



คู่มือประกอบสื่อการสอนวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

วิชาชีววิทยา

เรื่อง

กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืองวิทย์ บรรจงรัตน์

พุทธศักราช 2554



กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์นันทนา อังกินันท์
รองศาสตราจารย์สุมิตรา คงชื่นสิน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัชรา ลิ้มปะนะเวช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต่อศักดิ์ สีลานันท์
นางปริญญนุช กลิ่นรัตน์
นางฐปนา บางยี่ขัน

**สถานที่ให้ความอนุเคราะห์ภาพ/
ข้อมูล**

ภาควิชาพฤกษศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ให้ความอนุเคราะห์ภาพ/ข้อมูล

อาจารย์ ดร.เพลินพิศ โชคชัยชำนาญกิจ (ภาพปก)



คำชี้แจง

กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ เป็นตอนหนึ่งของสื่อประกอบการสอน เรื่อง การถ่ายทอดทางพันธุกรรม ซึ่งมีสื่อทั้งหมด 13 ตอน คือ

1. ประวัติของเมนเดล และศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายทอดทางพันธุกรรม
2. Test cross, Backcross, Reciprocal cross
3. ความน่าจะเป็นและกฎแห่งการแยก
4. กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ
5. การแสดงออกของยีนแบบ Complete dominant, Incomplete dominant และ Codominant
6. มัลติเปิลแอลลีล (Multiple alleles)
7. หมู่เลือดระบบ ABO (ABO blood group)
8. พอลียีน (Polygene)
9. การถ่ายทอดลักษณะพันธุกรรมแบบ Sex influence และ Sex limited
10. ยีนบนโครโมโซมเพศ (Sex linked gene)
11. ยีนบนโครโมโซมเดียวกัน (linkage gene)
12. การศึกษาพันธุประวัติ
13. แบบทดสอบเรื่องการถ่ายทอดทางพันธุกรรม

คู่มือประกอบการสอน เรื่อง กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ ฉบับนี้เป็นส่วนต่อเนื่องกับ เรื่อง ความน่าจะเป็นและกฎแห่งการแยก จัดทำขึ้นเพื่อช่วยให้ผู้สอนเข้าใจจุดประสงค์และขอบเขตของเนื้อหา ของสื่อประกอบการสอนที่ผลิตขึ้น อีกทั้งเป็นแนวทางให้ผู้สอนนำ สื่อประกอบการสอน ไปใช้ได้อย่างเหมาะสม รวมถึงช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจและกระตุ้นความสนใจเนื้อหาของบทเรียน นอกจากนี้ยังสร้างความเข้าใจที่ถูกต้อง เกี่ยวกับศัพท์ทางวิชาการที่ควรทราบ และเปิดโอกาสให้ ผู้เรียนได้บูรณาการความรู้ที่ได้รับโดยการอภิปรายร่วมกัน ซึ่งหากบรรลุวัตถุประสงค์ที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว จะทำให้การจัดการเรียนการสอนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์เรืองวิทย์ บรรจงรัตน์
รองศาสตราจารย์สมิตรา คงชื่นสิน

ผู้จัดทำคู่มือ
ผู้ตรวจคู่มือ



สารบัญ

	หน้า
จุดประสงค์	5
ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง	5
เนื้อหา	6
แนวทางในการจัดการเรียนรู้	18
ภาคผนวก	22
ก. คำอธิบายศัพท์	
ข. แหล่งเรียนรู้เพิ่มเติม	
รายชื่อสื่อการสอนวิชาชีพวิชาจำนวน 92 ตอน	23



จุดประสงค์

เพื่อให้ผู้เรียนสามารถอธิบาย

1. กฎข้อที่ 2 ของเมนเดล “กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ” (Law of Independent Assortment)
2. ความสัมพันธ์ระหว่างกฎข้อที่ 2 ของเมนเดล และการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส

ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง

เมื่อผู้เรียนได้ดูสื่อประกอบการสอนตอนนี้แล้วสามารถ

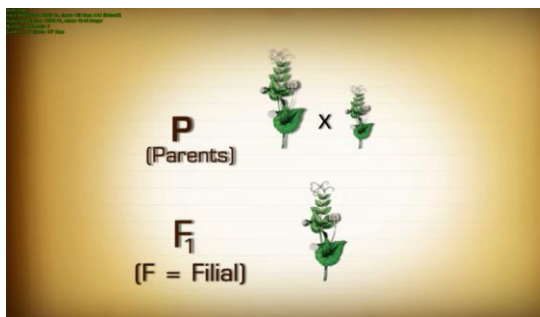
1. อธิบายกฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระของเมนเดลได้
2. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระกับการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสได้



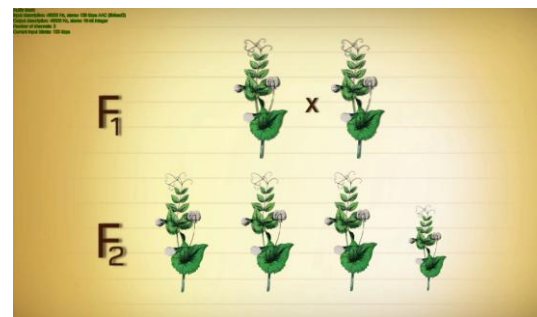
เนื้อหา

คู่มือประกอบการสอน เรื่อง กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ ฉบับนี้เป็นส่วนที่ต่อเนื่องจากคู่มือประกอบการสอนเรื่อง ความน่าจะเป็นและกฎแห่งการแยก ซึ่งเป็นกฎการถ่ายทอดทางพันธุกรรมของเมนเดล ดังนั้น เมื่อนักเรียนได้เรียนกฎการถ่ายทอดทางพันธุกรรมของเมนเดลจบทั้ง 2 ข้อแล้ว จะทำให้เข้าใจกระบวนการพื้นฐานในการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตและเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการศึกษาต่อในระดับที่สูงขึ้น

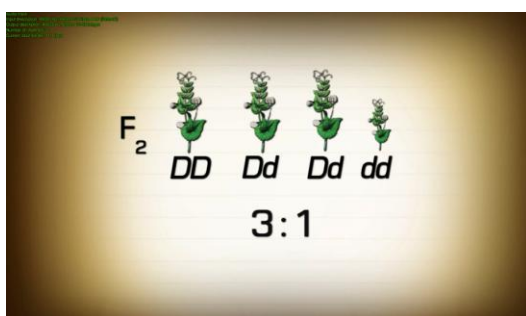
กฎการถ่ายทอดทางพันธุกรรมของเมนเดล มีอยู่ด้วยกัน 2 ข้อ ดังนี้ กฎข้อที่ 1 ของเมนเดล คือ กฎแห่งการแยก (law of segregation) ซึ่งมีใจความว่า “ยีนที่อยู่กันเป็นคู่ จะแยกออกจากกันไปเข้าสู่คนละเซลล์สืบพันธุ์” เมื่อเมนเดลได้ทำการผสมพันธุ์ต้นถั่วแบบ monohybrid cross หรือการผสมพันธุ์หนึ่งลักษณะนั้น ลูกผสม F_1 ที่ได้ มีลักษณะเป็นลักษณะเด่นเพียงลักษณะเดียว (รูปที่ 1 ก) ในขณะที่ลูกผสม F_2 จะมีการแสดงออกสองลักษณะ คือลักษณะเด่นและลักษณะด้อย (รูปที่ 1 ข) ในอัตราส่วน phenotype เด่น : ด้อย เท่ากับ 3 : 1 (รูปที่ 1 ค) และมีอัตราส่วนของ genotype เท่ากับ 1 : 2 : 1 (รูปที่ 1 ง)



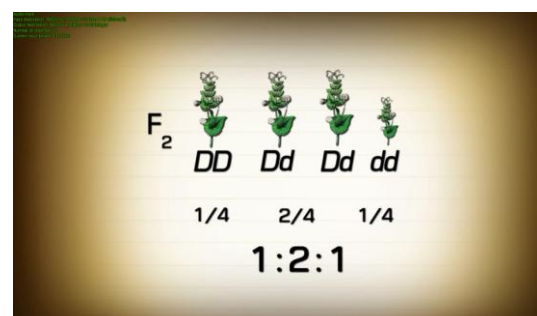
ก



ข



ค



ง

รูปที่ 1 (ก) การผสมพันธุ์ระหว่างถั่วต้นสูงกับถั่วต้นเตี้ย ได้ลูกมีลักษณะเด่น คือ ลูก F_1 เป็นต้นสูงทั้งหมด

(ข) ลูก F_2 ที่ได้จากการผสมตัวเองของ F_1 แสดงทั้งลักษณะเด่นและลักษณะด้อย

(ค) อัตราส่วน phenotype ของลูกผสม F_2 เด่น : ด้อย เท่ากับ 3 : 1

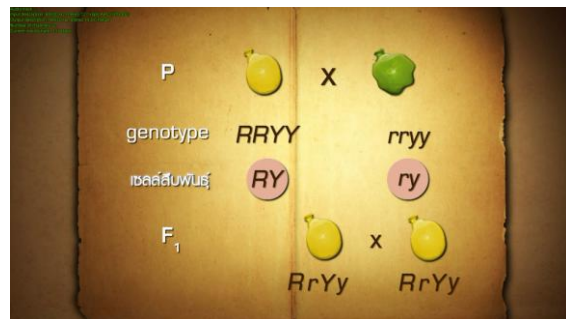
(ง) อัตราส่วน genotype ของลูกผสม F_2 เท่ากับ 1 : 2 : 1



ในการผสมพันธุ์ที่พิจารณาพร้อมกันสองลักษณะ หรือ dihybrid cross เช่น การผสมพันธุ์ระหว่างต้นถั่วที่มีเมล็ดกลมและสีเหลือง กับ ต้นถั่วที่มีเมล็ดย่นและสีเขียว (รูปที่ 2 ก) สมมุติว่าถั่วต้นพ่อแม่พันธุ์ ที่ฝ่ายหนึ่งมี เมล็ดกลมสีเหลือง มี genotype $RRYY$ และอีกฝ่ายหนึ่งมี เมล็ดย่นสีเขียว มี genotype $rryy$ ซึ่งในการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ของถั่ว ต้น ที่มี genotype $RRYY$ จะสามารถสร้างเซลล์สืบพันธุ์ ได้เป็น RY เพียงรูปแบบเดียว ในขณะที่ถั่วต้นที่มี genotype $rryy$ ก็จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ ได้เป็น ry เพียงแบบเดียว เช่นกัน ซึ่ง จะส่งผลให้ลูก F_1 จะมี genotype เป็น heterozygous ของยีน 2 ตำแหน่ง คือ $RrYy$ เรียกว่า ลูกผสมสองลักษณะ หรือ dihybrid ที่มีลักษณะเมล็ดกลมสีเหลืองทั้งหมด (รูปที่ 2 ข) และหลังจากนั้นเมื่อปล่อยให้ลูกรุ่น F_1 ผสมตัวเองลูก F_1 จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้ 4 แบบ คือ $RY:Ry:rY:ry$ ในสัดส่วนเท่า ๆ กัน คือ $1:1:1:1$ (รูปที่ 2 ค)



ก



ข



ค

รูปที่ 2 (ก) การผสมพันธุ์สองลักษณะ หรือ dihybrid cross ของเมล็ดถั่วที่มีเมล็ดกลมและมีสีเหลืองกับเมล็ดถั่วที่มีเมล็ดย่นและมีสีเขียว

(ข) การผสมพันธุ์แบบ dihybrid cross และการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ของถั่วรุ่นพ่อแม่

(ค) ลูก F_1 ผสมตัวเอง ซึ่ง F_1 จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้ 4 แบบ คือ $RY:Ry:rY:ry$ ในสัดส่วนเท่า ๆ กัน คือ $1:1:1:1$



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

Audio track
Input description: 48000 Hz, stereo, 127.4 kbps AAC, 14786402
Output description: 48000 Hz, stereo, 128 kbps AAC
Number of channels: 2
Current input bitrate: 128 kbps

Punnett square

F_2

เซลล์สืบพันธุ์ F_1 (RrYy)	เซลล์สืบพันธุ์ F_1 (RrYy)			
	RY	Ry	rY	ry
RY	RRYY (yellow round)	RRYy (yellow round)	RrYY (yellow round)	RrYy (yellow round)
Ry	RRYy (yellow round)	RRyy (yellow wrinkled)	RrYy (yellow round)	Rryy (yellow wrinkled)
rY	RrYY (yellow round)	RrYy (yellow round)	rrYY (green round)	rrYy (green round)
ry	RrYy (yellow round)	Rryy (yellow wrinkled)	rrYy (green round)	rryy (green wrinkled)

รูปที่ 3 การหา genotype และ phenotype ของลูก F_2 โดยการสร้างตาราง Punnett square

จะเห็นได้ว่า เซลล์สืบพันธุ์ของ ฝ่ายหนึ่งในทุกแบบมีโอกาสที่จะปฏิสนธิกับเซลล์สืบพันธุ์ของ อีกฝ่ายหนึ่งได้ทุกแบบและเมื่อรวมจำนวนลักษณะที่แสดงออกเหมือนกันสรุปรวมเป็นอัตราส่วน phenotype เท่ากับ เมล็ดกลมสีเหลือง : เมล็ดกลมสีเขียว : เมล็ดย่นสีเหลือง : เมล็ดย่นสีเขียว เท่ากับ 9 : 3 : 3 : 1 ดังรูปที่ 4

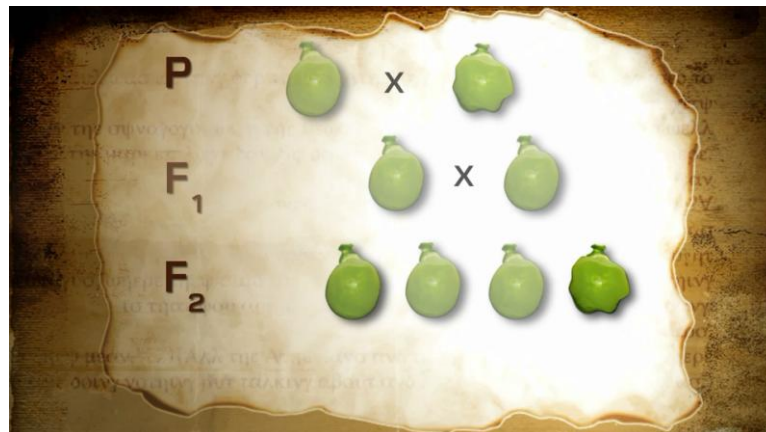
Audio track
Input description: 48000 Hz, stereo, 127.4 kbps AAC, 14786402
Output description: 48000 Hz, stereo, 128 kbps AAC
Number of channels: 2
Current input bitrate: 128 kbps

Phenotype	Genotype	Genotypic ratio	Phenotypic ratio
เมล็ดกลมสีเหลือง	RRYY	1	9
	RRYy	2	
	RrYY	2	
	RrYy	4	
เมล็ดกลมสีเขียว	RrYy	1	3
	Rryy	2	
เมล็ดย่นสีเหลือง	rrYY	1	3
	rrYy	2	
เมล็ดย่นสีเขียว	rryy	1	1

รูปที่ 4 genotype และ phenotype พร้อมทั้งอัตราส่วนของ F_2 จากการผสมแบบ dihybrid cross



นอกจากนี้เพื่อให้เข้าใจในการทำความเข้าใจ ยังมีอีกแนวทางหนึ่งที่จะ สามารถวิเคราะห์ผล ของ การผสมพันธุ์แบบ dihybrid cross โดยการแยกพิจารณาที่ละลักษณะแบบ monohybrid cross ดังนี้ ลักษณะที่ 1 คือลักษณะรูปร่างเมล็ด เช่น รุ่นพ่อแม่มีเมล็ดกลมผสมกับเมล็ดย่น ได้ลูกรุ่น F_1 ที่มีรูปร่าง เมล็ดกลมทั้งหมด และเมื่อปล่อยให้ F_1 ผสมตัวเองก็จะได้ลูก F_2 ซึ่งมีสัดส่วนเมล็ดกลมเท่ากับ $\frac{3}{4}$ และ เมล็ดย่นเท่ากับ $\frac{1}{4}$ ดังนั้น อัตราส่วนระหว่างเมล็ดกลม ต่อ เมล็ดย่น จึงเท่ากับ 3 : 1 (รูปที่ 5)



ก

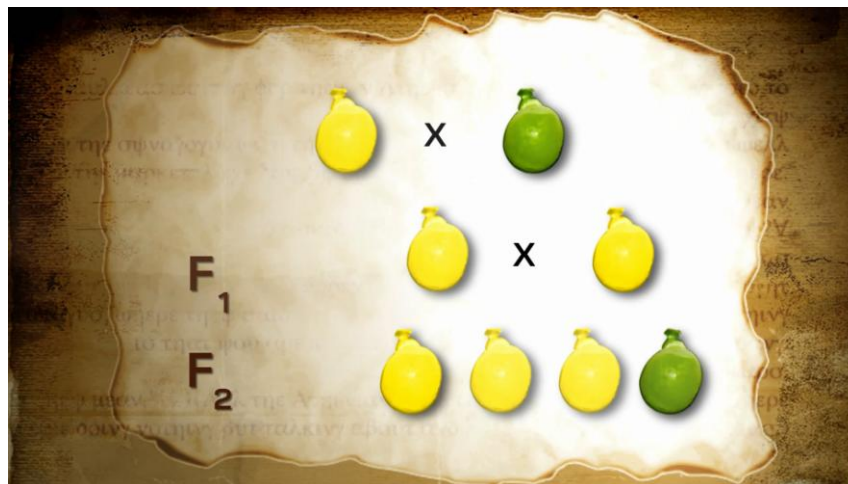


ข

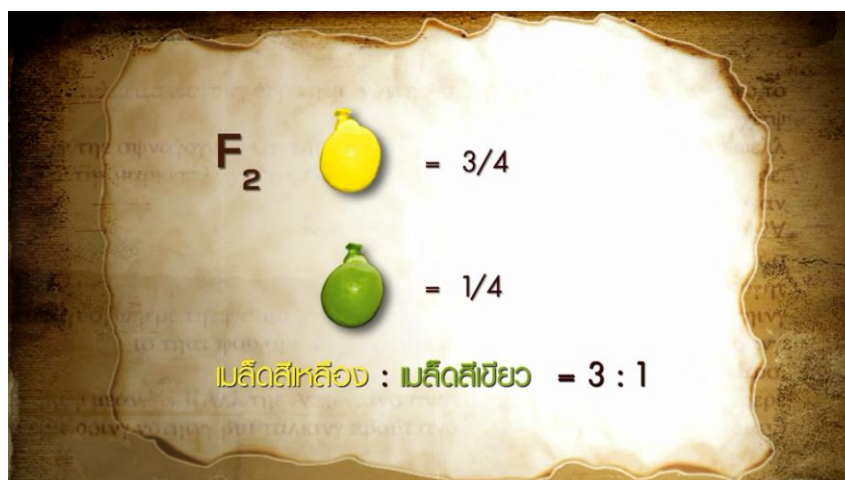
รูปที่ 5 (ก) การผสมพันธุ์แบบ monohybrid cross ในถั่วระหว่างเมล็ดกลมกับเมล็ดย่น
(ข) อัตราส่วน phenotype ใน F_2 เมล็ดกลม : เมล็ดย่น เท่ากับ 3 : 1



เช่นเดียวกันกับอีกลักษณะหนึ่งที่พ่อแม่มีเมล็ดสีเหลืองผสม พันธุ์กับเมล็ดสีเขียว ได้ลูกรุ่น F_1 เป็นเมล็ดสีเหลืองทั้งหมด และเมื่อปล่อยให้ F_1 ผสมตัวเองก็จะได้ลูกรุ่น F_2 มีสัดส่วนเมล็ดสีเหลืองเท่ากับ $\frac{3}{4}$ และเมล็ดสีเขียวเท่ากับ $\frac{1}{4}$ ก็จะได้สัดส่วนระหว่าง เมล็ดสีเหลืองต่อเมล็ดสีเขียว เท่ากับ 3 : 1 เช่นกัน (รูปที่ 6)



ก



ข

รูปที่ 6 (ก) การผสมพันธุ์แบบ monohybrid cross ในถั่วระหว่างเมล็ดสีเหลืองกับเมล็ดสีเขียว
(ข) อัตราส่วน phenotype ใน F_2 เมล็ดสีเหลือง : เมล็ดสีเขียว เท่ากับ 3 : 1



เมื่อพิจารณาพร้อมกันสองลักษณะ โดยการนำผลของทั้งสองลักษณะมาคูณกัน อัตราส่วนเมล็ด
กลมสีเหลือง : เมล็ดกลมสีเขียว : เมล็ดย่นสีเหลือง : เมล็ดย่นสีเขียว เท่ากับ $9 : 3 : 3 : 1$ (รูปที่ 7) ซึ่ง
เท่ากับการรวมกันของสอง monohybrid คือ $(3 + 1)^2$ จะเท่ากับ $9 + 3 + 3 + 1$ หรือโอกาสที่สอง
เหตุการณ์ที่ไม่ขึ้นแก่กัน จะมีโอกาสเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน จะมีค่าเท่ากับผลคูณของโอกาสที่จะเกิดแต่ละ
เหตุการณ์ตามกฎของการคูณ



ก



ข

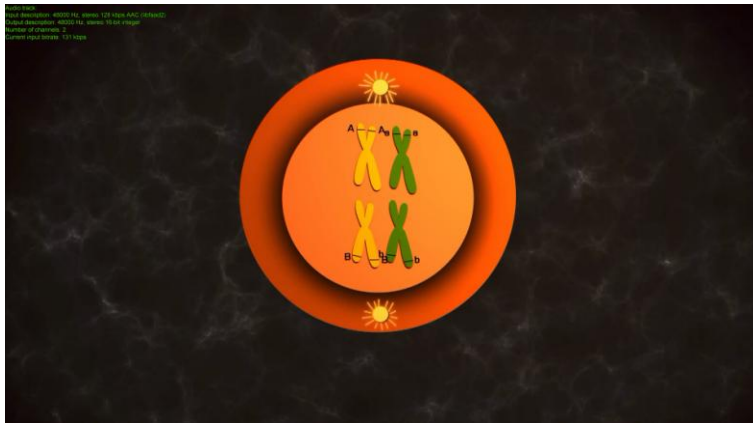
รูปที่ 7 (ก) การนำผลของ monohybrid cross ทั้งสองลักษณะมาพิจารณารวมกันซึ่งจะทำให้
ทราบอัตราส่วน phenotype ของ dihybrid cross ดังภาพ (ข)



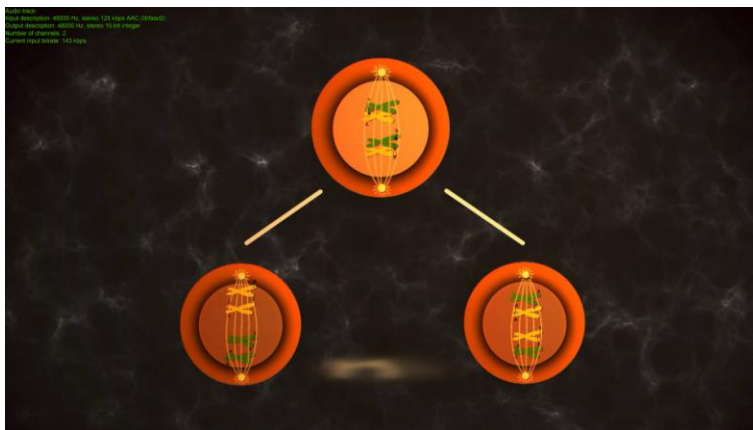
เมื่อผลการศึกษาการผสม พันธุ์สองลักษณะออกมาดังนี้ แสดงว่าคู่ของแอลลีลของยีนที่ควบคุมลักษณะเมล็ดเมื่อแยกออกจากกันไปรวมกลุ่มกับคู่ของแอลลีลที่ควบคุมลักษณะสีเมล็ดที่แยกออกจากกัน เช่นกันอย่างเป็นอิสระ เมินเดล จึงได้นำเสนอกฎการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมข้อที่ 2 ซึ่งมีชื่อว่า กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ (law of independent assortment) ซึ่งมีใจความว่า “คู่ของแอลลีลของยีนหนึ่งจะแยกออกจากกันไปรวมกลุ่ม อย่างอิสระ กับอีกแอลลีลหนึ่งของยีนอีกคู่หนึ่ง ที่แยกออกจากกัน” ซึ่งจากกฎข้อที่ 1 ของเมินเดล กล่าวว่ายีนจะอยู่กันเป็นคู่ และจะแยกออกจากกันไปยังเซลล์แต่ละเซลล์สืบพันธุ์ ในขณะที่กฎข้อ 2 ก็กล่าวว่าแต่ละแอลลีลของแต่ละคู่นั้นจะเข้าร่วมกลุ่มกับอีกแอลลีลของอีกคู่นั้นเป็นไปอย่างอิสระ ดังนั้นจึงสามารถสร้างเซลล์สืบพันธุ์ของลูก F_1 ที่มี genotype $RrYy$ โดยแอลลีล R กับ r แยกออกจากกัน ในขณะที่อีกคู่คือแอลลีล Y ก็แยกออกจาก y เช่นกัน และ R ก็จะไปเข้าคู่ได้ทั้งกับ Y และ y เช่นเดียวกันกับ r ก็จะไปเข้าคู่ได้ทั้งกับ Y และ y เช่นเดียวกันจึงได้เซลล์สืบพันธุ์ 4 แบบ คือ RY Ry rY ry ในสัดส่วนเท่า ๆ กัน

ความสัมพันธ์ระหว่างกฎข้อที่ 2 ของเมินเดลและการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส

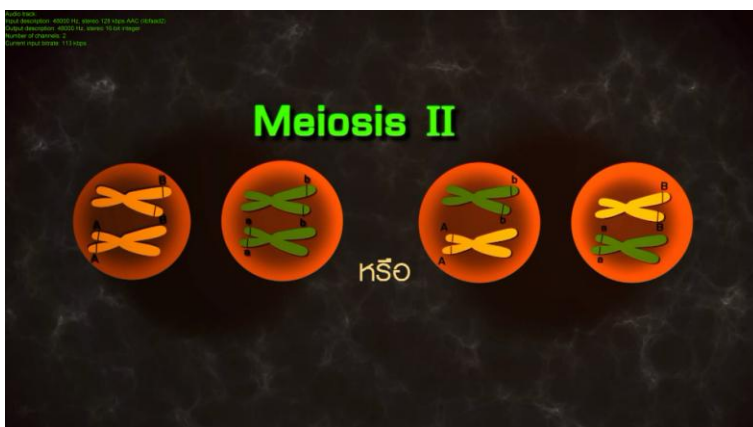
จากการศึกษาเรื่องกฎข้อที่ 2 ของเมินเดลนี้ ถ้าเรามองในแง่มุมทางชีววิทยาเช่นเดียวกับกฎข้อที่ 1 ของเมินเดลจะเห็นว่า กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระนี้ สอดคล้องกับกระบวนการแบ่ง ไมโอซิส ด้วยเช่นกัน คือ ในระยะ anaphase I โครโมโซมคู่เหมือนที่แยกออกจากกัน จะสามารถเข้าสู่ขั้วเซลล์โดยสัมพันธ์กับ centromere จะหันไปทางขั้วใด ยกตัวอย่างเช่น โครโมโซมคู่ที่ 1 แท่งสีเหลือง ที่มียีน A อยู่ นั้นอาจแยกไปกับ โครโมโซมคู่ที่ 2 แท่งสีเหลือง ที่มียีน B หรืออาจแยกไปด้วยกันกับโครโมโซมแท่งสีเขียว ที่มียีน b อยู่ เป็นต้น ดังนั้น จึง มีโอกาสได้เซลล์สืบพันธุ์ 4 แบบ คือ AB ab Ab และ aB ในสัดส่วนเท่า ๆ กัน คือ $1 : 1 : 1 : 1$ (รูปที่ 8)



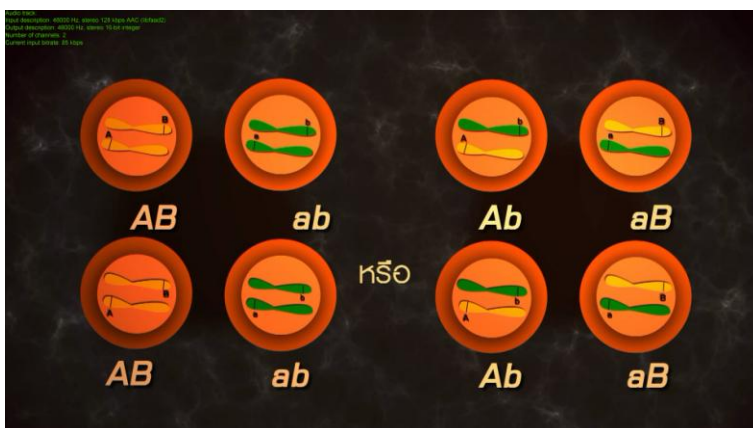
(ก) การเข้าคู่กันของโครโมโซม
คู่เหมือนในระยะ
prophase I



(ข) การรวมกลุ่มกันแบบสุ่ม
ของโครโมโซมคู่เหมือน
ในระยะ anaphase I



(ค) โอกาสที่จะเกิดขึ้นได้เมื่อมี
การรวมกลุ่มกันของ
โครโมโซมคู่เหมือน
แบบสุ่ม



(ง) เซลล์สืบพันธุ์ที่มีโอกาส
เกิดขึ้นได้หลังเสร็จสิ้น
meiosis II

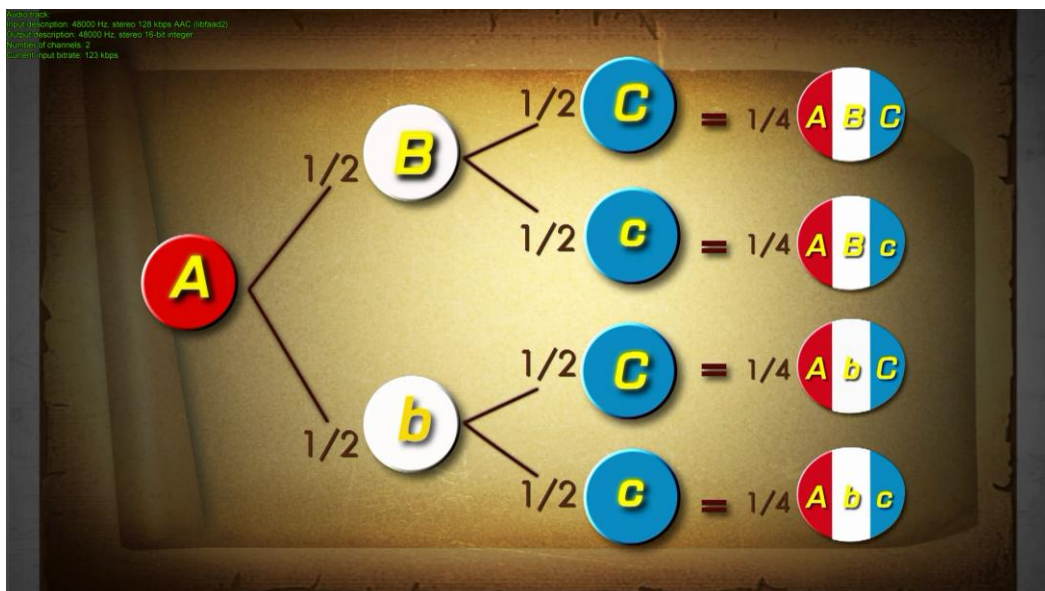
รูปที่ 8 จีโนไทป์ของเซลล์สืบพันธุ์หลังจากการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส



การประยุกต์ใช้กฎของเมนเดล

การหาชนิดและอัตราส่วนของเซลล์สืบพันธุ์

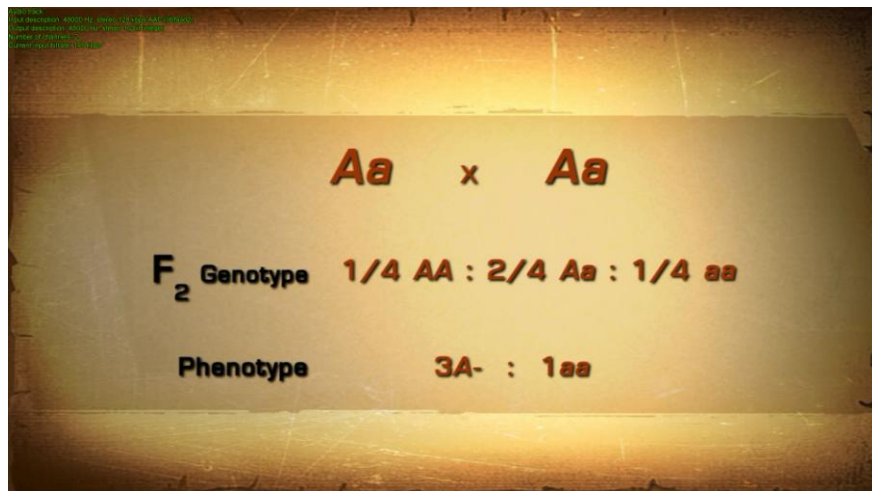
เมื่อผู้เรียนได้เข้าใจกฎเกณฑ์การถ่ายทอดทางพันธุกรรมตามกฎของเมนเดลแล้ว จากหลักการนี้สามารถนำมาดัดแปลงใช้กับการหาผลลัพธ์ของการผสมพันธุ์ในรูปแบบต่าง ๆ ได้ เช่น ในกรณีที่มียีน 3 คู่ สมมติว่าเป็น $AABbCc$ การหาเซลล์สืบพันธุ์ก็จะใช้หลักการเดียวกัน โดยการทำ branching คือ ยีนคู่ AA จะแยกออกได้รูปแบบเดียวคือ A ซึ่งจะไปรวมกลุ่มได้ทั้ง B และ b เช่นเดียวกับ คู่ A และ B ก็จะสามารถไปรวมกลุ่มได้ทั้ง C และ c เพราะฉะนั้น $AABbCc$ สร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้ 4 แบบ คือ ABC ABc AbC Abc ในสัดส่วนเท่า ๆ กัน (รูปที่ 9)



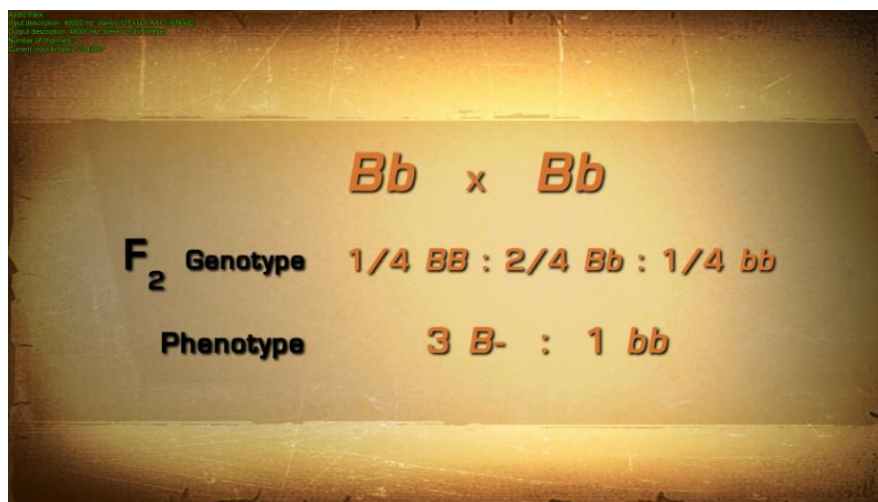
รูปที่ 9 การใช้วิธี branching เพื่อหาชนิดและสัดส่วนของเซลล์สืบพันธุ์

การคำนวณหาอัตราส่วน genotype และ phenotype

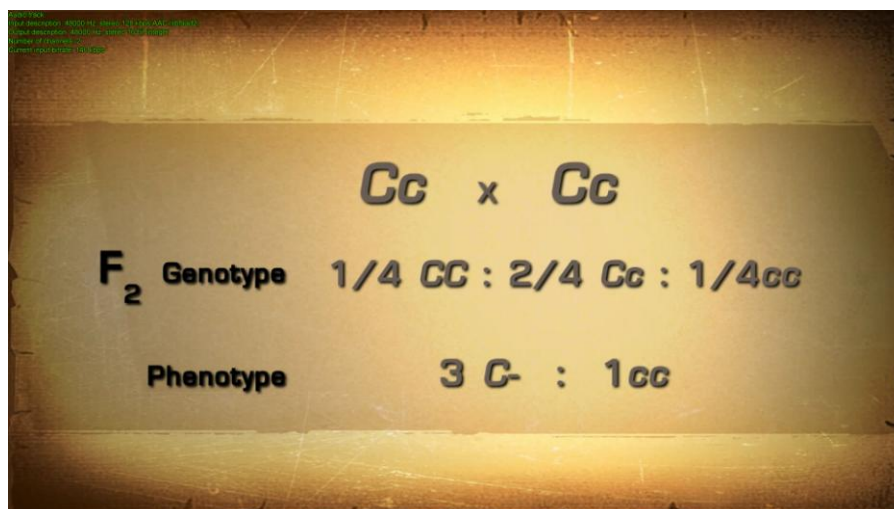
ในการคำนวณหาอัตราส่วน genotype และ phenotype สามารถทำได้ด้วยการ พิจารณาที่ละลักษณะตัวอย่างเช่น การผสมพันธุ์ระหว่าง $AABBCC$ กับ $aabbcc$ ลูก F_1 ที่ได้คือ $AaBbCc$ เมื่อนำลูก F_1 ผสมกันเอง ก็จะมี 3 คู่ monohybrid cross คือ คู่ของ Aa กับ Aa ก็จะได้ genotype $1/4 AA : 2/4 Aa : 1/4 aa$ และ phenotype 3 $A - : 1 aa$ ดังรูปที่ 10 คู่ของ Bb กับ Bb จะได้ genotype $1/4 BB : 2/4 Bb : 1/4 bb$ และ phenotype 3 $B - : 1 bb$ ดังรูปที่ 11 คู่ของ Cc กับ Cc จะได้ genotype $1/4 CC : 2/4 Cc : 1/4 cc$ และ phenotype 3 $C - : 1 cc$ ดังรูปที่ 12 โดยที่ในตำแหน่งของ phenotype ที่มีการขีดเส้นไว้ นั้นหมายถึงเป็นได้ทั้ง dominant gene หรือ recessive gene



รูปที่ 10 การผสมพันธุ์แบบ monohybrid ระหว่าง Aa กับ Aa



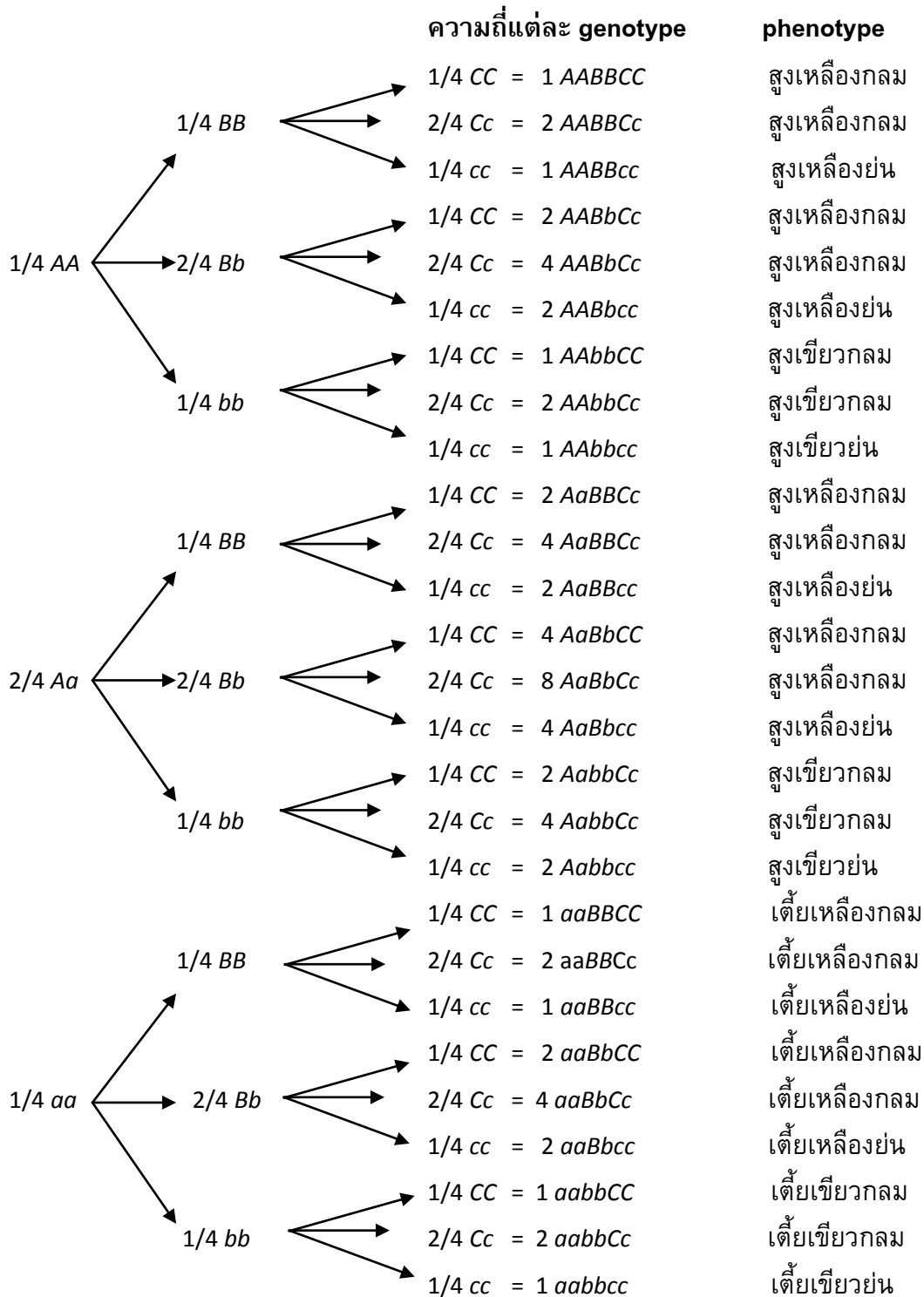
รูปที่ 11 การผสมพันธุ์แบบ monohybrid ระหว่าง Bb กับ Bb



รูปที่ 12 การผสมพันธุ์แบบ monohybrid ระหว่าง Cc กับ Cc

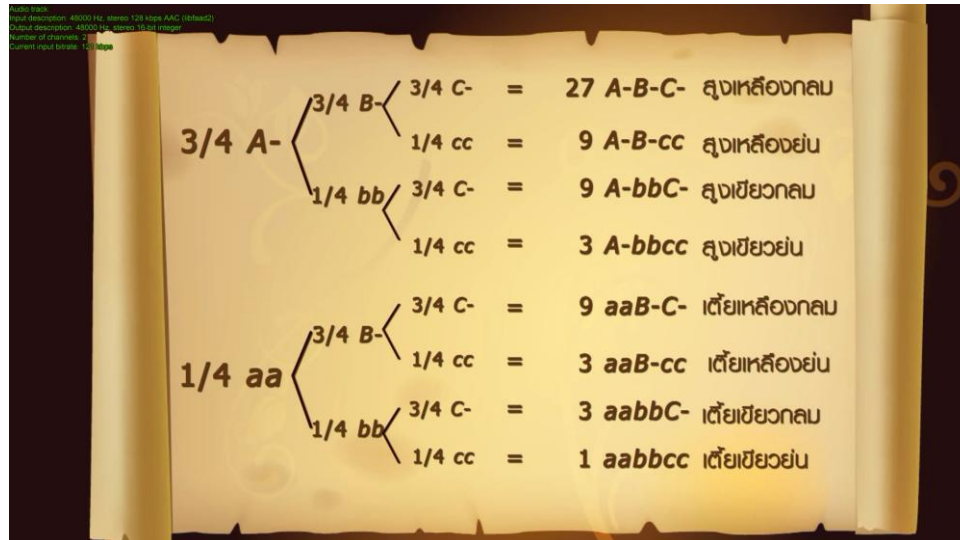


หากกำหนดให้ยีน A ควบคุมต้นสูง ยีน a ควบคุมต้นเตี้ย ยีน B ควบคุมเมล็ดสีเหลือง ยีน b ควบคุมเมล็ดสีเขียว ยีน C ควบคุมเมล็ดกลม และยีน c ควบคุมเมล็ดย่น เมื่อนำ monohybrid cross ของยีนทั้ง 3 คู่นี้จากรูปที่ 10 11 และ 12 มาหา ความถี่ของแต่ละ genotype และ phenotype โดยวิธี branching หรือ fork line ได้ดังนี้





หากต้องการ ทราบเฉพาะอัตราส่วน phenotype โดยไม่ต้อง การทราบอัตราส่วน genotype สามารถทำได้ด้วยวิธีการนี้ เช่นกันคือนำเฉพาะอัตราส่วน phenotype มาทำ branching ดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะทำให้ใช้เวลาน้อยลงได้พอสมควร ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 การหาอัตราส่วน phenotype จากการผสมพันธุ์ระหว่าง genotype AaBbCc ด้วยกันเอง ด้วยวิธี branching

กฎการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมทั้ง 2 ข้อของเมนเดลที่ได้ กล่าวมาแล้วนี้ เป็นรากฐานสำคัญของการพัฒนาองค์ความรู้ด้านพันธุศาสตร์ ซึ่งถือเป็นกุญแจสำคัญที่นำไปสู่การไขปริศนาทางพันธุกรรมทั้งในอดีต ปัจจุบัน และอนาคต ได้เป็นอย่างดี



แนวทางในการจัดการเรียนรู้

เมื่อผู้เรียนได้ศึกษาสื่อการสอนมาจนจบกฎการถ่ายทอดทางพันธุกรรมของเมนเดลแล้ว
ข้อเสนอแนะสำหรับผู้สอนในตอนนี้ คือ

1. สรุปกฎการถ่ายทอดทางพันธุกรรมของเมนเดล ทั้ง 2 ข้อ เพื่อย้ำกับผู้เรียนอีกครั้ง คือ
กฎข้อที่ 1 กฎแห่งการแยก (Law of Segregation) มีใจความว่า “ยีนที่อยู่กันเป็นคู่ จะแยกออกจากกันไปเข้าสู่คนละเซลล์สืบพันธุ์”
กฎข้อที่ 2 กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ (Law of Independent assortment)
มีใจความว่า “คู่ของแอลลีลของยีนหนึ่งจะแยกออกจากกันไปรวมกลุ่ม อย่างอิสระ กับอีกแอลลีลหนึ่งของยีนอีกคู่หนึ่งที่แยกออกจากกัน”

กฎข้อที่ 1 เป็นกฎที่ได้มาจากการผสม พันธุ์แบบ monohybrid cross หรือการผสมพันธุ์หนึ่งลักษณะ ลูก F_1 ที่ได้มีลักษณะเด่นเพียงลักษณะเดียว และเมื่อให้ F_1 ผสมพันธุ์ด้วยกันเอง ลูก F_2 ที่ได้จะมีการแสดงออกทั้งสองลักษณะ คือทั้งลักษณะเด่นและลักษณะด้อย ในอัตราส่วน phenotype เด่น : ด้อย เท่ากับ 3 : 1 และมีอัตราส่วนของ genotype $AA : Aa : aa$ เท่ากับ 1 : 2 : 1 เมื่อชั่วรุ่นพ่อแม่มี genotype $AA \times aa$

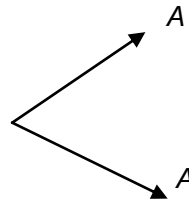
กฎข้อที่ 2 เป็นกฎที่ได้มาจากการผสม พันธุ์แบบ dihybrid cross หรือการผสมพันธุ์สองลักษณะ เช่นเดียวกัน ลูก F_1 ที่ได้จะมีลักษณะเด่น เพียงลักษณะเดียว และเมื่อให้ลูก F_1 ผสมพันธุ์ด้วยกันเองลูก F_2 จะมีอัตราส่วน phenotype เท่ากับ 9 : 3 : 3 : 1 สำหรับกฎข้อที่ 2 นี้เน้นให้นักเรียนเข้าใจเฉพาะอัตราส่วน phenotype ก็เพียงพอ



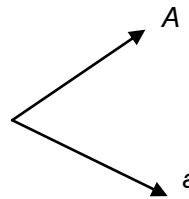
2. การหาเซลล์สืบพันธุ์ (gamete) โดยหลักการคือ แอลลีลอยู่กันเป็นคู่ เมื่อสร้างเซลล์สืบพันธุ์คู่ของแอลลีลก็จะแยกออกจากกัน และสามารถไปเข้าร่วมกลุ่มกับแอลลีลของยีนคู่อื่นได้อย่างอิสระ ยกตัวอย่างวิธีการหาเซลล์สืบพันธุ์ทำได้ดังนี้

กรณียีน 1 คู่ **AA หรือ Aa**

ได้เซลล์สืบพันธุ์ 1 แบบ **AA**
คือ **A**

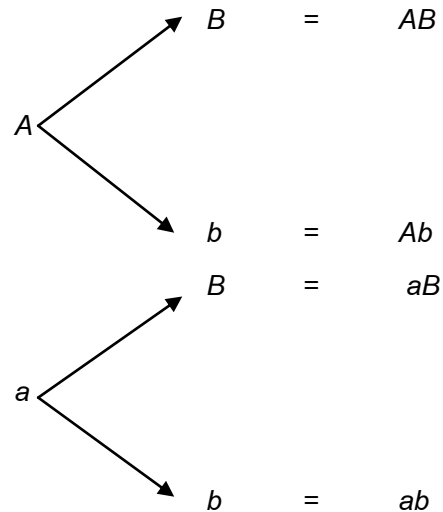


ได้เซลล์สืบพันธุ์ 2 แบบ **Aa**
คือ **A และ a**



กรณียีน 2 คู่ **AaBb**

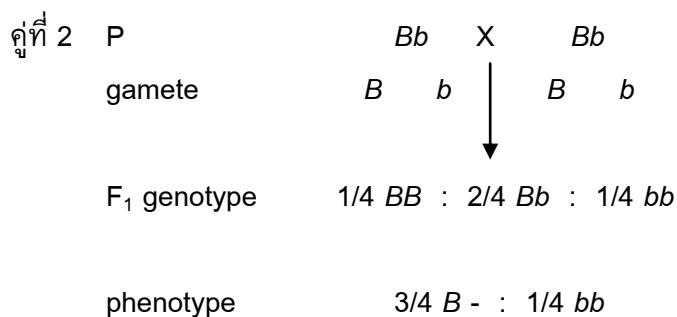
ได้เซลล์สืบพันธุ์ 4 แบบ
คือ **AB, Ab, aB, ab**



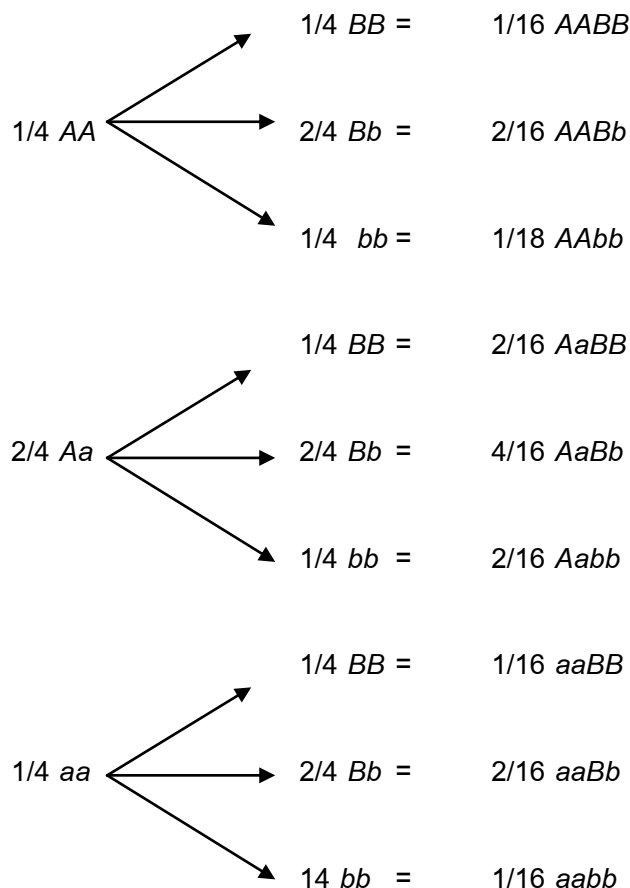
และหากมียีน 3 คู่ ก็ให้แตกกิ่งในแถวที่ 3 ต่อไปอีก



3. การหาอัตราส่วน genotype และอัตราส่วน phenotype ไม่ว่าจะเป็นคู่ของยีนก็สามารถหาอัตราส่วนดังกล่าวได้ โดยการหาที่ละคู่ ตัวอย่างเช่น การผสมพันธุ์ระหว่าง $AaBb \times AaBb$ สามารถแยกได้ 2 คู่ผสม คือ $Aa \times Aa$ กับคู่ของ $Bb \times Bb$



การหาอัตราส่วน genotype ให้นำผลลัพธ์ของ 2 คู่ ผสมมารวมกัน





จากอัตราส่วน genotype ที่ได้ เราสามารถที่จะหาอัตราส่วนของ phenotype ได้โดยรวมส่วนที่แสดงออกเหมือนกันเข้าด้วยกัน ซึ่งหากมียีนจำนวนมากขึ้นอาจจะทำให้สับสนได้ มีวิธีที่ย่อลงได้โดยใช้เฉพาะอัตราส่วน phenotype จากตัวอย่าง monohybrid ในข้อที่ 3 นี้ ได้ดังนี้

$$\begin{array}{lcl} 3/4 A - & \longrightarrow & 3/4 B - = 9/16 A - B - \\ & \longrightarrow & 1/4 bb = 3/16 A - bb \\ \\ 1/4 aa & \longrightarrow & 3/4 B - = 3/16 aaB - \\ & \longrightarrow & 1/4 bb = 1/16 aabb \end{array}$$

ดังนั้นอัตราส่วน phenotype = $A - B - : A - bb : aaB - : aabb$
9 : 3 : 3 : 1

4. คำถาม : จากการผสมพันธุ์พืชคู่หนึ่ง ได้ลูก F_1 ที่มี genotype $AaBbCc$ อยากทราบว่าเมื่อให้ลูก F_1 ผสมตัวเอง ลูก F_2 ที่มี genotype $AaBbCc$ จะมีอัตราส่วนเท่าไร

คำตอบ : วิธีทำคือให้พิจารณาอัตราส่วนแบบ monohybrid cross ที่ละคู่ของ F_1 ดังนี้

$$\begin{array}{l} 1. \text{ คู่ยีน } A \qquad Aa \quad \times \quad Aa \\ \qquad \qquad \qquad \downarrow \\ \qquad \qquad \qquad 1/4 AA \quad : \quad 2/4 Aa \quad : \quad 1/4 aa \\ \\ 2. \text{ คู่ยีน } B \qquad Bb \quad \times \quad Bb \\ \qquad \qquad \qquad \downarrow \\ \qquad \qquad \qquad 1/4 BB \quad : \quad 2/4 Bb \quad : \quad 1/4 bb \\ \\ 3. \text{ คู่ยีน } C \qquad Cc \quad \times \quad Cc \\ \qquad \qquad \qquad \downarrow \\ \qquad \qquad \qquad 1/4 CC \quad : \quad 2/4 Cc \quad : \quad 1/4 cc \end{array}$$

ต่อไปให้นำอัตราส่วนที่ต้องการทราบมาคูณกันเนื่องจากแต่ละยีนเป็นอิสระกันจึงใช้กฎของการคูณ
อัตราส่วนที่ต้องการทราบ คือ $AaBbCc = 1/4 \times 2/4 \times 2/4 = 4/64$



ภาคผนวก

ก. คำอธิบายศัพท์

dihybrid cross

(การผสมพันธุ์สองลักษณะ)

การผสมพันธุ์ที่พิจารณาสองลักษณะไปพร้อมกัน

dominant gene (ยีนเด่น) ยีนที่เข้ม หรือมีการแสดงออกเด่นกว่าเมื่ออยู่
ร่วมกับแอลลีลด้อย ในสภาพเฮเทอโรไซกัส

genotype (จีโนไทป์)

แบบขององค์ประกอบทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต
ประกอบด้วยคู่แอลลีล ของยีนรูปแบบต่าง ๆ
ที่บ่งบอกลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต

monohybrid cross

(การผสมพันธุ์ลักษณะเดียว)

การผสมพันธุ์ที่พิจารณาเพียงลักษณะเดียว

phenotype (ฟีโนไทป์)

สมบัติหรือลักษณะของสิ่งมีชีวิต ที่สังเกต หรือตรวจสอบได้
เป็นผลเนื่องจากพันธุกรรมหรือพันธุกรรม และสิ่งแวดล้อม

recessive gene (ยีนด้อย) ยีนที่แสดงออกด้อยกว่า หรือไม่แสดงออก เมื่ออยู่ร่วมกับ
แอลลีลเด่น

ข. แหล่งเรียนรู้เพิ่มเติม

1. สมาคมพันธุศาสตร์แห่งประเทศไทย. 2546. หลักพันธุศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. 416 หน้า.
2. ไพศาล เหล่าสุวรรณ. 2535. พันธุศาสตร์. โรงพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. 342 หน้า.
3. Klug , William S.and M. R. Cummings. 2003. Concepts of Genetics 7Th ed. Prentice Hall, Inc., USA. 693 p.



รายชื่อสื่อการสอนวิชาชีววิทยาจำนวน 92 ตอน

ตอนที่	ชื่อตอน	อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ
1	ชีววิทยาคืออะไร	รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพฤทธิกุล
2	ชีวจริยธรรม	รศ.ดร.สุจินดา มัลย์วิจิตรนนท์
3	การวางแผนการทดลอง และการตรวจสอบสมมติฐาน	ผศ.ดร.พงษ์ชัย หาญยุทธนากร
4	ตัวอย่างการทดลองทางชีววิทยา	ผศ.ดร.พงษ์ชัย หาญยุทธนากร
5	ส่วนประกอบและวิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	อ.ดร.จิรารัช กิตนะ
6	การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาและประมาณขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	อ.ดร.จิรารัช กิตนะ
7	ปฏิกิริยา polymerization และ hydrolysis	อ.ดร.จุฑาพันธุ์ พิณสวัสดิ์
8	โปรตีน	ผศ.ดร.พงษ์ชัย หาญยุทธนากร
9	กรดนิวคลีอิก	ผศ.ดร.พงษ์ชัย หาญยุทธนากร
10	การดำรงชีวิตของเซลล์	ผศ.ดร.พงษ์ชัย หาญยุทธนากร
11	การสื่อสารระหว่างเซลล์; บทนำ	ผศ.ดร.อรรณณ สัตยาลัย
12	การสื่อสารระหว่างเซลล์; การสื่อสารระยะไกลในพืชและสัตว์	ผศ.ดร.อรรณณ สัตยาลัย
13	การสื่อสารระยะไกลในสัตว์	ผศ.ดร.อรรณณ สัตยาลัย
14	องค์ประกอบของการสื่อสารระหว่างเซลล์	ผศ.ดร.อรรณณ สัตยาลัย
15	ทางเดินอาหารและกระบวนการย่อยอาหารของสัตว์เคี้ยวเอื้อง	ผศ.ดร.พัชนี สิงห์อาษา
16	การย่อยอาหารในลำไส้เล็ก	ผศ.ดร.พัชนี สิงห์อาษา
17	ภาพรวมของการสลายอาหารระดับเซลล์	อ.ดร.จุฑาพันธุ์ พิณสวัสดิ์
18	ลูกโซ่หายใจ	อ.ดร.จุฑาพันธุ์ พิณสวัสดิ์
19	oxidative phosphorylation	อ.ดร.จุฑาพันธุ์ พิณสวัสดิ์
20	การแลกเปลี่ยนแก๊สของสัตว์น้ำและสัตว์บก	รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพฤทธิกุล
21	เรื่องกลไกการหายใจและศูนย์ควบคุมการหายใจในคน	รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพฤทธิกุล
22	ไต: หน่วยไต และการสร้างปัสสาวะของไตคน	รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพฤทธิกุล



ตอนที่	ชื่อตอน	อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ
23	ระบบหมุนเวียนเลือดแบบเปิด (open circulatory system) และแบบปิด (closed circulatory system)	รศ.ดร.วิทยา ยศยิ่งยวด
24	องค์ประกอบของเลือด หมู่เลือด และ การแข็งตัวของเลือด	รศ.ดร.วิทยา ยศยิ่งยวด
25	การป้องกันตนเองของร่างกาย และ ระบบภูมิคุ้มกัน	รศ.ดร.วิทยา ยศยิ่งยวด
26	การเคลื่อนที่ของปลา	รศ.วีณา เมฆวิชัย
27	กลไกการหดตัวของกล้ามเนื้อโครงร่าง	รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพฤทธิกุล
28	การทำงานของเซลล์ประสาท	อ.ดร.นพดล กิตนะ
29	การถ่ายทอดกระแสประสาทระหว่างเซลล์ประสาท	อ.ดร.นพดล กิตนะ
30	เซลล์รับความรู้สึก	รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพฤทธิกุล
31	หูและการได้ยิน	รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพฤทธิกุล
32	ฮอร์โมนคืออะไร	รศ.ดร.สุจินดา มัลย์วิจิตรนนท์
33	ชนิดของฮอร์โมนและชนิดของเซลล์เป้าหมาย	รศ.ดร.สุจินดา มัลย์วิจิตรนนท์
34	การสืบพันธุ์ระดับเซลล์ 1 วัฏจักรเซลล์ อินเทอร์เฟส และ division phase	ผศ.ดร.อรรณพ สัตยาลัย
35	การสืบพันธุ์ระดับเซลล์ 2 วัฏจักรเซลล์ division phase mitosis	ผศ.ดร.อรรณพ สัตยาลัย
36	การสืบพันธุ์ระดับเซลล์ 3 วัฏจักรเซลล์; division phase; meiosis	ผศ.ดร.อรรณพ สัตยาลัย
37	เซลล์พืช	ผศ.ดร.มานิต คิตอยู่
38	เนื้อเยื่อพืช	ผศ.ดร.มานิต คิตอยู่
39	ปากใบและการควบคุมการเปิด-ปิดของปากใบ	อ.ดร.อัญชลี ใจดี
40	การลำเลียงน้ำของพืช	รศ.ดร.ปรีดา บุญหลง
41	พลังงานชีวิต	รศ.ดร.ศุภจิตรา ชัชวาลย์
42	ปฏิกิริยาแสง (Light reaction)	รศ.ดร.ศุภจิตรา ชัชวาลย์
43	ปฏิกิริยาคาร์บอน (carbon reaction) – Calvin cycle	ผศ.ดร.บุญธิดา โฆษิตทรัพย์
44	กลไกการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช C_4	ผศ.ดร.บุญธิดา โฆษิตทรัพย์
45	กลไกการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช CAM	ผศ.ดร.บุญธิดา โฆษิตทรัพย์
46	ปัจจัยจำกัดในการสังเคราะห์ด้วยแสง	รศ.ดร.ปรีดา บุญหลง



ตอน ที่	ชื่อตอน	อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ
47	โครงสร้างของดอก (Structure of Flower)	ผศ.ดร.ต่อศักดิ์ สีลานันท์
48	การปฏิสนธิในพืชดอก	ผศ.ดร.ต่อศักดิ์ สีลานันท์
49	การเกิดและโครงสร้างผล	อ.ดร.สร้อยนภา ญาณวัฒน์
50	การงอกของเมล็ด	รศ.นันทนา อังกินันท์
51	การวัดการเจริญเติบโตของพืช	อ.ดร.อัญชลี ใจดี
52	ออกซิน	ผศ.ดร.กนกวรรณ เสรีภาพ
53	การใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชในการเกษตร	ผศ.พัชรา ลิมปะนะเวช
54	การเคลื่อนไหวของพืช	ผศ.ดร.กนกวรรณ เสรีภาพ
55	ความน่าจะเป็นและกฎแห่งการแยก	ผศ. เรืองวิทย์ บรรจงรัตน์
56	กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ	ผศ. เรืองวิทย์ บรรจงรัตน์
57	มัลติเปิลแอลลีล (Multiple alleles)	อ.ดร.วรลักษณ์ เกษตรนันท์
58	พอลิยีน (Polygene)	อ.ดร.วรลักษณ์ เกษตรนันท์
59	โครงสร้างของดีเอ็นเอ (DNA structure)	อ.ดร.เพลินพิศ โชคชัยชำนาญกิจ
60	โครงสร้างของโครโมโซม (Chromosome structure)	อ.ดร.เพลินพิศ โชคชัยชำนาญกิจ
61	การถอดรหัสพันธุกรรม (Transcription)	อ.ดร.ธนะกาญจน์ มัญชุพานี
62	การแปลรหัสพันธุกรรม (Translation)	อ.ดร.ธนะกาญจน์ มัญชุพานี
63	แนะนำพันธุวิศวกรรม	อ.ดร.ปฐมวดี ญาณทัศนียิจิต
64	ขั้นตอนของพันธุวิศวกรรม	อ.ดร.ปฐมวดี ญาณทัศนียิจิต
65	สิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรม(Genetically modified organisms: GMOs)	อ.ดร.รัชนิกร ธรรมโชติ
66	ชาร์ล ดาร์วิน คือใคร	ผศ.ดร.เจษฎา เต็นดวงบริพันธ์
67	หลักฐานการเกิดวิวัฒนาการ	ผศ.ดร.เจษฎา เต็นดวงบริพันธ์
68	ทฤษฎีวิวัฒนาการของดาร์วิน	ผศ.ดร.เจษฎา เต็นดวงบริพันธ์
69	วิวัฒนาการของเชื้อดื้อยา	ผศ.ดร.เจษฎา เต็นดวงบริพันธ์
70	วิวัฒนาการของมนุษย์	ผศ.ดร.เจษฎา เต็นดวงบริพันธ์



ตอน ที่	ชื่อตอน	อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ
71	อาณาจักรมอเนอรา	ผศ.ดร.รสริน พลวัฒน์
72	อาณาจักรโพรทิสตา	ผศ.ดร.รสริน พลวัฒน์
73	อาณาจักรฟังไจ	ผศ.ดร.จิตรตรา เพ็ญเขียว
74	ความหลากหลายของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง	ผศ.ดร.อาจอง ประทัดสุนทรสาร
75	ความหลากหลายของสัตว์มีกระดูกสันหลัง	รศ.วีณา เมฆวิชัย
76	กลไกของพฤติกรรม	รศ.ดร.อุษณีย์ ยศยิ่งยวด
77	พฤติกรรมการเรียนรู้แบบต่าง ๆ	รศ.ดร.อุษณีย์ ยศยิ่งยวด
78	การสื่อสารระหว่างสัตว์	รศ.ดร.อุษณีย์ ยศยิ่งยวด
79	แนวคิดเกี่ยวกับระบบนิเวศ	ผศ.ดร.อาจอง ประทัดสุนทรสาร
80	ไบโอมบนบก	ผศ.ดร.อาจอง ประทัดสุนทรสาร
81	การสำรวจระบบนิเวศบนบก	ผศ.ดร.อาจอง ประทัดสุนทรสาร
82	ความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งมีชีวิตกับปัจจัยทางกายภาพ	ผศ.ดร.วิเชษฐ کنzio
83	ความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ ในระบบนิเวศ	ผศ.ดร.วิเชษฐ کنzio
84	โซ่อาหารและใยอาหาร	ผศ.ดร.วิเชษฐ کنzio
85	วัฏจักรสาร	ผศ.ดร.วิเชษฐ کنzio
86	ความหมายของคำว่าประชากร(population) และประวัติการศึกษาประชากร	รศ.ดร.กำธร ชีรคุปต์
87	วิธีการหาค่าความหนาแน่นของประชากรโดยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบวางแปลง (quadrat sampling method)	รศ.ดร.กำธร ชีรคุปต์
88	การเพิ่มขนาดของประชากร (population growth)	รศ.ดร.กำธร ชีรคุปต์
89	โครงสร้างอายุ (age structure) ของประชากร	รศ.ดร.กำธร ชีรคุปต์
90	ประเภทของทรัพยากร	อ.ดร.พงษ์ชัย ดำรงโรจน์วัฒนา
91	ปัญหาที่มีต่อทรัพยากรธรรมชาติและสภาพแวดล้อม	อ.ดร.พงษ์ชัย ดำรงโรจน์วัฒนา
92	หลักการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ	อ.ดร.พงษ์ชัย ดำรงโรจน์วัฒนา