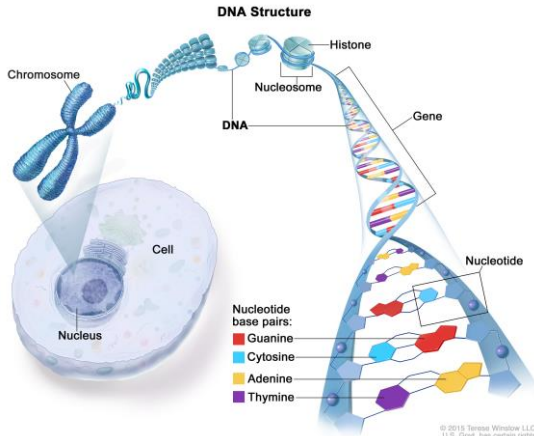


เอกสารประกอบการสอน เรื่อง พันธุศาสตร์



① ความสัมพันธ์ระหว่างโครโมโซม ยีน และสารพันธุกรรม



ที่มา <http://www.sciphotha.com>

เซลล์เป็นหน่วยพื้นฐานที่สำคัญของสิ่งมีชีวิต เซลล์ทั่วไปประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ เยื่อหุ้มเซลล์ ไซโทพลาซึม และนิวเคลียส ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของสิ่งมีชีวิต ภายในนิวเคลียสซึ่งมีรูปร่างกลมหรือรูปไข่ถ้าใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูภายในขณะที่เซลล์กำลังแบ่งตัวจะเห็นว่า ภายในมีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กๆ ขดพันกันอยู่เหมือนขดลวดสปริงเต็มไปหมด เราเรียกเส้นใยเล็กๆ ที่ขดพันกันอยู่เหมือนขดลวดสปริงเต็มไปหมด เราเรียกโครงสร้างนี้ว่า **โครมาติน (chromatin)** ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของ DNA (deoxyribonucleic acid) ขดจับ

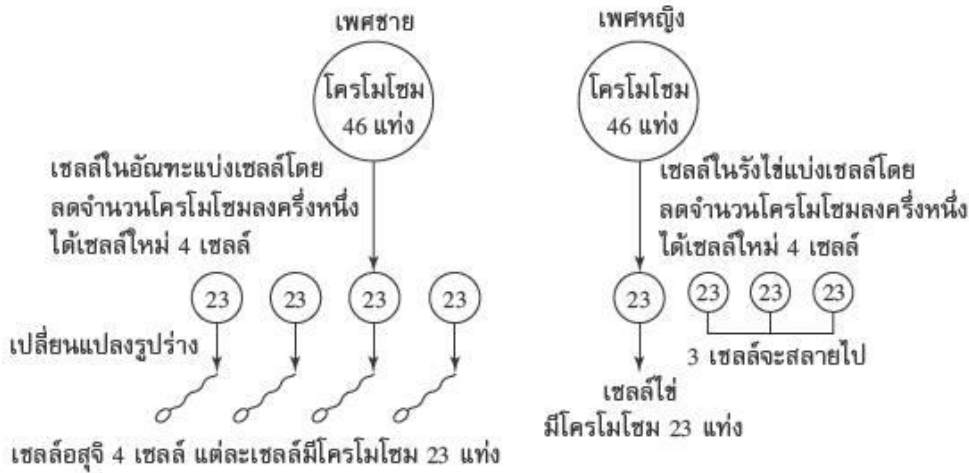
ตัวกับโปรตีน เมื่อมีการแบ่งเซลล์ ปริมาณของ DNA จะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า เส้นโครมาตินก็จะขดแน่นมากขึ้น และหดสั้นเข้าจนมีลักษณะเป็นแท่งๆ เรียกว่า

โครโมโซม (chromosome) มีหน้าที่ถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากรุ่นพ่อแม่ไปสู่รุ่นลูก สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดจะมีจำนวนโครโมโซมที่แน่นอนและคงที่ และสิ่งมีชีวิตต่างชนิดกันจะมีจำนวนโครโมโซมแตกต่างกัน

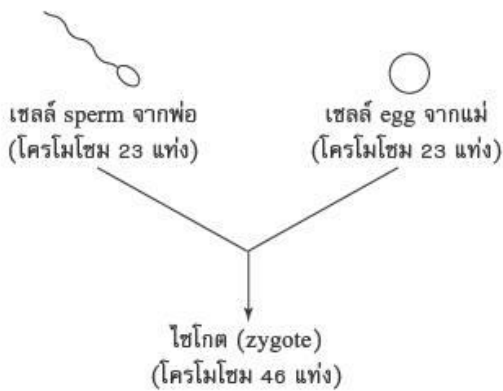
ยีนเป็นส่วนหนึ่งของโครโมโซม โครโมโซมหนึ่งๆมียีนควบคุมลักษณะต่างๆ เป็นพันๆ ลักษณะต่างๆ เป็นพันๆ ลักษณะภายในยีนพบว่ามีสารเคมีที่สำคัญชนิดหนึ่ง คือ DNA หรือเรียกว่า **สารพันธุกรรม** ซึ่งเป็นโครงสร้างประกอบด้วยสายยาว 2 เส้น พันกันเป็นเกลียวคู่แบบบันไดเวียน ทำหน้าที่กำหนดกิจกรรมต่างๆ ภายในเซลล์ โดยควบคุมการสังเคราะห์ให้โปรตีนชนิดต่างๆ เช่น เอนไซม์ เฮอร์โกลบินในเม็ดเลือดแดง ฮอรโมนบางชนิด เป็นต้น

② หน้าที่ของสารพันธุกรรม DNA (deoxyribonucleic acid)

การศึกษาการถ่ายทอดทางพันธุกรรม เรียกว่า **พันธุศาสตร์ (Genetics)** ซึ่งจะอธิบายให้รู้ว่า ลักษณะทางพันธุกรรมที่พ่อแม่ถ่ายทอดให้ลูกนั้น เรียกว่า ยีน (Gene) ยีนเป็นข้อมูลทางพันธุกรรมที่เรียงอยู่บนโครโมโซมในนิวเคลียส โดยมีจำนวนมากมายเรียงต่อกันเป็นสายคล้ายลูกปัด ยีนของพ่ออยู่ภายในนิวเคลียสของเซลล์อสุจิ (Sperm cell) และยีนของแม่อยู่ภายในนิวเคลียสของเซลล์ไข่ (Egg cell) เมื่อมีการสืบพันธุ์เซลล์อสุจิและเซลล์ไข่จะเกิด **การปฏิสนธิ (Fertilization)** นิวเคลียสของเซลล์อสุจิจะรวมกับนิวเคลียสของเซลล์ไข่ ได้นิวเคลียสของเซลล์ใหม่ เรียกว่า ไซโกต (Zygote) ซึ่งเป็นเซลล์เริ่มต้นของสิ่งมีชีวิตใหม่หรือ ลูก ดังนั้นลูกจึงมียีนมาจากพ่อครึ่งหนึ่ง และจากแม่อีกครึ่งหนึ่ง ลักษณะต่างๆ ที่ประกอบขึ้นเป็นตัวเรานั้น ได้มาจากพ่อและแม่ สิ่งที่พ่อแม่ส่งผ่านมาให้เราเรียกว่า **ลักษณะทางพันธุกรรม (genetic character)** ซึ่งทำให้เราเหมือนพ่อ และแม่ และเมื่อพิจารณาให้ละเอียดขึ้นไปอีกจะพบว่าลักษณะที่เราเหมือนแม่นั้นจะเหมือนตาข่ายของเรารุ่นหนึ่ง โดยผ่านการ **สืบพันธุ์ (Reproduction)**

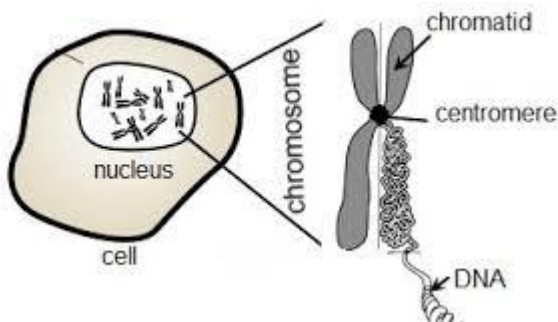


แผนภาพแสดงเซลล์สืบพันธุ์เพศชายและเพศหญิง



รูปแสดงจำนวนโครโมโซมภายหลังการปฏิสนธิ

โครโมโซมในเซลล์ร่างกายของสิ่งมีชีวิตมีรูปร่างลักษณะเหมือนกันเป็นคู่ๆ แต่ละคู่เรียกว่า **โฮมอโลกัสโครโมโซม** (homologous chromosome) เมื่อแบ่งเซลล์โครโมโซมแต่ละแท่งจะประกอบด้วยโครมาทิด 2 โครมาทิด (chromatid) ที่เหมือนกัน บริเวณที่โครมาทิดทั้งสองติดกันเรียกว่า **เซนโทรเมียร์** (centromere)



ที่มา: <https://www.biologycorner.com/>

ศัพท์พื้นฐานทางพันธุศาสตร์

- Gene คือลักษณะทางพันธุกรรมซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครโมโซม โครโมโซมของคนมี 23 คู่ และมียีนอยู่ประมาณ 50,000 ยีน ยีนเหล่านี้กระจายอยู่ในโครโมโซมแต่ละคู่และควบคุมการถ่ายทอดลักษณะไปสู่ลูกได้ประมาณ 50,000 ลักษณะ

2. allele คือยีนที่เป็นคู่เดียวกันเรียกว่าเป็น แอลลีลิก (allelic) ต่อกันหมายความว่าแอลลีลเหล่านั้นจะมีตำแหน่งเดียวกันบนโครโมโซมที่เป็นคู่กัน(homologous chromosome)
3. gamete หมายถึงเซลล์เพศ (sex cell) ทั้งไข่ (egg) และอสุจิหรือ (Sperm)
4. genotype หมายถึงลักษณะการจับคู่กันของแอลลีลของยีนที่ควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตซึ่งจะมี 2
5. ลักษณะ ลักษณะพันธุแท้ เช่น TT, tt และลักษณะพันธุทาง เช่น Tt
6. phenotype หมายถึงลักษณะที่ปรากฏออกมาให้เห็นซึ่งเป็นผลจากการแสดงออกของจีโนไทป์นั่นเอง เช่น TT, Tt มียีนไทป์ต่างกันแต่มีฟีโนไทป์เหมือนกัน คือ เป็นต้นสูงทั้งคู่
7. homozygote หมายถึงคู่ของแอลลีลซึ่งเหมือนกัน เช่น TT จัดเป็น ฮอมอไซกัสโดมิแนนต์ (homozygous dominant) เนื่องจากลักษณะทั้งคู่เป็น**ลักษณะเด่น** หรือtt จัดเป็นฮอมอไซกัสรีเซสซีฟ(homozygous recessive) เนื่องจากลักษณะทั้งคู่เป็น**ลักษณะด้อย** ลักษณะที่เป็นฮอมอไซโกตเราเรียกว่า **พันธุแท้**
8. heterozygote หมายถึง คู่ของแอลลีลที่ไม่เหมือนกัน เช่น Tt ลักษณะของเฮเทอโรไซโกตเราเรียกว่า **เป็นพันธุทาง**
9. dominant คือลักษณะที่แสดงออกเมื่อเป็นฮอมอไซกัสโดมิแนนต์และเฮเทอโรไซโกต
10. recessive ลักษณะที่จะถูกข่มเมื่ออยู่ในรูปของเฮเทอโรไซโกตและจะแสดงออกเมื่อเป็นฮอมอไซกัสรีเซสซีฟ
11. complete dominant หมายถึงการข่มของลักษณะเด่นต่อลักษณะด้อยเป็นไปอย่างสมบูรณ์ทำให้ฟีโนไทป์ของฮอมอไซกัสโดมิแนนต์และเฮเทอโรไซโกตเหมือนกัน เช่น TT จะมีฟีโนไทป์เหมือนกับ Tt ทุกประการ
12. ลักษณะเด่นไม่สมบูรณ์ incomplete dominant เป็นการข่มกันอย่างไม่สมบูรณ์ ทำให้เฮเทอโรไซโกตไม่เหมือนกับฮอมอไซกัสโดมิแนนต์ เช่น การผสมดอกไม้สีแดงกับดอกไม้สีขาวได้ดอกไม้สีชมพูแสดงว่าแอลลีลที่ควบคุมลักษณะดอกไม้สีแดงข่มแอลลีลที่ควบคุมลักษณะดอกไม้สีขาวได้ไม่สมบูรณ์
13. Codominant เป็นลักษณะที่แอลลีลแต่ละตัวมีลักษณะเด่นกันทั้งคู่ข่มกันไม่ลงทำให้ฟีโนไทป์ของเฮเทอโรไซโกตแสดงออกมาทั้งสองลักษณะ เช่น หมู่เลือด AB ทั้งแอลลีล I^A และแอลลีล I^B จะแสดงออกในหมู่เลือดทั้งคู่
14. test cross เป็นการผสมระหว่างต้นที่มีฟีโนไทป์เด่นกับต้นที่มีฟีโนไทป์ด้อย เพื่อต้องการทราบว่าต้นลักษณะเด่นนั้นเป็นลักษณะพันธุแท้หรือพันธุทาง ถ้าหากต้นที่ผสมซึ่งเป็นลักษณะด้อยนั้นเป็นพ่อแม่จะเรียกว่าการผสมแบบแบค ครอส (back cross)
15. karyotype คือการศึกษาโครโมโซมโดยการถ่ายภาพแล้วนำภาพถ่ายของ โครโมโซมมาจัดเรียงเข้าคู่กันและแบ่งเป็นกลุ่มๆได้
16. monohybrid cross เป็นการผสมพันธุซึ่งเรากำลังถึงลักษณะเพียงลักษณะเดียวและมียีนควบคุมอยู่เพียงคู่เดียว
17. dihybrid cross เป็นการผสมที่ศึกษาลักษณะสองลักษณะในเวลาเดียวกัน มียีนควบคุมสองคู่

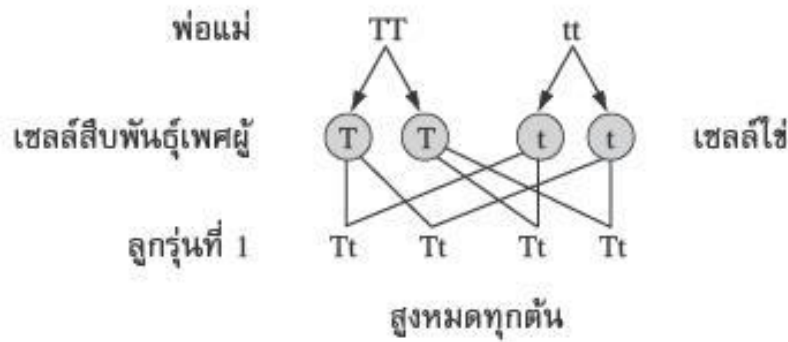
③ การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมตามทฤษฎีของเมนเดล

เกรกอร์ โยฮันน์ เมนเดล (Gregor Johann Mendel) นักบวชชาวออสเตรียที่มีความเชี่ยวชาญเรื่องพฤกษศาสตร์และคณิตศาสตร์ ได้ทำการทดลองและอธิบายวิธีการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมได้อย่างชัดเจน จนได้รับการยกย่องให้เป็น **บิดาแห่งพันธุศาสตร์**

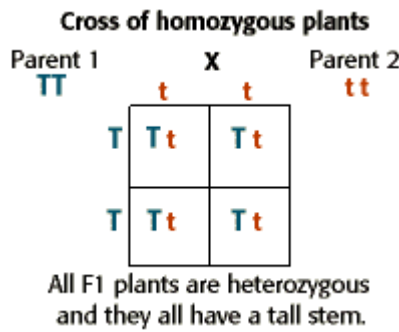


ที่มา: <https://th.wikipedia.org/>

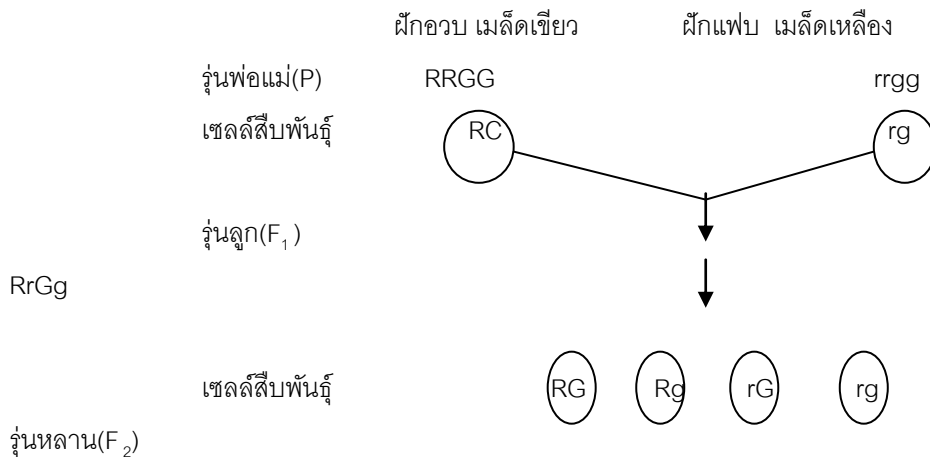
ในการศึกษาพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต นักพันธุศาสตร์นิยมใช้สัญลักษณ์แผนผังแสดงลักษณะทางพันธุกรรมทั้งที่ปรากฏลักษณะให้เห็นและไม่ปรากฏลักษณะให้เห็นในขณะที่กำลังศึกษาเท่าที่จะสามารถสืบค้นได้ แผนผังนี้เรียกว่า “เพดดิกรี” (Pedigree) หรือพงศาวลี



การผสมพันธุ์ถั่วลันเตาโดยพิจารณาลักษณะเดียว ตามทฤษฎีของเมนเดล เช่น ถั่วลันเตาดันสูงพันธุ์แท้ กับถั่วลันเตาดันเตี้ยพันธุ์แท้ ได้ผลรุ่นลูก (F₁) และรุ่นหลาน (F₂) ดังนี้



การผสมพันธุ์ถั่วลันเตาโดยพิจารณาสองลักษณะ นำถั่วลันเตาฝักอวบ เมล็ดผสมกับถั่วลันเตา ฝักแฟบ เมล็ดเหลืองจะได้รุ่นลูก(F₁)และรุ่นหลาน (F₂) ดังนี้



	จีโนไทป์	ฟีโนไทป์	จีโนไทป์	ฟีโนไทป์	จีโนไทป์	ฟีโนไทป์	จีโนไทป์	ฟีโนไทป์
RrGg	RG		Rg		rG		rg	
RrGg								
RG	RRGG	ฝักอวบ เมล็ดเขียว	RRGg	ฝักอวบ เมล็ดเขียว	RrGG	ฝักอวบ เมล็ดเขียว	RrGg	ฝักอวบ เมล็ดเขียว

Rg	RRGg	ฝักอวบ เมล็ดเขียว	RrGg	ฝักอวบ เมล็ดเหลือง	RrGg	ฝักอวบ เมล็ดเขียว	Rrgg	ฝักอวบ เมล็ดเหลือง
rG	RrGG	ฝักอวบ เมล็ดเขียว	RrGg	ฝักอวบ เมล็ดเขียว	rrGG	ฝักแฟบ เมล็ดเขียว	rrGg	ฝักแฟบ เมล็ดเขียว
rg	RrGg	ฝักอวบ เมล็ดเขียว	Rrgg	ฝักอวบ เมล็ดเหลือง	rrGg	ฝักแฟบ เมล็ดเขียว	rrgg	ฝักแฟบ เมล็ดเหลือง

พันธุศาสตร์ตามหลักของเมนเดล (Mendelian Genetics)

1. กฎแห่งการแยกตัว (Law of segregation) ลักษณะของสิ่งมีชีวิตนั้นถูกควบคุมโดย gene และ gene จะปรากฏเป็นคู่ๆเสมอ ในการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ (gamete) gene ที่อยู่เป็นคู่ๆ จะแยกออกจากกันแล้วเข้าสู่เซลล์สืบพันธุ์เซลล์ละ 1 gene คือ จะเกิดการแบ่งเซลล์แบบ meiosis ทำให้จำนวน chromosome ลดลงครึ่งหนึ่ง เมื่อมีการผสมระหว่างเซลล์ สืบพันธุ์ เช่น อสุจิกับไข่ gene ก็จะถูกกลับมาเป็นคู่ๆอีกเช่นเดิม

2. กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ (Law of independent assortment) ยีนที่แยกออกจากกันที่เป็นคู่กัน จะจัดกลุ่มอย่างอิสระกับยีนอื่นที่แยกออกจากกันเช่นกันในการเข้าไปอยู่ในเซลล์สืบพันธุ์จึงสามารถทำนายอัตราส่วนของเซลล์สืบพันธุ์ที่มีกลุ่มของยีนต่างๆได้ เช่น จีโนไทป์ RrYy จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้ 4 ชนิด คือ RY Ry rY และ ry ในอัตราส่วน 1:1:1:1 เซลล์สืบพันธุ์ 4 ชนิด ของทั้งพ่อและแม่ มีโอกาสจะมารวมกลุ่มอย่างอิสระ รุ่น F₂ จึงมีจีโนไทป์ในอัตราส่วน 9:3:3:1

ข้อสรุปจากการวิเคราะห์ของเมนเดล

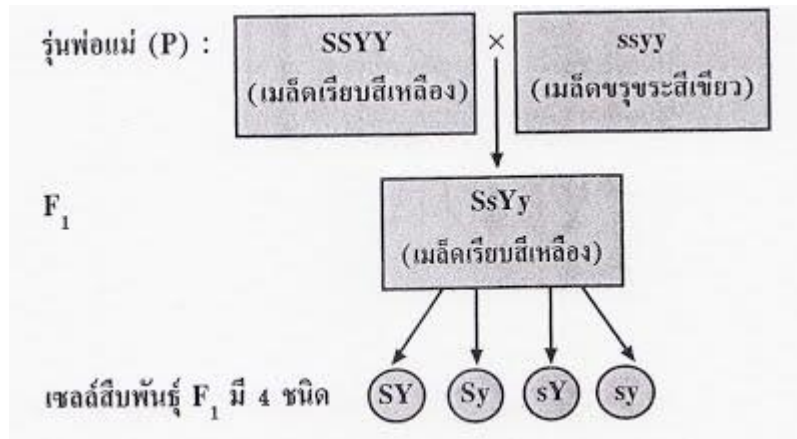
- การถ่ายทอดลักษณะหนึ่งลักษณะใดของสิ่งมีชีวิตถูกควบคุมโดยปัจจัย (factor) เป็นคู่ๆ ต่อมาปัจจัยเหล่านั้นถูกเรียกว่า ยีน (gene)
- ยีนที่ควบคุมลักษณะต่างๆจะอยู่กันเป็นคู่ๆ และสามารถถ่ายทอดไปยังรุ่นต่อไปได้
- ลักษณะแต่ละลักษณะจะมียีนควบคุม 1 คู่ โดยมียีนหนึ่งมาจากพ่อและอีกยีนมาจากแม่
- เมื่อมีการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ (gamete) ยีนที่อยู่เป็นคู่ๆจะแยกออกจากกันไปอยู่ในเซลล์สืบพันธุ์ของแต่ละเซลล์และ ยีนเหล่านั้นจะเข้าคู่กันได้ในอีกในไซโกต
- ลักษณะที่ไม่ปรากฏในรุ่น F₁ ไม่ได้สูญหายไปไหนเพียงแต่ไม่สามารถแสดงออกมาได้
- ลักษณะที่ปรากฏออกมาในรุ่น F₁ มีเพียงลักษณะเดียวเรียกว่า ลักษณะเด่น (dominant) ส่วนลักษณะที่ปรากฏในรุ่น F₂ และมีโอกาสปรากฏในรุ่นต่อไปได้น้อยกว่า เรียกว่า ลักษณะด้อย (recessive)
- ในรุ่น F₂ จะได้ลักษณะเด่นและลักษณะด้อยปรากฏออกมาเป็นอัตราส่วน เด่น : ด้อย = 3 : 1

การคำนวณหาอัตราส่วนทางพันธุศาสตร์

- สร้างตาราง Punet square
- สร้างเส้นแบบแตกแขนง (Branching หรือ Fork-line method)
- ใช้หลักความน่าจะเป็น (Probability)

ตัวอย่าง ถ้าผสมตัวเมดิคเรียลสีเหลืองที่เป็น homozygous dominance กับตัวเมดิคบุรุษระสีเขียวที่เป็น homozygous recessive จะได้ลูก F1 ถ้านำ F1 ผสมกันเอง จงหา F2 genotype และ F2 phenotype

วิธีที่ 1 สร้างตาราง Punet square



F₂ Genotype :-

เซลล์ สืบพันธุ์เพศเมีย / เซลล์สืบพันธุ์ เพศผู้	SY	Sy	sY	sy
SY	SSYY	SSYy	SsYY	SsYy
Sy	SSYy	SSyy	SsYy	Ssyy
sY	SsYY	SsYy	ssYY	ssYy
sy	SsYy	Ssyy	ssYy	ssyy

จากตาราง จีนไทป์มี 9 ชนิด (16 Combinations) คือ

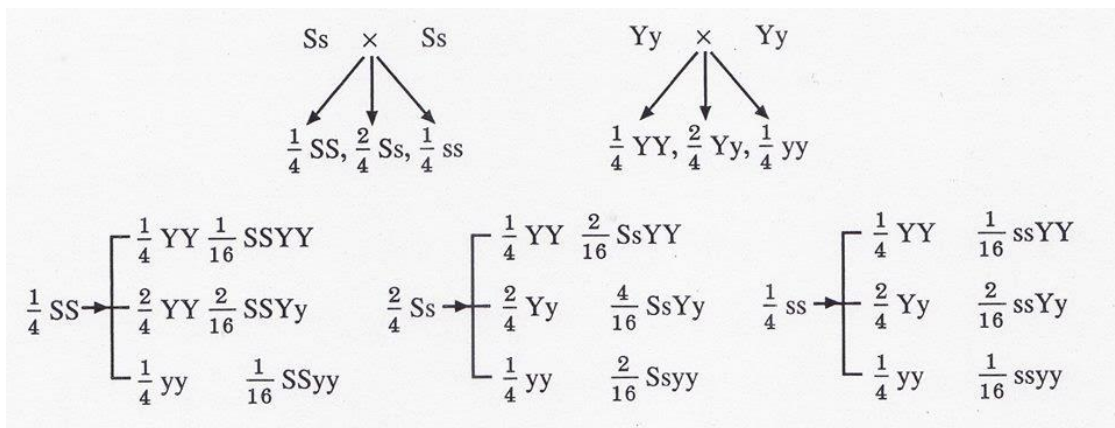
$\frac{1}{16}$ SSYY	$\frac{2}{16}$ Ssyy	$\frac{2}{16}$ SSYy	$\frac{1}{16}$ ssYY	$\frac{1}{16}$ SSyy
$\frac{2}{16}$ ssYy	$\frac{2}{16}$ SsYY	$\frac{1}{16}$ ssyy	$\frac{4}{16}$ SsYy	

จากตารางพันเนตมีฟีโนไทป์ 4 ชนิด คือ

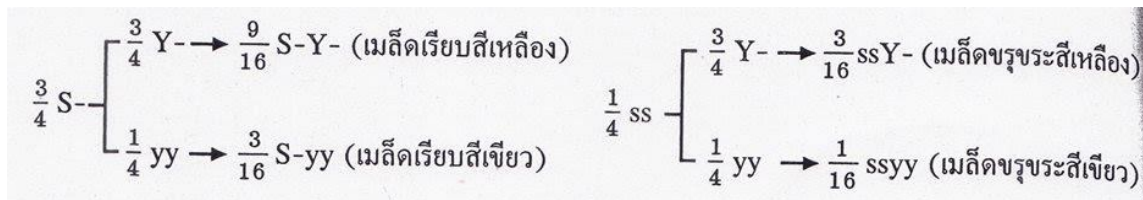
$\frac{9}{16}$ เมดิคเรียลสีเหลือง (S-Y-)	$\frac{3}{16}$ เมดิคบุรุษระสีเหลือง (ssY-)
$\frac{3}{16}$ เมดิคเรียลสีเขียว (S-yy)	$\frac{1}{16}$ เมดิคบุรุษระสีเขียว (ssyy)

วิธีที่ 2 สร้างแบบแตกแขนง (Branching หรือ Fork-line method)

2.1 หาชนิดจีโนไทป์ : ให้แยกคู่ยีนแล้วผสมทีละลักษณะเป็น monohybrid พร้อมกับนำความน่าจะเป็นของแต่ละลักษณะมาคูณกัน ดังนี้

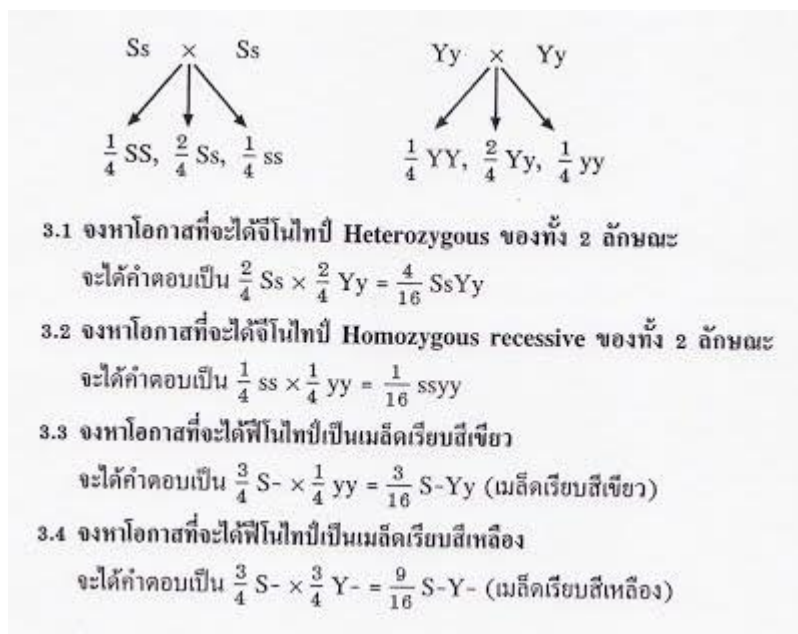


2.2 หาชนิดและสัดส่วนฟีโนไทป์ : ให้รวมจีโนไทป์ ที่มีฟีโนไทป์เป็นแบบเดียวกัน แล้วนำไปผสมกันแต่ละลักษณะ โดยนำค่าความน่าจะเป็นมาคูณกัน ดังนี้



วิธีที่ 3 ใช้หลักความน่าจะเป็น (Probability)

ให้ผสมทีละลักษณะ (Monohybrid cross) และนำค่าความน่าจะเป็นของแต่ละลักษณะมาคูณเช่นกัน



③ Test Cross / Black Cross

การผสมเพื่อทดสอบ (Test Cross)

วิธีการทดสอบจีโนไทป์ (Genotype) ของสิ่งมีชีวิตที่ต้องสงสัยว่าที่มีลักษณะเด่นนั้นเป็นแบบพันธุ์แท้หรือพันธุ์ทาง โดยการนำสิ่งมีชีวิตที่ต้องสงสัยไปผสมกับสิ่งมีชีวิตชนิดเดียวกันที่มีลักษณะด้อยแท้ ถ้าลูก (รุ่น F1) ที่ออกมาเป็นลักษณะเด่น

ทั้งหมดแสดงว่าสิ่งมีชีวิตที่ต้องสงสัยนั้นเป็นลักษณะเด่นแบบพันธุ์แท้ แต่ถ้าลูก (รุ่น F1) ที่ออกมาเป็นลักษณะเด่นต่อลักษณะด้อยมีเป็นสัดส่วน 1:1 แสดงว่าเป็นลักษณะเด่นแบบพันธุ์ทาง

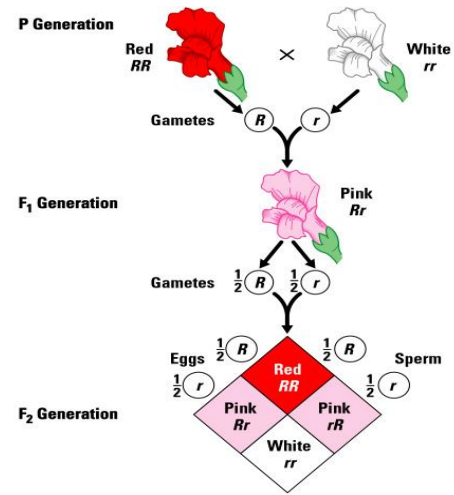
การผสมกลับ (Back Cross)

การผสมกลับ หรือ Back Cross คือ วิธีการทดสอบจีโนไทป์ (Genotype) ของสิ่งมีชีวิตรุ่น F1 ที่ต้องสงสัยที่มีลักษณะเด่นว่าเป็นแบบพันธุ์แท้หรือพันธุ์ทาง โดยการนำสิ่งมีชีวิตรุ่น F1 ที่ต้องสงสัยไปผสมกับรุ่นพ่อหรือรุ่นแม่ที่มีลักษณะด้อยแท้ ถ้าผลออกมาเป็นลักษณะเด่นทั้งหมดแสดงว่าสิ่งมีชีวิตรุ่น F1 ที่ต้องสงสัยนั้นเป็นลักษณะเด่นแบบพันธุ์แท้ แต่ถ้าผลออกมาเป็นลักษณะเด่นต่อลักษณะด้อยมีเป็นสัดส่วน 1:1 แสดงว่าเป็นลักษณะเด่นแบบพันธุ์ทาง

④ ลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของเมนเดล

1. Incomplete dominance การถ่ายทอดลักษณะเด่นไม่สมบูรณ์หรือการผสมแบบไม่สมบูรณ์ พบในสิ่งมีชีวิตบางอย่าง ที่ลักษณะพันธุกรรมไม่สามารถผสมกันได้ เมื่อลักษณะพันธุกรรมทั้งสองลักษณะอยู่ร่วมกัน สามารถแสดงออกได้ทั้งสองลักษณะ ทำให้ลูกที่เกิดมามีลักษณะของพ่อแม่ร่วมกัน ตัวอย่างเช่น ลักษณะสีดอกลิ้นมังกรและดอกบานเย็น

การผสมต้นลิ้นมังกรดอกสีแดงกับต้นลิ้นมังกรดอกสีขาว ซึ่งควบคุมด้วย 2 แอลลีล ถ้ากำหนดให้ R กับ R' และจีโนไทป์ RR แสดงลักษณะสีแดง R'R' แสดงลักษณะดอกสีขาว ส่วนจีโนไทป์ RR' จะแสดงลักษณะดอกสีชมพู ดังนั้นการผสมต้นลิ้นมังกรดอกสีแดงกับต้นลิ้นมังกรดอกสีขาวซึ่งเป็นพันธุ์แท้ทั้งคู่จะแสดงฟีโนไทป์และจีโนไทป์ในรุ่นต่าง ๆ ได้ดังนี้



Copyright © 2004 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

รุ่น P	ดอกสีแดง	x	ดอกสีขาว
genotype รุ่น P	RR	x	R'R'
ลูกผสมรุ่นที่ 1	มีดอกสีชมพูทั้งหมด		
genotype รุ่น ลูก	RR'		
ผสมรุ่นลูกผสมกันเอง คือ	ดอกสีชมพู	x	ดอกสีชมพู
genotype	RR'	x	RR'
เซลล์สืบพันธุ์	R R'	R R'	
ลูกรุ่น F2 มีจีโนไทป์เป็น	RR	RR'	RR'
ลูกรุ่นที่ 2 มี	ดอกสีแดง	ดอกสีชมพู	และดอกสีขาว
ในอัตราส่วน	1	:	2 : 1

ลูกรุ่นที่ 1 แสดงลักษณะสีดอกแตกต่างกันจากต้นที่ใช้เป็นพ่อและแม่ ทั้งนี้เนื่องจากคู่ยีนที่ควบคุมดอกสีแดงและคู่ gene ที่ควบคุมดอกสีขาวต่างไม่สามารถผสมกันได้

ปฏิกริยาระหว่างคู่ของ gene นี้เป็นแบบที่เรียกว่าเด่นไม่สมบูรณ์ (incomplete dominant) ซึ่งเป็นผลให้การแสดงออกของลูกรุ่นที่ 1 และลูกรุ่นที่ 2 แตกต่างไปจากลักษณะที่ควบคุมด้วยยีนที่มีปฏิกริยาแบบเด่นสมบูรณ์ (complete dominant) ดังผลที่เห็นได้ในการทดลองของเมนเดล

ตัวอย่าง ลักษณะพันธุกรรมของเส้นผมในคน

กำหนดให้ H เป็นยีนควบคุมลักษณะผมหยิก

กำหนดให้ H' เป็นยีนควบคุมลักษณะผมเหยียดตรง

ดังนั้น genotype HH แสดงลักษณะผมหยิก H'H' แสดงลักษณะผมเหยียดตรง และ HH'' แสดงลักษณะผมเป็นลอนหรือหยักศก พ่อและแม่ที่มีผมหยักศก จะมีโอกาสมีลูกที่มีลักษณะเส้นผมแตกต่างกัน คือ

พ่อและแม่	ผมหยักศก x ผมหยักศก				
genotype	HH'		x	HH'	
เซลล์สืบพันธุ์	H	H'	H	H'	
genotype รุ่น F1	HH	HH'	HH'	H'H'	
phenotype F1	ผมหยิก	ผมหยักศก	ผมเหยียดตรง		
อัตราส่วน	1	:	2	:	1

แสดงว่า การถ่ายทอดลักษณะเส้นผมในคนเป็นลักษณะเด่นไม่สมบูรณ์

2. codominance

ตัวอย่างลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นการข่มร่วมกัน คือ หมู่เลือดระบบ ABO ในคน ซึ่งจำแนกตามชนิดของแอนติเจนซึ่งเป็นสารประกอบพวกไกลโคโปรตีนอยู่ที่เยื่อหุ้มเซลล์เม็ดเลือดแดง มี 2 ชนิด คือ แอนติเจน A และแอนติเจน B โดยหมู่เลือด A มีแอนติเจน A และหมู่เลือด B มีแอนติเจน B จากการศึกษาพบว่าพ่อและแม่มียีนควบคุมหมู่เลือด A และ B ที่เป็นฮอมอโลกัสโดมิแนนท์ จะได้ลูกที่มีหมู่เลือด AB

	พ่อหมู่เลือด A	แม่หมู่เลือด B
จีโนไทป์	I ^A I ^A	I ^B I ^B
เซลล์สืบพันธุ์	I ^A	I ^B
ลูกหมู่เลือด	AB	
จีโนไทป์	I ^A I ^B	

หมู่เลือดของพ่อและแม่เป็นหมู่เลือด A และ B ตามลำดับ มียีนควบคุมในสภาพฮอมอโลกัสโดมิแนนท์ทั้งคู่ จะมีลูกที่มีหมู่เลือด AB ที่เกิดจากแอลลีน I^A เข้าคู่กับแอลลีน I^B แอลลีนทั้งสองแอลลีนแสดงลักษณะเด่นได้เท่ากัน ๆ จึงแสดงออกร่วมกัน เรียกว่า การข่มร่วมกัน (codominance)

3. multiple alleles

จากการศึกษาของ เอฟ เบิร์นสไตน์ (F. Bernstein) เป็นคนแรกที่อธิบายการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของหมู่เลือดในระบบ ABO จีโนไทป์และฟีโนไทป์ของหมู่เลือดระบบ ABO ดังตาราง ตาราง จีโนไทป์และฟีโนไทป์ของหมู่เลือดระบบ ABO

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

ลักษณะพันธุกรรมของหมู่เลือดระบบ ABO เป็นลักษณะที่ควบคุมด้วยยีน 3 แอลลีล คือ I^A I^B และ i ดังนั้นยีนที่มีมากกว่า 2 แอลลีล ใน 1 โคลด์ เรียกว่า มัลติเปิลแอลลีล (multiple alleles)

ตัวอย่าง พันธุกรรมของ เลือดระบบ ABO ในมนุษย์

I^A = สังเคราะห์แอนติเจน A

I^B = สังเคราะห์แอนติเจน B

i = ไม่สังเคราะห์แอนติเจน A และ B

แต่แอลลีล I^A และ I^B จะแสดงออกพร้อมกัน คือ สังเคราะห์แอนติเจนทั้งสองชนิด คือ แอนติเจน A และแอนติเจน B ดังนั้น

$I^A I^A$ = จะมีแอนติเจนเพียงชนิด คือ ชนิด A เลือดหมู่ A

$I^B I^B$ = จะมีแอนติเจนเพียงชนิด คือ ชนิด B เลือดหมู่ B

$I^A I^B$ = จะมีแอนติเจนเพียงชนิด คือ ชนิด A เลือดหมู่ AB

ii = ไม่มีแอนติเจนเลยเพราะ i เป็นยีนด้อยไม่สามารถสังเคราะห์ แอนติเจนทั้งสองชนิด เลือดหมู่ O

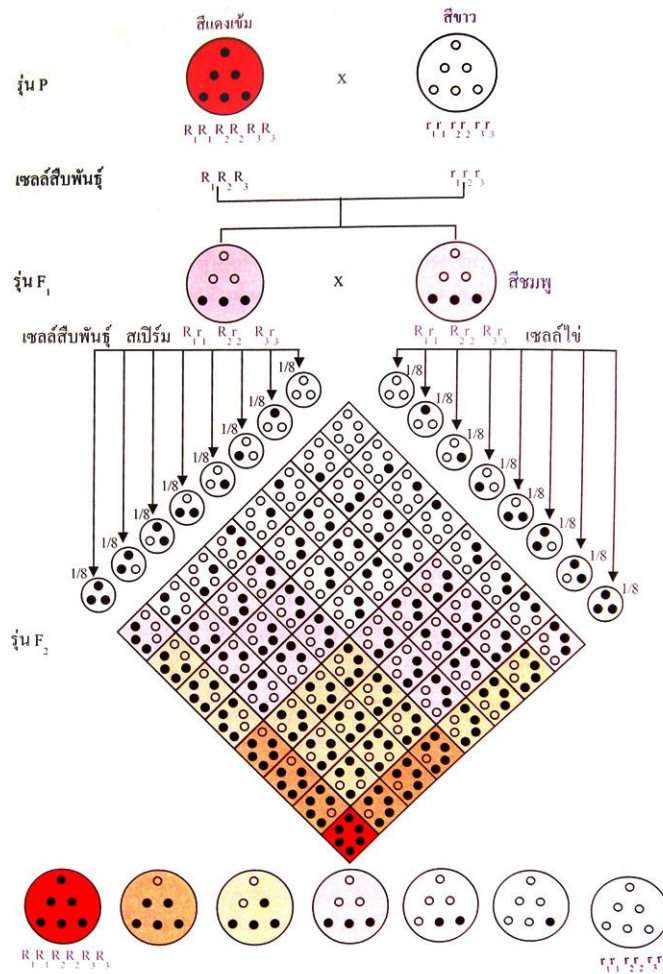
4. poly gene

ยีนที่กล่าวมาแล้ว เป็นพวกที่แสดงลักษณะออกมอย่างเด่นชัด เช่น ถั่วที่มีผิวเมล็ดเรียบหรือขรุขระ เนื้อเมล็ดสีเหลืองหรือเขียว และการเกิดหมู่เลือดชนิดต่าง ๆ ในคน ลักษณะนี้จัดเป็นพวกที่แสดงลักษณะการทางคุณภาพ (qualitative trait) หรือลักษณะการไม่ต่อเนื่อง (discontinuous trait) คือไม่ว่าจะถูกควบคุมด้วยยีนเพียงคู่เดียวหรือหลายคู่ก็ตาม ผลของการทำงานร่วมกันของยีนจะออกมาในรูปของฟีโนไทป์ใดๆโดยเฉพาะและชัดเจน ไม่มีลักษณะกึ่งกลางหรือต่อเนื่องกัน ทำให้สามารถจัดกลุ่มฟีโนไทป์ได้สะดวกและแน่นอน และสิ่งแวดล้อมมีอิทธิพลไปตัดแปลงการแสดงออกของยีนนั้น ๆ น้อยหรืออาจไม่มีเลยก็ได้

ในทางตรงข้าม จะพบว่าลักษณะกรรมพันธุ์บางอย่างมีความแตกต่างกันเล็กน้อยอย่างต่อเนื่องจนไม่อาจจัดจำแนกออกเป็นกลุ่มฟีโนไทป์อย่างชัดเจน เหมือนอย่างในกรณีแรก ตัวอย่าง เช่น ลักษณะความสูง สถิติปัญญา สติปัญญา สีผิวของคน

ลักษณะดังกล่าวนี้มีความแปรผันอย่างมาก จึงจัดเป็นลักษณะทางปริมาณ (quantitative trait) หรือลักษณะต่อเนื่อง (continuous trait) เพราะสามารถวัดหาขนาดหรือปริมาณ หรือวิเคราะห์ในเชิงปริมาณได้ อย่างเช่น ความสูงของคนส่วนมากก็มีขนาดใกล้เคียงกันและลดหลั่นกันไปตามลำดับ จนกระทั่งพบว่าคนที่สูงมากหรือเตี้ยมากมีจำนวนไม่มากนัก ซึ่งทำให้ลักษณะความสูงของคนมีสภาพการกระจายแบบโค้งปกติ (normal distribution curve) ลักษณะกรรมพันธุ์เช่นนี้เกิดจากปัจจัยร่วมกันระหว่างพันธุกรรมและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะเกี่ยวกับอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโต จึงเป็นการยากที่จะกล่าวถึงปัจจัยใด ๆ มีความสำคัญหรือมีบทบาทต่อการแสดงออกทางฟีโนไทป์ได้มากกว่ากัน

สมมุติฐานที่ใช้อธิบายการถ่ายทอดลักษณะกรรมพันธุ์แบบต่อเนื่อง คือ มียีน หรือกลุ่ม ยีนหลายคู่ที่เรียกว่า พอลิยีน (polygene) ทำหน้าที่ควบคุมลักษณะเดียวกัน คู่ยีนเหล่านี้อาจมีตำแหน่ง ต่างกันภายในโครโมโซมคู่เดียวกัน หรืออยู่บนโครโมโซมต่างคู่กันก็ได้โดยยีนแต่ละคู่จะส่งผลต่อการแสดงออกของลักษณะนั้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่สิ่งแวดล้อมมีอิทธิพลช่วยเสริมการแสดงออกทางฟีโนไทป์พอสมควร จึงทำให้ลักษณะที่แสดงออกทางฟีโนไทป์แตกต่างแปรผันอย่างมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางพันธุกรรมและสภาพแวดล้อม เช่น การถ่ายทอดลักษณะของเมล็ดข้าวสาลี



ที่มา: <http://www.vcharkarn.com>

เอช. นิลสสัน-เอิล (H. Nilsson-Ehle) (พ.ศ.2452) นักพันธุศาสตร์ชาวสวีเดน ได้ศึกษาการถ่ายทอดลักษณะสีของเมล็ดข้าวสาลี ซึ่งเป็นตัวอย่างการถ่ายทอดลักษณะกรรมพันธุ์แบบต่อเนื่องลักษณะนี้มียีนที่ควบคุมเพียง 3 คู่

สมมุติว่ายีน R₁ R₂ R₃ เป็นยีนที่ควบคุมให้เมล็ดข้าวสาลีมีลักษณะสีแดง และ r₁ r₂ r₃ เป็นยีนที่ควบคุมให้เมล็ดข้าวสาลีมีสีขาว การผสมพันธุ์ข้าวสาลีที่มีเมล็ดสีแดงเข้มพันธุ์แท้กับเมล็ดข้าวสาลีสีขาวพันธุ์แท้ พบว่าลูกรุ่น F₁ เมล็ดมีสีชมพู เมื่อให้รุ่น F₁ ผสมพันธุ์กันเองรุ่น F₂ ที่ได้ จะมีสีแตกต่างกัน แบ่งออกเป็น 7 กลุ่ม ตั้งแต่กลุ่มเมล็ดสีแดงเข้ม และกลุ่มที่เมล็ดมีความเข้มของสีแดงลดน้อยลงตามลำดับ จนถึงกลุ่มที่มีเมล็ดมีสีขาว

ดังนั้นเมล็ดข้าวสาลีที่มีจีโนไทป์ เป็น R₁R₁R₂R₂R₃R₃ จะแสดงลักษณะเมล็ดสีแดงเข้ม ส่วนพวกที่มีจีโนไทป์เป็น r₁r₁r₂r₂r₃r₃จะมีเมล็ดสีขาว ซึ่งความเข้มของสีแดงขึ้นอยู่กับจำนวนยีน R หากจีโนไทป์มีจีโนควบคุมให้มีสีแดงจำนวนมากขึ้น สีของเมล็ดก็จะเข้มขึ้นเป็นลำดับ และจะจำแนกความแตกต่างของจีโนไทป์ได้ถึง 7 แบบ ถ้ามีคู่ของยีนที่ควบคุมลักษณะเดียวกันเพิ่มมากขึ้นเท่าใด ก็จะได้จำนวนฟีโนไทป์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย จนเมื่อดูจากฟีโนไทป์ไม่อาจทราบได้ว่าจำนวนยีนที่ควบคุมมีเท่าใด แต่อาจประมาณได้โดยใช้หลักเกณฑ์ทางสถิติโดยการหาค่าเฉลี่ย (mean) และค่าของความแปรผัน (Variance) ถ้าค่าของความแปรผันมาก แสดงว่ามียีนที่ควบคุมลักษณะนั้นน้อย แต่ถ้าค่าความแปรผันน้อย แสดงว่ามียีนที่ควบคุมมีมาก ลักษณะทางพันธุกรรมที่ถูกควบคุมด้วยยีนหลายคู่ (multiple gene หรือ polygenes) เรียกว่าเป็น พอลิจีนิกเทรต (polygenic trait)

⑥ X-linked gene/Y-linked gene

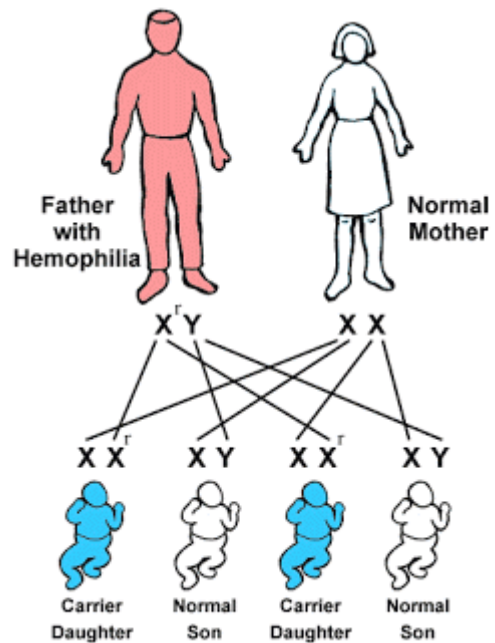
X-linked gene

1. ลักษณะตาบอดสีเขียว - แดง ในมนุษย์

ตาบอดสี เป็นลักษณะที่พบมากในประชากรพวกผิวขาว โดยมีชายตาบอดสีชนิดนี้ 2 ใน 25 คน แต่ในเพศหญิงพบน้อยประมาณ 1 ใน 250 คน ลักษณะตาบอดสี เขียว - แดง นี้ ผู้มียีนนี้จะมองเห็นเป็นสีเดียวคือสีขาหรือเทาเท่านั้น คนปกติจะเห็นแสงสีน้ำเงินแดงเขียวผสมกันเป็นสีขาว บางคนต้องการเพียงสองสีก็เห็นเป็นสีขาว แต่บางคนต้องการเพียงสีเดียวก็เห็นเป็นสีขาวได้แก่พวกตาบอดสีเขียว - แดง เพศหญิงตาปกติอาจจะมียีนตาบอดสีแฝงมาเป็นพาหะ (carrier) แต่เป็นคนถ่ายทอดยีนตาบอดสีให้ลูกซึ่งมักแสดงออกในลูกชายเนื่องจากเอกซ์โครโมโซมเพียงแท่งเดียว ยีนตาบอดสีจึงแสดงออกได้

2. ลักษณะโรคโลหิตไหลไม่หยุด (hemophilia)

เมื่อเกิดบาดแผลแล้วทำให้โลหิตไหลไม่หยุด เนื่องจากร่างกายไม่มีสารที่ช่วยให้โลหิตแข็งตัว โรคนี้พบเป็นมากในเพศชาย โดยพบในทารกเพศชาย 1 ใน 10,000 คน และหญิงที่เป็นพาหะพบอัตราส่วนเท่ากัน ชายที่เป็นโรคนี้ส่วนใหญ่จะเสียชีวิตก่อนที่จะแต่งงาน ส่วนหญิงจะเสียชีวิตในระยะวัยรุ่นคือมีรอบเดือนเนื่องจากสูญเสียโลหิตมาก หญิงที่เป็นโรคนี้จะต้องได้ยีนด้อยมาจากทั้งพ่อและแม่ โดยมีแม่ที่เป็นพาหะแต่งงานกับพ่อซึ่งเป็นโรคโลหิตไหลไม่หยุด ถ้าหญิงปกติแต่งงานกับชายเป็นโรคจะมีบุตรชายเป็นโรคดังแสดงในแผนภาพต่อไปนี้



ใน

3. โรคกล้ามเนื้ออ่อนตัว (duchenne muscular dystrophy หรือ pseudo hypertrophic)

โรคนี้ไม่ค่อยพบมาก เนื่องจากเป็นยีนด้อยบนโครโมโซมเพศ

ทารกเพศชายจะเจริญเติบโตเป็นปกติในระยะแรกของวัยเด็ก แต่กล้ามเนื้อจะ

เข้าสู่วัยรุ่น ในปัจจุบันยังไม่ทราบวิธีป้องกันรักษา เมื่อหญิง

เฮเทโรไซกัส (+d) แต่งานกับชายปกติ (+Y) จะมีบุตรในอัตราส่วน 1/4 หญิงปกติ (++) : 1/4 หญิงพาหะ(+d) : 1/4 ชายปกติ (+Y) : 1/4ชายเป็นกล้ามเนื้ออ่อนตัว (dY) และต่อมาชายที่เป็นโรคนี้ก็ตายก่อนอายุ 20 ปี จึงทำให้อัตราส่วนเปลี่ยนไปในภายหลัง

Y-linked gene

ลักษณะที่อยู่บน Y โครโมโซมมีขนาดเล็กมีสารพันธุกรรมอยู่น้อย จึงพบว่ายีนอยู่บนวายโครโมโซมน้อย การถ่ายทอดลักษณะบนวายโครโมโซมเป็นไปอย่างง่าย ๆ ถ้าพ่อมีลักษณะที่อยู่บนวายโครโมโซมจะพบยีนนั้นเฉพาะในลูกชายเท่านั้น เช่น ลักษณะผิวหนังเป็นเก็ด (porcupine men) ลักษณะมีพังผืดยึดระหว่างนิ้วเท้าที่ 2 และ 3 พบในครอบครัวหนึ่งในสหรัฐอเมริกา ซึ่งพบลักษณะนี้ในลูกชายจำนวน 14 คน ลักษณะมีขนที่ใบหู ลักษณะนี้มีขนยาวตามใบหูมากกว่าปกติ พบในเพศชาย และพบบ่อยในประชากรของอินเดีย

ที่มา: <https://kas-kasanapharayut.blogspot.com>

๗ sex-influenced trait หรือลักษณะภายใต้อิทธิพลของเพศ

เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะเฉพาะในเพศซึ่งแสดงเฉพาะเพศใดเพศหนึ่งแล้ว ลักษณะที่เป็น sex-influenced trait หรือลักษณะภายใต้อิทธิพลของเพศนี้ ลักษณะเด่นจะอยู่ภายใต้อิทธิพลของเพศ ถึงแม้ว่าจะมีจีนอยู่บนออโทโซม จีนตัวเดียวกันแต่แสดงในแต่ละเพศต่างกัน โดยทั่วไปเกิดจากสภาวะภายในของสิ่งมีชีวิต อันเนื่องมาจากฮอร์โมนเพศนั่นเอง ซึ่งพบลักษณะเช่นนี้ในสัตว์ชั้นสูงเท่านั้น

ลักษณะบางอย่างในมนุษย์ที่เข้าใจว่าอาจเป็นลักษณะ sex-influenced trait เช่น ลักษณะปอยผมด้านหน้ามีสีขาว ปลายนิ้วมือยาว ลักษณะริมฝีปากบนแห้ง เพดานปากโหว่ และการพูดติดอ่าง ลักษณะเหล่านี้พบในเพศชายมากกว่าเพศหญิง อย่างไรก็ตามการถ่ายทอดลักษณะค่อนข้างซับซ้อนเพราะมีอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมและพันธุกรรมร่วมกันในการแสดงออกของจีนด้วย

ลักษณะในมนุษย์ที่ศึกษากันมาก ว่าเป็น sex-influenced trait ได้แก่ ลักษณะสีรยะล้านเนื่องจากกรรมพันธุ์ ไม่รวมเอาการหัวล้านจากโรคภัยไข้เจ็บ เช่น จากโรคไทฟอยด์ หรือต่อมไทรอยด์อักเสบ ลักษณะสีรยะล้านจากกรรมพันธุ์ มีจีน B ควบคุม เพศชายฮอมอโลกัส และเฮเทโรไซกัสจะ แสดงลักษณะหัวล้าน แต่ในเพศหญิงจะแสดงลักษณะล้านเมื่อเป็นฮอมอโลกัสเท่านั้น จึงพบมากในเพศชาย การแสดงฟีโนไทป์จึงเป็นดังตาราง แสดงลักษณะหัวล้านในคน

จีโนไทป์	ลักษณะในเพศหญิง	ลักษณะในเพศชาย
BB	สีรยะล้าน	สีรยะล้าน
Bb	สีรยะไม่ล้าน	สีรยะล้าน
bb	สีรยะไม่ล้าน	สีรยะไม่ล้าน

เข้าใจว่าลักษณะหัวล้านเกิดจากฮอร์โมนเพศเป็นตัวสำคัญ ในเพศหญิง Bb ซึ่งหัวไม่ล้านแต่เมื่อเป็นเนื้ออกในมดลูก และถูกตัดมดลูกออก จะกลายเป็นคนหัวล้าน ได้

๘ sex-limited trait หรือลักษณะที่ปรากฏจำเพาะเพศ

ลักษณะบางลักษณะแสดงออกในเพศใดเพศหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากฮอร์โมนเพศเป็นตัวควบคุม โดยที่จีนนั้นไม่ได้อยู่บนโครโมโซมเพศ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัด ได้แก่ขนของสัตว์ปีก เช่น นก และไก่พันธุ์เลกฮอร์น ตัวผู้ขนยาวปลายแหลม โค้งงอ ขอบหยักสวยงาม ส่วนตัวเมียจะมีขนสั้น ๆ ตรงปลายมน ขอบเรียบไม่สวยงาม เรียกว่าขนแบบตัวผู้ (cock-feathered) และขนแบบตัวเมีย (hen-feathered) ตามลำดับในไก่พันธุ์อื่น ๆ เช่น ซีไบท์แบนด์ม ทั้งตัวผู้และตัวเมียมีขนแบบตัวเมีย ไก่พันธุ์แฮมเบิร์กและไวอันดอต ตัวผู้มีขนทั้ง 2 แบบ ส่วนตัวเมียมีขนแบบตัวเมียมีจีน H ควบคุม และขนแบบตัวผู้มีจีน h ควบคุม แต่ในเพศเมีย จีน h จะไม่แสดง ดังนั้นไม่ว่าจะมีจีโนไทป์อย่างไรก็ตามจะมีขนแบบตัวเมียทั้งหมด ดังตารางที่ 2.5 ตารางที่ 16.6 แสดงจีโนไทป์และฟีโนไทป์ของขนไก่

จีโนไทป์	ลักษณะในเพศเมีย	ลักษณะในเพศผู้
HH	ขนแบบตัวเมีย	ขนแบบตัวเมีย
Hh	ขนแบบตัวเมีย	ขนแบบตัวเมีย
hh	ขนแบบตัวเมีย	ขนแบบตัวผู้

ถ้าไก่ตัวเมียถูกตัดรังไข่ทิ้งจะกลายเป็น มีขนแบบตัวผู้ได้ ดังนั้นจีน H จะทำให้มีขนแบบตัวเมียได้เมื่อมีฮอร์โมนเพศเมีย อยู่ และจะทำให้เป็นขนตัวผู้เมื่อไม่มีฮอร์โมนเพศเมียอยู่ ส่วน h ทำให้เกิดขนแบบตัวผู้เมื่อไม่มีฮอร์โมนเพศเมียและทำให้เกิดขนตัวเมียถ้ามีฮอร์โมนเพศเมียอยู่

ลักษณะเฉพาะเพศในคนที่เห็นชัด ได้แก่ หนองเครา ซึ่งมีเฉพาะในเพศชาย ส่วนในเพศหญิงปกติไม่มีหนองเครา จากการศึกษาต่อมสร้างหนองเคราปรากฏว่ามีจำนวนต่อเนื้อเยื่อที่ผิวหนังเท่ากัน แตกต่างกันที่การเจริญงอกงามของหนองเครา ถ้าเพศหญิงมีฮอร์โมนเพศเปลี่ยนไป หนองเคราจะเจริญงอกงามได้ ในกรณีวัยรุ่นนม พ่อแม่พันธุ์วัยรุ่น เมื่อผสมกันย่อมให้จีนเกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำนม และคุณภาพของนมแก่ลูกวัวทุกตัว แต่จะมีเฉพาะวัวตัวเมียเท่านั้น ที่สามารถให้น้ำนมในปริมาณ และคุณภาพที่รับยีนมาจากพ่อแม่ได้