

การสืบพันธุ์ระดับเซลล์ (cellular reproduction)

ผศ.ดร.สุมิตรา วิสุทธารมณ

การสืบพันธุ์เป็นสมบัติประการหนึ่งของสิ่งมีชีวิตซึ่งส่งผลให้สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดสามารถดำรงเผ่าพันธุ์อยู่ได้ สิ่งมีชีวิตตัวใหม่เกิดจากการสืบพันธุ์ระดับเซลล์ของสิ่งมีชีวิตตัวเดิม โดยผ่านกระบวนการแบ่งเซลล์ (cell division) เสมอ เช่น แบคทีเรียเซลล์ใหม่เกิดจากการแบ่งตัวของเซลล์เดิม สิ่งมีชีวิตหลายเซลล์ที่มีการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศสร้างเซลล์สืบพันธุ์โดยกระบวนการแบ่งเซลล์ เมื่อเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้และเพศเมียรวมกันจะได้เซลล์เริ่มต้นของสิ่งมีชีวิตตัวใหม่ เป็นต้น ในการแบ่งเซลล์แต่ละครั้งเซลล์ใหม่จะต้องได้รับการถ่ายทอดสารพันธุกรรม (genetic material) และไซโทพลาซึมบางส่วนมาจากเซลล์เดิม เพื่อใช้ในการเริ่มต้นกิจกรรมต่าง ๆ ของเซลล์ใหม่ต่อไป

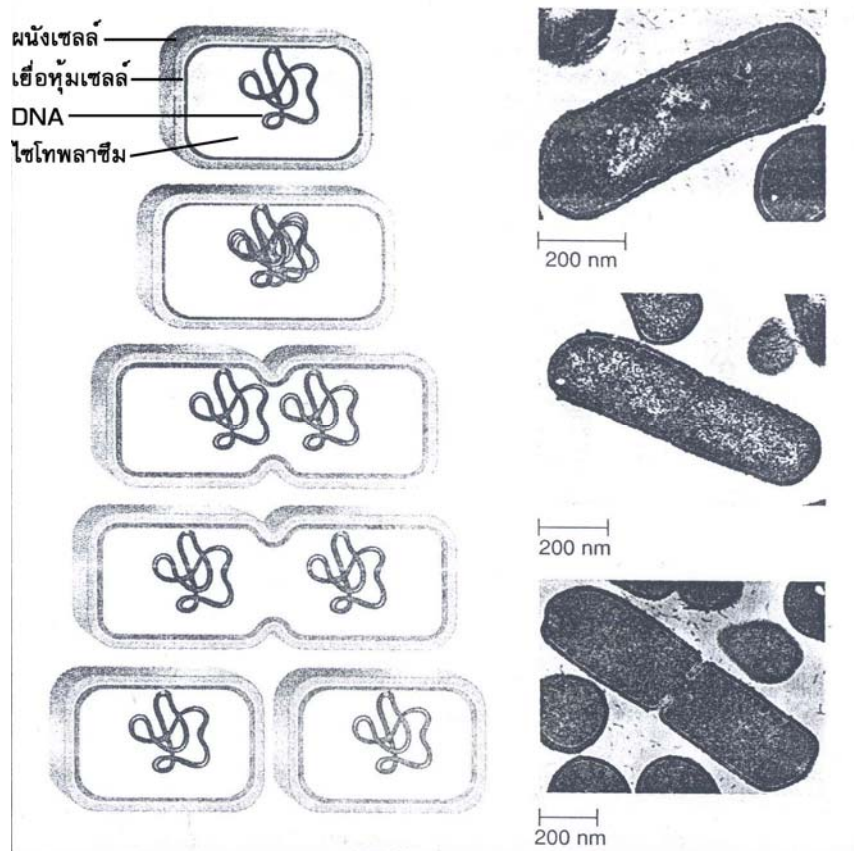
เซลล์แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. เซลล์โพรแคริโอต (prokaryote) เป็นเซลล์ขนาดเล็กไม่มีนิวเคลียส เนื่องจากไม่มีเยื่อหุ้มแบ่งแยกไซโทพลาซึมและสารพันธุกรรม (genetic material) จากกัน สารพันธุกรรมที่พบในเซลล์โพรแคริโอตส่วนใหญ่เป็น DNA เพียงโมเลกุลเดียว โดยอยู่เป็นอิสระไม่รวมกับโปรตีน นอกจากนี้เซลล์โพรแคริโอตยังไม่มีออร์แกเนลล์(organelle) ชนิดที่มีเยื่อหุ้ม เช่น ไมโทคอนเดรีย, พลาสทิด เป็นต้น ตัวอย่างของเซลล์โพรแคริโอต ได้แก่ แบคทีเรีย สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue green algae)

2. เซลล์ยูแคริโอต(eukaryote) เป็นเซลล์ที่มีนิวเคลียส ภายในไซโทพลาซึมมีออร์แกเนลล์ที่มีเยื่อหุ้มหลายชนิด เซลล์ยูแคริโอตเป็นเซลล์ของสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ ได้แก่ รา ยีสต์ พืช สัตว์ โดยขนาดและรูปร่างของเซลล์มีความผันแปรมาก

เนื่องจากโครงสร้างของเซลล์โพรแคริโอตและยูแคริโอตแตกต่างกัน ดังนั้นวิธีการในการแบ่งเซลล์จึงแตกต่างกันไปด้วย เซลล์โพรแคริโอตเป็นเซลล์ที่มีโครงสร้างแบบง่าย ๆ การแบ่งเซลล์จึงไม่ยุ่งยาก เมื่อเซลล์เติบโตเต็มที่แล้วจะมีการแบ่งตัวโดยวิธีที่เรียกว่า การแบ่งสองส่วน(binary fission) สำหรับเซลล์ยูแคริโอตมีโครงสร้างซับซ้อน การแบ่งเซลล์จึงมีหลายขั้นตอน ประกอบด้วย การแบ่งนิวเคลียส (karyokinesis) และการแบ่งไซโทพลาซึม (cytokinesis)

การแบ่งแยกตัวของโพรแคริโอต (Prokaryotic fission)



(จาก Mader. 1998. **Biology**)

รูปที่ 1 การแบ่งเป็นสองส่วน (Binary fission)

ภาพซ้าย : เป็นไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการแบ่งเป็นสองส่วน เริ่มด้วยการจำลอง DNA การยืดยาวของเยื่อหุ้มเซลล์ การแยกกันของ DNA และการคอดเว้าของเยื่อหุ้มเซลล์แบ่งเซลล์ออกเป็นสองเซลล์

ภาพขวา : เป็นภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงการแบ่งเป็นสองส่วนของเซลล์แบคทีเรีย

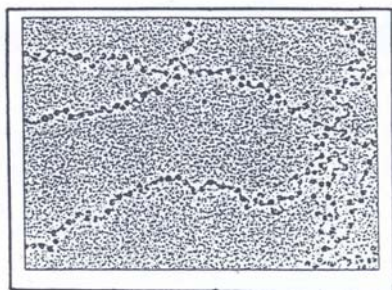
สารพันธุกรรมในเซลล์โพรแคริโอตเป็น DNA ที่มีลักษณะเป็นวง (รูปที่ 1) และมีเพียงหนึ่งโมเลกุล ยึดติดกับเยื่อหุ้มเซลล์ตรงตำแหน่งเฉพาะ ก่อนการแบ่งตัวของเซลล์มีการถ่ายแบบดีเอ็นเอ (DNA replication) เกิดขึ้น โดย DNA โมเลกุลใหม่ยึดติดกับเยื่อหุ้มเซลล์ใกล้ตำแหน่งโมเลกุลเดิม จากนั้นมีการเจริญของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้ DNA สองโมเลกุลถูกดึงแยกห่างจากกันพร้อม ๆ กับการยืดยาวของเซลล์ ต่อมาเยื่อหุ้มเซลล์ตรงจุดกึ่งกลางเซลล์ทั้งสองด้านที่อยู่ตรงข้ามกันถูกดึงเข้าสู่ด้านในจนบรรจบกัน แบ่งแยกเซลล์ออกเป็นสองส่วน ผลที่ได้ คือ เซลล์สองเซลล์ซึ่งแต่ละเซลล์มี DNA

หนึ่งโมเลกุลและไซโทพลาซึมที่มีโมเลกุลของสารต่าง ๆ เช่น เอนไซม์ อาหารสะสม และออร์แกเนลล์ จำนวนหนึ่งซึ่งพอที่เซลล์จะใช้เริ่มต้นการดำรงชีพต่อไป

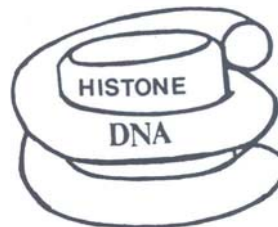
โครโมโซมของยูแคริโอต (Eukaryotic chromosome)

สารพันธุกรรมของเซลล์ยูแคริโอตมีปริมาณมากกว่าที่พบในโพรแคริโอต ดังนั้นจึงต้องมีการจัดโมเลกุล DNA อย่างเป็นระเบียบเพื่อให้บรรจุอยู่ในนิวเคลียสได้ การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่าภายในนิวเคลียสมีลักษณะเป็นเส้นใยเล็ก ๆ เรียกว่า ไโครมาทิน (chromatin fiber) เนื่องจากไโครมาทินมีขนาดเล็กมาก (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 นาโนเมตร) เมื่อข้อมนิวเคลียสด้วยสีเฉพาะจึงมองเห็นไโครมาทินอยู่รวมกันเป็นกลุ่มติดสีเข้มทึบ เรียกรวม ๆ ว่า ไโครมาทิน (chromatin)

องค์ประกอบทางเคมีของโครมาทิน ประกอบด้วย DNA และโปรตีนเป็นส่วนใหญ่โดยมี RNA รวมอยู่ด้วยเล็กน้อย โปรตีนที่พบส่วนใหญ่เป็นชนิดฮิสโตน (histone) ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีสมบัติเป็นเบส DNA ในเซลล์ยูแคริโอตมีลักษณะเป็นเส้น (linear) ปลายเปิด แต่ละโมเลกุลอยู่รวมกับฮิสโตน โดยมีแบบแผนแน่นอนเป็นหน่วยย่อย เรียกว่า นิวคลีโอโซม (nucleosome) ซึ่งเป็นหน่วยย่อยเล็กสุดของโครมาทิน ภาพถ่ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงลักษณะของไโครมาทินเป็นสายยาวคล้ายสายลูกประคำ (รูปที่ 2)



ก.



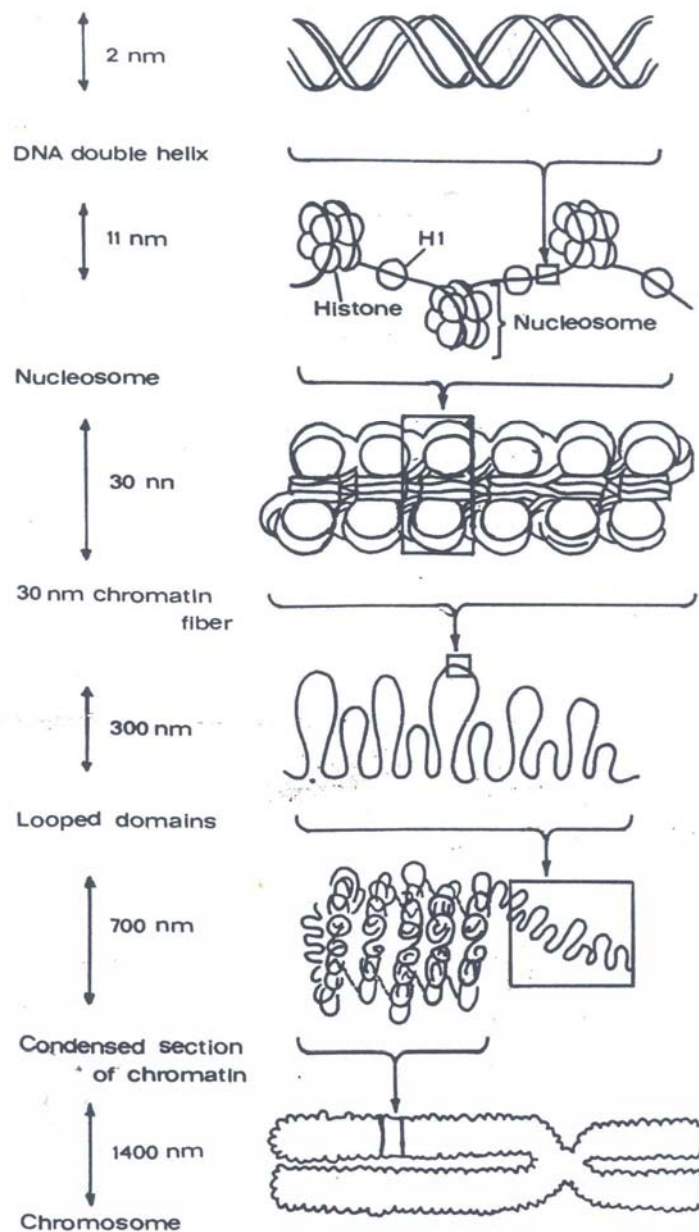
ข.

(จาก Lewin. 1987. Genes)

รูปที่ 2

- ก. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงไโครมาทินที่มีลักษณะคล้ายสายลูกประคำ ก้อนกลมแต่ละก้อน คือ นิวคลีโอโซม
- ข. ใคอะแกรมแสดงรูปร่างของนิวคลีโอโซม 1 หน่วย

กล่าวคือ ประกอบด้วยก้อนกลมขนาดเล็กเรียงร้อยต่อกันด้วยเส้นใยบาง ๆ ก้อนกลมขนาดเล็กนี้ คือ นิวคลีโอโซม ซึ่งแต่ละหน่วยประกอบด้วย DNA ประมาณ 200 คู่นิวคลีโอไทด์ (nucleotide pair) และกลุ่มฮิสโตน 8 โมเลกุล โดย DNA พันรอบกลุ่มฮิสโตนเป็นระยะ ๆ ส่งผลให้เกิดเป็นใยโครมาติน เมื่อเข้าสู่ระยะแบ่งตัวของเซลล์ใยโครมาตินมีการขดตัวหลายระดับจนเป็นเส้นหนาขึ้น เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โครโมโซม (chromosome) (รูปที่ 3)



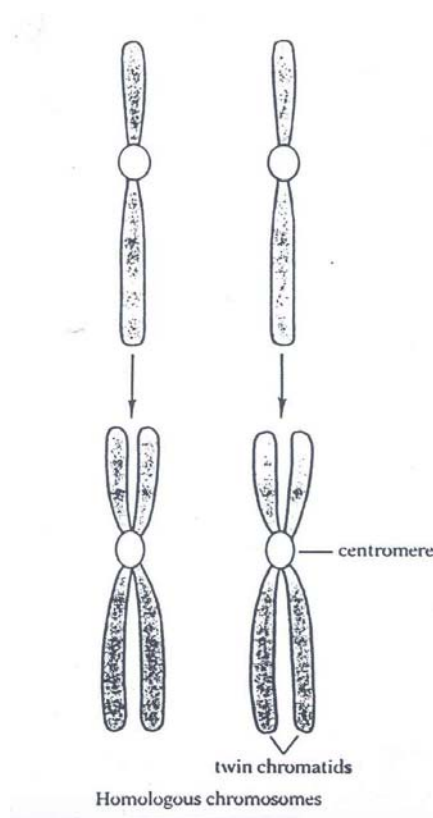
(จาก Campbell, 1990. **Biology**)

รูปที่ 3 ไดอะแกรมแสดงลำดับขั้นการจัดตัวของใยโครมาตินจนปรากฏเป็นแท่งโครโมโซม

ดังนั้น โครมาตินและโครโมโซมคือสิ่งเดียวกัน แต่อยู่ในสภาพที่ต่างกันในแต่ละช่วงของวัฏจักรเซลล์ (cell cycle)

โครโมโซมมองเห็นได้ในช่วงที่เซลล์มีการแบ่งตัว โดยก่อนแบ่งเซลล์ทุกครั้งโครโมโซมแต่ละแท่งมีการจำลองตัวทำให้โครโมโซมในระยะแบ่งตัวประกอบด้วยโครมาทิดสองสายที่เหมือนกัน เชื่อมติดกันตรงเซนโทรเมียร์ (centromere) ซึ่งเป็นบริเวณที่แคบสุดของแท่งโครโมโซม และมีบทบาทเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของแท่งโครโมโซมขณะเซลล์แบ่งตัว ตำแหน่งเซนโทรเมียร์ทำให้โครโมโซมมีรูปร่างต่าง ๆ กัน

ในเซลล์ยูแคริโอตส่วนใหญ่ โครโมโซมแต่ละแท่งมีคู่เหมือนหรือฮอมอโลกัสโครโมโซมปรากฏอยู่ด้วย (รูปที่ 4)



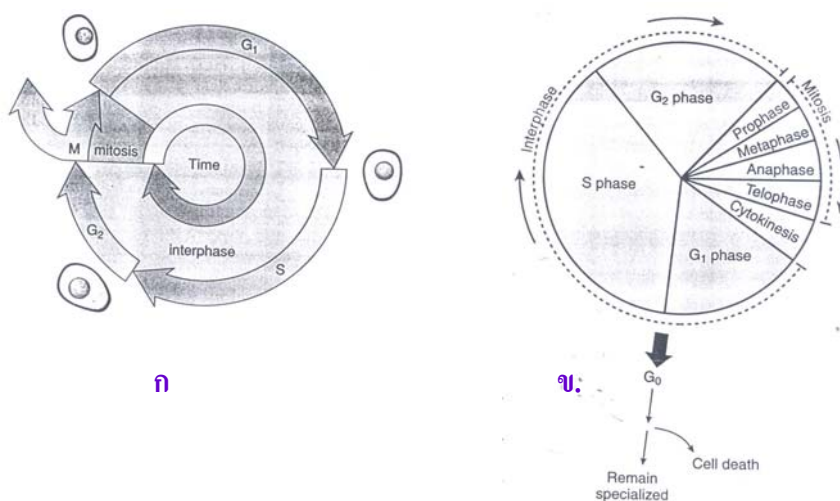
(จาก Keeton and Gould. 1986. **Biological Science**)

รูปที่ 4 แสดงฮอมอโลกัสโครโมโซมก่อนและหลังการจำลองตัวของโครโมโซม

โดยเป็นโครโมโซมที่ได้รับจากพ่อและแม่ฝ่ายละแท่ง ฮอมอโลกัสโครโมโซมแต่ละคู่มีขนาด รูปร่างเฉพาะคู่ และมียีน (gene) ที่ควบคุมลักษณะเดียวกันอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกันบนคู่โครโมโซม เซลล์ที่มีฮอมอโลกัสโครโมโซมอยู่ด้วยเป็นคู่ ๆ เรียกว่า เซลล์ดิพลอยด์ (diploid cell, $2n$) ได้แก่ เซลล์ไม่เกี่ยวกับเพศ (somatic cell) ที่พบทั่วไปในร่างกาย เซลล์ที่มีโครโมโซมแต่ละแท่งอยู่เดี่ยว ๆ เรียกว่า เซลล์แฮพลอยด์ (haploid cell, n) ได้แก่ เซลล์สืบพันธุ์ (sex cell) เช่น ในคน เซลล์สืบพันธุ์ คือ ไข่และอสุจิ มีโครโมโซม 23 แท่ง ($n = 23$) ขณะที่เซลล์อื่น ๆ ในร่างกายมีโครโมโซม 46 แท่ง ($2n = 46$) โดยแต่ละแท่งมีคู่เหมือนอยู่ด้วย

วิธีการแบ่งนิวเคลียสในเซลล์ยูแคริโอต มี 2 วิธี คือ ไมโทซิส (mitosis) และไมโอซิส (meiosis) ไมโทซิสเป็นวิธีการรักษาจำนวนโครโมโซมและองค์ประกอบทางพันธุกรรมของเซลล์เดิมไว้ สำหรับไมโอซิสมีขั้นตอนที่ส่งผลให้มีการรวมกลุ่มใหม่ของยีน (gene recombination) และการลดจำนวนโครโมโซม เซลล์ที่ได้จากการแบ่งแบบไมโอซิสจึงมีองค์ประกอบทางพันธุกรรมแตกต่างกัน และมีจำนวนโครโมโซมลดลงครึ่งหนึ่งของเซลล์เริ่มต้น

วัฏจักรเซลล์



(จาก Mader. 1998. **Biology** และ Lewis. 2001. **Human genetics**)

รูปที่ 5

- ก. วัฏจักรเซลล์แบ่งเป็นสองช่วง คือ อินเทอร์เฟสและระยะแบ่งเซลล์
- ข. ในแต่ละช่วงแบ่งเป็นระยะย่อย ๆ โดยช่วงอินเทอร์เฟสแบ่งเป็นระยะ G₁, S, G₂ และระยะแบ่งเซลล์แบ่งย่อยเป็นการแบ่งนิวเคลียส (โพรเฟส, เมทาเฟส, แอนาเฟส และเทโลเฟส) และการแบ่งไซโทพลาซึม

เซลล์มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเป็นวัฏจักร (รูปที่ 5) โดยวัฏจักรเซลล์นับจากช่วงเวลาตั้งแต่จุดเริ่มการเกิดเซลล์ใหม่ จนถึงจุดที่เซลล์แบ่งตัวได้เซลล์ใหม่อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งในช่วงเวลานี้ภายในเซลล์มีกิจกรรมต่าง ๆ เกิดขึ้นมากมาย ในแต่ละวัฏจักรเซลล์แบ่งออกเป็นสองระยะ คือ อินเทอร์เฟส (interphase) และระยะแบ่งเซลล์ (division phase)

อินเตอร์เฟส

เซลล์ที่ยังไม่มีการแบ่งตัวมีนิวเคลียสอยู่ในระยะอินเตอร์เฟส ซึ่งภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงมีลักษณะเป็นก้อนทึบข้อมืดสีเข้มและมองไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ทำให้เข้าใจว่าระยะนี้เป็นระยะพัก (resting stage) ของเซลล์ที่ไม่มีกิจกรรมใด ๆ เกิดขึ้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้วอินเตอร์เฟสเป็นช่วงเวลาที่เซลล์มีกิจกรรมต่าง ๆ เกิดขึ้นมากมาย เช่น การสังเคราะห์ RNA การสังเคราะห์โปรตีน การย่อยสลายสารอาหาร เป็นต้น เมื่อเลี้ยงเซลล์ในอาหารที่มี ^3H -thymidine (tritiated thymidine) ซึ่งนำไปใช้สังเคราะห์ DNA พบว่าในช่วงเวลาหนึ่งขณะที่นิวเคลียสอยู่ในระยะอินเตอร์เฟสมีการสังเคราะห์ DNA เกิดขึ้น ช่วงเวลานี้ เรียกว่า ระยะ S (S-phase ย่อมาจาก synthesis phase) ดังนั้น ระยะอินเตอร์เฟสจึงแบ่งเป็นระยะย่อย 3 ระยะต่อเนื่องกัน คือ ระยะ G_1 (G_1 phase ย่อมาจาก Gap one phase) ระยะ S และ ระยะ G_2 (G_2 phase ย่อมาจาก Gap two phase)

- ระยะ G_1 เป็นช่วงเวลาก่อนการสังเคราะห์ DNA เริ่มต้นจากจุดที่เซลล์เกิดใหม่จนถึงจุดที่เริ่มการสังเคราะห์ DNA G_1 เป็นระยะที่เซลล์มีการสังเคราะห์ RNA และโปรตีนเกิดขึ้นมากมาย โปรตีนเหล่านี้เป็นโปรตีนที่ใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ของเซลล์ เช่น เป็นเอนไซม์ เป็นฮอร์โมน เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างต่าง ๆ ของเซลล์ เป็นต้น ระยะนี้จึงเป็นช่วงเวลาที่เซลล์เติบโต

- ระยะ S ได้แก่ ช่วงเวลาที่เซลล์สังเคราะห์ DNA เป็นระยะต่อจาก ระยะ G_1 จนถึงจุดที่ยุติการสังเคราะห์ DNA ในช่วงเวลานี้โครโมโซมแต่ละแท่งมีการจำลองตัวเกิดขึ้นด้วย

- ระยะ G_2 เป็นช่วงเวลาลงการสังเคราะห์ DNA เริ่มตั้งแต่จุดสิ้นสุดการสังเคราะห์ DNA จนถึงจุดที่เริ่มมีการแบ่งนิวเคลียส นิวเคลียสในระยะ G_2 มีปริมาณ DNA เพิ่มขึ้นหนึ่งเท่าตัวของปริมาณ DNA ในระยะ G_1 นอกจากนี้โครโมโซมแต่ละแท่งประกอบด้วยโครมาทิดสองสาย โดยโครมาทิดแต่ละสายประกอบด้วย DNA หนึ่งโมเลกุล ระยะ G_2 จึงเป็นระยะที่เซลล์เตรียมตัวเพื่อเข้าสู่ช่วงเวลาแบ่งตัวต่อไป

ดังนั้น เมื่อรวมระยะย่อยต่าง ๆ ของอินเตอร์เฟส และระยะแบ่งเซลล์เข้าด้วยกัน วัฏจักรเซลล์จึงประกอบด้วย 4 ระยะ คือ ระยะ G_1 ระยะ S ระยะ G_2 และระยะแบ่งเซลล์

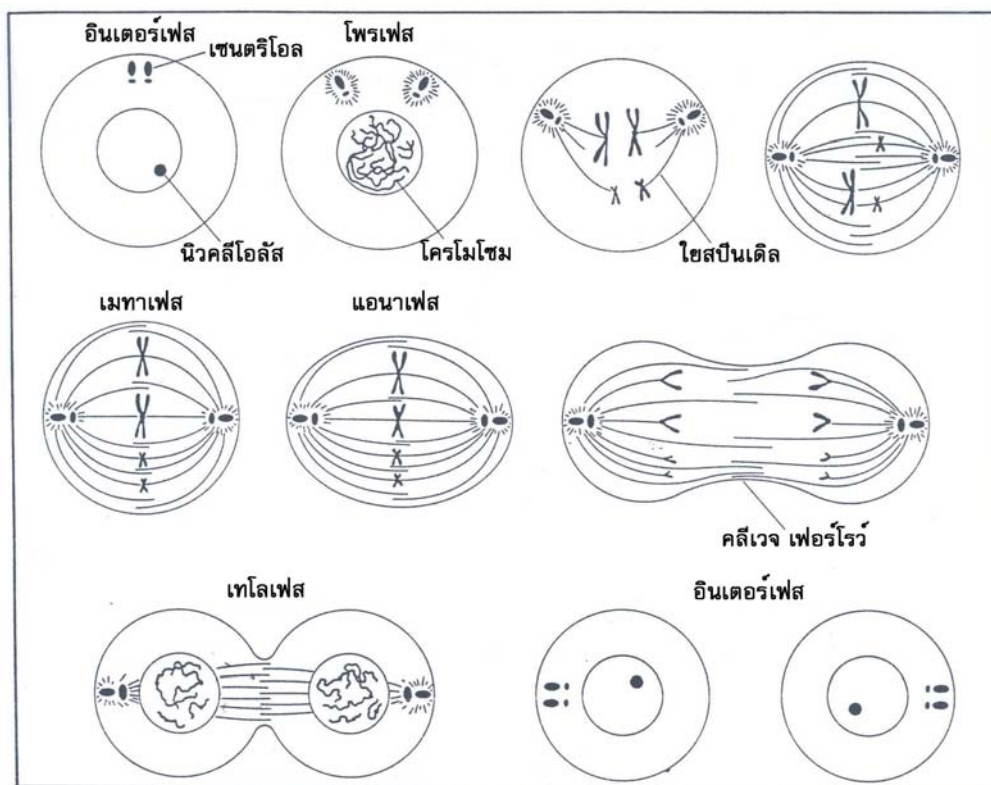
ระยะแบ่งเซลล์ (Division phase หรือ M-phase)

ขณะที่นิวเคลียสอยู่ในระยะอินเตอร์เฟส โครโมโซมอยู่ในสภาพคลายตัวอย่างมาก หรืออยู่ในสภาพไฮโครมาทิน ทั้งนี้เพื่อให้เหมาะสมต่อการแสดงออกทางยีน (gene expression) เมื่อเซลล์เข้าสู่ระยะแบ่งเซลล์โครมาทินหดตัวเพิ่มขึ้นทำให้สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของแท่งโครโมโซม

ที่เกิดอย่างต่อเนื่องได้ ระเบียบเซลล์เป็นระยะสุดท้ายของวัฏจักรเซลล์ เป็นช่วงเวลาที่นิวเคลียสแบ่งตัวโดยกระบวนการไมโทซิส (จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า M-phase) ตามด้วยการแบ่งไซโทพลาซึม

ไมโทซิส

ขั้นตอนของไมโทซิส (รูปที่ 6) แบ่งเป็นระยะย่อย 4 ระยะ ตามลำดับ คือ โพรเฟส (prophase) เมทาเฟส (metaphase) แอนาเฟส (anaphase) และเทโลเฟส (telophase) ในแต่ละระยะมีการเปลี่ยนแปลงสำคัญ ๆ ดังนี้



(จาก Darnell, Lodish and Baltimore, 1986. *Molecular Cell Biology*)

รูปที่ 6 โคอะแกรมแสดงการเปลี่ยนแปลงของนิวเคลียส ในกระบวนการไมโทซิส

-**โพรเฟส** เป็นระยะเริ่มต้นของไมโทซิส โครมาทินเริ่มขดตัวสั้นลง จึงมองเห็นโครโมโซมมีลักษณะเป็นเส้นพันกันไปมาคล้ายกลุ่มด้าย โครโมโซมแต่ละเส้นประกอบด้วยโครมาทิดสองสาย ซึ่งยังไม่สามารถมองเห็น เนื่องจากระดับการขดตัวของโครมาทินยังไม่แน่นพอ ในระยะปลายโพรเฟสมีการสลายตัวของเยื่อหุ้มนิวเคลียสและระยะโพรเฟสสิ้นสุดลง เมื่อเยื่อหุ้มนิวเคลียสสลายตัวหมด

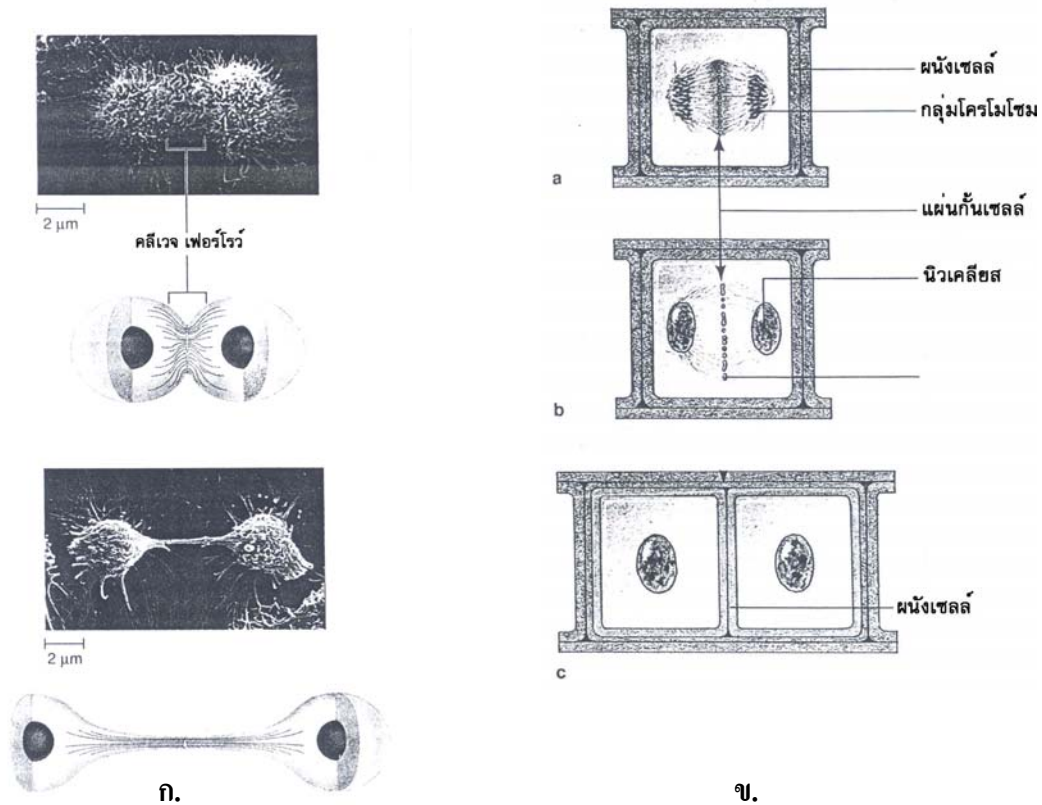
ภายในไซโทพลาซึมมีการสร้างสปินเดิลไฟเบอร์ (spindle fiber) ซึ่งช่วยในการเคลื่อนตัวของโครโมโซม ในเซลล์สัตว์มีเซนทริโอลเป็นศูนย์กลางการสร้างและเรียงตัวของสปินเดิลไฟเบอร์ โดยเซนทริโอลสองคู่ที่จำลองตัวตั้งแต่ระยะอินเตอร์เฟสเคลื่อนแยกจากกันเข้าสู่ขั้วเซลล์ที่อยู่ตรงข้ามกันมีสปินเดิลไฟเบอร์เชื่อมโยงระหว่างเซนทริโอลที่ขั้วเซลล์ทั้งสอง รอบ ๆ เซนทริโอลมีสปินเดิลไฟเบอร์เรียงตัวเป็นรัศมี เรียกว่า แอสเทอร์ (aster) และมีสปินเดิลไฟเบอร์อีกกลุ่มหนึ่งโยงระหว่างเซนทริโอลและไคเนโทคอร์ (kinetochore) ไคเนโทคอร์เป็นโครงสร้างที่สร้างขึ้นรอบเซนโทรเมียร์ของโครโมโซมแต่ละแท่งในช่วงที่มีการแบ่งเซลล์ สำหรับในเซลล์พืชซึ่งไม่มีเซนทริโอลมีการสร้างสปินเดิลไฟเบอร์มาจากขั้วเซลล์โดยไม่มีแอสเทอร์เหมือนที่พบในเซลล์สัตว์

- **เมทาเฟส** หลังจากเชื้อหุ้มนิวเคลียสสลายตัว โครโมโซมแต่ละแท่งจะถูกสปินเดิลไฟเบอร์ดึงให้เคลื่อนมาเรียงกันอยู่ในแนวศูนย์สูตร (equator) ของเซลล์ โดยโครโมโซมในระยะนี้ขดตัวมากที่สุดจนมองเห็นเป็นแท่งชัดเจน เมทาเฟสเป็นช่วงเวลาสั้นมาก และสิ้นสุดลงเมื่อเซนโทรเมียร์ของโครโมโซมแต่ละแท่งแบ่งตัว

- **แอนาเฟส** ระยะนี้โครมาทิดของโครโมโซมแต่ละแท่งถูกดึงให้ผละแยกจากกันและเคลื่อนเข้าสู่ขั้วเซลล์ โดยมีเซนโทรเมียร์เป็นส่วนเคลื่อนนำ แต่ละโครมาทิด คือ โครโมโซมของเซลล์ใหม่ เรียกว่า daughter chromosome

- **เทโลเฟส** daughter chromosome แต่ละแท่งถูกดึงมารวมกันอยู่ที่ขั้วเซลล์แต่ละขั้ว โครโมโซมที่ขดสั้นอยู่เริ่มคลายตัวปรากฏเป็นเส้นยาวกลับสู่สภาพไฮโครมาทิน มีการสร้างเชื้อหุ้มนิวเคลียสล้อมรอบกลุ่มโครโมโซมแต่ละกลุ่มเกิดเป็นนิวเคลียสใหม่ ในแต่ละนิวเคลียสมีจำนวนโครโมโซมเท่ากับจำนวนโครโมโซมในเซลล์เริ่มต้นที่แบ่งตัว

การแบ่งไซโทพลาซึม



(จาก Mader. 1998. **Biology** และ Starr and Taggart. 1998. **Biology**)

รูปที่ 7 แสดงการแบ่งไซโทพลาซึม

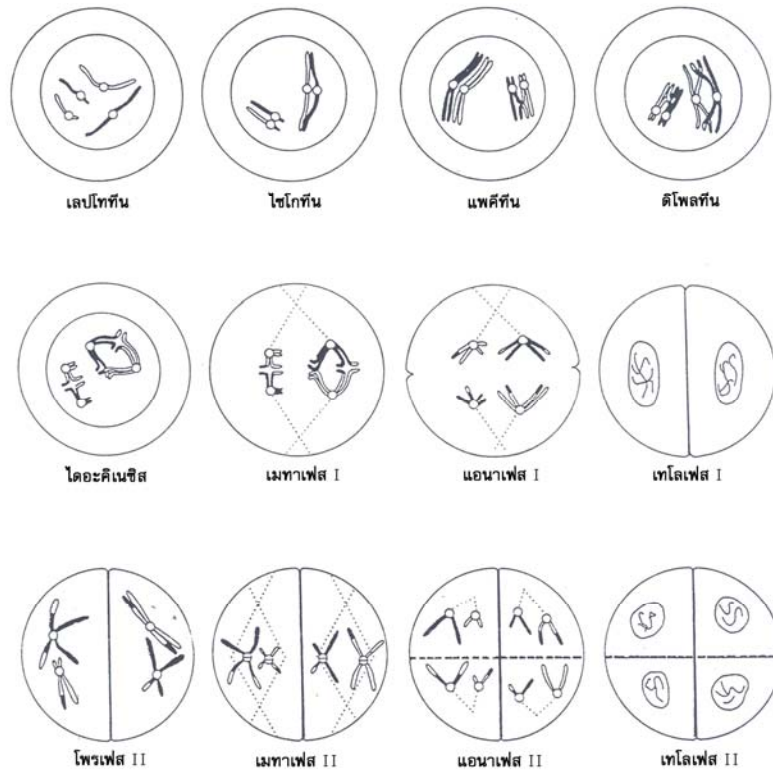
ก. การเกิดคลิเวจเฟอร์โรว์ในเซลล์สัตว์

ข. การสร้างแผ่นกั้นเซลล์ในเซลล์พืช

การแบ่งไซโทพลาซึมเริ่มขึ้นในตอนปลายของแอนาเฟสหรือในช่วงต้นของเทโลเฟส ในเซลล์สัตว์การแบ่งไซโทพลาซึมเกิดขึ้นโดยกระบวนการคลิเวจ (cleavage) เริ่มจากการเกิดร่อง เรียกว่า คลิเวจ เฟอร์โรว์ (cleavage furrow) บนเยื่อหุ้มบริเวณผิวนอกของเซลล์ตรงแนวศูนย์สูตร มีลักษณะเป็นร่องตื้น ๆ โดยเกิดสองด้านตรงกันข้ามกัน จากนั้นร่องค่อย ๆ คอดลึกเข้าไปในเซลล์จนบรรจบกัน แบ่งแยกเซลล์ออกเป็นสองเซลล์ สำหรับเซลล์พืชการแบ่งไซโทพลาซึมแตกต่างจากเซลล์สัตว์ เริ่มต้นโดยการสร้างแผ่นกั้นเซลล์ (cell plate) เป็นแนวบริเวณกึ่งกลางเซลล์ จากนั้นแผ่นกั้นเซลล์ซึ่งเป็นแผ่นเยื่อหุ้มสองชั้นค่อย ๆ เจริญขยายออกมาสู่ขอบเซลล์ทั้งสองด้านจนเชื่อมต่อกับเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เซลล์ถูกแบ่งเป็นสองส่วน แล้วจึงมีการสร้างและสะสมสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ระหว่างเยื่อหุ้มสองชั้นของแผ่นกั้นเซลล์ จนในที่สุดเกิดเป็นผนังเซลล์ของเซลล์ใหม่ต่อไป

เมื่อการแบ่งไซโทพลาซึมเสร็จสิ้นลง ผลลัพธ์ที่ได้ คือ เซลล์ใหม่สองเซลล์ ซึ่งแต่ละเซลล์จะเข้าสู่ระยะ G_1 ของวัฏจักรเซลล์ต่อไป เซลล์สองเซลล์ที่ได้จากการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิสมีจำนวนโครโมโซมเท่าเดิมและมีองค์ประกอบทางพันธุกรรมเหมือนกัน ดังนั้นไมโทซิสจึงเป็นวิธีการที่สิ่งมีชีวิตใช้ในการเพิ่มจำนวนเซลล์ การสร้างเซลล์ใหม่ขึ้นทดแทนเซลล์เดิม และในสิ่งมีชีวิตที่มีการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศใช้การแบ่งเซลล์แบบไมโทซิสในการสร้างสิ่งมีชีวิตตัวใหม่

ไมโอซิส



(จาก Mays. 1981. Genetics)

รูปที่ 8 ไคอะแกรมแสดงการเปลี่ยนแปลงนิวเคลียสโดยกระบวนการไมโอซิส

เป็นวิธีการแบ่งนิวเคลียสอีกแบบหนึ่งซึ่งพบในเซลล์เฉพาะชนิดเท่านั้น เช่น เซลล์โอโอโกเนีย (oogonia) ในรังไข่ (ovary) เซลล์สเปอร์มาโทโกเนีย (spermatogonia) ในอัณฑะ (testis) เซลล์ก้านิดสปอร์ (sporocyte) ในอับเรณู (arsther) เป็นต้น เซลล์ใหม่ที่ได้จากการแบ่งนิวเคลียสแบบไมโอซิสมีจำนวนโครโมโซมลดลงครึ่งหนึ่งของเซลล์เดิม เพราะในขั้นตอนของไมโอซิสมีการแยกจากกันของฮอมอโลกัสโครโมโซมอยู่ด้วย

ก่อนการแบ่งนิวเคลียสแบบไมโอซิสทุกครั้งมีการถ่ายแบบ DNA (DNA replication) เกิดขึ้นในช่วงอินเตอร์เฟส หลังจากนั้นจึงมีการแบ่งนิวเคลียส 2 ครั้ง ซึ่งมักเกิดต่อเนื่องกัน ดังนั้นไมโอซิสจึงแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ไมโอซิส I (meiosis I) และไมโอซิส II (meiosis II)

ไมโอซิส I

เป็นขั้นตอนในการลดจำนวนโครโมโซมลงครึ่งหนึ่ง ประกอบด้วย 4 ระยะ คือ

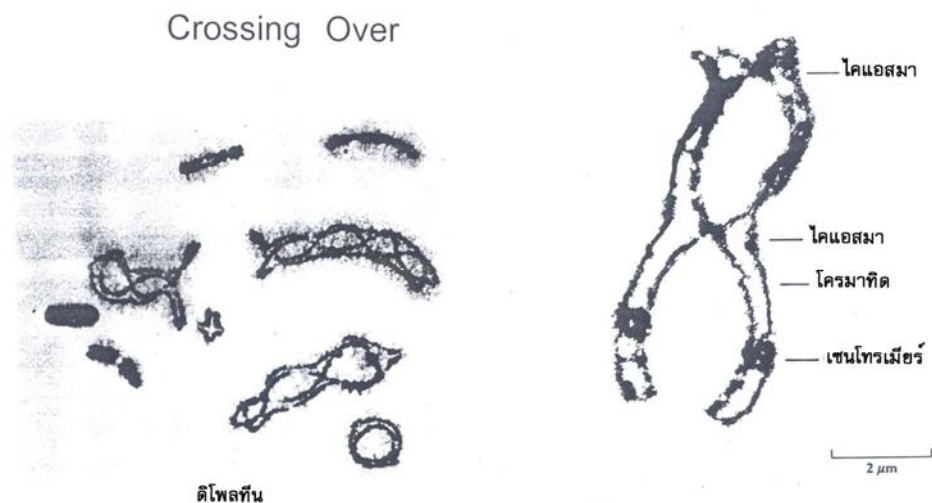
- **โพรเฟส I** ระยะนี้มีเหตุการณ์สำคัญเกิดขึ้นหลายเหตุการณ์ แบ่งออกเป็นระยะย่อยๆ ได้อีก 5 ระยะ ได้แก่

- **เลปโททีน (leptotene)** โครมาทินเริ่มหดตัวจนปรากฏเป็นเส้นโครโมโซมอยู่ในนิวเคลียส โดยแต่ละโครโมโซมประกอบด้วยโครมาทิดสองสาย

- **ไซโกทีน (zygotene)** ระยะนี้เริ่มต้นโดยฮอโมโลกัสโครโมโซมแต่ละคู่เข้าจับคู่กันตามความยาวของแท่ง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ซิแนปซิส (synapsis) และสิ้นสุดระยะเมื่อการจับคู่ของฮอโมโลกัสโครโมโซมเสร็จสิ้น

- **แพคทีน (pachytene)** โครโมโซมหดตัวเพิ่มขึ้น เรียกคู่ฮอโมโลกัสโครโมโซมแต่ละคู่ว่า ไบวาเลนต์ (bivalent) โดยแต่ละไบวาเลนต์ประกอบด้วยโครมาทิด 4 สาย ซึ่งอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เททเรด (tetrad) ปรากฏการณ์สำคัญของระยะนี้ คือ การไขว้เปลี่ยนโครมาทิดระหว่างฮอโมโลกัส เรียกว่า ครอสซิงโอเวอร์ (crossing over) ซึ่งส่งผลให้มีการจัดกลุ่มใหม่ของยีน (gene recombination) เกิดขึ้น

- **ดิพลทีน (diplotene)** โครโมโซมของไบวาเลนต์แต่ละคู่เริ่มผละจากกัน การแยกของโครโมโซมทำให้เกิดรอยไขว้ตรงตำแหน่งที่เกิดครอสซิงโอเวอร์ เรียกรอยไขว้นี้ว่า ไคแอสมา (chiasma)



(จาก Redei, 1982. *Genetics*)

รูปที่ 9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงไบวาเลนต์ในระยะดิพลทีน ซึ่งประกอบด้วยโครมาทิดสี่สาย และในบางไบวาเลนต์มีไคแอสมาอยู่ด้วย

- **ไดอะคิเนซิส (diakinesis)** โครโมโซมขดสั้นลงมากจึงมองเห็นไปวาเลนที่ชัดเจน การผลแยกของโครโมโซมในแต่ละไปวาเลนที่เกิดขึ้นเกือบสมบูรณ์ ยกเว้นตรงปลายแท่งซึ่งยังคงเกี่ยวพันกันอยู่

ในช่วงปลายของโพรเฟส I มีการสร้างสปินเดิลไฟเบอร์ในไซโทพลาซึมเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในไมโทซิส และเยื่อหุ้มนิวเคลียสสลายตัว

- **เมทาเฟส I** ภายหลังจากสลายตัวของเยื่อหุ้มนิวเคลียส สปินเดิลไฟเบอร์เข้าเกาะที่ไคนีโทคอร์ตรงเซนโทรเมียร์ของโครโมโซมแต่ละแท่งในไปวาเลนที่ ดึงให้ไปวาเลนที่เคลื่อนมาเรียงกันอยู่ตรงแนวศูนย์สูตรของเซลล์ โดยหันไคนีโทคอร์เข้าสู่ขั้วเซลล์แต่ละขั้ว
- **แอนาเฟส I** โครโมโซมแต่ละโครโมโซมในไปวาเลนที่ถูกดึงให้ผลแยกจากกันและเคลื่อนเข้าสู่ขั้วเซลล์แต่ละขั้ว โดยแต่ละแท่งยังคงประกอบด้วยโครมาทิดสองสายยึดกันตรงเซนโทรเมียร์ ดังนั้นในแต่ละขั้วเซลล์จึงมีโครโมโซมเพียงครึ่งหนึ่งของจำนวนโครโมโซมในเซลล์เดิม
- **เทโลเฟส I** โครโมโซมคล้ายตัวกลับเข้าสู่สภาพไฮโครมาทินมีการสร้างเยื่อหุ้มนิวเคลียสล้อมรอบกลุ่มโครโมโซมแต่ละกลุ่มปรากฏเป็นนิวเคลียสใหม่ การแบ่งไซโทพลาซึมเกิดขึ้นในระยะนี้ ในสิ่งมีชีวิตบางชนิดการแบ่งไซโทพลาซึมเกิดขึ้นในช่วงปลายแอนาเฟส I

เมื่อการแบ่งไซโทพลาซึมสิ้นสุดลง ได้เซลล์ใหม่สองเซลล์ซึ่งนิวเคลียสของแต่ละเซลล์มีโครโมโซมลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของเซลล์เดิมหรือเพียงครึ่งชุด (n) จากนั้นแต่ละเซลล์จะเข้าสู่การแบ่งนิวเคลียสครั้งที่ 2 โดยนิวเคลียสเข้าสู่ระยะอินเตอร์เฟสช่วงสั้น ๆ โดยไม่มีการถ่ายแบบ DNA เกิดขึ้น เรียกช่วงเวลานี้ว่า อินเตอร์คิเนซิส (interkinesis)

ไมโอซิส II

การแบ่งนิวเคลียสในระยะนี้เป็นการแยกระหว่างโครมาทิดของโครโมโซมแต่ละแท่ง ลำดับการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมเหมือนกับที่เกิดขึ้นในไมโทซิส ประกอบด้วยระยะย่อย คือ

- **โพรเฟส II** โครมาทินขดตัวเพิ่มขึ้นปรากฏเป็นเส้นโครโมโซมพันกัน แต่ละเส้นประกอบด้วยสองโครมาทิด ในตอนปลายระยะเยื่อหุ้มนิวเคลียสสลายไป
- **เมทาเฟส II** สปินเดิลไฟเบอร์เข้าเกาะตรงไคนีโทคอร์ของโครโมโซมแต่ละแท่งและดึงให้เคลื่อนมาเรียงอยู่ในแนวเดียวกันบริเวณศูนย์สูตรของเซลล์

- **แอนาเฟส II** โครมาทิดของโครโมโซมแต่ละแท่งผละแยกจากกันโดยมีการแบ่งเซนโทรเมียร์เกิดขึ้นด้วย แล้วเคลื่อนเข้าสู่ขั้วเซลล์แต่ละขั้ว
- **เทโลเฟส II** โครมาทิดที่ขั้วเซลล์แต่ละขั้วซึ่งเป็นโครโมโซมของเซลล์ใหม่คลายตัวกลับสู่สภาพไฮโครมาทิน มีการสร้างเยื่อหุ้มนิวเคลียสล้อมรอบกลุ่มโครโมโซมแต่ละกลุ่ม ตอนปลายระยะมีการแบ่งไซโทพลาซึมเกิดขึ้น ได้เซลล์ใหม่ที่มีจำนวนโครโมโซมลดลงครึ่งหนึ่งของเซลล์เริ่มต้น

ข้อเปรียบเทียบระหว่างไมโทซิสและไมโอซิส

ไมโทซิสและไมโอซิสมีลำดับการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสคล้ายคลึงกันแต่เมื่อเปรียบเทียบแล้วมีความแตกต่างกันหลายประการ โดยความแตกต่างส่วนใหญ่อยู่ในขั้นตอนการแบ่งไมโอซิส I ความแตกต่างที่สำคัญ คือ

1. การแบ่งนิวเคลียสโดยไมโทซิสเป็นการแบ่งเซลล์ไม่เกี่ยวกับเพศ ขณะที่การแบ่งนิวเคลียสแบบไมโอซิสเป็นการแบ่งเซลล์เฉพาะเพื่อสร้างเซลล์สืบพันธุ์
2. การแบ่งแบบไมโทซิสมีการแบ่งนิวเคลียสเพียงครั้งเดียวขณะที่การแบ่งแบบไมโอซิสมีการแบ่งนิวเคลียสสองครั้งต่อเนื่องกัน
3. การแบ่งแบบไมโอซิสในระยะโพรเฟส I มีการจับคู่ของฮอมอโลกัสโครโมโซม (ซิแนปซิส) และการไขว้เปลี่ยนส่วนระหว่างโครมาทิดของคู่ฮอมอโลกัส (ครอสซิง-โอเวอร์) เกิดขึ้น ขณะที่ปรากฏการณ์เหล่านี้ไม่พบในการแบ่งแบบไมโทซิส
4. ในระยะเมทาเฟส I มีการเรียงตัวของไกวเลนทันในแนวศูนย์สูตรของเซลล์และระยะแอนาเฟส I มีการแยกกันของโครโมโซมเกิดขึ้น ทั้งสองเหตุการณ์นี้ไม่พบในการแบ่งแบบไมโทซิส
5. เมื่อการแบ่งเซลล์เสร็จสิ้นลง เซลล์ลูกจากการแบ่งแบบไมโทซิสมีสองเซลล์ แต่ละเซลล์มีจำนวนโครโมโซมและปริมาณ DNA เท่ากันและเท่ากับเซลล์เริ่มต้น ส่วนการแบ่งแบบไมโอซิสทำให้เซลล์ใหม่สี่เซลล์ โดยเซลล์ใหม่แต่ละเซลล์มีจำนวนโครโมโซมและปริมาณ DNA ลดลงครึ่งหนึ่งของเซลล์เริ่มต้น

