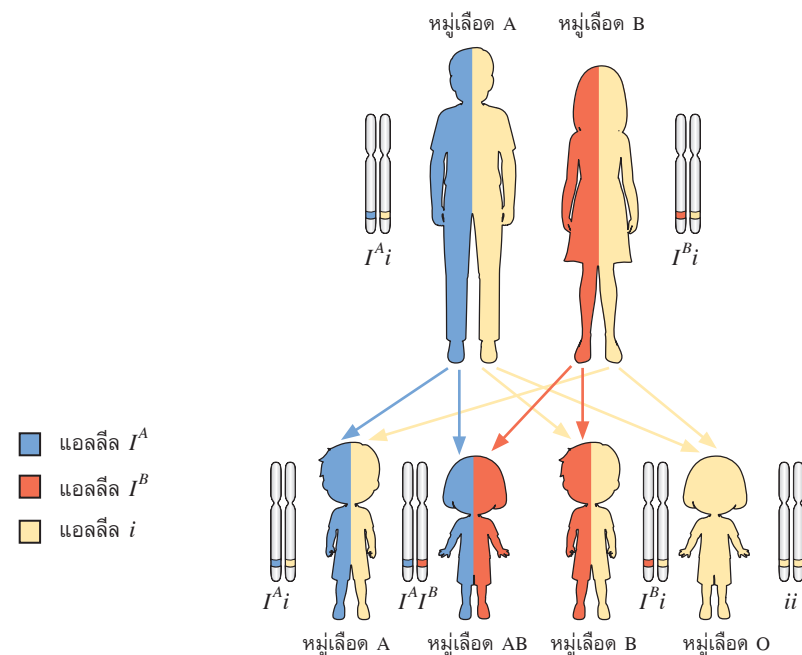
นอกจากนั้นยังมีผู้ศึกษาลักษณะเส้นผมของคน ซึ่งมีการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมแบบความเด่นไม่สมบูรณ์เช่นกัน ถ้าหากกำหนดให้แอลลีล C_1 ควบคุมลักษณะผมหยิก และ C_2 ควบคุมลักษณะผมเหยียดตรง ดังนั้น จีโนไทป์ C_1C_1 แสดงลักษณะผมหยิก จีโนไทป์ C_1C_2 แสดงลักษณะผมหยักศก จีโนไทป์ C_2C_2 แสดงลักษณะผมตรง พ่อและแม่ที่มีผมหยักศกจึงมีโอกาสมีลูกที่มีลักษณะเส้นผมแตกต่างกันได้



▲ ภาพที่ 4.10 การถ่ายทอดลักษณะพันธุกรรมของพ่อและแม่ที่มีผมหยักศกทั้งคู่ ที่มา : คลังภาพ อจท.

3.2 ความเด่นร่วม

ความเด่นร่วม (codominance) เป็นการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่คู่ของแอลลีลบนคู่โฮโมโลกัสโครโมโซมแสดงลักษณะเด่นเท่ากัน จึงปรากฏลักษณะออกมารวมกัน เช่น หมู่เลือดระบบ ABO และหมู่เลือดระบบ MN ในมนุษย์ โดยจะถูกจำแนกตามชนิดของแอนติเจน ซึ่งเป็นสารประกอบไกลโคโปรตีน (glycoprotein) ที่อยู่บนเยื่อหุ้มเซลล์ของเม็ดเลือดแดง โดยระบบ ABO ประกอบด้วย 2 ชนิด คือ แอนติเจน A และแอนติเจน B จากการศึกษพบว่า แอลลีล I^A ควบคุมการสร้างแอนติเจน A แอลลีล I^B ควบคุมการสร้างแอนติเจน B และทั้งสองแอลลีลจะแสดงลักษณะเด่น ถ้าแอลลีลทั้งสองเข้าคู่กันเป็น $I^A I^B$ จะมีหมู่เลือด AB เนื่องจากบนเยื่อหุ้มเซลล์เม็ดเลือดแดงจะมีทั้งไกลโคโปรตีนของแอนติเจน A และแอนติเจน B



▲ ภาพที่ 4.11 ความเด่นร่วมของแอลลีล I^A และ I^B ในคนที่หมู่เลือด AB
ที่มา : คลังภาพ อจท.

3.3 มัลติเพิลแอลลีล

ปกติบนโลคัสของโฮโมโลกัสโครโมโซมจะพบแอลลีล 2 แอลลีลที่ควบคุมการแสดงออกของลักษณะหนึ่ง ๆ แต่บางลักษณะถูกควบคุมด้วยแอลลีลมากกว่า 2 แอลลีลได้ เรียกลักษณะแบบนี้ว่า มัลติเพิลแอลลีล (multiple alleles) เช่น หมู่เลือดระบบ ABO ถูกควบคุมด้วยแอลลีล 3 แอลลีล ซึ่งมีผลต่อการสร้างแอนติเจนของเซลล์เม็ดเลือดแดง โดยแอลลีล I^A ควบคุมการสร้างแอนติเจน A แอลลีล I^B ควบคุมการสร้างแอนติเจน B และแอลลีล i ไม่ควบคุมการสร้างทั้งแอนติเจน A และแอนติเจน B

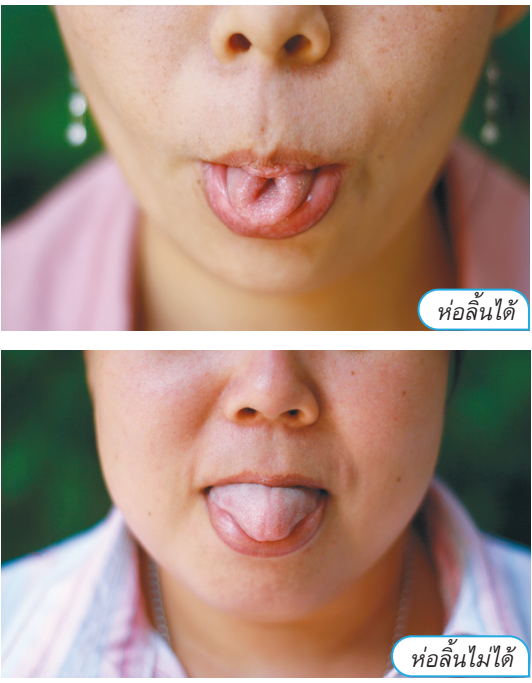
การเข้าคู่กันของแอลลีลต่าง ๆ จะแสดงลักษณะฟีโนไทป์ของหมู่เลือดที่ต่างกัน ดังนี้

จีโนไทป์	ฟีโนไทป์
$I^A I^A$ $I^A i$	หมู่เลือด A
$I^B I^B$ $I^B i$	หมู่เลือด B
$I^A I^B$	หมู่เลือด AB
ii	หมู่เลือด O

จากตารางจะเห็นว่าแอลลีล i จะไม่แสดงออกเมื่อมีการเข้าคู่กับแอลลีล I^A และ I^B แต่จะแสดงออกเมื่อเข้าคู่กับแอลลีล i เท่านั้น แสดงว่าแอลลีล i เป็นแอลลีลด้อย จึงไม่มีการแสดงออกเมื่อเข้าคู่กับแอลลีล I^A และ I^B ซึ่งเป็นแอลลีลเด่น แต่จะแสดงออกเมื่อเข้าคู่กับแอลลีลด้อยด้วยตัวเอง

3.4 ลักษณะที่ควบคุมด้วยยีนหลายคู่

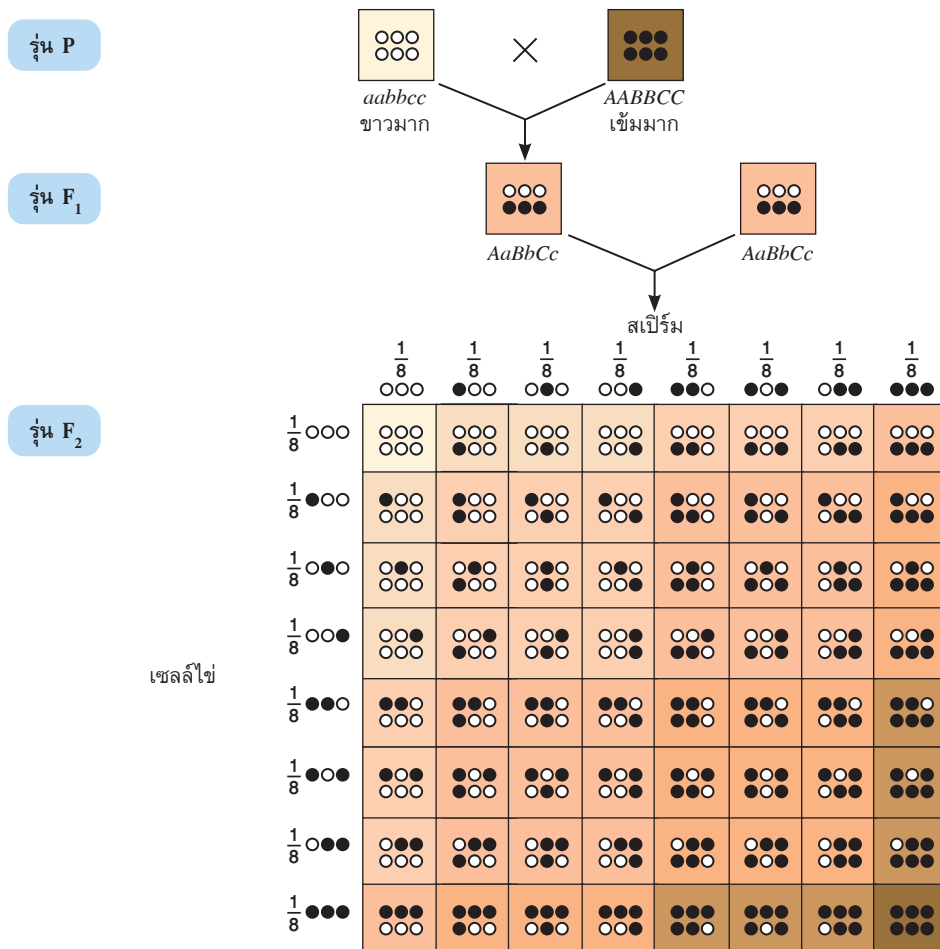
การศึกษาลักษณะพันธุกรรมของเมนเดลเป็นลักษณะที่มีการแปรผันแบบไม่ต่อเนื่อง (discontinuous variation trait) หรือลักษณะเชิงคุณภาพ (qualitative trait) ซึ่งเป็นการศึกษาลักษณะที่ควบคุมด้วยยีนเพียง 1 คู่เท่านั้น จึงทำให้ทั้งสองลักษณะแตกต่างกันอย่างชัดเจน เช่น ลักษณะของหงส์ (ชั้นเดียวหรือสองชั้น) ลักษณะการห่อลิ้น (ได้หรือไม่ได้) ลักษณะของตุง (มีหรือไม่มี) แต่บางลักษณะจะถูกควบคุมด้วยยีนหลายคู่ หรือพอลิยีน (multiple gene หรือ polygenes) ซึ่งยีนทั้งหมดจะทำหน้าที่ร่วมกันเพื่อควบคุมฟีโนไทป์ที่แสดงลักษณะเชิงปริมาณ หรือลักษณะที่มีความแตกต่างกันเล็กน้อยไล่ลำดับกันไป เช่น สีตา สีผิว ความสูงของมนุษย์ ซึ่งยีนควบคุมหลายคู่จะอยู่บนคู่โฮโมโลกัสโครโมโซมเดียวกันหรือต่างกัน เรียกลักษณะที่ถูกควบคุมด้วยยีนหลายคู่ว่า พอลิยีนิกเทรต (polygenic trait)



▲ ภาพที่ 4.12 การห่อลิ้นเป็นลักษณะทางพันธุกรรมที่มีการแปรผันแบบไม่ต่อเนื่อง
ที่มา : คลังภาพ อจท.

การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมแบบพอลิยีน เช่น ลักษณะสีผิวของคนถูกควบคุมด้วยยีนหลายยีนที่ทำหน้าที่ควบคุมการสร้างเมลานิน (melanin) หากกำหนดให้ลักษณะสีผิวถูกควบคุมด้วยยีน 3 คู่ ที่มีแอลลีล $A B$ และ C ควบคุมการสร้างเมลานินทำให้ผิวสีเข้ม และแอลลีล $a b$ และ c ไม่มีการสร้างเมลานินทำให้ผิวสีขาว โดยการแสดงออกของยีนแต่ละตำแหน่งจะเป็นการทำงานร่วมกัน ซึ่งคนที่มียีนโตนีแบบ $AABBCC$ จะมีผิวสีเข้ม แต่คนที่มียีนโตนีแบบ $aabbcc$ จะมีผิวสีขาว และคนที่มียีนโตนีแบบ $AaBbCc$ จะมีสีผิวอยู่กึ่งกลางระหว่างผิวสีเข้มและผิวสีขาว นอกจากนี้ บางจีโนไทป์จะมีความเข้มของสีผิวที่เหมือนกัน เช่น $AaBbCc$ และ $AABbcc$ เนื่องจากมีแอลลีล 3 แอลลีลที่ควบคุมผิวสีเหมือนกัน

จากการศึกษาพบว่า หากให้คนที่ผิวสีเข้ม ($AABBCC$) แต่งงานกับคนที่ผิวสีขาว ($aabbcc$) จะได้ลูกรุ่น F_1 มีลักษณะสีผิวอยู่กึ่งกลางระหว่างผิวสีเข้มกับผิวสีขาว ($AaBbCc$) ทั้งหมด และหากให้ลูกรุ่น F_1 แต่งงานกับคนที่มียีนสีผิวอยู่กึ่งกลาง ($AaBbCc$) เช่นเดียวกัน จะได้รุ่น F_2 ที่มีลักษณะฟีโนไทป์ที่แตกต่างกัน ดังนี้



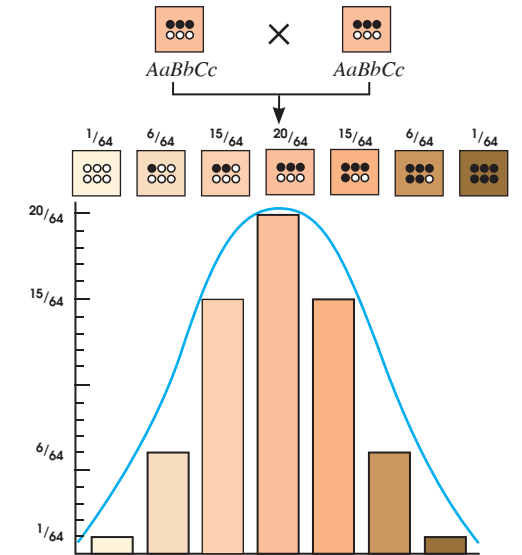
▲ ภาพที่ 4.13 การถ่ายทอดลักษณะสีผิวที่มียีนควบคุมทั้งหมด 3 คู่ แบบพอลิยีน
ที่มา : Campbell, et al (2010)

เมื่อนำลักษณะฟีโนไทป์ที่ได้มาจัดกลุ่มจะพบว่า มีความแตกต่างกันถึง 7 แบบ ซึ่งแต่ละแบบจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยและลดหลั่นกันไป และสามารถนำเสนอในรูปแบบกราฟโดยมีการกระจายอย่างต่อเนื่องหรือกระจายแบบโค้งปกติ เรียกลักษณะเช่นนี้ว่า **ลักษณะทางพันธุกรรมที่มีการแปรผันต่อเนื่อง (continuous variation trait) หรือ ลักษณะเชิงปริมาณ (quantitative trait)** โดยสิ่งแวดล้อมจะมีผลต่อยีนที่ควบคุมลักษณะเชิงปริมาณเหล่านี้ด้วย

นอกจากลักษณะของสีผิวที่มีพอลิยีนควบคุมการแสดงออกแล้ว ยังมีลักษณะอื่น ๆ เช่น ลักษณะสีตา ซึ่งมียีนควบคุมหลายคู่ โดยแอลลีลเด่นจะควบคุมให้มีการสร้างสารสีเมลานิน ถ้าจีโนไทป์มีแอลลีลเด่นหลายแอลลีล ปริมาณของเมลานินก็จะมากทำให้ม่านตามีสีต่าง ๆ ตั้งแต่สีน้ำตาลเข้มจนถึงสีน้ำตาลอ่อน แต่ถ้าจีโนไทป์มีเฉพาะแอลลีลด้อยก็ จะไม่มีการสร้างเมลานิน ทำให้มีตาสีฟ้า นอกจากนั้นลักษณะความสูง การให้นมของวัว และขนาดของผลไม้ ก็เป็นลักษณะทางพันธุกรรมที่มีการแปรผันต่อเนื่องเช่นกัน



▲ ภาพที่ 4.15 ลักษณะสีตาถูกควบคุมด้วยยีนหลายคู่แบบพอลิยีน
ที่มา : คลังภาพ อจท.



▲ ภาพที่ 4.14 กราฟการกระจายของลักษณะทางพันธุกรรมที่มีการแปรผันต่อเนื่องของสีผิวของคน
ที่มา : Campbell, et al (2010)

H.O.T.S.

คำถามท้าทายการคิดขั้นสูง

สิ่งแวดล้อมมีผลต่อลักษณะทางพันธุกรรมที่มีการแปรผันต่อเนื่องหรือลักษณะเชิงปริมาณ อย่างไร



กิจกรรม

ทักษะกระบวนการวิทยาศาสตร์

- การสังเกต
- การลงความเห็นจากข้อมูล

จิตวิทยาศาสตร์

- ความมีเหตุผล
- ความรอบคอบ

ลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล

จงตอบคำถามต่อไปนี้

1. ในการผสมพันธุ์พืชชนิดหนึ่งดอกสีแดงกับดอกสีขาว ได้รุ่น F_1 ดอกสีชมพูทั้งหมด หากผสมรุ่น F_1 ด้วยกันเอง ฟีนไทป์ของรุ่น F_2 จะมีลักษณะอย่างไร อัตราส่วนเท่าใด
2. จากโจทย์ข้อ 1 จงหาโอกาสของรุ่น F_2 ที่มีสีดอกเหมือนกับสีดอกในรุ่นพ่อแม่ (รุ่น P)
3. ครอบครัวหนึ่งมีลูก 4 คน ประกอบด้วยหมู่เลือด A จำนวน 1 คน หมู่เลือด B จำนวน 2 คน และหมู่เลือด O จำนวน 1 คน จงหาว่าพ่อและแม่มีหมู่เลือดชนิดใดได้บ้าง และมีจีโนไทป์เป็นแบบใด
4. ครอบครัวหนึ่งพ่อมีหมู่เลือด AB แม่มีหมู่เลือด O จงหาว่าลูกที่เกิดมาสามารถมีหมู่เลือดชนิดใดได้บ้าง และมีจีโนไทป์เป็นแบบใด
5. ต้นไม้ชนิดหนึ่งมียืน 3 คู่ ควบคุมความสูง โดยต้นพ่อพันธุ์มีจีโนไทป์แบบ $XXYYZZ$ มีความสูง 250 เซนติเมตร ต้นแม่พันธุ์มีจีโนไทป์แบบ $xxyyzz$ มีความสูง 100 เซนติเมตร เมื่อไม่คำนึงถึงปัจจัยจากสิ่งแวดล้อม จงตอบคำถามต่อไปนี้
 - 5.1 จงหาว่า แอลลีลเด่น 1 แอลลีล ทำให้ต้นไม้สูงขึ้นกี่เซนติเมตร
 - 5.2 ต้นไม้ 4 ต้น คือ ก ข ค และ ง มีจีโนไทป์ดังต่อไปนี้ $XXYyzz$ $XxYyZZ$ $XXYyzz$ $xxYyzz$ ตามลำดับ จงเรียงลำดับความสูงของต้นไม้จากมากไปน้อย
6. จงอธิบายความหมายของคำต่อไปนี้
 - 6.1 การข่มไม่สมบูรณ์
 - 6.2 ความเด่นร่วม
 - 6.3 มัลติเพิลแอลลีล
 - 6.4 พอลิยีน



อภิปรายผลกิจกรรม

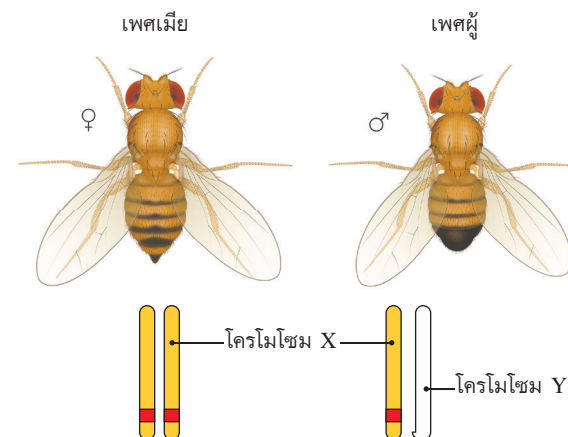
จากกิจกรรมนี้ จะทราบหลักการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมอื่น ๆ ที่เป็นส่วนขยายจากหลักพันธุศาสตร์ของเมนเดล ทั้งการข่มไม่สมบูรณ์ ซึ่งแอลลีลไม่ได้แสดงลักษณะเด่นหรือลักษณะด้อยอย่างสมบูรณ์ แต่จะแสดงลักษณะออกมกึ่งกลางระหว่างสองลักษณะ ความเด่นร่วม ซึ่งแอลลีลจะไม่ข่มกันแต่จะแสดงความเด่นเท่ากัน มัลติเพิลแอลลีล ซึ่งลักษณะถูกควบคุมด้วยแอลลีลมากกว่า 2 แอลลีล และพอลิยีน ซึ่งลักษณะถูกควบคุมด้วยยีนหลายยีน นอกจากนั้น ยังสามารถทำนายโอกาสของการเกิดลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตในรุ่นต่อไปได้ เช่น การทำนายโอกาสของหมู่เลือดในรุ่นลูก เป็นต้น

3.5 ยีนบนโครโมโซมเพศ

โครโมโซมของมนุษย์มีจำนวน 23 คู่ หรือ 46 แท่ง ซึ่งในเพศชายและเพศหญิงมีโครโมโซมเหมือนกัน 22 คู่ คือ โครโมโซมร่างกาย (autosome) และอีก 1 คู่ แตกต่างกัน คือ โครโมโซมเพศ (sex chromosome) ซึ่งในเพศหญิงมีโครโมโซมเพศเป็น XX ส่วนเพศชายมีโครโมโซมเพศเป็น XY

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าลักษณะทางพันธุกรรมถูกควบคุมด้วยยีนบนโครโมโซมร่างกาย และมีการถ่ายทอดลักษณะตามกฎของเมนเดล ทั้งความผิดปกติของแอลลีลเด่น ซึ่งหากมีแอลลีลเด่นเพียงแอลลีลเดียวก็จะแสดงลักษณะความผิดปกติออกมาทันที เช่น โรคหัวใจ และความผิดปกติของแอลลีลด้อย ซึ่งจะแสดงลักษณะความผิดปกติออกมาก็ต่อเมื่อคู่ของยีนนั้นเป็นแอลลีลด้อยทั้งคู่ แต่หากมีแอลลีลด้อยเพียงแอลลีลเดียวก็จะไม่แสดงความผิดปกติออกมา เนื่องจากถูกแอลลีลเด่นข่มอยู่ เช่น โรคผิวหนัง โรคธาลัสซีเมีย รวมถึงการถ่ายทอดลักษณะพันธุกรรมด้วยยีนบนโครโมโซมร่างกายที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล เช่น หมู่เลือดระบบ ABO สีผิว สีตา

ในปี พ.ศ. 2453 ทอมัส ฮันต์ มอร์แกน (Thomas Hunt Morgan) นักวิจัยด้านเอ็มบริโอของมหาวิทยาลัยโคลัมเบีย ประเทศสหรัฐอเมริกา พบลักษณะพันธุกรรมที่ควบคุมด้วยยีนบนโครโมโซมเพศเป็นครั้งแรกจากการทดลองเลี้ยงและผสมพันธุ์แมลงหวี่ ซึ่งมีโครโมโซม 4 คู่ ประกอบด้วยโครโมโซมร่างกาย 3 คู่ และโครโมโซมเพศ 1 คู่ ซึ่งแมลงหวี่เพศเมียมีโครโมโซมเพศเป็น XX และแมลงหวี่เพศผู้มีโครโมโซมเพศเป็น XY เช่นเดียวกับโครโมโซมเพศของคน



▲ ภาพที่ 4.16 โครโมโซมเพศของแมลงหวี่
ที่มา : คลังภาพ อจท.

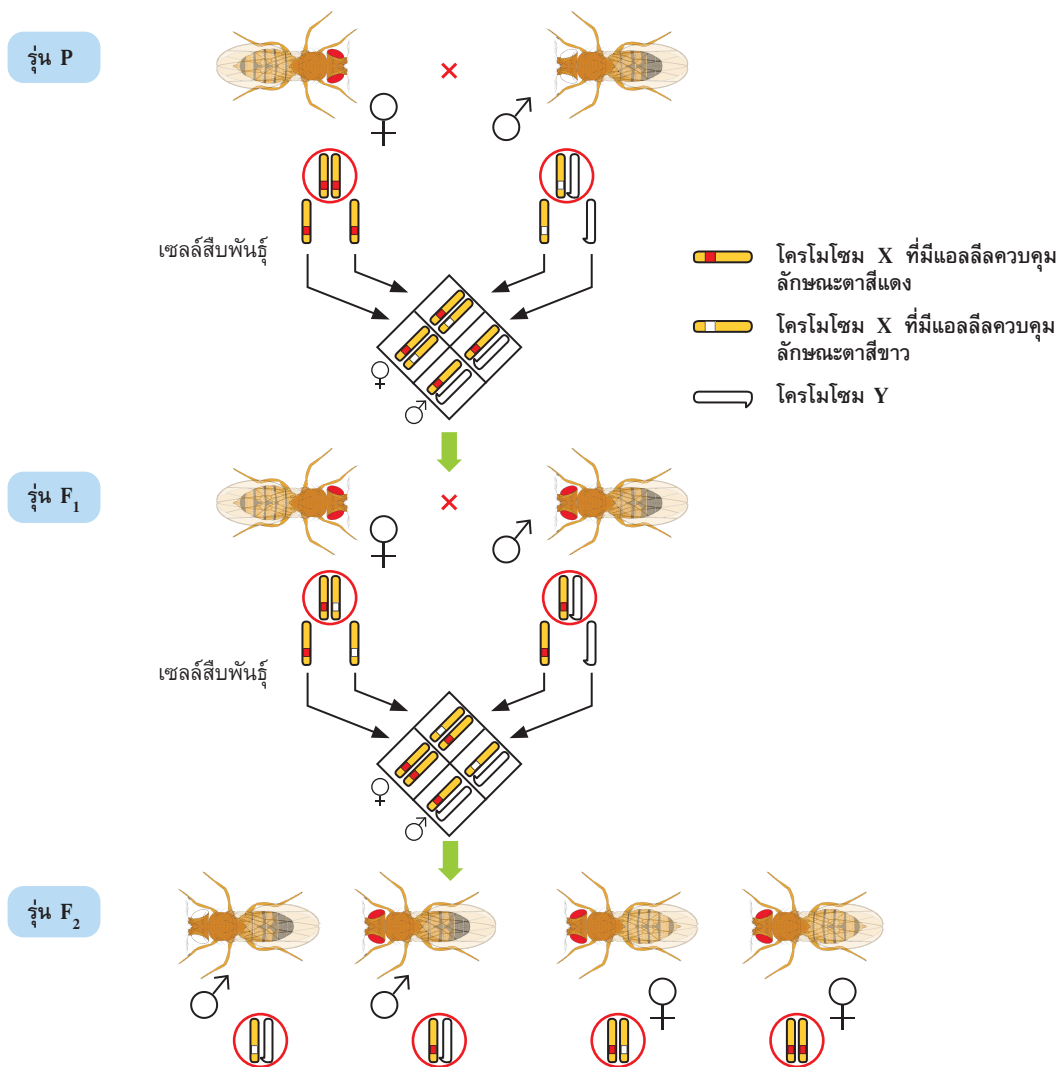
มอร์แกนทดลองผสมพันธุ์แมลงหวี่เป็นจำนวนหลายรุ่น ทำให้ได้ลูกหลานเป็นจำนวนมาก จากการสังเกตพบว่าแมลงหวี่เพศผู้บางตัวมีตาสีขาว ซึ่งแตกต่างจากแมลงหวี่ส่วนใหญ่ที่มีตาสีแดง ซึ่งเป็นลักษณะปกติ (wild type) มอร์แกนจึงเรียกแมลงหวี่ตาสีขาวเหล่านี้ว่าสายพันธุ์กลายหรือฟีโนไทป์ที่กลายพันธุ์ (mutant phenotype) เนื่องจากเกิดการกลายพันธุ์จากแอลลีลของสายพันธุ์ปกติที่มีตาสีแดง



▲ ภาพที่ 4.17 สีตาที่แตกต่างกันของแมลงหวี่
ที่มา : คลังภาพ อจท.

จากนั้นมอร์แกนจึงผสมพันธุ์แมลงหวี่เพศเมียตาสีแดงกับแมลงหวี่เพศผู้ตาสีขาว ได้รุ่น F_1 มีตาสีแดงทั้งหมด แล้วจึงนำรุ่น F_1 มาผสมพันธุ์กันเอง ได้รุ่น F_2 ซึ่งเพศเมียทุกตัวมีตาสีแดง แต่เพศผู้มีตาสีแดงต่อตาสีขาว ในอัตราส่วน 1 : 1 และจะพบแมลงหวี่ตาสีขาวเฉพาะในเพศผู้เท่านั้น มอร์แกนจึงสรุปว่า สีตาของแมลงหวี่มีความเชื่อมโยงกับเพศ

จากผลการทดลองดังกล่าว มอร์แกนให้เหตุผลว่า ยีนที่ควบคุมลักษณะสีตาของแมลงหวี่อยู่บนโครโมโซม X โดยแอลลีลควบคุมตาสีแดงจะแสดงลักษณะข่มแอลลีลควบคุมตาสีขาว ขณะที่โครโมโซม Y ไม่มียีนควบคุมสีตา โดยแมลงหวี่รุ่นลูกเพศผู้จะได้รับโครโมโซม X จากแม่และโครโมโซม Y จากพ่อ ส่วนแมลงหวี่เพศเมียจะได้รับโครโมโซม X จากพ่อและแม่ ซึ่งแมลงหวี่รุ่นลูกเพศผู้ที่มียีนควบคุมตาสีขาวเพียงแอลลีลเดียวก็จะแสดงลักษณะตาสีขาวออกมา ขณะที่แมลงหวี่เพศเมียจะต้องมีแอลลีลควบคุมตาสีขาวทั้งคู่ ถึงจะแสดงลักษณะตาสีขาวออกมา



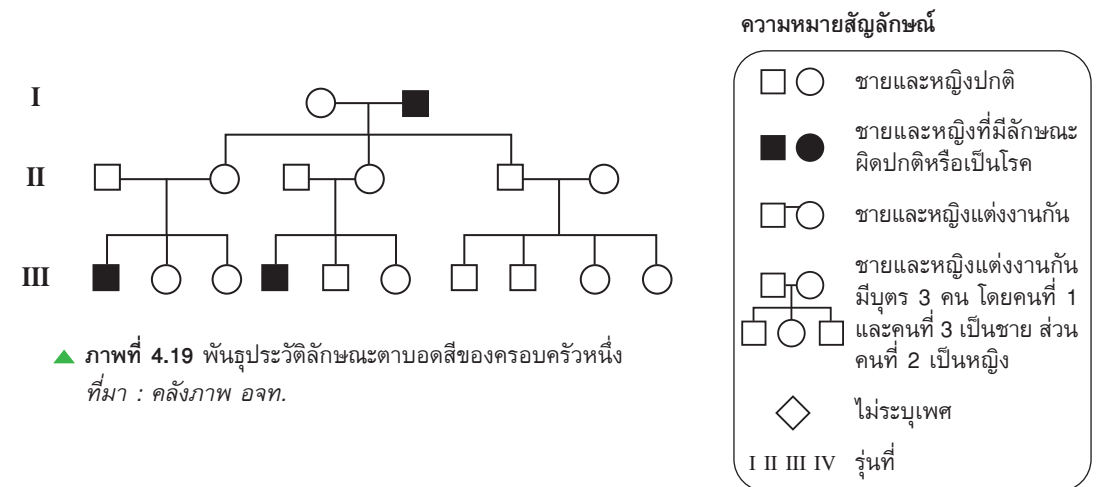
▲ ภาพที่ 4.18 การผสมพันธุ์แมลงหวี่ตามแนวคิดของมอร์แกน
ที่มา : คลังภาพ อจท.

มอร์แกนเรียกยีนที่ถ่ายทอดผ่านโครโมโซมเพศของแมลงหวี่นี้ว่า **ยีนที่เกี่ยวข้องกับเพศ** (sex-linked gene) ซึ่งเป็นการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่ควบคุมโดยยีนบนโครโมโซมเพศเท่านั้น แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) **ยีนบนโครโมโซม X (X-linked gene)** เป็นยีนที่มีตำแหน่งอยู่บนโครโมโซม X ซึ่งพบทั้งแอลลีลเด่นและแอลลีลด้อย แต่ส่วนมากมักพบเป็นแอลลีลด้อยมากกว่า และจะพบในเพศชายมากกว่าเพศหญิงเนื่องจากเพศชายมีโครโมโซม X เพียงแท่งเดียว และบางยีนก็ก่อให้เกิดโรคหรือลักษณะผิดปกติ เช่น

ลักษณะตาบอดสีเขียว-แดง (green and red color blindness) เป็นลักษณะที่ควบคุมโดยยีนบนโครโมโซม X ซึ่งเป็นแอลลีลด้อย การศึกษาลักษณะตาบอดสีของครอบครัวสามารถนำมาเขียน **พันธุ์ประวัติ (pedigree)** ซึ่งเป็นแผนผังแสดงความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมของบุคคลต่าง ๆ ในครอบครัว ซึ่งสามารถใช้ศึกษารูปแบบการถ่ายทอดทางพันธุกรรมของลักษณะที่สนใจ เช่น โรคทางพันธุกรรมที่ถูกควบคุมด้วยยีนบนโครโมโซมร่างกายและโครโมโซมเพศ โดยใช้สัญลักษณ์แสดงแทนตัวบุคคล เพศ ลักษณะพันธุกรรมที่ปกติหรือผิดปกติ และความสัมพันธ์ต่าง ๆ ในครอบครัว

จากการศึกษาพันธุ์ประวัติของครอบครัวหนึ่งที่แม่สายตาปกติ แต่พ่อเป็นตาบอดสี ดังนี้



▲ ภาพที่ 4.19 พันธุ์ประวัติลักษณะตาบอดสีของครอบครัวหนึ่ง
ที่มา : คลังภาพ อจท.

หากกำหนดให้ C แทนแอลลีลควบคุมลักษณะตาปกติ และ c แทนแอลลีลควบคุมลักษณะตาบอดสี จากพันธุ์ประวัติของครอบครัวนี้ แสดงให้เห็นว่า ในรุ่นที่ III ลูกชายคนแรกของครอบครัวที่ 1 และ 2 มีจีโนไทป์แบบ X^cY ซึ่งมีลักษณะตาบอดสี ดังนั้น ลูกชายคนแรกจาก 2 ครอบครัวนี้ต้องได้รับแอลลีลตาบอดสีมาจากแม่ เนื่องจากลูกชายจะรับโครโมโซม X จากแม่ จึงทำให้ทราบว่าหญิงคนที่ 1 และ 2 ในรุ่นที่ II มีจีโนไทป์แบบ X^CX^c ซึ่งเป็นพาหะ (carrier) เพราะรับแอลลีลตาบอดสี X^c มาจากพ่อในรุ่นที่ 1



Biology Focus

การแข็งตัวของเลือด

การแข็งตัวของเลือด เป็นกระบวนการที่ทำให้เลือดกลายเป็นลิ่มเลือดซึ่งเป็นกลไกสำคัญของการ

- ห้ามเลือด เมื่อเกิดบาดแผลเกล็ดเลือดจะเคลื่อนที่มายังบริเวณบาดแผลและปล่อยเอนไซม์ทรอมโบ-
- พลาสทิน เพื่อกระตุ้นให้ไฟบริโนเจนเปลี่ยนเป็นไฟบริน จากนั้นไฟบรินจะกระตุ้นให้ไฟโบรินเจน
- เปลี่ยนเป็นไฟบริน และเข้าจับกับเกล็ดเลือดกลายเป็นลิ่มเลือดเพื่ออุดรอยรั่วของหลอดเลือดให้เลือดไม่
- ไหลออกจากหลอดเลือด

Biology in Real Life



คู่สมรสที่เป็นโรคหรือเป็นพาหะของโรคทางพันธุกรรมจะมีความเสี่ยงที่จะให้กำเนิดบุตรที่มีความผิดปกติทางพันธุกรรม เช่น โรคตาบอดสี โรคฮีโมฟีเลีย โรคกลุ่มอาการดาวน์ เป็นต้น จึงควรตรวจหาความผิดปกติทางพันธุกรรมของทารกในครรภ์ ซึ่งสามารถตรวจได้เมื่ออายุครรภ์หลังประมาณ 12-18 สัปดาห์ โดยตรวจจากชิ้นเนื้อของรก การเจาะน้ำคร่ำ หรือการตรวจเลือดจากสายสะดือทารก

โรคฮีโมฟีเลีย (hemophilia) เป็นความผิดปกติจากแอลลีลด้อยบนโครโมโซม X ซึ่งเกิดจากการขาดโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวของเลือด เมื่อเกิดบาดแผลจึงมีเลือดออกนานกว่าปกติเพราะร่างกายสร้างลิ่มเลือดได้ช้า ปัจจุบันคนที่โรคฮีโมฟีเลียสามารถรักษาได้โดยการฉีดโปรตีนที่ทำให้เลือดแข็งตัว

โรคภาวะพร่องเอนไซม์ G-6-PD (glucose-6-phosphate dehydrogenase deficiency) เป็นความผิดปกติจากแอลลีลด้อยบนโครโมโซม X ซึ่งเกิดจากร่างกายขาดเอนไซม์กลูโคส-6-ฟอสเฟตดีไฮโดรจีเนส (glucose-6-phosphate dehydrogenase) ที่ช่วยป้องกันการแตกตัวของเซลล์เม็ดเลือดแดงจากการทำลายของสารอนุมูลอิสระ ผู้ที่ขาดเอนไซม์นี้จะมีอาการแพ้ยา รักษาโรคมาลาเรีย ยาปฏิชีวนะ ยาแก้ปวดลดไข้ และอาหารบางชนิด ปัจจุบันยังไม่มี การรักษาที่จำเพาะนอกเหนือจากการหลีกเลี่ยงตัวกระตุ้นต่าง ๆ

โรคทางพันธุกรรมที่เกิดจากแอลลีลด้อยบนโครโมโซม X พบได้น้อย เช่น โรคมนุษย์หมาป่า (congenital generalized hypertrichosis) ซึ่งจะมีขนยาวบริเวณใบหน้า ลำตัว แขนและขา เป็นต้น

2) ยีนบนโครโมโซม Y (Y-linked gene) เป็นยีนที่มีตำแหน่งอยู่บนโครโมโซม Y ทำหน้าที่ควบคุมลักษณะของเพศชาย ซึ่งการถ่ายทอดยีนบนโครโมโซม Y จะถ่ายทอดจากพ่อไปยังลูกชาย และจากลูกชายไปยังหลายชายเป็นทอด ๆ ต่อกันไป นอกจากนี้บนโครโมโซม Y ยังมียีนควบคุมลักษณะอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางเพศอยู่ด้วย แต่เนื่องจากโครโมโซม Y มีขนาดเล็กมาก จึงมียีนอยู่เพียงจำนวนน้อย ลักษณะทางพันธุกรรมที่ถ่ายทอดผ่านโครโมโซม Y เช่น ยีน SRY ที่ควบคุมการสร้างอวัยวะ นัย้เท้ามีพังผืด ผิวหนังมีสะเก็ดดำทั้งตัว



กิจกรรม

ทักษะกระบวนการวิทยาศาสตร์

- การสังเกต
- การตีความข้อมูลและการลงสรุปข้อมูล

จิตวิทยาศาสตร์

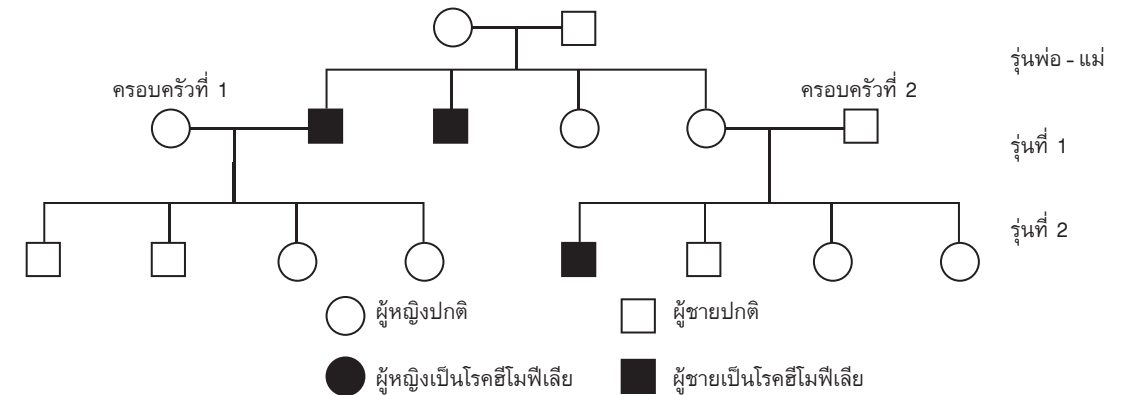
- ความมีเหตุผล
- ความรอบคอบ

ลักษณะทางพันธุกรรมที่ควบคุมโดยยีนบนโครโมโซมเพศ

จงตอบคำถามต่อไปนี้

1. ชายคนหนึ่งตาบอดสี มีพ่อตาปกติ จงหาจีโนไทป์ของแม่ หากกำหนดให้ C แทนแอลลีลเด่นสำหรับตาปกติ และ c แทนแอลลีลด้อยสำหรับตาบอดสีบนโครโมโซม X

- ถ้าชายตาบอดสีแต่งงานกับหญิงตาปกติแต่เป็นพาหะของโรคตาบอดสี จะมีโอกาสที่ลูกชายและลูกสาวตาบอดสีได้ร้อยละเท่าใด
- ถ้าชายตาบอดสีแต่งงานกับหญิงตาปกติและไม่เป็นพาหะของโรคตาบอดสี จะเป็นไปได้หรือไม่ที่จะมีลูกชายหรือลูกสาวตาบอดสี เพราะเหตุใด
- จากพันธุประวัติของครอบครัวหนึ่งที่มีประวัติเกี่ยวกับโรคฮีโมฟีเลีย ดังนี้



▲ ภาพที่ 4.20 พันธุประวัติลักษณะของโรคฮีโมฟีเลียของครอบครัวหนึ่งที่มา : คลังภาพ อจท.

จงตอบคำถามต่อไปนี้

- เพราะเหตุใดลูกชายในรุ่นที่ 1 ถึงเป็นโรคฮีโมฟีเลียทั้งหมด
- เพราะเหตุใดลูกชายในครอบครัวที่ 2 ถึงเป็นโรคฮีโมฟีเลียร้อยละ 50
- เพราะเหตุใด โอกาสในการพบโรคทางพันธุกรรมที่ถ่ายทอดด้วยยีนบนโครโมโซม Y จึงน้อยกว่าโรคทางพันธุกรรมที่ถ่ายทอดด้วยยีนบนโครโมโซม X



อภิปรายผลกิจกรรม

จากกิจกรรมนี้ จะสามารถทำนายโอกาสของการเกิดโรคทางพันธุกรรมที่มียีนควบคุมอยู่บนโครโมโซมเพศ ซึ่งหากยีนนั้นมีตำแหน่งอยู่บนโครโมโซม X ลูกชายที่ได้รับโครโมโซมดังกล่าวจะแสดงอาการของโรคทันทีเนื่องจากมีโครโมโซม X เพียงแท่งเดียว แต่ลูกสาวจะเป็นพาหะของโรค และจะแสดงอาการของโรคเมื่อได้รับโครโมโซม X ที่มีแอลลีลผิดปกติทั้งสองแท่ง และหากยีนนั้นมีตำแหน่งอยู่บนโครโมโซม Y จะเป็นการถ่ายทอดจากพ่อไปยังลูกชาย และจากลูกชายไปยังหลายชายเท่านั้น เนื่องจากเพศหญิงไม่มีโครโมโซม Y

3.6 ยีนบนโครโมโซมเดียวกัน

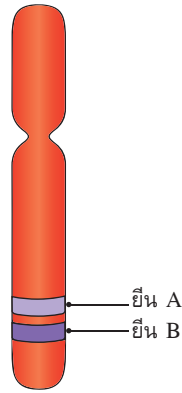
โครโมโซมหนึ่งโครโมโซมประกอบด้วยยีนจำนวนมากซึ่งยีนบางยีนอาจมีตำแหน่งบนโครโมโซมใกล้กันและมีแนวโน้มจะถูกถ่ายทอดไปด้วยกันได้

ในปี พ.ศ. 2446 วอลเตอร์ ชัตตัน (Walter Sutton) กล่าวว่า “โครโมโซมเป็นแหล่งรวมของยีน ซึ่งโครโมโซมหนึ่งโครโมโซมประกอบด้วยยีนเป็นจำนวนมาก โดยยีน 2 โลคัส หรือมากกว่า 2 โลคัส ที่อยู่บนโครโมโซมเดียวกันสามารถถ่ายทอดไปด้วยกันได้ เรียกว่ายีนที่ถูกถ่ายทอดไปด้วยกันว่า **ลิงค์เกจ (linkage)**” ซึ่งส่วนมากยีนที่อยู่ใกล้กันจะมีโอกาสถ่ายทอดไปด้วยกันมากกว่ายีนที่อยู่ไกลกัน เพราะยีนที่อยู่ใกล้กันอาจเกิดครอสซิงโอเวอร์

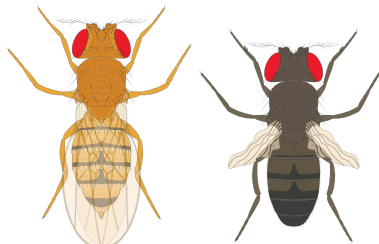
โดยพิจารณาจาก 2 ลักษณะที่ถูกควบคุมด้วยยีนที่อาจถูกถ่ายทอดไปด้วยกัน คือ ลักษณะสีตัวและลักษณะของปีก ซึ่งลักษณะที่พบได้ทั่วไปในประชากรตามธรรมชาติของแมลงหวี่หรือลักษณะเด่น คือ ลำตัวสีน้ำตาลและปีกยาวปกติ ในขณะที่ลักษณะด้อย คือ ลำตัวสีดำและปีกสั้น

กำหนดให้ B แทนแอลลีลควบคุมลำตัวสีน้ำตาล (แอลลีลเด่น) และ b แทนแอลลีลควบคุมลำตัวสีดำ (แอลลีลด้อย) และ C แทนแอลลีลควบคุมปีกปกติ (แอลลีลเด่น) และ c แทนแอลลีลควบคุมปีกกุด (แอลลีลด้อย)

เมื่อแมลงหวี่ตัวสีน้ำตาลปีกปกติที่เป็นโฮโมไซกัส (BBCC) ผสมพันธุ์กับแมลงหวี่ตัวสีดำปีกสั้นที่เป็นโฮโมไซกัส (bbcc) จะได้ลูกรุ่น F₁ มีลักษณะลำตัวสีน้ำตาลปีกปกติที่เป็นเฮเทอโรไซกัส (BbCc) ทั้งหมด จากนั้นผสมพันธุ์แมลงหวี่ตัวสีน้ำตาลปีกปกติที่เป็นเฮเทอโรไซกัส (BbCc) ของรุ่น F₁ กับแมลงหวี่ตัวสีดำปีกสั้น (bbcc) พบว่า หากเป็นไปตามกฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระของเมนเดล แมลงหวี่ตัวสีน้ำตาลปีกปกติที่เป็นเฮเทอโรไซกัสจะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้ 4 รูปแบบ คือ BC Bc bC และ bc ส่วนแมลงหวี่ตัวสีดำปีกสั้นจะสร้างเซลล์สืบพันธุ์เพียงรูปแบบเดียว คือ bc ซึ่งฟีโนไทป์ของรุ่น F₂ น่าจะมีลักษณะที่แสดงออกมา 4 ลักษณะ คือ ตัวสีน้ำตาลปีกปกติ (BbCc) ตัวสีน้ำตาลปีกสั้น (Bbcc) ตัวสีดำปีกปกติ (bbCc) และตัวสีดำปีกสั้น (bbcc) ในอัตราส่วน 1 : 1 : 1 : 1 ตามลำดับ แต่จากการทดลอง พบว่า รุ่น F₂ ที่ได้มีฟีโนไทป์เพียง 2 ลักษณะเท่านั้น คือ ตัวสีน้ำตาลปีกปกติ (BbCc) และตัวสีดำปีกสั้น (bbcc) ในอัตราส่วน 1 : 1 ซึ่งไม่เป็นไปตามกฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระของเมนเดล

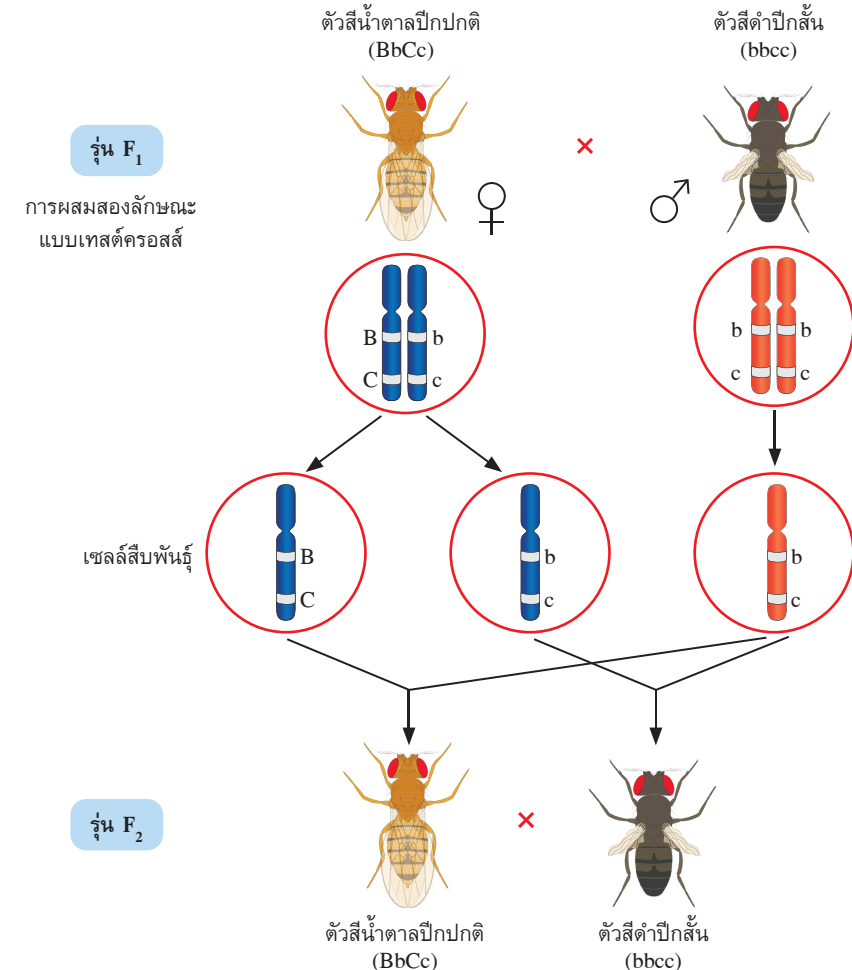


▲ ภาพที่ 4.21 ยีนที่อยู่ใกล้กันบนโครโมโซมเดียวกันมีโอกาสเป็นลิงค์เกจกัน
ที่มา : คลังภาพ อจท.



▲ ภาพที่ 4.22 ลักษณะของปีกและสีตัวที่แตกต่างกันในแมลงหวี่
ที่มา : คลังภาพ อจท.

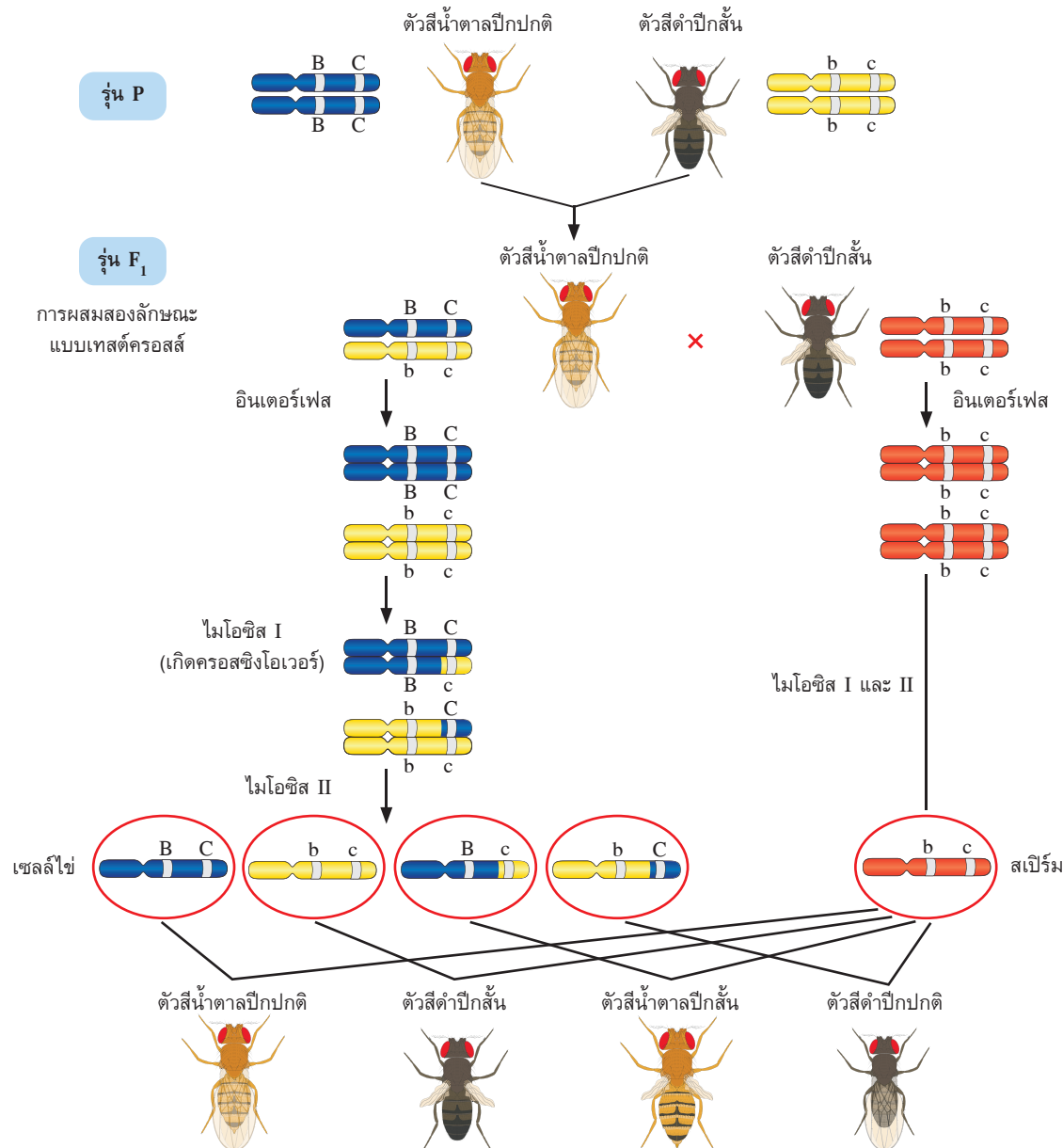
จากผลการทดลองแสดงว่า แมลงหวี่ตัวสีน้ำตาลปีกปกติในรุ่น F₁ ที่มีจีโนไทป์เป็นเฮเทอโรไซกัสสามารถสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้เพียง 2 แบบเท่านั้น คือ BC และ bc ส่วนแมลงหวี่ตัวสีดำปีกสั้นจะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้เพียงแบบเดียว คือ bc เนื่องจากแอลลีล B และ C อยู่บนโครโมโซมเดียวกัน เช่นเดียวกับแอลลีล b และ c ก็อยู่บนโครโมโซมเดียวกันซึ่งเป็นโฮโมโลกัสโครโมโซมกัน และจะถูกถ่ายทอดไปด้วยกันเมื่อมีการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ เรียกแอลลีลของยีนที่ถูกถ่ายทอดไปด้วยกันนี้ว่า **ลิงค์ยีน (linked genes)** แสดงว่ายีนที่ควบคุมลักษณะสีตัวและลักษณะของปีกอยู่บนโครโมโซมเดียวกันและเป็นลิงค์ยีนกัน



▲ ภาพที่ 4.23 การถ่ายทอดยีนที่เป็นลิงค์เกจในแมลงหวี่
ที่มา : Campbell, et al (2015)

อย่างไรก็ตาม แอลลีลของยีนที่เป็นโฮโมโลกัสโครโมโซมกันสามารถแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนโครมาทิดของโฮโมโลกัสโครโมโซมในระหว่างการเข้าคู่กันในระยะโพรเฟส I เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า **ครอสซิงโอเวอร์ (crossing over)** ทำให้ยีนที่เคยถ่ายทอดไปด้วยกันบางส่วนสามารถแยกออกจากกันไปยังเซลล์สืบพันธุ์แต่ละเซลล์ และจะทำให้มีเซลล์สืบพันธุ์จำนวนหนึ่งแตกต่างไปจากเดิม

โดยปกติการผสมพันธุ์แมลงหวี่ตัวสีน้ำตาลปีกปกติที่เป็นเฮเทอโรไซกัส ($BbCc$) กับแมลงหวี่ตัวสีดำปีกสั้น ($bbcc$) ควรจะได้รุ่น F_1 มีฟีโนไทป์เพียง 2 ลักษณะเท่านั้น คือ ตัวสีน้ำตาลปีกปกติ ($BbCc$) และตัวสีดำปีกสั้น ($bbcc$) แต่หากเกิดปรากฏการณ์ครอสซิงโอเวอร์ขึ้นในระหว่างการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ จะทำให้เซลล์สืบพันธุ์จำนวนหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น จากเซลล์สืบพันธุ์ชนิดปกติ BC และ bc เปลี่ยนเป็นเซลล์สืบพันธุ์ชนิด Bc และ bC ทำให้รุ่น F_1 ที่ได้แตกต่างจากเดิม โดยมีฟีโนไทป์ 4 ลักษณะ คือ ตัวสีน้ำตาลปีกปกติ ($BbCc$) ตัวสีน้ำตาลปีกสั้น ($Bbcc$) ตัวสีดำปีกปกติ ($bbCc$) และตัวสีดำปีกสั้น ($bbcc$) แต่ปริมาณลูก F_1 ที่เกิดจากการคลอสซิงโอเวอร์นั้นจะเกิดในปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับลูกที่เกิดจากลิงค์ยีนตามปกติ



▲ ภาพที่ 4.25 การถ่ายทอดยีนที่เป็นลิงเกจและการเกิดคลอสซิงโอเวอร์ในการผสมพันธุ์แมลงหวี่
ที่มา : Campbell, et al (2015)

3.7 ลักษณะพันธุกรรมที่ขึ้นกับอิทธิพลเพศ

ลักษณะทางพันธุกรรมบางลักษณะถูกควบคุมด้วยยีนบนโครโมโซมร่างกายและมีฮอโมนเพศควบคุม ซึ่งมีการแสดงออกในแต่ละเพศไม่เท่ากัน เรียกลักษณะเหล่านี้ว่า **ลักษณะพันธุกรรมที่ขึ้นกับอิทธิพลเพศ** (sex-influenced trait) เช่น ลักษณะศีรษะล้านในคน



▲ ภาพที่ 4.26 ลักษณะศีรษะล้านของคน เป็นพันธุกรรมที่ขึ้นกับอิทธิพลเพศ
ที่มา : คลังภาพ อจท.

กำหนดให้ B เป็นแอลลีลควบคุมลักษณะศีรษะล้าน และ B^+ เป็นแอลลีลควบคุมลักษณะศีรษะไม่ล้าน ซึ่งในเพศชายและเพศหญิงมีจีโนไทป์และฟีโนไทป์แสดงลักษณะศีรษะล้านแตกต่างกัน ดังนี้

ตารางที่ 4.4 : จีโนไทป์และฟีโนไทป์ของลักษณะศีรษะล้านในเพศชายและเพศหญิง

จีโนไทป์	ฟีโนไทป์	
	เพศชาย	เพศหญิง
BB	ศีรษะล้าน	ศีรษะล้าน
BB^+	ศีรษะล้าน	ศีรษะไม่ล้าน
B^+B^+	ศีรษะไม่ล้าน	ศีรษะไม่ล้าน

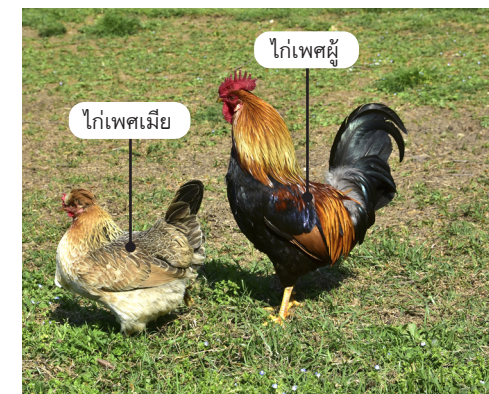
3.8 ลักษณะพันธุกรรมที่แสดงออกเฉพาะเพศใดเพศหนึ่ง

ลักษณะทางพันธุกรรมที่ถูกควบคุมด้วยยีนบนโครโมโซมร่างกาย บางลักษณะขึ้นอยู่กับระดับฮอโมนภายในร่างกาย ทำให้มีการแสดงออกเพียงเพศใดเพศหนึ่งเท่านั้น เรียกว่า **ลักษณะพันธุกรรมที่แสดงออกเฉพาะเพศใดเพศหนึ่ง** (sex limited traits) เช่น ขนหางของไก่ ซึ่งไก่เพศผู้จะมีขน 2 แบบ ขนแบบค็อก (cock feather) และขนแบบเฮน (hen feather) แต่เพศเมียมีขนหางสั้นเพียงแบบเดียวเท่านั้น

กำหนดให้ H เป็นแอลลีลควบคุมลักษณะขนแบบเฮน และ h เป็นแอลลีลควบคุมลักษณะขนแบบค็อก ซึ่งไก่เพศผู้และเพศเมียมีจีโนไทป์และฟีโนไทป์ที่แสดงขนหางแตกต่างกัน ดังนี้

ตารางที่ 4.5 : จีโนไทป์และฟีโนไทป์ของลักษณะขนหางไก่ในเพศผู้และเพศเมีย

จีโนไทป์	ฟีโนไทป์	
	เพศผู้	เพศเมีย
HH	ขนแบบเฮน	ขนแบบเฮน
Hh	ขนแบบเฮน	ขนแบบเฮน
hh	ขนแบบค็อก	ขนแบบเฮน



▲ ภาพที่ 4.27 ลักษณะขนแบบค็อกในไก่เพศผู้ และแบบเฮนในไก่เพศเมีย
ที่มา : คลังภาพ อจท.

Summary

การถ่ายทอดทางพันธุกรรม

การศึกษานันทศาสตร์ของเมนเดล

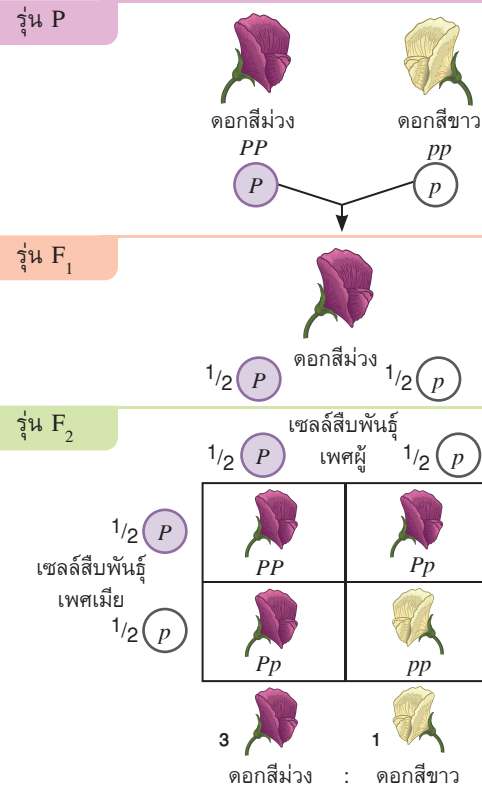
- เมนเดลเลือกใช้ถั่วลันเตาเป็นตัวแทนสิ่งมีชีวิตเพื่อศึกษาการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม เนื่องจากถั่วลันเตามีอายุสั้น ปลูกง่าย ให้เมล็ดจำนวนมาก มีดอกสมบูรณ์เพศ และมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน
- การถ่ายทอดลักษณะของถั่วลันเตาถูกควบคุมด้วยยีน (gene) ที่มี 2 แอลลีล คือ แอลลีลเด่นควบคุมลักษณะเด่น และแอลลีลด้อยควบคุมลักษณะด้อย ซึ่งแอลลีลเด่นจะข่มแอลลีลด้อยอย่างสมบูรณ์
- จีโนไทป์เป็นรูปแบบของยีนที่มีแอลลีลปรากฏเป็นคู่ เช่น PP Pp pp ส่วนฟีโนไทป์เป็นลักษณะที่ปรากฏออกมา เช่น ดอกสีม่วง ดอกสีขาว



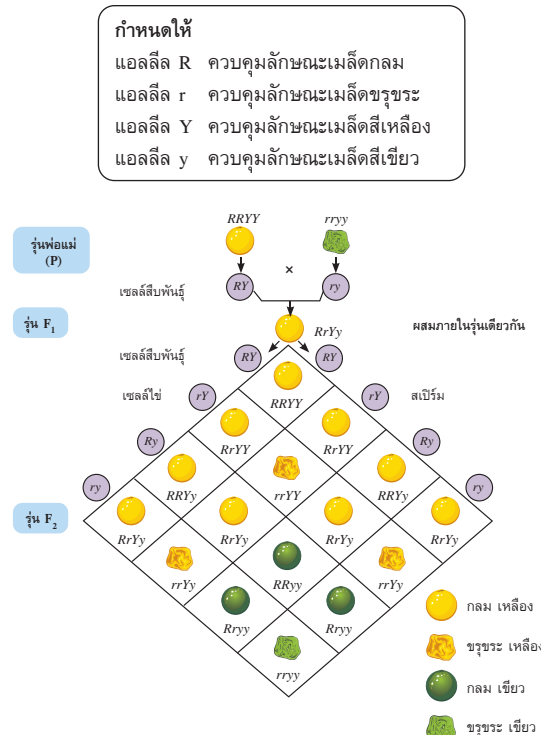
▲ ภาพที่ 4.28 ลักษณะฝักและดอกถั่วลันเตา
ที่มา : คลังภาพ อจท.

กฎการแยกและกฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระ

- กฎการแยก : ยีนที่เป็นคู่กันจะแยกออกจากกันเมื่อมีการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ โดยเซลล์สืบพันธุ์แต่ละเซลล์จะได้รับเพียงแอลลีลใดแอลลีลหนึ่ง
- กฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระ : แอลลีลของยีนที่เป็นคู่กัน เมื่อแยกออกจากกันจะจัดกลุ่มกันอย่างอิสระกับแอลลีลของยีนอื่น ๆ ซึ่งแยกออกจากคู่เช่นกันเพื่อเข้าไปยังเซลล์สืบพันธุ์



▲ ภาพที่ 4.29 การผสมหนึ่งลักษณะของถั่วลันเตา
ที่มา : คลังภาพ อจท.



▲ ภาพที่ 4.30 การผสมสองลักษณะของถั่วลันเตา
ที่มา : คลังภาพ อจท.

ลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล

- ความเด่นไม่สมบูรณ์ : รูปแบบของฟีโนไทป์ในรุ่น F_1 ที่แสดงออกไม่ได้มีลักษณะเด่นหรือด้อยแบบสมบูรณ์ แต่มีลักษณะอยู่กึ่งกลาง เช่น ดอกของต้นลิ้นมังกร ลักษณะของเส้นผม
- ความเด่นร่วม : รูปแบบที่แอลลีล 2 แอลลีลมีผลต่อฟีโนไทป์เท่า ๆ กัน เช่น หมู่เลือด AB ที่เกิดจากความเด่นร่วมของแอลลีล I^A และ I^B
- มัลติเพิลแอลลีล : รูปแบบของยีนที่มีแอลลีลมากกว่า 2 แอลลีล ในการควบคุมลักษณะใดลักษณะหนึ่ง เช่น หมู่เลือด ABO ที่มีแอลลีลควบคุม 3 แอลลีล ได้แก่ I^A I^B และ i
- ลักษณะที่ควบคุมด้วยยีนหลายคู่ : รูปแบบการถ่ายทอดลักษณะที่ถูกควบคุมด้วยยีนหลายยีน มักเป็นลักษณะเชิงปริมาณ และมีสิ่งแวดล้อมเกี่ยวข้อง เช่น สีผิว สีตา
- ยีนบนโครโมโซมเพศ : ยีนที่อยู่บนโครโมโซม X หรือ Y ความผิดปกติของยีนบนโครโมโซมเพศที่ถูกถ่ายทอด เช่น โรคฮีโมฟีเลีย โรคตาบอดสี
- ยีนบนโครโมโซมเดียวกัน : ยีนที่มีตำแหน่งอยู่บนโครโมโซมเดียวกัน ซึ่งมีแนวโน้มที่จะถ่ายทอดไปด้วยกัน เรียกว่ายีนที่ถ่ายทอดไปด้วยกันว่า ลิงค์ยีน เช่น ยีนควบคุมลักษณะสีตัวและลักษณะปีกของแมลงหวี่
- ลักษณะพันธุกรรมที่ขึ้นกับอิทธิพลเพศ : รูปแบบของลักษณะที่ถูกควบคุมโดยยีนบนโครโมโซมร่างกาย แต่มีการแสดงออกแตกต่างกันในแต่ละเพศ เช่น ลักษณะศีรษะล้าน
- ลักษณะพันธุกรรมที่แสดงออกเฉพาะเพศใดเพศหนึ่ง : รูปแบบของลักษณะที่ถูกควบคุมโดยยีนบนโครโมโซมร่างกาย แต่แสดงออกในเพศใดเพศหนึ่งเท่านั้น เช่น การสร้างน้ำนมในเพศหญิง การเกิดหนวดและเคราในเพศชาย

Self Check

ให้นักเรียนตรวจสอบความเข้าใจ โดยพิจารณาข้อความว่าถูกหรือผิด แล้วบันทึกลงในสมุด หากพิจารณาข้อความไม่ถูกต้อง ให้กลับไปทบทวนเนื้อหาตามหัวข้อที่กำหนดให้

	ถูก/ผิด	บทวนที่หัวข้อ
1. เมนเดลเลือกใช้ถั่วลันเตาเป็นพืชทดลอง เนื่องจากปลูกง่าย เจริญเติบโตเร็ว มียีนคู่เดียวควบคุมลักษณะทางพันธุกรรม และมีดอกแยกเพศอย่างชัดเจน จึงง่ายต่อการผสมพันธุ์เพื่อทดสอบลักษณะต่าง ๆ	☐	1.
2. จากกฎการถ่ายทอดพันธุกรรมของเมนเดล ยีนที่เป็นคู่กันจะแยกออกจากกัน และจัดกลุ่มอย่างอิสระกับยีนอื่นที่แยกออกจากคู่เช่นกัน	☐	2.
3. ลักษณะหมู่เลือดระบบ ABO ของมนุษย์ มีการถ่ายทอดตามกฎของเมนเดล โดยแอลลีลเด่น I^A I^B จะข่มแอลลีลด้อย i อย่างสมบูรณ์	☒	3.3
4. ลักษณะที่มีการแปรผันแบบต่อเนื่องมีปัจจัยควบคุม 2 ปัจจัย คือ พันธุกรรมและสิ่งแวดล้อม	☐	3.4
5. ความผิดปกติของยีนบนโครโมโซมเพศ X จะแสดงออกในเพศชายมากกว่าเพศหญิง เนื่องจากเพศชายมีโครโมโซมเพศ X เพียงแท่งเดียว เมื่อได้รับยีนที่มีแอลลีลผิดปกติก็จะแสดงออกทันที	☐	3.5



Unit questions 4

คำชี้แจง : ให้นักเรียนตอบคำถามต่อไปนี้

- กฎแห่งการแยกและกฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระของเมนเดล มีความสัมพันธ์กับการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสของสิ่งมีชีวิตอย่างไร
- ตามหลักการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของเมนเดล
กำหนดให้ กระต่ายขนสีขาว เป็นลักษณะเด่น แทนด้วย A
กระต่ายขนสีน้ำตาล เป็นลักษณะด้อย แทนด้วย a
กระต่ายขนสั้น เป็นลักษณะเด่น แทนด้วย B
กระต่ายขนยาว เป็นลักษณะด้อย แทนด้วย b
กระต่ายหูตั้ง เป็นลักษณะเด่น แทนด้วย C
กระต่ายหูพับ เป็นลักษณะด้อย แทนด้วย c
จงตอบคำถามต่อไปนี้
2.1 การผสมพันธุ์ระหว่างกระต่ายที่มีจีโนไทป์ $AABbcc$ กับ $aaBBCc$ รุ่น F_1 ที่ได้จะมีจีโนไทป์กี่แบบ อะไรบ้าง
2.2 การผสมพันธุ์ระหว่างกระต่ายที่มีจีโนไทป์ $AABbcc$ กับ $aaBBCc$ รุ่น F_1 ที่ได้จะมีฟีโนไทป์แบบใด และอัตราส่วนของฟีโนไทป์เท่าใด
- จากการศึกษาหมู่เลือดของครอบครัวหนึ่ง พบว่าพ่อมีเลือดหมู่ A แม่มีเลือดหมู่ B และลูก 3 คนมีเลือดหมู่ A AB และ A ตามลำดับ จงหาจีโนไทป์หมู่เลือดของพ่อและแม่
- ถ้าชายตาบอดสีแต่งงานกับหญิงที่เป็นพาหะของโรคตาบอดสี จงทำนายโอกาสของลูกชายหรือลูกสาวที่เป็นโรคตาบอดสี พร้อมทั้งเขียนพันธุประวัติของครอบครัวนี้
- การเกิดโครอสซิงโอเวอร์ในระหว่างการแบ่งเซลล์มีผลต่อการถ่ายทอดของลิงค์ยีนอย่างไร



แนวข้อสอบ A-Level

คำชี้แจง : ให้นักเรียนตอบคำถามต่อไปนี้

- พิจารณาข้อความต่อไปนี้
ก. เมื่อผสมพันธุ์พืชที่มีจีโนไทป์แบบโฮโมไซกัส 2 ต้น แบบผสมลักษณะเดียวจะได้ลูกที่มีฟีโนไทป์เหมือนกันทั้งหมด
ข. เมื่อผสมพันธุ์พืชที่มีจีโนไทป์แบบเฮเทอโรไซกัส 2 ต้น แบบผสมลักษณะเดียวจะได้ลูกที่มีฟีโนไทป์แตกต่างกัน 3 รูปแบบ
ค. เมื่อผสมพันธุ์พืชที่มีจีโนไทป์แบบเฮเทอโรไซกัส 2 ต้น แบบการผสมสองลักษณะจะได้ลูกที่มีฟีโนไทป์แตกต่างกัน 4 รูปแบบ
ข้อใดกล่าวถูกต้องเกี่ยวกับกฎของเมนเดล
1. ข้อ ก. เท่านั้น
2. ข้อ ก. และ ข.
3. ข้อ ก. และ ค.
4. ข้อ ข. และ ค.
5. ถูกต้องทุกข้อ
- สามีภรรยาคนหนึ่งมีหมู่เลือด AB โดยพ่อของภรรยามีประวัติทางการแพทย์พบว่าเป็นโรคฮีโมฟีเลีย ในขณะที่ฝ่ายสามีไม่พบว่าเป็นโรคฮีโมฟีเลีย ทั้งคู่มีลูกชาย 1 คน มีหมู่เลือด A ต่อมาลูกชายของทั้ง 2 คนประสบอุบัติเหตุและเสียชีวิตจากการเลือดไหลไม่หยุด และมีหญิงสาวคนหนึ่งอ้างกับทั้ง 2 คนว่าลูกสาวของเธอเป็นลูกของลูกชายของทั้ง 2 คน ถ้าเธอมีหมู่เลือด B และไม่มีประวัติทางการแพทย์ในครอบครัวเธอว่าเป็นโรคฮีโมฟีเลียเลย ข้อใดเป็นข้อยืนยันว่าเด็กคนนี้เป็นหลานของทั้ง 2 คนจริง
1. เด็กสาวมีจีโนไทป์ของหมู่เลือดเป็น ii และเป็นพาหะของโรคฮีโมฟีเลีย
2. เด็กสาวมีจีโนไทป์ของหมู่เลือดเป็น $I^A I^B$ และเป็นพาหะของโรคฮีโมฟีเลีย
3. เด็กสาวมีจีโนไทป์ของหมู่เลือดเป็น $I^A I^A$ และเป็นพาหะของโรคฮีโมฟีเลีย
4. เด็กสาวมีจีโนไทป์ของหมู่เลือดเป็น $I^A i$ และแสดงอาการของโรคฮีโมฟีเลีย
5. เด็กสาวมีจีโนไทป์ของหมู่เลือดเป็น $I^A i$ และแสดงอาการของโรคฮีโมฟีเลีย

