

# Concept 18-4

เนื้อหา: ยีนกับโครโมโซม

- ก. ยีนในออโตโซม
- ข. มัลติเปิลอัลลีลส์
- ค. ยีนในโครโมโซมเพศ
- ง. ยีนในโครโมโซมเดียวกัน

- การนำกฎของเมนเดลมาใช้กับคน ต้องจำไว้เสมอว่า ใช้ในการทำนายโอกาส (เป็นหลัก) มิใช่การทำนายจำนวน ทั้งนี้ เนื่องจาก จำนวนคนในครอบครัวของคนนั้นมีน้อยมาก เมื่อเทียบกับ จำนวนพืช และ สัตว์ ในแต่ละกลุ่ม

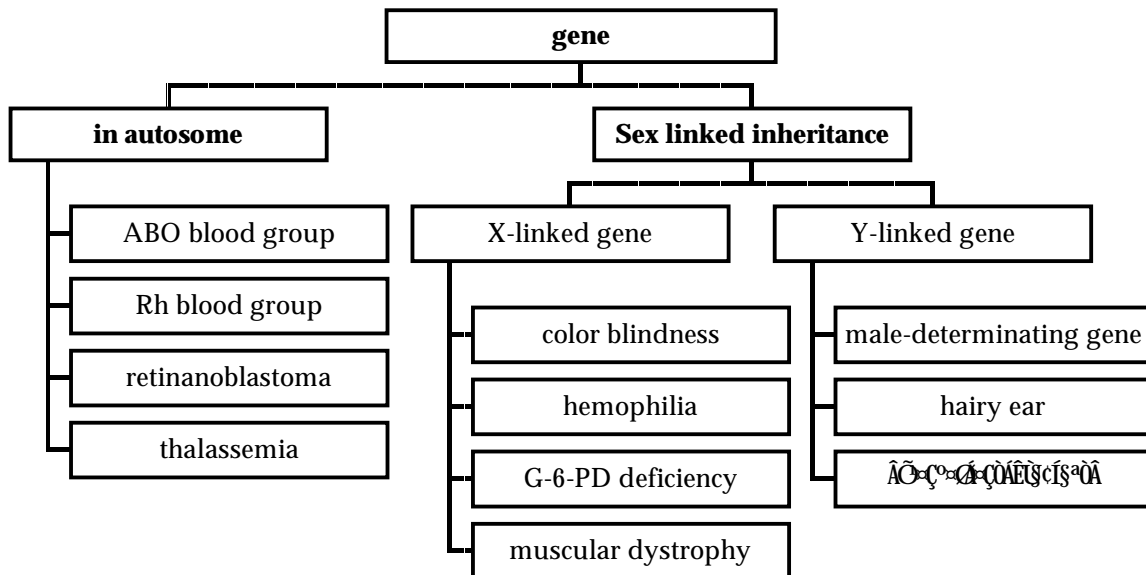
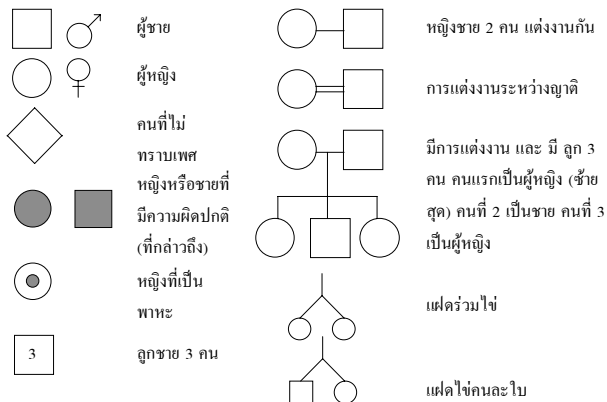
**ยีน (gene)**  $\Rightarrow$  หน่วยควบคุมลักษณะพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นแต่ละส่วนของสารพันธุกรรม (nucleic acid) ชนิด DNA หรือ RNA โดยบรรจุอยู่ใน chromosome

1. locus  $\Rightarrow$  ตำแหน่งของ gene ในโครโมโซม  $\Rightarrow$  1 locus หมายถึง 2 ตำแหน่งที่อยู่ตรงกันบน homologous chromosome
  - แต่ละโครโมโซมประกอบด้วย gene เป็นจำนวนพันยีน
2. ยีนต่างชนิดกันที่อยู่บน locus เดียวกัน เรียกว่า เป็น allele กัน (ไม่จำเป็นต้องเป็นยีนเด่นกับยีนด้อยเสมอไป)
3. จำนวนในคน : เชื่อว่า ประมาณ 40,000 gene
4. ทุก ๆ เซลล์ในร่างกาย มี gene เหมือนกันหมด (ยกเว้น เซลล์สืบพันธุ์)
5. ในแต่ละเซลล์ ยีนไม่ได้ทำหน้าที่ทั้งหมดทุกยีน (เชื่อกันว่า มียีนเพียงส่วนน้อย 1-10 % เท่านั้นที่ทำงาน)
  - ยีนส่วนใหญ่ไม่ทำหน้าที่
  - ในเซลล์ต่างชนิดกัน จะมียีนต่างชนิดกันทำหน้าที่
6. ยีนใด ๆ จะทำหน้าที่ ก็ต่อเมื่อมีการกระตุ้นให้ทำหน้าที่ (induction) และ จะไม่ทำหน้าที่ เมื่อมีการกดไม่ให้ทำหน้าที่ (repression)
  - repressor  $\Rightarrow$  สารที่ทำหน้าที่กีดการทำงานของยีน
    - ที่สำคัญที่สุด คือ โปรตีน histone
      - histone เป็นตัวสำคัญ ที่ทำหน้าที่ควบคุมให้ gene ทำหน้าที่ หรือ หยุดทำหน้าที่

การแยกคู่ของ gene	การแยกคู่ของ homologous chromosome
ยีนในแต่ละคู่ จะมาเข้าคู่กันในระยะ prophase-I ของ meiosis	homologous chromosome ในแต่ละคู่ จะเข้าคู่และ synapse ในระยะ prophase-I ของ meiosis
ยีนในแต่ละคู่ จะแยกออกจากกันในระยะ anaphase-I เมื่อมีการสร้างเซลล์สืบพันธุ์	homologous chromosome ในแต่ละคู่ จะแยกออกจากกัน ในระยะ anaphase-I เมื่อมีการสร้างเซลล์สืบพันธุ์
ในเซลล์สืบพันธุ์ ไม่มียีนที่เป็น allele กัน จำนวนยีนจึงมีเพียงครึ่งหนึ่งของยีนในเซลล์ร่างกาย	ในเซลล์สืบพันธุ์ ไม่มีโครโมโซม ที่เป็น homologous กัน จำนวนโครโมโซมจึงมีเพียงครึ่งหนึ่งของโครโมโซมในเซลล์ร่างกาย

**pedigree**  $\Rightarrow$  ประวัติการถ่ายทอดพันธุกรรมของครอบครัว หรือ ตระกูลใด ๆ เท่าที่จะสืบค้นได้

# CONCEPT 18-4



## ยีนใน autosome (somatic chromosome)

	อยู่บนโครโมโซมคู่ที่	alleles	phenotype	genotype
ABO blood group (ยีนที่ควบคุมหมู่เลือด ABO)	9	3 alleles ● $I^A$ กับ $I^B$ เป็น co-dominance ● $i$ เป็นยีนด้อย	A B AB O	$I^A I^A, I^A i$ $I^B I^B, I^B i$ $I^A I^B$ $ii$
Rh blood group (ยีนที่ควบคุมหมู่เลือด Rh)	1	2 alleles D และ d	$Rh^+$ $Rh^-$	$DD, Dd$ $dd$
ยีนทำให้เกิดโรคมะเร็งที่เรตินา (retinoblastoma)	13 (ยีนด้อย)	2 alleles + และ rb (ยีนด้อย)	ปกติ มะเร็งที่เรตินา	$+/+ , +/rb$ $rb/rb$
$\alpha$ -thal	16 (ยีนด้อย)			
$\beta$ -thal	11 (ยีนด้อย)			

**thalassemia**

- thalassa (ทะเล) + anemias (ภาวะโลหิตจาง)
- เป็นโรคพันธุกรรมที่พบได้ชุกชุมที่สุดในโลก
- ในไทย
  - ประชากรมีถิ่นของ thalassemia ประมาณ 20-30 %
  - เป็นโรคประมาณ 1 %
- ก่อให้เกิดปัญหาไม่เฉพาะทางการแพทย์ แต่มีผลทางด้านสาธารณสุข สังคม และ เศรษฐกิจ

haemoglobin = globin (polypeptide 4 สาย :  $\alpha_1 + \alpha_2 + \beta_1 + \beta_2$ ) + heme(fe)

- ในภาวะปกติ globin สาย  $\alpha$  และ สาย  $\beta$  จะมีปริมาณที่สมดุลกัน
- การสร้าง polypeptide ถูกควบคุมโดย gene

ความผิดปกติพื้นฐาน  $\Rightarrow$  มีการสร้าง globin (สาย  $\alpha$  หรือ สาย  $\beta$ ) ได้น้อยกว่าปกติ

- $\alpha$ -thal
  - ยีนด้อย อยู่ในโครโมโซมคู่ที่ 16
  - ทำให้เกิดโรค  $\alpha$ -thalassemia  $\Rightarrow$  การสร้าง  $\alpha$ -chain ผิดปกติ
- $\beta$ -thal
  - ยีนด้อย อยู่ในโครโมโซมคู่ที่ 11
  - ทำให้เกิดโรค  $\beta$ -thalassemia  $\Rightarrow$  การสร้าง  $\beta$ -chain ผิดปกติ
- นอกจาก gene  $\alpha$ -thal และ  $\beta$ -thal แล้ว ยังมีสาเหตุอื่น ๆ ที่ทำให้เกิดความผิดปกติใน haemoglobin แล้วทำให้เกิดโรค thalassemia ชนิดอื่น ๆ ได้อีก

ผู้ที่ป่วยโรค thalassemia เพราะได้รับ gene ด้อยมาจากพ่อและแม่

กลไกการเกิดโรค และ ลักษณะของโรค

- เม็ดเลือดแดงที่เกิดความไม่สมดุลของ globin ถูกทำลาย (ระหว่างสร้างในไขกระดูก หรือ ถูกตับและม้ามทำลาย ภายหลังออกจากไขกระดูก)  $\rightarrow$  ภาวะโลหิตจาง + ภาวะซีด
  - ภาวะซีด  $\rightarrow$ 
    - ร่างกายเจริญเติบโตช้ากว่าปกติ  $\rightarrow$  ตัวเตี้ย
    - อ่อนเพลียและเหนื่อยง่าย
- เม็ดเลือดแดงที่ถูกทำลาย เปลี่ยนไปเป็นน้ำดี  $\rightarrow$  ภาวะดีซ่าน
  - มีนิ่วในถุงน้ำดีบ่อยกว่าคนทั่วไป
- ร่างกายพยายามสร้างเม็ดเลือดแดงทดแทน โดย ไขกระดูก ตับและม้าม
  - ไขกระดูกจะขยายตัวออก  $\rightarrow$  โพรงกระดูกใหญ่ขึ้น และ กระดูกบางลง มีการเปลี่ยนแปลงของกระดูกศีรษะและกระดูกใบหน้า  $\rightarrow$  กระโหลกศีรษะและลักษณะใบหน้าผิดปกติ (กระดูกศีรษะเป็นพู หน้าผากโหนก ดั้งจมูกแบน โหนกแก้มสูง)
  - ตับและม้ามโต

การรักษา

- การให้เลือดทดแทน (กระทำตลอดชีวิต)
  - ผลแทรกซ้อน  $\Rightarrow$  เหล็กที่มีอยู่ในเลือด ไป สะสมในอวัยวะต่าง ๆ (หัวใจ, ตับ) เกิดความผิดปกติ ป้องกันโดย ให้ยาขับเหล็ก (ราคาแพงมาก)

- การปลูกถ่ายไขกระดูก  $\Rightarrow$  การนำไขกระดูกจากคนปกติไปปลูกถ่ายให้กับผู้ป่วย เพื่อให้ไปแทนที่ไขกระดูกของผู้ป่วย แล้ว

## CONCEPT 18-4

- พาหะ (carrier:Aa) ⊗ พาหะ → ลูกมีโอกาสเป็น 25 %
- ถ้าแม่มี Rh<sup>-</sup> มีลูกคนแรกเป็น Rh<sup>+</sup> และคนต่อไปเป็น Rh<sup>+</sup>
  - ถ้าไม่เกิดความบกพร่องของรก (noplacenta defect) อาจไม่เกิดอันตรายต่อลูก
  - ถ้าเกิดความผิดปกติของรก แต่ แม่ไม่ตอบสนองต่อ Rh<sup>+</sup> ของลูก ก็ไม่เป็นอันตราย
  - ถ้าเกิดความผิดปกติของรก และ แม่มีการตอบสนองสูง ลูกคนที่ 2 จะได้รับอันตราย หรือ แม่แต่เป็นลูกคนแรกก็  
ตาม ⇒ erythroblastosis fetalis

**multiple alleles** ⇒ พันธุกรรมลักษณะใดลักษณะหนึ่ง ที่ถูกควบคุมด้วย gene มากกว่า 2 alleles ที่ตำแหน่ง (locus) ของ homologous chromosome

- จำนวนแบบ genotype ที่เป็นไปได้ (possible genotype) =  $\binom{n+1}{2}$ ; n = จำนวน multiple allele
- จำนวนแบบ phenotype ที่เป็นไปได้ เมื่อมี ค้อย 1 =  $\binom{n}{2} + 1$
- แม้จะมี gene ควบคุมที่ตำแหน่งหนึ่งมากกว่า 2 alleles แต่ในบุคคลหนึ่ง ๆ (2n) จะมี gene ควบคุมลักษณะนั้นได้ไม่เกิน 2 alleles
- พันธุกรรมเลือดระบบ ABO มี gene ควบคุม 3 alleles
  - 1) I<sup>A</sup> นำ antigen A
  - 2) I<sup>B</sup> นำ antigen B
  - 3) i เป็นยีนด้อยต่อทั้ง I<sup>A</sup> และ I<sup>B</sup> ไม่นำ antigen (ทำให้เซลล์ไม่สามารถสังเคราะห์ antigen A หรือ B)
  - I<sup>A</sup> กับ I<sup>B</sup> เป็น codominance
  - จำนวนแบบ genotype = 6 ⇒ I<sup>A</sup>I<sup>A</sup>, I<sup>A</sup>I<sup>B</sup>, I<sup>A</sup>i, I<sup>B</sup>I<sup>B</sup>, I<sup>B</sup>i, ii
  - จำนวนแบบ phenotype = 4 ⇒ เลือดหมู่ A (I<sup>A</sup>I<sup>A</sup>, I<sup>A</sup>i), B (I<sup>B</sup>I<sup>B</sup>, I<sup>B</sup>i), AB (I<sup>A</sup>I<sup>B</sup>), O (ii)
  - สัญลักษณ์ I ใช้แทน allele ที่ควบคุมการสังเคราะห์ isoagglutinin ซึ่งเป็น antigen ที่มีเม็ดเลือดแดง

หมู่เลือดของคู่สามีภรรยา	genotype ที่เป็นไปได้ ของ สามี-ภรรยา	genotype ของลูกที่เป็นไปได้	หมู่เลือดของลูก ที่เป็นไปได้
O ⊗ O → O	ii ⊗ ii	ii	O
O ⊗ A	ii ⊗ I <sup>A</sup> I <sup>A</sup> ii ⊗ I <sup>A</sup> i	I <sup>A</sup> i I <sup>A</sup> i:ii = 1:1	A A:O = 1:1
O ⊗ B	ii ⊗ I <sup>B</sup> I <sup>B</sup> ii ⊗ I <sup>B</sup> i	I <sup>B</sup> i I <sup>B</sup> i:ii = 1:1	B B:O = 1:1
O ⊗ AB	ii ⊗ I <sup>A</sup> I <sup>B</sup>	I <sup>A</sup> i:I <sup>B</sup> i = 1:1	A:B = 1:1 ลูกมีหมู่เลือดไม่เหมือนพ่อแม่
A ⊗ A → A,O	I <sup>A</sup> I <sup>A</sup> ⊗ I <sup>A</sup> I <sup>A</sup> I <sup>A</sup> i ⊗ I <sup>A</sup> I <sup>A</sup> I <sup>A</sup> i ⊗ I <sup>A</sup> i	I <sup>A</sup> I <sup>A</sup> I <sup>A</sup> i:I <sup>A</sup> I <sup>A</sup> = 1:1 I <sup>A</sup> I <sup>A</sup> :I <sup>A</sup> i:ii = 1:2:1	A A A:O = 3:1

## CONCEPT 18-4

$A \otimes B \rightarrow A,B,AB,O$	$\Gamma^A \Gamma^A \otimes \Gamma^B \Gamma^B$ $\Gamma^A \Gamma^A \otimes \Gamma^B i$ $\Gamma^A i \otimes \Gamma^B \Gamma^B$ $\Gamma^A i \otimes \Gamma^B i$	$\Gamma^A \Gamma^B$ $\Gamma^A \Gamma^B : \Gamma^A i = 1:1$ $\Gamma^A \Gamma^B : \Gamma^B i = 1:1$ $\Gamma^A \Gamma^B : \Gamma^A i : \Gamma^B i : ii = 1:1:1:1$	<b>AB</b> $AB:A = 1:1$ $AB : B = 1:1$ $AB:A:B:O = 1:1:1:1$
$A \otimes AB$	$\Gamma^A \Gamma^A \otimes \Gamma^A \Gamma^B$ $\Gamma^A i \otimes \Gamma^A \Gamma^B$	$\Gamma^A \Gamma^A : \Gamma^A \Gamma^B = 1:1$ $\Gamma^A \Gamma^A : \Gamma^A i : \Gamma^B i : \Gamma^A \Gamma^B = 1:1:1:1$	$A:AB = 1:1$ $A:B:AB = 2:1:1$
$B \otimes B$	$\Gamma^B \Gamma^B \otimes \Gamma^B \Gamma^B$ $\Gamma^B i \otimes \Gamma^B \Gamma^B$ $\Gamma^B i \otimes \Gamma^B i$	$\Gamma^B \Gamma^B$ $\Gamma^B i : \Gamma^B \Gamma^B = 1:1$ $\Gamma^B \Gamma^B : \Gamma^B i : ii = 1:2:1$	<b>B</b> <b>B</b> $B:O = 3:1$
$B \otimes AB$	$\Gamma^B \Gamma^B \otimes \Gamma^A \Gamma^B$ $\Gamma^B i \otimes \Gamma^A \Gamma^B$	$\Gamma^B \Gamma^B : \Gamma^A \Gamma^B = 1:1$ $\Gamma^B \Gamma^B : \Gamma^B i : \Gamma^A i : \Gamma^A \Gamma^B = 1:1:1:1$	$B:AB = 1:1$ $B:A:AB = 2:1:1$
$AB \otimes AB \rightarrow A,B,AB$	$\Gamma^A \Gamma^B \otimes \Gamma^A \Gamma^B$	$\Gamma^A \Gamma^A : \Gamma^A \Gamma^B : \Gamma^B \Gamma^B = 1:2:1$	$A:AB:B = 1:2:1$

**X-linked gene** (ยีนที่เกี่ยวข้องกับ X), sex-linked gene (ยีนที่เกี่ยวข้องกับเพศ)  $\Rightarrow$  ยีนในโครโมโซม X (ไม่ว่าจะควบคุมลักษณะเพศหรือไม่ก็ตาม)

X-linked gene		2 alleles
color blindness $\Rightarrow$ ตาบอดสี (พบบ่อยที่สุดในคน)		C กับ c
hemophilia $\Rightarrow$ โรคโลหิตไหลไม่หยุด (ยีนด้อย) <ul style="list-style-type: none"> <li>• มีอาการ เลือดแข็งตัวช้า เนื่องจากขาดสารที่ช่วยให้เลือดแข็งตัว (เช่น Thromboplastin) เมื่อถูกอากาศ</li> <li>• ผู้ป่วยจึงเสียเลือดมาก เมื่อมีบาดแผลเกิดขึ้น</li> <li>• ปรากฏหลักฐานในราชวงศ์พระนางเจ้าวิกตอเรียแห่งอังกฤษ</li> </ul>		H กับ h
glucose-6-phosphate dehydrogenase deficiency $\Rightarrow$ ภาวะพร่องเอนไซม์ G-6-PD <ul style="list-style-type: none"> <li>• ไม่ปรากฏอาการของโรคอย่างชัดเจน</li> <li>• มีอาการแพ้ยา และ อาหารบางชนิดอย่างรุนแรง                         <ul style="list-style-type: none"> <li>• ยารักษาโรคมalaria (ไพรมาควิน, ควินิน) ยาปฏิชีวนะ (คลอแรมเฟนิคอลซัลโฟนาไมด์) ยาลดไข้แก้ปวด (แอสไพริน พาราเซตามอล)</li> <li>• กินถั่วปากอ้าดิบ ๆ หรือ สูดกลิ่นเอาสารจากถั่วปากอ้าเข้าไป</li> </ul> </li> <li>• ชายไทยมีผู้ขาดเอนไซม์ G-6-PD 12 %</li> </ul>		G และ g
muscular dystrophy $\Rightarrow$ โรคกล้ามเนื้อแขนขาลีบ		D กับ d
phenotype	genotype	
	ชาย	หญิง
ปกติ	A ( $X^A Y$ )	AA ( $X^A X^A$ )
พาหะ	ไม่มี	Aa ( $X^A X^a$ )
แสดงอาการ	a ( $X^a Y$ )	aa ( $X^a X^a$ )

- (สสาว) ในเพศชายมีโครโมโซม X เพียง 1 โครโมโซม จึงมียีนเพียงอัลลีลเดียว
- (สสาว) ในเพศหญิง มีโครโมโซม X 2 โครโมโซม จึงเขียน genotype เช่นเดียวกับยีนในออโตโซม

## CONCEPT 18-4

- ยีนด้อยในโครโมโซม X มีโอกาสแสดงออกได้ในเพศชายง่ายกว่า ยีนด้อยในออโตโซม

genotype แม่		genotype พ่อ	ลูกชาย	ลูกสาว	อัตราส่วน
$X^A X^A$	☺ ⊗ □	$X^A Y$	$\frac{1}{2} X^A Y$	$\frac{1}{2} X^A X^A$	□:☺ = 1:1
$X^A X^a$	⊙ ⊗ □	$X^A Y$	$\frac{1}{4} X^A Y + \frac{1}{4} X^a Y$	$\frac{1}{4} X^A X^A + \frac{1}{4} X^A X^a$	□:■:☺:⊙ = 1:1:1:1
$X^a X^a$	● ⊗ □	$X^A Y$	$\frac{1}{2} X^a Y$	$\frac{1}{2} X^A X^a$	■:⊙ = 1:1
$X^A X^A$	☺ ⊗ ■	$X^a Y$	$\frac{1}{2} X^A Y$	$\frac{1}{2} X^A X^a$	□:⊙ = 1:1
$X^A X^a$	⊙ ⊗ ■	$X^a Y$	$\frac{1}{4} X^A Y + \frac{1}{4} X^a Y$	$\frac{1}{4} X^A X^a + \frac{1}{4} X^a X^a$	□:■:⊙:● = 1:1:1:1
$X^a X^a$	● ⊗ ■	$X^a Y$	$\frac{1}{2} X^a Y$	$\frac{1}{2} X^a X^a$	■:● = 1:1

- การเชื่อมโยงข้อสรุปกับเพศคิตรี
  - ลูกชายจะเป็นโรคหรือไม่ขึ้นอยู่กับแม่ (เพราะพ่อต้องให้ Y เสมอจึงจะได้ลูกชาย)
    - ● → ■
    - ⊙ → □:■ = 1:1
    - ☺ → □
  - ลูกสาวจะเป็นโรคได้ เมื่อ พ่อเป็น และ แม่มี  $X^a$
  - เมื่อไม่มีใครแต่งงานกับ ■ ดังนั้น ลูกสาวจึงมีแต่ ☺ และ ⊙ เท่านั้นไม่เกิดโรค
  - phenotype พ่อแม่ ปกติ ⇒ พ่อจะส่ง  $X^A$  (ปกติ) มาให้เสมอ
    - ลูกผู้หญิง phenotype ปกติเสมอ
      - อาจเป็นพาหะ ถ้า 1) แม่เป็นพาหะ และ 2) แม่ให้ a มา
    - ลูกผู้ชายอาจปกติหรือไม่ก็ได้
      - ลูกผู้ชายปกติ เมื่อ
        - แม่ genotype AA
        - แม่เป็นพาหะ (Aa) แต่ส่ง A มาให้
      - ลูกชายเป็นโรคเมื่อ แม่เป็นพาหะ และ ส่ง a มาให้
    - ถ้าได้ลูกชายที่เป็นโรค แสดงว่าแม่เป็นพาหะแน่นอน
  - phenotype แม่ปกติ พ่อเป็นโรค (พ่อให้  $X^a$  แก่ลูกหญิง เสมอ)
    - ลูกหญิงปกติ ⇒ ลูกหญิงเป็นพาหะแน่นอน
    - ถ้ารู้ว่าลูกหญิงเป็นพาหะ แสดงว่า
      - แม่เป็นพาหะ แต่ให้ A
      - แม่ปกติ
- พ่อและแม่ phenotype ปกติ ได้ลูกสาว เป็นโรค ⇒ เป็นยีนในออโตโซม
  - เป็นยีนในออโตโซมแน่นอน โดย พ่อ : Aa, แม่ : Aa
    - ถ้าเป็นยีนในโครโมโซม X ลูกสาวเป็น หมายความว่า ต้องได้  $X^a$  จากพ่อ แต่ พ่อ เป็นปกติ จึงเป็นไปได้ไม่ได้

**Y-linked gene** (ยีนที่เกี่ยวข้องกับ Y) ⇒ ยีนในโครโมโซม Y

## CONCEPT 18-4

- ถ่ายทอดจากพ่อไปยังลูกชายเท่านั้น
- มีอยู่น้อย เนื่องจาก เป็นโครโมโซมเล็กที่สุด

ยีนควบคุมให้แสดงลักษณะเพศชาย (male-determining gene)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• อยู่บน p (สั้น) ใกล้ centromere</li> <li>• สร้างโปรตีนของเยื่อหุ้มเซลล์ (plasma membrane protein) ชนิด H-Y antigen</li> <li>• ตัวอ่อนระยะเริ่มแรกมีการสร้างอวัยวะเพศที่ยังไม่กำหนดเพศ H-Y antigen จะช่วยให้อวัยวะเพศพัฒนาไปเป็นอวัยวะได้ (เมื่ออวัยวะพัฒนามากขึ้น จะสร้าง testosterone ทำให้มีลักษณะเพศชายครบ)</li> </ul>
ยีนควบคุมการมีขนยาวที่ใบหู (hairy ear)	พบบ่อยในคนอินเดีย (เฉพาะเพศชาย และ ลูกชายทุกคนของชายที่เป็นจะมีอาการด้วย)
ยีนควบคุมความสูงของชาย	

- sex-influenced trait (ลักษณะที่อยู่ใต้อิทธิพลของเพศ)  $\Rightarrow$  ลักษณะซึ่งถูกควบคุมโดย gene ซึ่งแสดงลักษณะเด่นในเพศหนึ่ง แต่ แสดงลักษณะด้อยในอีกเพศหนึ่ง (หรือ ยีนซึ่งควบคุมลักษณะนั้น จะแสดงความเป็น dominance ของ allele นั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของเพศ)
  - ลักษณะสีระยะสั้นในคน (อยู่ในออโตโซม; เด่นในชาย)
- sex-limited trait (ลักษณะการที่ถูกจำกัดโดยเพศ)  $\Rightarrow$  ลักษณะที่เกิดเฉพาะในเพศใดเพศหนึ่งเท่านั้น
  - มียีนควบคุมอยู่บนออโตโซม
  - การแสดงออกของ gene ขึ้นอยู่กับ hormone ในร่างกาย
  - สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมเพศเมียเท่านั้นที่ผลิตน้ำนมได้

**linked gene** (ยีนที่เกี่ยวข้องกัน)  $\Rightarrow$  กลุ่มของ gene ที่อยู่บน chromosome เดียวกัน

- มักถูกถ่ายทอดไปด้วยกัน ไม่แยกตัวไปรวมกลุ่มอย่างอิสระตามกฎข้อที่สองของเมนเดล
- จำนวนกลุ่มของ linked gene ในสิ่งมีชีวิต = n (haploid)
- การตรวจสอบ linked gene  $\Rightarrow$  นำไปผสมกับตัวทดสอบที่เป็น homozygous recessive แล้วดูสัดส่วนของลูกที่เกิดขึ้น
  - $TTSS \otimes ttss \rightarrow TtSs \otimes ttss$ 
    - เป็น linked gene ( $\frac{TS}{ts}$ ) ไม่เกิด X-over  $\Rightarrow TS:ts = 1:1 \otimes ts \rightarrow TtSs:ttss = 1:1$
    - เป็น linked gene ( $\frac{TS}{ts}$ ) เกิด crossing over (ส่วนน้อย)  $\Rightarrow$  เซลล์สืบพันธุ์ส่วนใหญ่เป็น TS,ts ส่วนน้อยเป็น Ts,tS
      - การแลกเปลี่ยนระหว่างกลุ่ม gene T,t กับ กลุ่ม gene S,s จะมีโอกาสเกิดขึ้นได้เล็กน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับ
        - ระยะห่างระหว่างยีน 2 กลุ่มนี้
          - ถ้ายีนทั้งสองอยู่ชิดกันมาก ย่อมมีโอกาสแลกเปลี่ยนกันได้น้อย
          - ถ้าอยู่ห่างกันย่อมมีโอกาสมากขึ้นตามลำดับ
        - ระยะห่างจาก centromere  $\Rightarrow$  ยีนที่อยู่ห่างจาก centromere มาก ย่อมมีโอกาสแลกเปลี่ยนกลุ่มได้ง่ายกว่า
      - ถ้ากลุ่ม gene ที่อยู่บน homologous chromosome อยู่ในสภาพ homozygous การแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนของ chromatid ไม่ทำให้ได้เซลล์สืบพันธุ์ที่ต่างไปจากเดิม

## CONCEPT 18-4

- ไม่เป็น linked gene  $\Rightarrow$  TS:Ts:tS:ts = 1:1:1:1  $\otimes$  ts  $\rightarrow$  TtSs:Ttss:ttSs:ttss = 1:1:1:1