คู่มือประกอบสื่อการสอนวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์
ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

วิชาชีววิทยา

เรื่อง

โครงสร้างของโครโมโซม

โดย

อาจารย์ ดร.เพลินพิศ โชคชัยชำนาญกิจ

พุทธศักราช 2554

กองบรรณาธิการ รองศาสตราจารย์นันทนา อังกินันทน์
รองศาสตราจารย์สุมิตรา คงชื่นสิน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัชรา ลิมปนะเวช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต่อศักดิ์ สีลานันท์
นางปริญญนุช กลิ่นรัตน์
นางฐปนา บางยี่ขัน

สถานที่ให้ความอนุเคราะห์ภาพ/ข้อมูล ภาควิชาพฤกษศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำชี้แจง

โครงสร้างของโครโมโซม เป็นตอนหนึ่งของสื่อประกอบการสอน เรื่อง ยีนและโครโมโซม ซึ่งมีสื่อทั้งหมด 10 ตอน คือ

1. ยีนและโครโมโซม (Gene and chromosome)
2. โครงสร้างของดีเอ็นเอ (DNA structure)
3. โครงสร้างของโครโมโซม (Chromosome structure)
4. ความสัมพันธ์ระหว่างยีน ดีเอ็นเอ โครโมโซม และจีโนม
5. การจำลองตัวของดีเอ็นเอ (DNA replication)
6. การถอดรหัสพันธุกรรม (Transcription)
7. การแปลรหัสพันธุกรรม (Translation)
8. มิวเทชันระดับยีน (Gene mutation)
9. มิวเทชันระดับโครโมโซม (Chromosome mutation)
10. โรคทางพันธุกรรม

คู่มือประกอบ สื่อการสอน เรื่อง โครงสร้างของโครโมโซมนี้ จัดทำขึ้นเพื่อช่วยให้ ผู้สอนเข้าใจจุดประสงค์ของสื่อประกอบการสอนที่ผลิตขึ้น รวมทั้งทราบ ขอบเขตของเนื้อหา สาระที่สื่อประกอบการสอนเรื่องนี้กล่าวถึง และมี แนวทางในการใช้สื่อประกอบการสอนอย่างเหมาะสม เพื่อช่วยส่งเสริมความเข้าใจในเนื้อหาบทเรียนของผู้เรียน ตลอดจนกระตุ้นความสนใจ รวมถึงให้ความกระจ่างเกี่ยวกับศัพท์ทางวิชาการที่ควรทราบ และเปิดโอกาสให้ผู้เรียนได้บูรณาการความรู้ที่ได้รับจากการอภิปรายได้อย่างกว้างขวาง เพื่อให้การจัดการเรียนการสอนมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

อาจารย์ ดร. เพลินพิศ โชคชัยชำนาญกิจ ผู้จัดทำคู่มือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ธาริน โล่ห์ตระกูล ผู้ตรวจคู่มือ

สารบัญ

	หน้า
จุดประสงค์	5
ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง	5
เนื้อหา	6
แนวทางในการจัดการเรียนรู้	14
ภาคผนวก	18
ก. คำอธิบายศัพท์	
ข. แหล่งเรียนรู้เพิ่มเติม	
รายชื่อสื่อการสอนวิชาชีววิทยาจำนวน 92 ตอน	20

จุดประสงค์

เพื่อให้ผู้เรียนสามารถ

1. อธิบายรูปร่างและลักษณะของโครโมโซม
2. อธิบายส่วนประกอบของโครโมโซม

ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง

เมื่อผู้เรียนได้ดูสื่อประกอบการสอนตอนนี้แล้วสามารถ

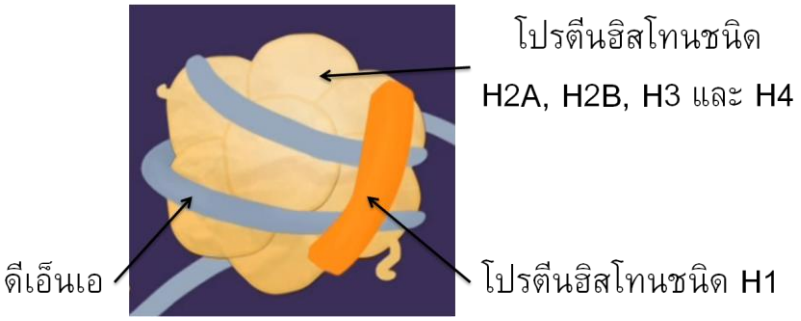
1. อธิบายรูปร่างและลักษณะของโครโมโซมได้
2. อธิบายส่วนประกอบของโครโมโซมได้
3. อธิบายถึงประโยชน์จากการศึกษาโครโมโซมได้

เนื้อหา

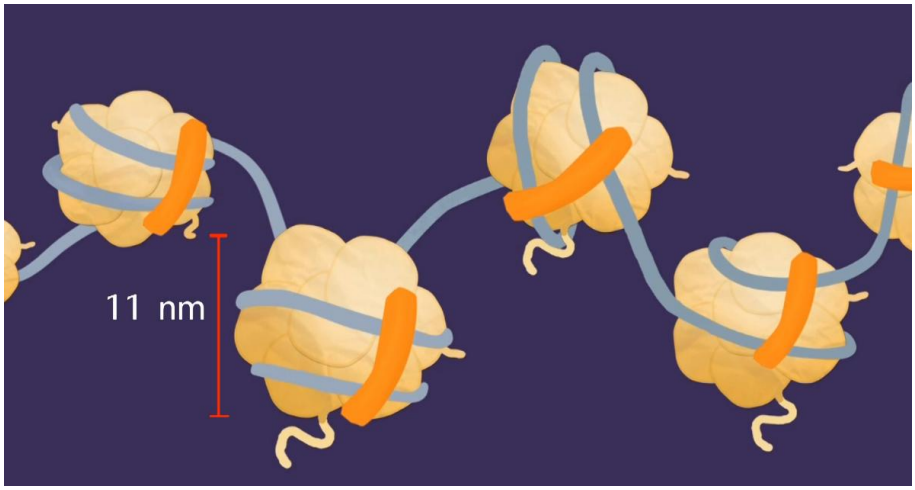
สิ่งมีชีวิตพวกยูแคริโอต (eukaryote) ส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซลล์เป็นจำนวนมาก ภายในนิวเคลียสของเซลล์แต่ละเซลล์มีสารพันธุกรรมซึ่งทำหน้าที่ควบคุมลักษณะพันธุกรรมที่แสดงออกและถ่ายทอดข้อมูลพันธุกรรม สารพันธุกรรมในระดับโมเลกุล คือ ดีเอ็นเอ ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใยบางและยาว โดยปกติดีเอ็นเอจะขดตัวร่วมกับโปรตีนเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า โครมาทิน (chromatin) และเมื่อเซลล์เข้าสู่กระบวนการแบ่งเซลล์ โครมาทินจะขดตัวมากขึ้นจึงมีความหนามากขึ้นและมีความยาวสั้นลงเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า โครโมโซม (chromosome)

โครโมโซม ประกอบด้วยดีเอ็นเอและโปรตีน โดยโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของโครโมโซม คือ โปรตีนฮิสโทน (histone protein) ซึ่งมีอยู่ 5 ชนิด คือ H1, H2A, H2B, H3 และ H4 ลักษณะการขดตัวของดีเอ็นเอและโปรตีนจนกระทั่งเป็นโครโมโซมเริ่มจากดีเอ็นเอซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นาโนเมตร พันรอบออกทาเมอร์ (octamer) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยโปรตีน ฮิสโทน 4 ชนิด คือ H2A, H2B, H3 และ H4 โดยมีชนิดละ 2 โมเลกุล รวมเป็น 8 โมเลกุล สายดีเอ็นเอ ที่พันรอบ ออกทาเมอร์จะประกอบกับโปรตีนฮิสโทนชนิด H1 เกิดเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า นิวคลีโอโซม (nucleosome) (รูปที่ 1) ดีเอ็นเอ 1 โมเลกุล จะพันกับโปรตีนฮิสโทนเกิดเป็นนิวคลีโอโซมจำนวนมากเรียงต่อกันคล้ายกับสายลูกปัด ทำให้เกิดเป็นสายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้นเป็น 11 นาโนเมตร (รูปที่ 2)

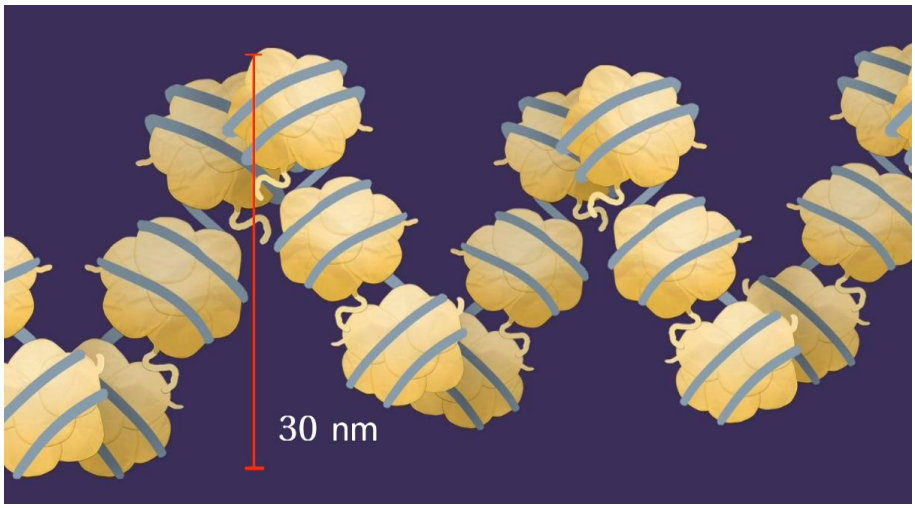
สายดีเอ็นเอและโปรตีนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 นาโนเมตร จะขดตัวแบบ ซิกแซก (zigzag) เกิดเป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 นาโนเมตร (รูปที่ 3) แล้วจึงขดและพันตัวร่วมกับโปรตีน สคาฟโฟลด์ (scaffold protein) เกิดเป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้นเป็น 300 นาโนเมตร เรียกว่า โครมาทิน (chromatin) (รูปที่ 4) โดยโครงสร้างนี้จะพบในเซลล์ระยะ อินเทอร์เฟส (interphase) หากเซลล์ไม่ได้แบ่งตัวสารพันธุกรรมในนิวเคลียสก็จะอยู่ในรูปของโครมาทินนี้โดยไม่ขดตัวเป็นโครโมโซม จนกว่าจะเริ่มเข้าสู่ระยะการแบ่งเซลล์ เมื่อเซลล์นั้นเกิดการแบ่งเซลล์ โครมาทิน 1 โครมาทิน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 นาโนเมตร จะขดตัวจนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้นเป็น 700 นาโนเมตร (รูปที่ 5) ซึ่งเรียกว่า โครโมโซม พบได้ในระยะเมทาเฟสของการแบ่งเซลล์ อย่างไรก็ตาม โครโมโซมที่พบในระยะเมทาเฟสนั้นประกอบด้วยดีเอ็นเอ 2 โมเลกุล หรือโครมาทิน 2 โครมาทิน จึงทำให้โครโมโซมมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 1,400 นาโนเมตร (รูปที่ 6)



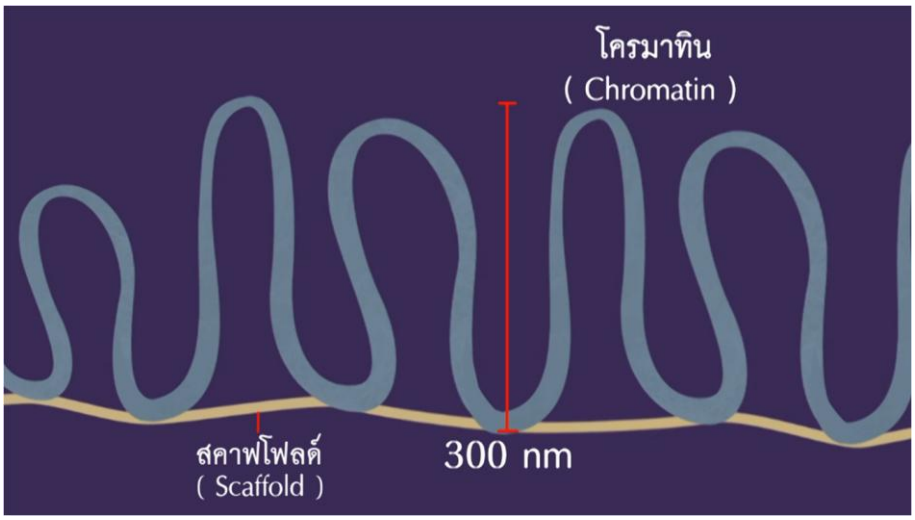
รูปที่ 1 นิวคลีโอโซม ประกอบด้วยดีเอ็นเอและโปรตีนฮิสโทน5 ชนิด ได้แก่ H1 H2A H2B H3 และ H4



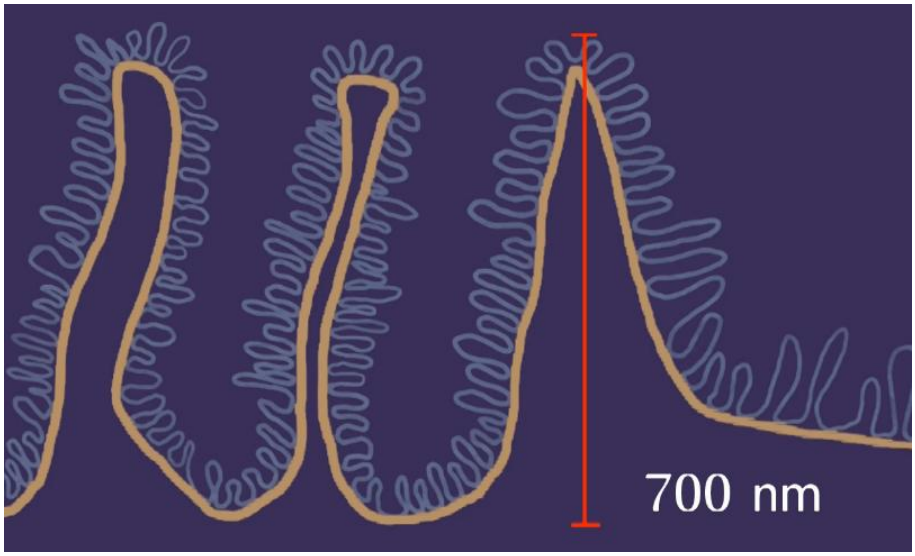
รูปที่ 2 นิวคลีโอโซมที่เรียงต่อกัน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 นาโนเมตร



รูปที่ 3 นิวคลีโอโซมที่เรียงต่อกันขดตัวมากขึ้นจนกระทั่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 นาโนเมตร

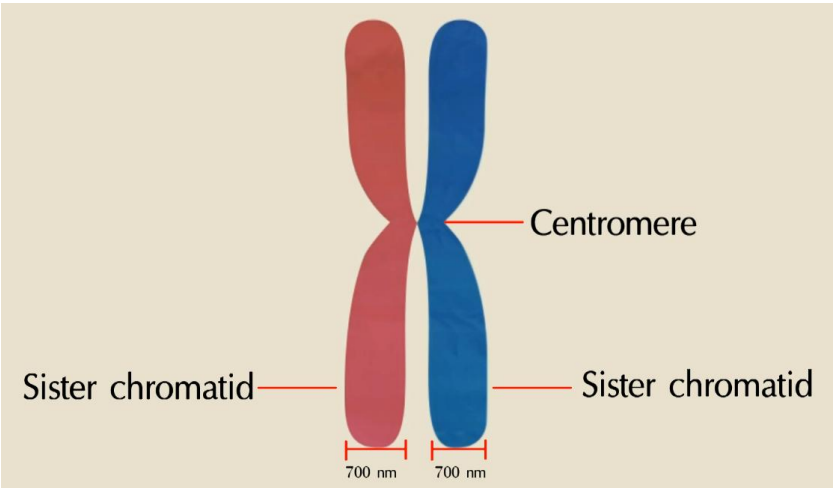


รูปที่ 4 โครมาทิน เกิดจากดีเอ็นเอที่ขดตัวร่วมกับโปรตีนฮิสโทนซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 นาโนเมตร ขดตัวร่วมกับโปรตีนสคาฟโฟลด์จนกระทั่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 นาโนเมตร



รูปที่ 5 โครโมโซมที่มีเพียง1 โครมาทิน หรือ1 ซิสเทอร์โครมาทิด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง700 นาโนเมตร

โครโมโซมซึ่งพบในระยะเมทาเฟสนั้นประกอบด้วยดีเอ็นเอ 2 โมเลกุล เนื่องจากเซลล์ที่อยู่ในระยะอินเทอร์เฟสนั้นแต่ละโครมาทินประกอบด้วยดีเอ็นเอ 1 โมเลกุล แต่เมื่อเซลล์กำลังเข้าสู่กระบวนการแบ่งเซลล์ จะมีการจำลองตัวของดีเอ็นเอ (DNA replication) ตั้งแต่ช่วงต้นของระยะอินเทอร์เฟส จึงทำให้ช่วงปลายของระยะอินเทอร์เฟส ดีเอ็นเอแต่ละโมเลกุลเพิ่มขึ้นเป็น 2 โมเลกุล หรือทำให้แต่ละโครมาทินเพิ่มขึ้นเป็น2 โครมาทิน โดยที่ดีเอ็นเอทั้ง 2 โมเลกุล หรือโครมาทินทั้ง 2 โครมาทินยังยึดติดกันอยู่ที่ตำแหน่งที่เรียกว่าเซนโทรเมียร์ (centromere) เมื่อกระบวนการแบ่งเซลล์ดำเนินไปถึงระยะเมทาเฟส ดีเอ็นเอจะขดตัวดังที่กล่าวมาข้างต้นจนกระทั่งเป็นโครงสร้างที่เรียกว่าโครโมโซม ซึ่งประกอบด้วยดีเอ็นเอ2 โมเลกุล หรือโครมาทิน 2 โครมาทิน โดยในระยะเมทาเฟสนี้จะเรียกแต่ละโครมาทินของโครโมโซมว่า ซิสเทอร์โครมาทิด (sister chromatid) หรืออาจเรียกสั้น ๆ ว่า โครมาทิด ดังนั้น แต่ละโครโมโซมจึงประกอบด้วย 2 ซิสเทอร์โครมาทิด (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 โครโมโซม ซึ่งประกอบด้วย2 โครมาทิน หรือ 2 ซิสเทอร์โครมาทิด ทำให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 1400 นาโนเมตร

ในการศึกษาโครโมโซมนั้น ส่วนใหญ่ศึกษาจากเซลล์ที่กำลังแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส (mitotic cell division) ในระยะเมทาเฟส เนื่องจากเป็นระยะที่โครโมโซมขดตัวมากที่สุด ทำให้เห็นโครโมโซมแต่ละแท่งชัดเจน ดังนั้น จึงต้องศึกษาโครโมโซมจากเซลล์บริเวณที่มีการแบ่งเซลล์ เช่น เนื้อเยื่อเจริญบริเวณปลายรากหรือปลายยอดของพืช เซลล์ในไขกระดูกของสัตว์ หรือใช้ วิธีการเลี้ยงเซลล์ด้วยการนำเซลล์เม็ดเลือดขาวหรือเซลล์จากน้ำคร่ำ มากระตุ้นให้เกิดการแบ่งเซลล์ภายในหลอดทดลอง นอกจากนี้การศึกษาโครโมโซม ยังศึกษาได้จากเซลล์ที่กำลังแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส (meiotic cell division) เช่น เซลล์เจิร์มไลน์ (germline cell) ซึ่งเป็นเซลล์ที่แบ่งตัวเพื่อสร้างเซลล์สืบพันธุ์

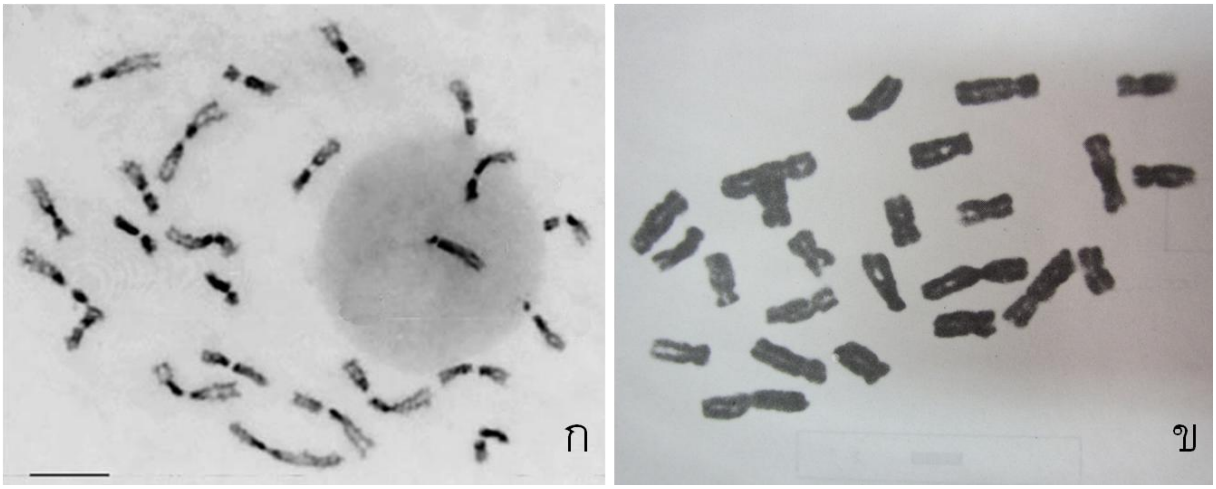
การศึกษาจำนวนโครโมโซม ส่วนใหญ่ศึกษาจากเซลล์ร่างกายของสิ่งมีชีวิต จึงเรียกจำนวนโครโมโซมในเซลล์ 1 เซลล์ที่ศึกษาได้จากสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดว่าจำนวนโครโมโซมในเซลล์ร่างกาย (somatic chromosome number) และเนื่องจากสิ่งมีชีวิตที่นำมาศึกษาโครโมโซมส่วนใหญ่เป็นสิ่งมีชีวิตพวกดิพลอยด์ (diploid) ซึ่งมีโครโมโซม 2 ชุดที่เหมือนกัน จึงใช้สัญลักษณ์ 2n แทนจำนวนโครโมโซมในเซลล์ร่างกาย นอกจากนี้เมื่อสิ่งมีชีวิตสร้างเซลล์สืบพันธุ์ ในเซลล์สืบพันธุ์แต่ละเซลล์จะมีจำนวนโครโมโซมเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนโครโมโซมในเซลล์ร่างกาย หรือมีจำนวนโครโมโซมเพียง 1 ชุด จึงใช้สัญลักษณ์ n แทนจำนวนโครโมโซมในเซลล์สืบพันธุ์ (gametic chromosome number) เช่น มนุษย์มีจำนวนโครโมโซมในเซลล์ร่างกายจำนวน 46 โครโมโซม เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ 2n = 46 และมีจำนวนโครโมโซมในเซลล์สืบพันธุ์จำนวน 23 โครโมโซม เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ n = 23 นอกจากนี้หากกล่าวถึงจำนวนโครโมโซม 1 ชุด ที่อยู่ภายในเซลล์ จะเรียกจำนวนโครโมโซม 1 ชุด นี้ว่า จำนวนโครโมโซมพื้นฐาน (basic chromosome number) โดยเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ x ซึ่งจำนวนโครโมโซมพื้นฐานนี้แสดงว่า ในเซลล์ 1 เซลล์นั้นมีโครโมโซมที่มีขนาดและรูปร่างไม่ซ้ำกันจำนวนเท่าใด เช่น มนุษย์มีจำนวนโครโมโซมพื้นฐานเป็น 23 โครโมโซม เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ x = 23 ซึ่งเห็นได้ว่าจำนวนโครโมโซมพื้นฐานของมนุษย์ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตพวกดิพลอยด์ จะเท่ากับจำนวนโครโมโซมในเซลล์สืบพันธุ์ และยังสามารถเขียนสัญลักษณ์ 2n = 2x = 46 เพื่อแสดงว่ามนุษย์เป็นสิ่งมีชีวิตพวกดิพลอยด์ซึ่งมีจำนวนโครโมโซมในเซลล์ร่างกายเป็น 2 ชุด ในกรณีที่ศึกษา จำนวนโครโมโซมในสิ่งมีชีวิตที่มีจำนวนโครโมโซมมากกว่า 2 ชุด ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตที่เรียกว่า พอลิพลอยด์ (polyploid) นั้น จะสามารถระบุจำนวนชุดของโครโมโซมได้ด้วยตัวเลขที่อยู่ด้านหน้าสัญลักษณ์ x เช่น ข้าวสาลีมีจำนวนโครโมโซมในเซลล์ร่างกาย 4 ชุด รวมเป็น 28 โครโมโซม เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ 2n = 4x = 28 แตงโมไร้เมล็ดมีจำนวนโครโมโซมในเซลล์ร่างกาย 3 ชุด รวมเป็น 33 โครโมโซม เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ 2n = 3x = 33 เป็นต้น โดยทั่วไปการเขียนการเขียนสัญลักษณ์เพื่อระบุจำนวนโครโมโซมพื้นฐานนิยมใช้กับพืชมากกว่าสัตว์ เนื่องจากมักพบพืชที่เป็นสิ่งมีชีวิตพวกพอลิพลอยด์ แต่สัตว์ส่วนใหญ่เป็นดิพลอยด์จึงไม่จำเป็นต้องระบุจำนวนโครโมโซมพื้นฐาน

เมื่อศึกษาจำนวนโครโมโซมในสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ พบว่า สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดมักมีจำนวนโครโมโซมแตกต่างกัน แต่พบว่าสิ่งมีชีวิตชนิดเดียวกันจะมีจำนวนโครโมโซมเท่ากัน ซึ่งเป็นลักษณะประจำตัวของสิ่งมีชีวิตชนิดนั้น ๆ ดังตัวอย่างจำนวนโครโมโซมของสิ่งมีชีวิตที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำนวนโครโมโซมของสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ

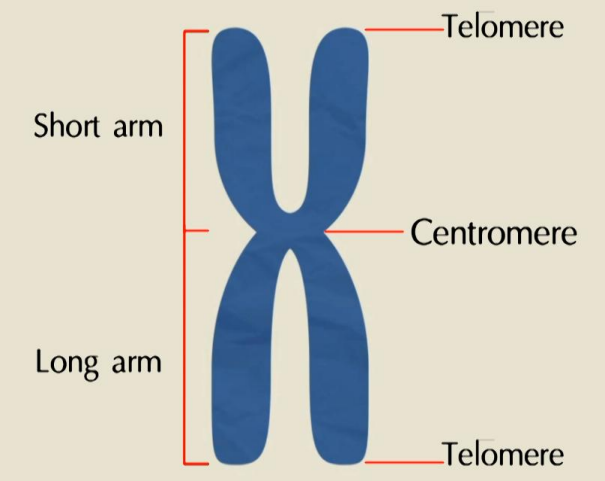
ชนิดของสิ่งมีชีวิต	จำนวนโครโมโซม (2n)
มนุษย์	46
ลิงกอริลลา	48
ลิงเสน	42
ช้าง	56
เสือดาว	38
สุนัข	78
แมลงหวี่	8
ข้าว	24
บัวจีน	24
กุยช่าย	26
หอม	16

จากตัวอย่างจำนวนโครโมโซมของสิ่งมีชีวิตในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดมีจำนวนโครโมโซมแตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตาม มีสิ่งมีชีวิตต่างชนิดกันอาจมีจำนวนโครโมโซมเท่ากัน เช่น ข้าวและบัวจีน ซึ่งมีจำนวนโครโมโซม 24 โครโมโซมเท่ากัน แต่เมื่อศึกษาขนาดและรูปร่างของโครโมโซมแล้วจะพบว่า โครโมโซมของข้าวและบัวจีน มีขนาดและรูปร่างต่างกัน (รูปที่ 7) ดังนั้นในการศึกษาโครโมโซมจึงต้องศึกษาทั้งจำนวน ขนาด และรูปร่างของโครโมโซม



รูปที่ 7 โครโมโซมของ (ก) ข้าว และ (ข) บัวจีน ซึ่งมีจำนวนโครโมโซมเท่ากัน คือ 2n = 24

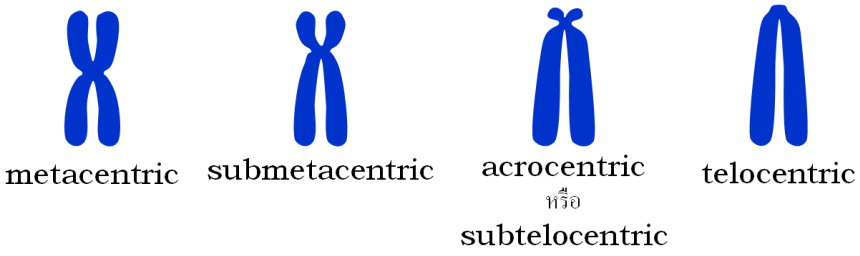
โครโมโซมมีโครงสร้างที่สำคัญ ได้แก่ เซนโทรเมียร์ (centromere) แขนของโครโมโซม (chromosome arm) และส่วนปลายของโครโมโซม (telomere) (รูปที่ 8)



รูปที่ 8 โครงสร้างของโครโมโซม องค์ประกอบสำคัญ คือ เซนโทรเมียร์ แขนของโครโมโซม และส่วนปลายของโครโมโซม

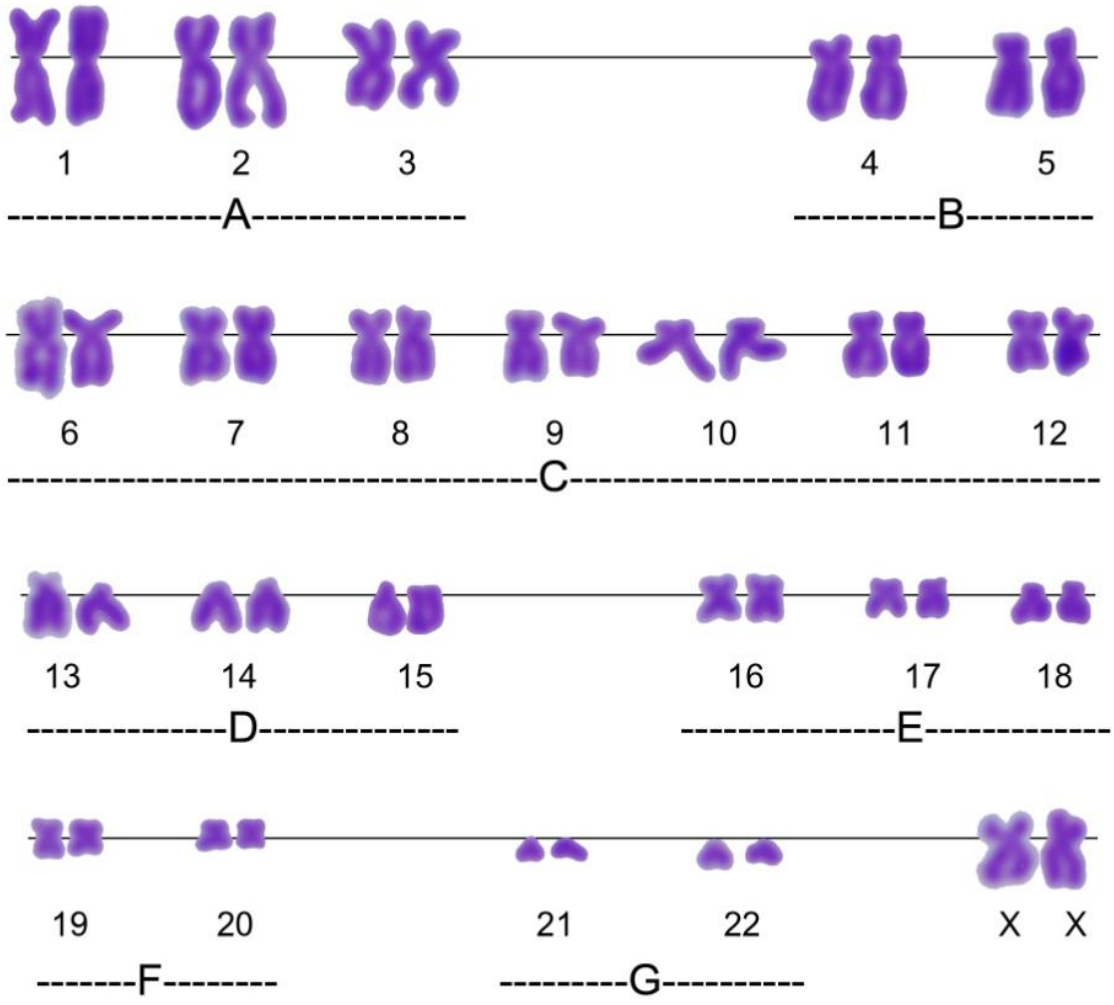
เซนโทรเมียร์ เป็นบริเวณที่ซิสเทอร์โครมาทิดทั้งสองเชื่อมติดกัน เห็นเป็นรอยคอดเข้า และเป็นตำแหน่งที่แบ่งแขนของโครโมโซมออกเป็น 2 ส่วน คือ แขนข้างสั้น (short arm) และแขนข้างยาว (long arm) โดยแขนของโครโมโซมจะเป็นตำแหน่งที่อยู่ของยีนต่าง ๆ ในขณะที่ส่วนปลายของโครโมโซมทำหน้าที่ช่วยป้องกันดีเอ็นเอจากการถูกทำลาย

เนื่องจากเซนโทรเมียร์ เป็นตำแหน่งที่แบ่งแขนของโครโมโซมออกเป็น 2 ส่วน จึงเป็นโครงสร้างที่ใช้ในการจำแนกรูปร่างของโครโมโซม คือ หากเซนโทรเมียร์อยู่กึ่งกลางโครโมโซมจะทำให้แขนของโครโมโซมทั้ง 2 ข้าง ยาวเท่ากัน จัดเป็นโครโมโซมแบบ เมทาเซนทริก (metacentric chromosome) หรือหากเซนโทรเมียร์อยู่ค่อนไปด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้เกิดเป็นแขนข้างสั้นและแขนข้างยาว จัดเป็นโครโมโซมแบบซับเมทาเซนทริก (submetacentric chromosome) หากเซนโทรเมียร์อยู่เกือบปลายสุดของโครโมโซม จะทำให้แขนข้างที่สั้นมีขนาดสั้นมาก และแขนข้างยาวมีความยาวมากกว่าแขนข้างที่สั้นมาก จัดเป็นโครโมโซมแบบ อะโครเซนทริก (acrocentric chromosome) หรือซับเทโลเซนทริก (subtelocentric chromosome) และหากเซนโทรเมียร์อยู่ปลายสุดของโครโมโซม จะทำให้โครโมโซมมีแขนข้างยาวเพียงอย่างเดียว จัดเป็นโครโมโซมแบบเทโลเซนทริก (telocentric chromosome) (รูปที่ 9)



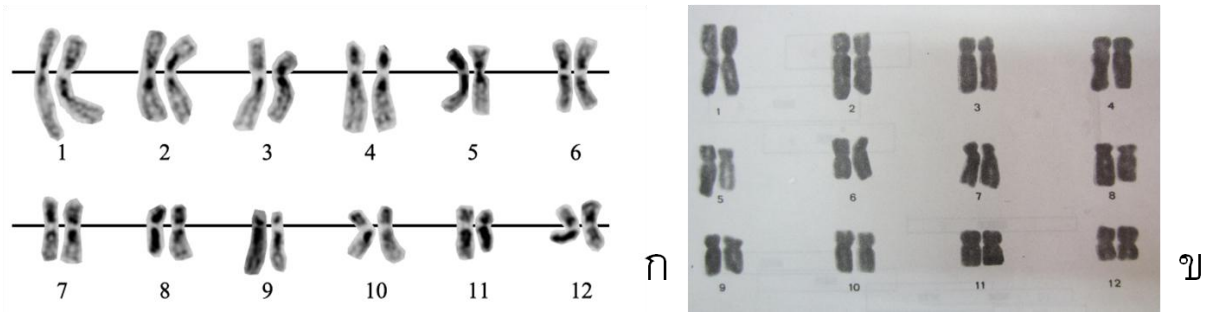
รูปที่ 9 รูปร่างของโครโมโซมแบบต่าง ๆ ซึ่งเป็นผลมาจากตำแหน่งเซนโทรเมียร์ที่ต่างกัน

การศึกษาจำนวน ขนาด และรูปร่างของโครโมโซมของสิ่งมีชีวิตทำได้โดยการนำโครโมโซมทั้งหมดในเซลล์ 1 เซลล์ที่อยู่ในระยะเมทาเฟส มาจัดคู่ตามขนาดและรูปร่างของโครโมโซม ซึ่งโครโมโซมที่มีขนาดเท่ากันและรูปร่างเหมือนกันจัดเป็นคู่กัน หรือเป็นโครโมโซมคู่เหมือน (homologous chromosome) จากนั้นนำโครโมโซมที่จัดคู่แล้วมาเรียงลำดับจากขนาดใหญ่ไปยังขนาดเล็ก ผลที่ได้จากการจัดคู่และเรียงลำดับตามขนาดของโครโมโซม เรียกว่า แคริโอไทป์ (karyotype) เช่นแคริโอไทป์ของมนุษย์ (รูปที่ 10) สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดจะมีรูปแบบแคริโอไทป์ที่แตกต่างกัน ถึงแม้ว่าจะมีจำนวนโครโมโซมเท่ากันก็ตาม ดังตัวอย่างเช่น แคริโอไทป์ของข้าวและบัวจีน (รูปที่ 11)



รูปที่ 10 แคริโอไทป์ของมนุษย์

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาจำนวน ขนาด และรูปร่างของโครโมโซม สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ศึกษาโรคทางพันธุกรรมที่เกิดจากความผิดปกติของโครโมโซม ซึ่งใช้มากในการตรวจวินิจฉัยทารกในครรภ์ ดังตัวอย่างโรคทางพันธุกรรมในตารางที่ 2 นอกจากนี้ ยังใช้เพื่อช่วยในการทำแผนที่ยีน ช่วยในการจัดจำแนกชนิดของสิ่งมีชีวิต ทั้งยังสามารถใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงพันธุ์ รวมถึงใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาวิวัฒนาการได้อีกด้วย



ก ข

รูปที่ 11 แคริโอไทป์ของ (ก) ข้าว และ (ข) บัวจีน ซึ่งมีจำนวนโครโมโซมเท่ากัน คือ 2n = 24 แต่มีขนาดและรูปร่างของโครโมโซมต่างกัน

ตารางที่ 2 ตัวอย่างโรคทางพันธุกรรมที่เกิดจากความผิดปกติของโครโมโซม

โรคทางพันธุกรรม	ความผิดปกติของโครโมโซม	จำนวนโครโมโซม
กลุ่มอาการเทิร์นเนอร์ (Turner syndrome)	โครโมโซม X ขาดหายไป 1 โครโมโซม	45
กลุ่มอาการไคลน์เฟลเทอร์ (Klinefelter syndrome)	โครโมโซม X เกินมา 1 โครโมโซม	47
กลุ่มอาการดาวน์ (Down Syndrome)	โครโมโซมคู่ที่ 23 เกินมา 1 โครโมโซม	47
กลุ่มอาการเอ็ดวาด (Edward syndrome)	โครโมโซมคู่ที่ 18 เกินมา 1 โครโมโซม	47
กลุ่มอาการพาทัว (Patau syndrome)	โครโมโซมคู่ที่ 13 เกินมา 1 โครโมโซม	47
กลุ่มอาการคริ ดู ชาร์ (Cri-du-chart syndrome)	แขนข้างสั้นของโครโมโซมที่ 5 ขาดหายไปบางส่วน	46

แนวทางในการจัดการเรียนรู้

สื่อประกอบการสอนเรื่อง โครงสร้างของโครโมโซม ได้อธิบายถึงโครงสร้างและองค์ประกอบของโครโมโซมของสิ่งมีชีวิตพวกยูแคริโอตที่เป็นดิพลอยด์ โดยศึกษาโครโมโซมที่อยู่ในระยะเมทาเฟสของการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส ให้ผู้สอนทบทวนเรื่องสิ่งมีชีวิตพวกดิพลอยด์และแฮพลอยด์ และกระบวนการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส เพื่อให้ผู้เรียนเข้าใจโครงสร้างของโครโมโซมจากสื่อได้ง่ายขึ้น

หลังจากที่ผู้สอนให้ผู้เรียนศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างของดีเอ็นเอแล้ว ให้ผู้เรียนอภิปรายโดยใช้คำถามและมีแนวทางคำตอบดังนี้

1. **คำถาม :** สิ่งมีชีวิตพวกโพรแคริโอตมีโครโมโซมหรือไม่ ถ้ามี โครโมโซมมีโครงสร้างเหมือนหรือต่างจากโครโมโซมของสิ่งมีชีวิตพวกยูแคริโอต

   ตอบ : สิ่งมีชีวิตพวกโพรแคริโอตมีสารพันธุกรรมเป็นดีเอ็นเอเช่นเดียวกับสิ่งมีชีวิตพวกยูแคริโอต แต่โพรแคริโอตมีดีเอ็นเอที่จำเป็นสำหรับการดำรงชีวิต (หรือ nuclear DNA เมื่อเทียบกับยูแคริโอต) เพียง 1 โมเลกุล และมีลักษณะเป็นวง (circular DNA) ส่วนยูแคริโอตมีดีเอ็นเอหลายโมเลกุล และมีลักษณะเป็นสายตรง (linear DNA) ทั้งดีเอ็นเอของโพรแคริโอตและดีเอ็นเอของยูแคริโอต ต่างก็ขดตัวร่วมกับโปรตีนเกิดเป็นโครงสร้างของโครโมโซม โดยโครโมโซมของสิ่งมีชีวิตพวกยูแคริโอตประกอบด้วยดีเอ็นเอ โปรตีนฮิสโทน และโปรตีนชนิดอื่น ขดตัวรวมกันจนเกิดเป็นโครโมโซม ในขณะที่โครโมโซมของสิ่งมีชีวิตพวกโพรแคริโอตประกอบด้วยดีเอ็นเอ และโปรตีนดีเอ็นเอไบน์ดิง (DNA binding protein) ขดตัวรวมกัน แต่การขดตัวไม่ซับซ้อนเหมือนกับโครโมโซมของสิ่งมีชีวิตพวกยูแคริโอต

2. **คำถาม :** โครโมโซมที่เห็นเป็นรูปคล้ายปาท่องโก๋ มีดีเอ็นเออยู่กี่โมเลกุล

   ตอบ : โครโมโซมที่เห็นเป็นรูปคล้ายปาท่องโก๋ มีดีเอ็นเออยู่ 2 โมเลกุล เนื่องจากจะพบโครโมโซมได้ในระยะเมทาเฟสของการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส ซึ่งก่อนที่เซลล์จะแบ่งตัวต้องมีการจำลองตัวของดีเอ็นเอ ทำให้ดีเอ็นเอแต่ละโมเลกุลเพิ่มขึ้นเป็น 2 โมเลกุล โดยที่โมเลกุลของดีเอ็นเอทั้งสองยังเชื่อมติดกันอยู่ เมื่อกระบวนการแบ่งเซลล์ดำเนินมาถึงระยะเมทาเฟส ดีเอ็นเอทั้งสองโมเลกุลจะขดตัวร่วมกับโปรตีน เป็นโครโมโซม 1 โครโมโซม ที่ประกอบด้วย 2 ซิสเทอร์โครมาทิด โดยแต่ละซิสเทอร์โครมาทิด มาจากดีเอ็นเอ 1 โมเลกุล

3. **คำถาม** : องค์ประกอบที่สำคัญของโครโมโซมมีอะไรบ้าง แต่ละองค์ประกอบของโครโมโซมมีหน้าที่อะไร

ตอบ : องค์ประกอบที่สำคัญของโครโมโซมได้แก่ เซนโทรเมียร์ แขนของโครโมโซม และส่วนปลายของโครโมโซม โดยเซนโทรเมียร์เป็นบริเวณที่ซิสเทอร์โครมาทิดทั้งสองเชื่อมติดกันจนเป็นรอยคอดเข้า และเป็นบริเวณที่แบ่งแขนของโครโมโซมออกเป็นแขนข้างสั้นและแขนข้างยาว แขนของโครโมโซมเป็นตำแหน่งต่าง ๆ ของยีนซึ่งทำหน้าที่ควบคุมลักษณะทางพันธุกรรม ส่วนปลายของโครโมโซม ทำหน้าที่ป้องกันดีเอ็นเอจากการถูกทำลาย

4. **คำถาม** : รูปร่างของโครโมโซมที่แตกต่างกันเกิดขึ้นได้อย่างไร และรูปร่างของโครโมโซมมีกี่แบบ แต่ละแบบมีลักษณะอย่างไร

ตอบ : รูปร่างของโครโมโซมเกิดจากตำแหน่งของเซนโทรเมียร์ที่แตกต่างกัน โดยรูปร่างของโครโมโซมมีอยู่ 4 แบบ คือ

โครโมโซมแบบเมทาเซนทริก เซนโทรเมียร์อยู่กึ่งกลางโครโมโซม ทำให้แขนของโครโมโซมทั้งสองข้างยาวเท่ากัน

โครโมโซมแบบซับเมทาเซนทริก เซนโทรเมียร์อยู่ค่อนไปด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้แขนของโครโมโซมยาวไม่เท่ากัน เกิดเป็นแขนข้างสั้นและแขนข้างยาว

โครโมโซมแบบอะโครเซนทริก หรือซับเทโลเซนทริก เซนโทรเมียร์อยู่เกือบปลายสุดของโครโมโซม ทำให้แขนข้างสั้นมีขนาดสั้นมาก และแขนข้างยาวมีขนาดยาวมาก

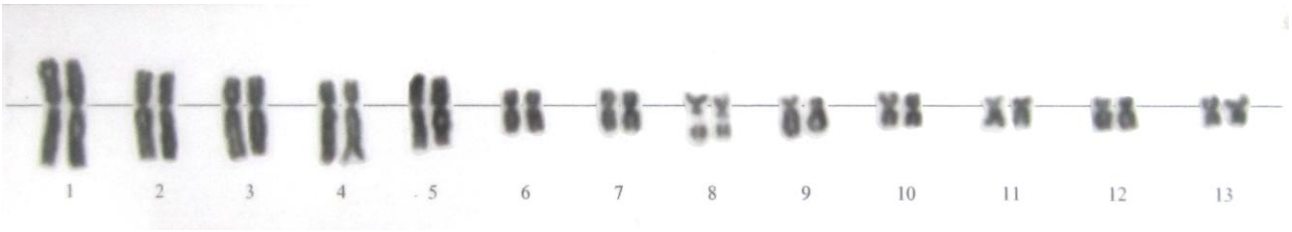
โครโมโซมแบบเทโลเซนทริก เซนโทรเมียร์อยู่ปลายสุดของโครโมโซม ทำให้โครโมโซมมีแขนข้างยาวเพียงอย่างเดียว

5. **คำถาม** : ให้ผู้เรียนจัดแคริโอไทป์จากภาพโครโมโซมระยะเมทาเฟสของกบนา ซึ่งมีจำนวนโครโมโซม 2n = 26

ตอบ : ในการจัดแคริโอไทป์ ให้ผู้เรียนตัดโครโมโซมแต่ละโครโมโซมแยกออกจากกันแล้วจัดคู่โครโมโซมที่เป็นฮอมอโลกัสโครโมโซมกันซึ่งจะมีขนาดเท่ากัน และรูปร่างเหมือนกัน จากนั้นนำโครโมโซมแต่ละคู่มาเรียงลำดับจากขนาดใหญ่ไปยังขนาดเล็ก โดยให้โครโมโซมคู่ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดเป็นโครโมโซมคู่ที่ 1 และโครโมโซมคู่ที่มีขนาดเล็กที่สุดเป็นคู่สุดท้าย หากโครโมโซมมีขนาดเท่ากันให้เรียงตามรูปร่างของโครโมโซมเริ่มจาก เมทาเซนทริก ซับเมทาเซนทริก อะโครเซนทริก และเทโลเซนทริก โดยการวางโครโมโซมให้วางแขนข้างสั้นไว้ด้านบนและแขนข้างยาวไว้ด้านล่าง และให้ตำแหน่งเซนโทรเมียร์ของโครโมโซมทุกคู่อยู่ในแนวเดียวกัน ดังแสดงในภาพด้านล่าง

ในกรณีของกบนา มีโครโมโซมที่มีลักษณะพิเศษอยู่ 1 คู่ คือ โครโมโซมคู่ที่ 8 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับโครโมโซมขาด เป็นบริเวณที่ไม่ติดสีย้อม เนื่องจากเป็นตำแหน่งของนิวคลีโอลัส

ผลที่ได้จากการจัดแคริโอไทป์ของผู้เรียนอาจได้ผลแตกต่างจากตัวอย่างแคริโอไทป์ที่ให้ไว้เล็กน้อย เนื่องจากโครโมโซมบางคู่มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกันมาก เช่น คู่ที่ 6 และ 7 คู่ที่ 11 และ 12 ทั้งนี้ ในการศึกษาแคริโอไทป์ของสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ ต้องใช้จำนวนเซลล์อย่างน้อย 10 เซลล์ เพื่อให้การจัดแคริโอไทป์มีความถูกต้อง นอกจากนี้ ยังมีการคำนวณความยาวของแขนโครโมโซมเพื่อระบุรูปร่างของโครโมโซมอีกด้วย


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13

ภาคผนวก

ก. คำอธิบายศัพท์

แคริโอไทป์ karyotype	ภาพโครโมโซมที่จัดคู่ และเรียงลำดับตามขนาดและรูปร่าง เพื่อให้สะดวกในการศึกษาจำนวน ขนาด และรูปร่างของโครโมโซม
โครมาทิน chromatin	ดีเอ็นเอที่ขดตัวรวมกับโปรตีนจนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 นาโนเมตร พบในเซลล์ระยะอินเทอร์เฟส
โครโมโซม chromosome	โครงสร้างที่อยู่ในนิวเคลียส เป็นตำแหน่งที่อยู่ของยีนต่าง ๆ มีองค์ประกอบเป็นดีเอ็นเอและโปรตีนที่ขดตัวรวมกัน เห็นชัดเจนในระหว่างการแบ่งเซลล์ โดยเฉพาะระยะเมทาเฟสซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านที่กว้างที่สุด1400 นาโนเมตร (มี2 ซิสเทอร์โครมาทิด)
จำนวนโครโมโซมในเซลล์ร่างกาย somatic chromosome number	จำนวนโครโมโซมทั้งหมดที่มีอยู่ในเซลล์ร่างกาย 1 เซลล์ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ 2n เนื่องจากส่วนใหญ่ศึกษาในสิ่งมีชีวิตที่เป็นดิพลอยด์
จำนวนโครโมโซมในเซลล์สืบพันธุ์ gametic chromosome number	จำนวนโครโมโซมทั้งหมดที่มีอยู่ในเซลล์สืบพันธุ์ 1 เซลล์ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ n เนื่องจากจะมีจำนวนโครโมโซมเป็นครึ่งหนึ่งของเซลล์ร่างกาย
จำนวนโครโมโซมพื้นฐาน basic chromosome number	จำนวนโครโมโซมที่มีขนาดและรูปร่างไม่ซ้ำกันเลยในเซลล์ 1 เซลล์ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ x และมีตัวเลขอยู่หน้าสัญลักษณ์ x เพื่อบอกว่า ในเซลล์ 1 เซลล์ มีจำนวนโครโมโซมพื้นฐานกี่ชุด
ซิสเทอร์โครมาทิด sister chromatid	ดีเอ็นเอ 1 โมเลกุล ที่ขดตัวรวมกับโปรตีนจนมีความหนา 700 นาโนเมตร เห็นชัดเจนในเซลล์ระยะเมทาเฟส โดยโครโมโซม 1 โครโมโซม ประกอบด้วยซิสเทอร์โครมาทิด 2 ซิสเทอร์โครมาทิด
ดิพลอยด์ diploid	เซลล์หรือสิ่งมีชีวิตที่มีจำนวนโครโมโซม 2 ชุด
นิวคลีโอโซม nucleosome	ดีเอ็นเอที่พันรอบโปรตีนฮิสโทน 8 โมเลกุลที่ประกอบกันเป็นออกทาเมอร์ และมีโปรตีนฮิสโทนชนิด H1 ประกอบอยู่ด้วย

เซนโทรเมียร์ centromere	บริเวณที่เป็นรอยคอดเข้าบนโครโมโซม เป็นบริเวณที่ ซิสเทอร์โครมาทั้งสองติดกัน และตำแหน่งของเซนโทรเมียร์ใช้กำหนดรูปร่างของโครโมโซม
ส่วนปลายของโครโมโซม telomere	บริเวณปลายของโครโมโซมทั้งสองด้าน ทำหน้าที่ป้องกันการถูกทำลายของโครโมโซม
พอลิพลอยด์ polyploid	เซลล์หรือสิ่งมีชีวิตที่มีจำนวนโครโมโซมมากกว่า 2 ชุด
ออกทาเมอร์ octamer	โครงสร้างที่ประกอบด้วยโปรตีนฮิสโทน 4 ชนิด ได้แก่ H2A H2B H3 และ H4 อย่างละ 2 โมเลกุล รวมเป็น 8 โมเลกุล

ข. แหล่งเรียนรู้เพิ่มเติม

1. Brooker, R.J. 2009. Genetics: analysis and principle. 3rd ed. Addison-Wesley. California, USA.

2. Reece, J.B., Urry, L.A., Cain, M.L., Wasserman, S.A., Minorsky, R.V. and Jackson, R.B. 2011. Campbell Biology. 9th edition (Global Edition). Pearson Education, Inc., San Franciscs.

3. Snustad, D.P. and Simmous, M.J. 2010. Principles of Genetics. 5th ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.

รายชื่อสื่อการสอนวิชาชีววิทยาจำนวน 92 ตอน

ตอนที่	ชื่อตอน	อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ
1	ชีววิทยาคืออะไร	รศ.ดร.ประคอง ตังประพฤทธิ์กุล
2	ชีวจริยธรรม	รศ.ดร.สุจินดา มาลัยวิจิตรนนท์
3	การวางแผนการทดลอง และการตรวจสอบสมมติฐาน	ผศ.ดร.พงชัย หาญยุทธนากร
4	ตัวอย่างการทดลองทางชีววิทยา	ผศ.ดร.พงชัย 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.พงชัย หาญยุทธนากร
9	กรดนิวคลีอิค	ผศ.ดร.พงชัย หาญยุทธนากร
10	การดำรงชีวิตของเซลล์	ผศ.ดร.พงชัย หาญยุทธนากร
11	การสื่อสารระหว่างเซลล์; บทนำ	ผศ.ดร.อรวรรณ สัตยาลัย
12	การสื่อสารระหว่างเซลล์; การสื่อสารระยะใกล้ในพืชและสัตว์	ผศ.ดร.อรวรรณ สัตยาลัย
13	การสื่อสารระยะไกลในสัตว์	ผศ.ดร.อรวรรณ สัตยาลัย
14	องค์ประกอบของการสื่อสารระหว่างเซลล์	ผศ.ดร.อรวรรณ 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 ตังประพฤทธิ์กุล
21	เรื่องกลไกการหายใจและศูนย์ควบคุมการหายใจในคน	รศ.ดร.ประคอง ตังประพฤทธิ์กุล
22	ไต: หน่วยไต และการสร้างปัสสาวะของไตคน	รศ.ดร.ประคอง ตังประพฤทธิ์กุล
23	ระบบหมุนเวียนเลือดแบบเปิด (open circulatory system) และแบบปิด (closed circulatory system)	รศ.ดร.วิทยา ยศยิ่งยวด

ตอนที่	ชื่อตอน	อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ
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 ตังประพฤทธิ์กุล
28	การทำงานของเซลล์ประสาท	อ.ดร.นพดล กิตนะ
29	การถ่ายทอดกระแสประสาทระหว่างเซลล์ประสาท	อ.ดร.นพดล กิตนะ
30	เซลล์รับความรู้สึก	รศ.ดร.ประคอง ตังประพฤทธิ์กุล
31	หูและการได้ยิน	รศ.ดร.ประคอง ตังประพฤทธิ์กุล
32	ฮอร์โมนคืออะไร	รศ.ดร.สุจินดา มาลัยวิจิตรนนท์
33	ชนิดของฮอร์โมนและชนิดของเซลล์เป้าหมาย	รศ.ดร.สุจินดา มาลัยวิจิตรนนท์
34	การสืบพันธุ์ระดับเซลล์ 1 วัฏจักรเซลล์ อินเทอร์เฟส และ division phase	ผศ.ดร.อรวรรณ สัตยาลัย
35	การสืบพันธุ์ระดับเซลล์ 2 วัฏจักรเซลล์ division phase mitosis	ผศ.ดร.อรวรรณ สัตยาลัย
36	การสืบพันธุ์ระดับเซลล์ 3 วัฏจักรเซลล์; division phase; meiosis	ผศ.ดร.อรวรรณ สัตยาลัย
37	เซลล์พืช	ผศ.ดร.มานิต คิดอยู่
38	เนื้อเยื่อพืช	ผศ.ดร.มานิต คิดอยู่
39	ปากใบและการควบคุมการเปิด-ปิดของปากใบ	อ.ดร.อัญชลี ใจดี
40	การลำเลียงน้ำของพืช	รศ.ดร.ปรีดา บุญ-หลง
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 บุญ-หลง
47	โครงสร้างของดอก (Structure of Flower)	ผศ.ดร.ต่อศักดิ์ สีลานันท์
48	การปฏิสนธิในพืชดอก	ผศ.ดร.ต่อศักดิ์ สีลานันท์

ตอนที่	ชื่อตอน	อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ
49	การเกิดและโครงสร้างผล	อ.ดร.สร้อยนภา ญาณวัฒน์
50	การงอกของเมล็ด	รศ.นันทนา อังกินันทน์
51	การวัดการเจริญเติบโตของพืช	อ.ดร.อัญชลี ใจดี
52	ออกซิน	ผศ.ดร.กนกวรรณ เสรีภาพ
53	การใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชในการเกษตร	ผศ.พัชรา ลิมปนะเวช
54	การเคลื่อนไหวของพืช	ผศ.ดร.กนกวรรณ เสรีภาพ
55	ความน่าจะเป็นและกฎแห่งการแยก	ผศ. เรืองวิทย์ บรรจงรัตน์
56	กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ	ผศ. เรืองวิทย์ บรรจงรัตน์
57	มัลติเปิลแอลลีล (Multiple alleles)	อ.ดร.วราลักษณ์ เกษตรานันท์
58	พอลิยีน (Polygene)	อ.ดร.วราลักษณ์ เกษตรานันท์
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 ญาณทัศนีย์จิต
64	ขั้นตอนของพันธุวิศวกรรม	อ.ดร.ปฐมวดี ญาณทัศนีย์จิต
65	สิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรม (Genetically modified organisms: GMOs)	อ.ดร.รัชนีกร ธรรมโชติ
66	ชาร์ล ดาร์วิน คือใคร	ผศ.ดร.เจษฎา เด่นดวงบริพันธ์
67	หลักฐานการเกิดวิวัฒนาการ	ผศ.ดร.เจษฎา เด่นดวงบริพันธ์
68	ทฤษฎีวิวัฒนาการของดาร์วิน	ผศ.ดร.เจษฎา เด่นดวงบริพันธ์
69	วิวัฒนาการของเชื้อดื้อยา	ผศ.ดร.เจษฎา เด่นดวงบริพันธ์
70	วิวัฒนาการของมนุษย์	ผศ.ดร.เจษฎา เด่นดวงบริพันธ์
71	อาณาจักรมอเนอรา	ผศ.ดร.รสริน พลวัฒน์
72	อาณาจักรโพรทิสตา	ผศ.ดร.รสริน พลวัฒน์
73	อาณาจักรฟังไจ	ผศ.ดร.จิตรตรา เพียภูเขียว

ตอนที่	ชื่อตอน	อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ
74	ความหลากหลายของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง	ผศ.ดร.อาจอง ประทัตสุนทรสาร
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 ประทัตสุนทรสาร
80	ไบโอมบนบก	ผศ.ดร.อาจอง ประทัตสุนทรสาร
81	การสำรวจระบบนิเวศบนบก	ผศ.ดร.อาจอง ประทัตสุนทรสาร
82	ความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งมีชีวิตกับปัจจัยทางกายภาพ	ผศ.ดร.วิเชฎฐ์ คนซื่อ
83	ความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ ในระบบนิเวศ	ผศ.ดร.วิเชฎฐ์ คนซื่อ
84	โซ่อาหารและใยอาหาร	ผศ.ดร.วิเชฎฐ์ คนซื่อ
85	วัฏจักรสาร	ผศ.ดร.วิเชฎฐ์ คนซื่อ
86	ความหมายของคำว่าประชากร(population) และประวัติการศึกษาประชากร	รศ.ดร.กำธร ธีรคุปต์
87	วิธีการหาค่าความหนาแน่นของประชากรโดยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบวางแปลง (quadrat sampling method)	รศ.ดร.กำธร ธีรคุปต์
88	การเพิ่มขนาดของประชากร (population growth)	รศ.ดร.กำธร ธีรคุปต์
89	โครงสร้างอายุ (age structure) ของประชากร	รศ.ดร.กำธร ธีรคุปต์
90	ประเภทของทรัพยากร	อ.ดร.พงษ์ชัย ดำรงโรจน์วัฒนา
91	ปัญหาที่มีต่อทรัพยากรธรรมชาติและสภาพแวดล้อม	อ.ดร.พงษ์ชัย ดำรงโรจน์วัฒนา
92	หลักการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ	อ.ดร.พงษ์ชัย ดำรงโรจน์วัฒนา