

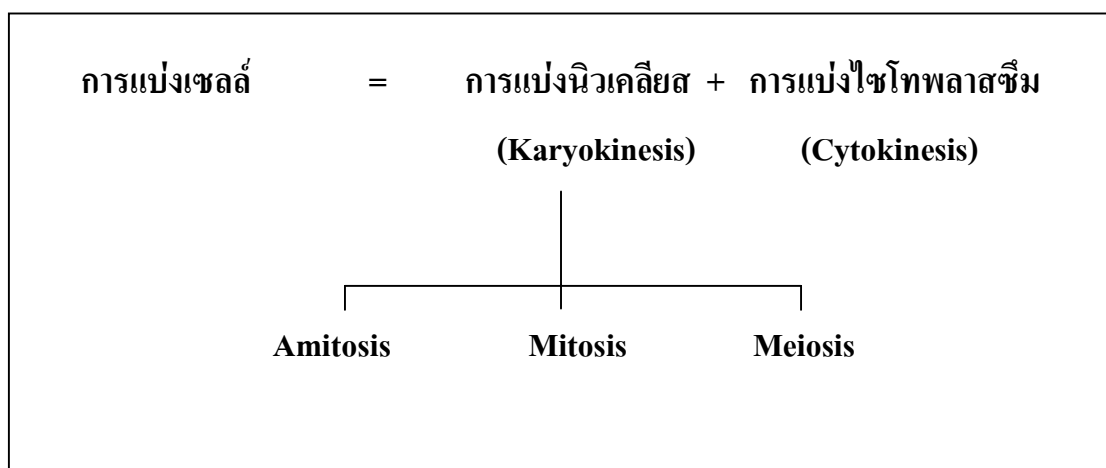
## การแบ่งเซลล์ (Cell Division)

การแบ่งเซลล์ (Cell division) ประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐานสำคัญ 2 ขั้นตอน คือ

1. การแบ่งนิวเคลียส (Karyokinesis หรือ Nuclear division)
2. การแบ่งไซโทพลาสซึม (Cytokinesis หรือ Cytoplasmic division)

ในกระบวนการแบ่งนิวเคลียส จำแนกเป็น 3 ลักษณะ คือ

1. อะไมโทซิส (Amitosis) เป็นการแบ่งนิวเคลียสที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างง่าย ๆ โดยนิวเคลียสจะหดคกลางแล้วแบ่งเป็น 2 ส่วน เซลล์ที่มีการแบ่งนิวเคลียสแบบนี้ได้แก่ มาโครนิวเคลียส (Macronucleus) ของซีเลียต เช่น พารามีเซียม และเซลล์ที่ผิดปกติกำลังจะสลายตัวไป หรือเซลล์ที่เป็นโรค แต่นักชีววิทยาบางท่านมีความเห็นว่า อะไมโทซิส ก็คือ ไมโทซิส นั่นเอง
2. ไมโทซิส (Mitosis) เป็นการแบ่งนิวเคลียสที่ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงหลายลำดับขั้นตอนต่อเนื่องกันไป เป็นผลทำให้โครโมโซมที่อยู่ในนิวเคลียสแยกออกจากกัน โดยมีทั้งคุณภาพและปริมาณเท่ากับนิวเคลียสของเซลล์เดิมก่อนการแบ่งทุกประการ การแบ่งนิวเคลียสแบบนี้พบในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด
3. ไมโอซิส (Meiosis) เป็นการแบ่งนิวเคลียสที่ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อนหลายขั้นตอนมากกว่าไมโทซิส ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นทำให้โครโมโซมลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของเซลล์เดิมก่อนการแบ่ง การแบ่งนิวเคลียสแบบนี้เป็นการแบ่งเพื่อสร้างเซลล์สืบพันธุ์ (Sex Cell) เพื่อใช้ในกระบวนการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศของสัตว์และเป็นการแบ่งเพื่อสร้างสปอร์ (spore) ในพืช



## การแบ่งเซลล์ในสิ่งมีชีวิตพวกยูคาริโอต (Eucaryote)

สิ่งมีชีวิตพวกยูคาริโอต ได้แก่ สิ่งมีชีวิตที่มีนิวเคลียสสมบูรณ์ คือมีเยื่อหุ้มนิวเคลียส ภายในมี DNA และโปรตีนประกอบกันเป็นโครโมโซม และมีจำนวนโครโมโซมมาก กระบวนการแบ่งเซลล์ จึงมีความซับซ้อนกว่าในพวกโพรคาริโอต

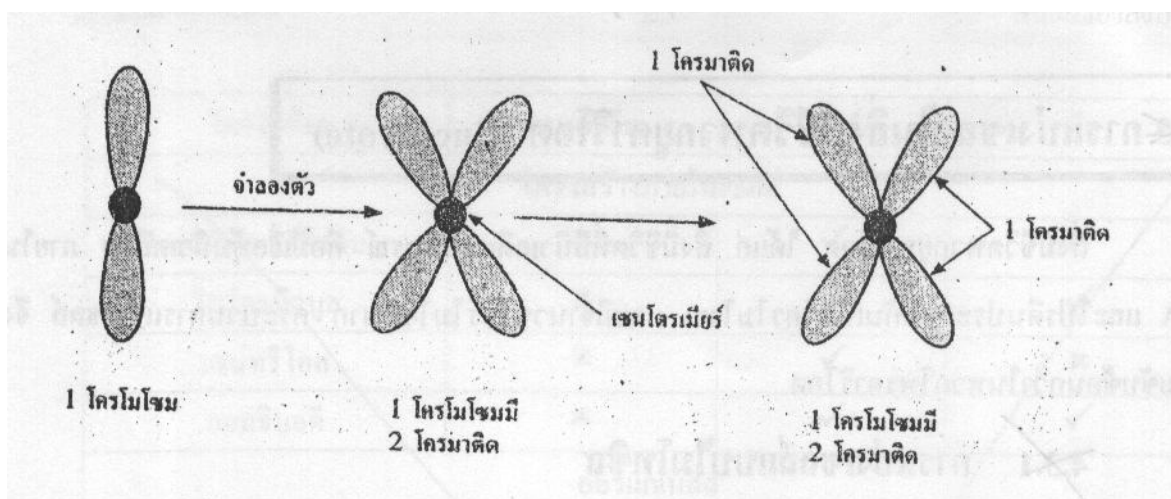
### การแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส

วัฏจักรของเซลล์ (Cell Cycle) คือ ช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงของเซลล์จากระยะที่เซลล์มีการเตรียมตัวให้พร้อมที่จะแบ่งตัวได้ และเข้าสู่ระยะการแบ่งนิวเคลียสจนสิ้นสุดการแบ่งเซลล์ ดังนั้น ในแต่ละวัฏจักรของเซลล์ที่กำลังแบ่งตัวจึงอาจแบ่งเป็น 2 ระยะใหญ่ ๆ คือ

1. ระยะที่เซลล์เตรียมพร้อมที่จะแบ่งตัว เรียก ระยะอินเตอร์เฟส (Interphase) ประกอบด้วยระยะย่อย 3 ระยะ คือ

1.1 ระยะจี ( $G_1$  phase) เป็นระยะพักฟื้นของเซลล์ก่อนที่จะมีการสร้าง DNA เซลล์ในระยะนี้จะเตรียมและสะสมสารต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการสังเคราะห์ DNA เซลล์จะไม่สามารถแบ่งตัวและตายไปในที่สุด ระยะจี 1 ใช้เวลาประมาณ 4–8 ชั่วโมง แต่อาจมีระยะเวลาด้านหรือยาวนานกว่านี้แล้วแต่ชนิดของเซลล์และชนิดของสิ่งมีชีวิต

1.2 ระยะเอส (S phase) เป็นระยะสังเคราะห์ DNA และโปรตีน ปริมาณของ DNA จะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า DNA ที่สังเคราะห์ขึ้นมาใหม่นั้นมีคุณสมบัติเหมือนชุดเดิมทุกประการ ซึ่งเรียกจากการจำลองตัวเองของ DNA ขึ้นมาใหม่อีกชุดหนึ่งว่า DNA replication และเนื่องจาก DNA มีตำแหน่งอยู่ในโครโมโซมจึงอาจกล่าวว่าการจำลองโครโมโซมขึ้นมาใหม่อีกชุดหนึ่ง (chromosome replication) ดังนั้นโครโมโซมแต่ละอันจึงประกอบด้วย 2 เส้น เรียกแต่ละเส้นนี้ว่าโครมาติด (chromatid) โดยโครมาติดยังติดกันตรงตำแหน่งที่เรียกว่า เซนโตรเมียร์ (centromere) ระยะนี้ใช้เวลานานประมาณ 6–10 ชั่วโมง



**1.3 ระยะจี 2 (G<sub>2</sub> phase)** เป็นระยะที่เซลล์เตรียมจะแบ่งตัวมีการสร้างสิ่งจำเป็นในการแบ่งเซลล์ เช่น โปรตีน ระยะนี้ใช้เวลาประมาณ 4 1/2 ชั่วโมง

**2. ระยะแบ่งนิวเคลียสหรือระยะไมโทซิส (M phase)** เป็นระยะที่เซลล์แบ่งโครโมโซมโดยประกอบด้วยระยะต่าง ๆ 4 ระยะ คือ โปรเฟส (prophase) เมตาเฟส (metaphase) แอนาเฟส (Anaphase) และทีโลเฟส (Telophase) หลังจากระยะทีโลเฟสสิ้นสุดลง เซลล์แม่ 1 เซลล์จะแบ่งได้เซลล์ลูก 2 เซลล์ ระยะ M ใช้เวลาประมาณ 1 – 1 1/2 ชั่วโมง ดังนั้น โดยทั่วไปแต่ละวัฏจักรของเซลล์จะใช้เวลาประมาณ 20 ชั่วโมง

### **2.1 ระยะอินเตอร์เฟส (Interphase) มีการเปลี่ยนแปลงดังนี้**

1. โครโมโซมจำลองตัวเองขึ้นมาอีกชุดหนึ่งซึ่งเหมือนกับโครโมโซมเดิม และติดกันอยู่เซนโทรเมียร์ ระยะนี้ 1 โครโมโซมจึงประกอบด้วย 2 โครมาติด
2. เป็นระยะที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีมากที่สุด จึงอาจเรียกว่า ระยะเมแทบอลิก (Metabolic stage)
3. เซนทริโอล (Centriole) แบ่งเป็น 2 อัน
4. เป็นระยะที่ใช้เวลานานที่สุด ดังนั้นถ้าศึกษาการแบ่งเซลล์ไมโทซิสด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบเซลล์ปรากฏในระยะอินเตอร์เฟสมากที่สุด
5. เป็นระยะที่โครโมโซมมีความยาวมากที่สุด

### **2.2 ระยะโปรเฟส (Prophase) มีการเปลี่ยนแปลงดังนี้**

1. โครมาติดแต่ละเส้นของโครโมโซมจะหดตัวสั้นเข้า ทำให้มองเห็นเป็นแท่งชัดเจนขึ้นกว่าเดิม นักชีววิทยาบางท่านให้ความเห็นว่า การหดสั้นของโครโมโซมเนื่องจาก โครโมโซมที่เป็นเส้นยาวนั้นขดตัวเป็นแบบลวดสปริง
2. เห็นโครโมโซมชัดเจนขึ้นเนื่องจากแต่ละท่อนมีขนาดใหญ่ และสั้น ทำให้เห็นชัดว่าโครโมโซม 1 ท่อน ประกอบด้วย 2 โครมาติด ติดกันอยู่เซนโทรเมียร์
3. เยื่อหุ้มนิวเคลียสจะค่อย ๆ สลายตัวไป
4. ในเซลล์สัตว์หรือโพรติสต์บางชนิด เช่น สาหร่าย รา เซนทริโอล ในไซโทพลาสซึมที่แบ่งตัวเป็น 2 อันแล้วในตอนปลายระยะอินเตอร์เฟส จะเคลื่อนไป 2 ข้างของนิวเคลียส เซนทริโอลจะสร้างเส้นใยโปรตีนเรียก ไมโทติก สปินเดิล (Mitotic Spindle) ไปเกาะที่ไคเนโตคอร์ (Kinetochore) ของแต่ละโครโมโซม ดังนั้น รอบ ๆ เซนทริโอลจึงมีไมโทติก สปินเดิลยื่นออกมาหลาย เรียกว่า แอสเตอร์ (Aster) ในพืชชั้นสูงไม่มีเซนทริโอล แต่ก็มีโครงสร้างไมโทติกสปินเดิล จากโพลาร์แคป (Polar cap) ซึ่งรวมกันที่ขั้วของเซลล์
5. นิวคลีโอไลต์ จะหายไป

### 2.3 ระยะเมตาเฟส (Metaphase) มีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

1. โครโมโซมจะเคลื่อนไปเรียงตัวเป็นแถวตามแนวกึ่งกลางของเซลล์ (equatorial plate)
2. เห็นโครโมโซมชัดเจนที่สุดจึงเป็นระยะที่เหมาะสมต่อการนับจำนวนโครโมโซม

การจัดเรียงโครโมโซมเป็นคู่ ๆ (karyotype) และศึกษาความแตกต่างของลักษณะโครโมโซมได้อย่างชัดเจน  
ระยะนี้โครโมโซมหดสั้นมากที่สุด ซึ่งสะดวกต่อการเคลื่อนที่ไปยัง 2 ข้างของเซลล์

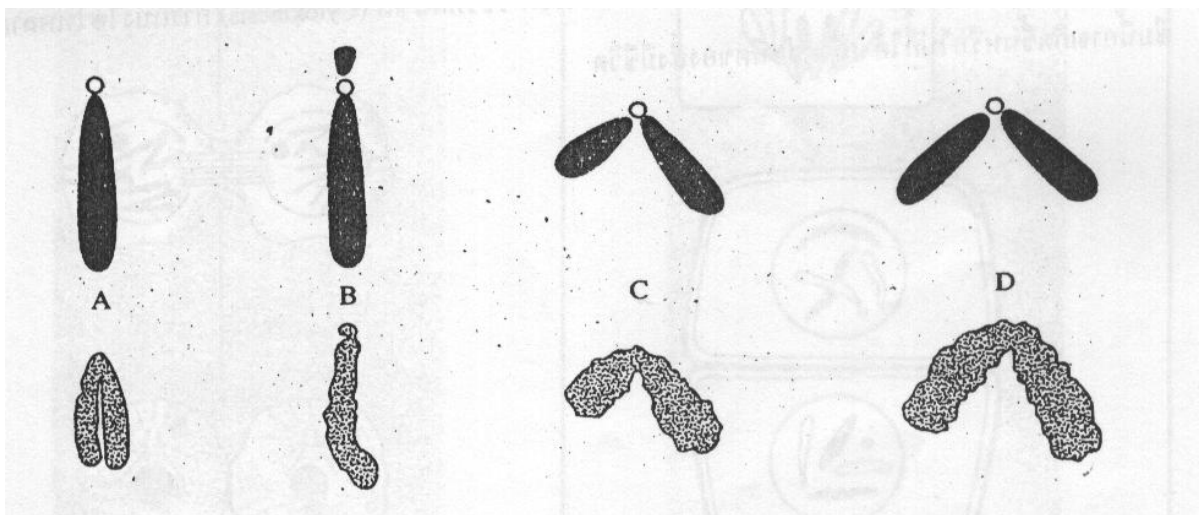
3. เซนโตรเมียร์ของแต่ละโครโมโซมจะแบ่งครึ่ง ทำให้โครมาติดเริ่มจะแยกกันในตอนท้าย ๆ ของระยะนี้

### 2.4 ระยะแอนาเฟส (Anaphase) มีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

1. ระยะนี้เซนโตรเมียร์มีกิจกรรมมากที่สุด เพราะเป็นตัวช่วยให้โครโมโซมเคลื่อนที่ได้โดยเซนโตรเมียร์ จะเคลื่อนตัวก่อนจุดอื่น ๆ ของโครโมโซม

2. โครมาติดของแต่ละโครโมโซมถูกดึงแยกออกจากกันโดยเส้นใยไมโทติก สปินเดิล เซนทริโอล และเซนโตรเมียร์ ทำให้เกิดรูปร่างของโครโมโซมแบบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับว่าเซนโตรเมียร์จะอยู่ตำแหน่งใดของโครโมโซม เช่น ถ้าเซนโตรเมียร์อยู่ตรงกลาง โครโมโซมจะเป็นรูปตัววี (V) ถ้าอยู่ก่อนไปทางปลายก็จะเป็นรูปตัวเจ (J) ถ้าอยู่ปลายสุดก็จะเป็นรูปตัวไอ (i) เรียกว่า โครโมโซมลูก (daughter chromosome) ดังนั้น ในระยะนี้ภายในเซลล์จึงมีโครโมโซมเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่าตัว หรือเท่ากับ  $4n$  (Tetraploid) (ถ้าเซลล์เริ่มต้นแบ่งมีโครโมโซม  $2n$ )

3. เป็นระยะที่ใช้เวลานานที่สุด เมื่อเทียบกับระยะอื่น ๆ

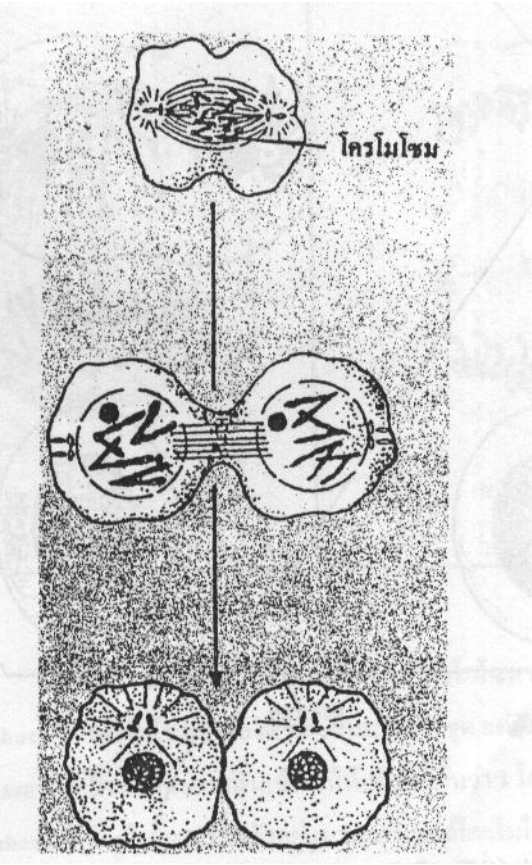
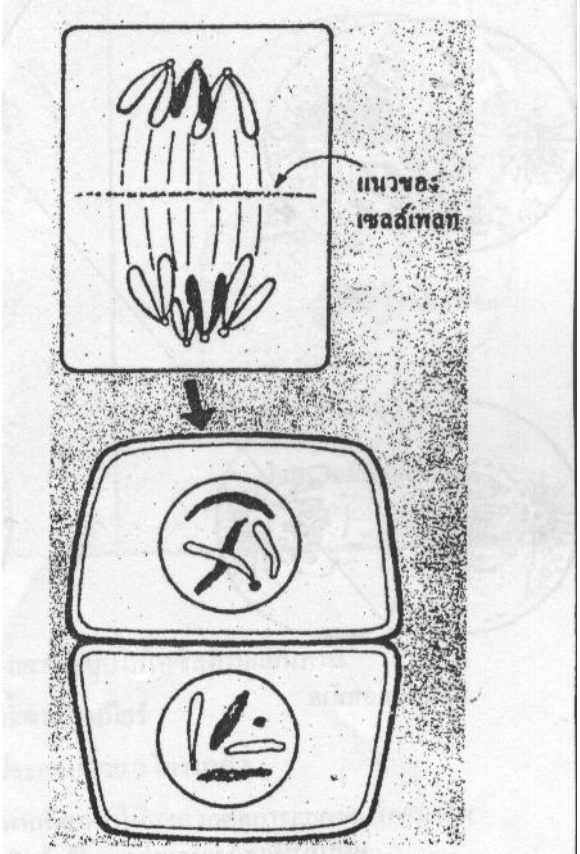


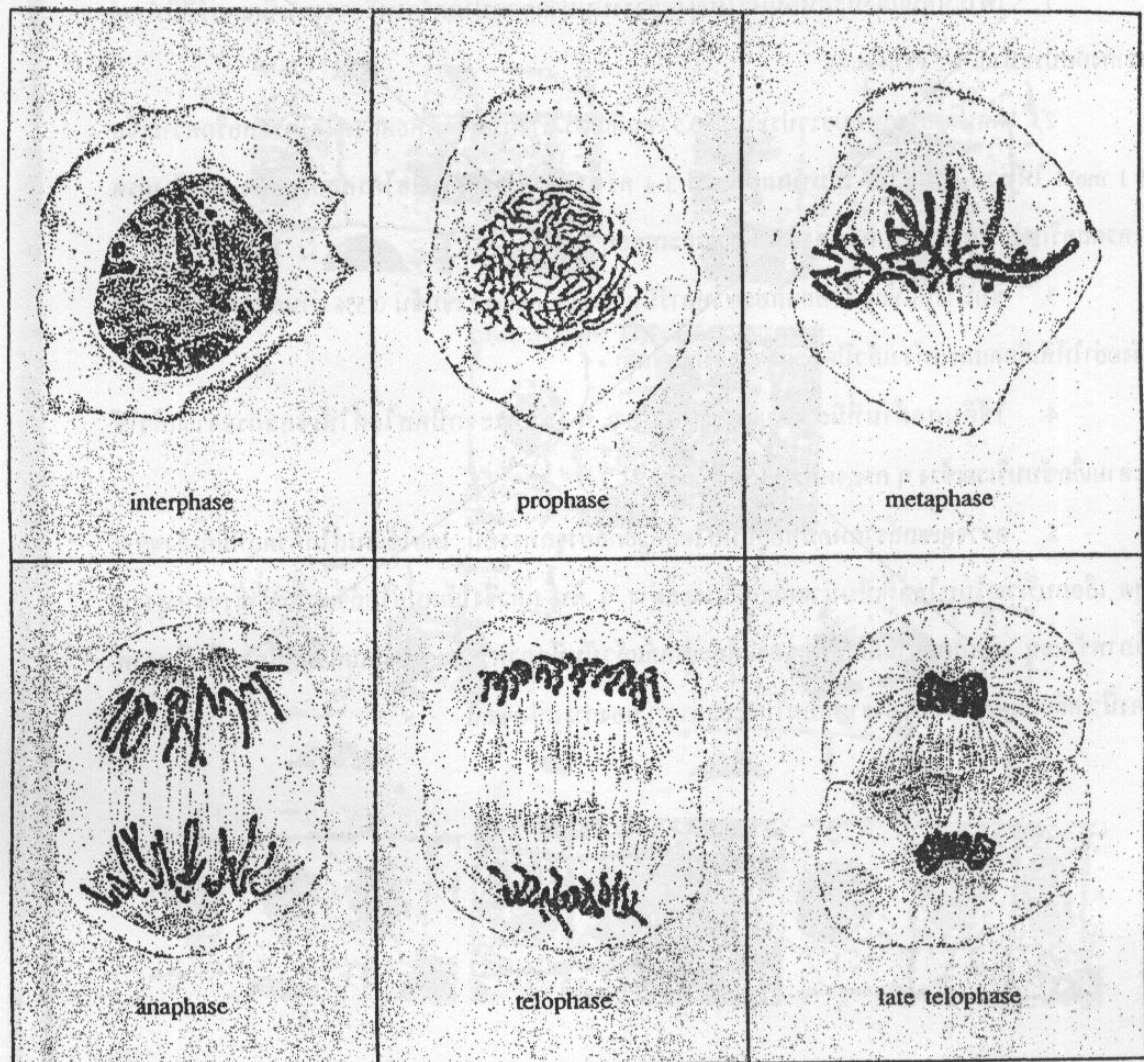
ภาพแสดงรูปร่างของโครโมโซมแบบต่าง ๆ จากภาพ A, B มีรูปร่างแบบตัวไอ C มีรูปร่างแบบตัวเจ และ D มีรูปร่างแอลตัววีแถบบนเป็นภาพวาด แถวล่างเป็นภาพของจริง

## 2.5 ระยะทีโลเฟส (Telophase) มีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

1. โครโมโซมลูกที่เกิดขึ้นในระยะแอนาเฟส จะแยกห่างจากกันมากยิ่งขึ้น จนกระทั่งไปอยู่ขั้วตรงข้ามของเซลล์
2. ขั้วของเซลล์แต่ละข้างจะประกอบด้วยโครโมโซมที่มีจำนวนเท่ากัน และเท่ากับเซลล์เริ่มต้นก่อนการแบ่ง
3. ในตอนปลายระยะนี้ สายไมโทติก สปินเดิล จะสลายตัวไป
4. กลุ่มของโครโมโซมลูก จะเริ่มขยายตัวออกเป็นเส้นใยยาวคไปมาคล้ายตาข่าย ทำให้เห็นมีลักษณะเป็นเส้นบางยาวพันกันอยู่ และโครโมโซมระยะนี้มีลักษณะเหมือนโครโมโซมในระยะเริ่มแรกของอินเตอร์เฟส
5. เยื่อหุ้มนิวเคลียส และนิวคลีโอลัสจะเริ่มปรากฏให้เห็นแต่ละกลุ่มของโครโมโซมที่รวมกันอยู่ที่ขั้วของเซลล์จะอยู่ในสภาพเป็นนิวเคลียสใหม่ และมีลักษณะเหมือนกับนิวเคลียสของเซลล์ในระยะอินเตอร์เฟส
6. มีการแบ่งตัวของไซโทพลาสซึม เรียก ไซโทคินซิส (Cytokinesis) การแบ่งไซโทพลาสซึมนี้อาจเกิดขึ้นหรือไม่ก็ได้ แล้วแต่วิธีของสิ่งมีชีวิต

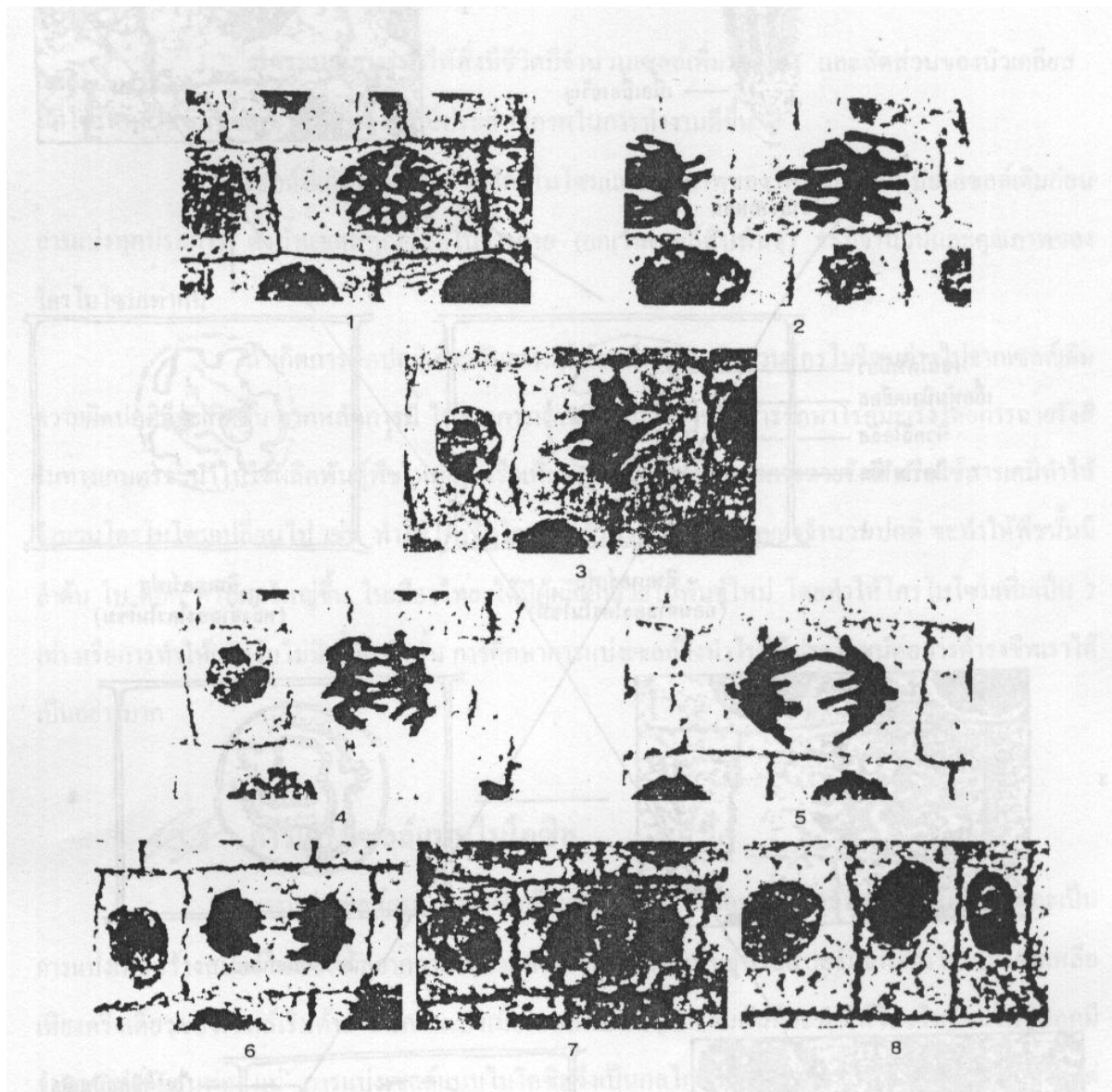
ข้อแตกต่างระหว่างการแบ่งไซโทพลาสซึมในเซลล์สัตว์ และเซลล์พืช

| เซลล์สัตว์                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | เซลล์พืช                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>เยื่อหุ้มเซลล์จะคอดเข้าไปในบริเวณกลางเซลล์ แยกไซโทพลาสซึมออกเป็นสองส่วน จนเกิดเป็น 2 เซลล์บริบูรณ์ ดังแผนภาพข้างล่าง การที่เยื่อหุ้มเซลล์คอดกัจาก 2 ข้างเข้าใจกลางเซลล์ได้นั้น เกิดจากกิจกรรมของไฮโปรตีนแอกทิน (actin) การแบ่งไซโทพลาสซึมของเซลล์สัตว์แบบนี้เรียก Furrow type</p>  <p>แผนภาพแสดงการแบ่งไซโทพลาสซึมของเซลล์สัตว์ (furrow type)</p> | <p>เซลล์พืชไม่คอดตรงกลางเข้าหากันเหมือนเซลล์สัตว์ แต่จะเกิดแผ่นกั้นเซลล์หรือเซลล์เพลท (Cell plate) ขึ้นตรงแนวกลางเซลล์ แล้วขยายออกไปจนชนกับผนังเซลล์เดิมทำให้ไซโทพลาสซึมแยกออกเป็น 2 ส่วน และจะเกิดเป็น 2 เซลล์เกิดเป็น 2 เซลล์ใหม่ในที่สุด การแบ่งไซโทพลาสซึมของเซลล์พืชนี้เกิดจาก กอลจิบอดีสร้างเซลล์โลสมาก่อตัวเป็นเซลล์เพลทจาก กึ่งกลางเซลล์ขยายไป 2 ข้างของเซลล์กลายเป็นผนังเซลล์ในที่สุด การแบ่งไซโทพลาสซึมแบบที่ว่า cell plate type</p>  <p>แผนภาพแสดงการแบ่งไซโทพลาสซึมของเซลล์พืช (cell plate type)</p> |



**ลำดับการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมของการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิสตามแผนภาพ**

- Interphase** : โครโมโซมจำลองตัวเองขึ้นมาอีก 1 ชุด แต่ยังติดกันอยู่ที่เซนโทรเมียร์
- Prophase** : โครโมโซมหดสั้นเข้า ทำให้เห็นชัดขึ้นว่า 1 โครโมโซมประกอบด้วย 2 โครมาติด
- Metaphase** : โครโมโซมเรียงตัวอยู่แนวกลางเซลล์โครโมโซมหดสั้นมากที่สุดทำให้สะดวกต่อการแยกของโครมาติด
- Anaphase** : โครมาติดถูกแยกไปสองข้างของเซลล์ทำให้โครโมโซมเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าตัว เช่น จาก  $2n \rightarrow 4n$
- Telophase** : โครโมโซมถูกไปรวมอยู่แต่ละข้างของเซลล์แบ่งไซโทพลาสมจนกลายเป็น 2 เซลล์ใหม่สมบูรณ์



ภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมในนิวเคลียสระยะต่าง ๆ ของการแบ่งเซลล์  
แบบไมโทซิสในเซลล์รากหอม

1-2 ระยะโพรเฟส    3 ระยะเมทาเฟส    4-5 ระยะแอนาเฟส    6-8 ระยะเทโลเฟส

## ความสำคัญของการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส

1. เป็นกระบวนการทำให้สิ่งมีชีวิตมีจำนวนเซลล์เพิ่มมากขึ้น และสัดส่วนของนิวเคลียสกับไซโทพลาสซึมพอเหมาะ ทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพในการทำงานดีขึ้น
2. เซลล์ที่เกิดใหม่มีจำนวนโครโมโซมและคุณภาพของโครโมโซมเหมือนเซลล์เดิมก่อนการแบ่งทุกประการ ดังนั้นเซลล์ทุกเซลล์ในร่างกาย (ยกเว้นเซลล์สืบพันธุ์) จะมีจำนวนและคุณภาพของโครโมโซมเท่ากัน
3. ถ้าเกิดการผิดปกติเกี่ยวกับการแบ่งเซลล์ เช่น จำนวนโครโมโซมต่างไปจากเซลล์เดิม ความผิดปกติก็จะเกิดขึ้น จากหลักการนี้ ในทางการแพทย์ จะนำไปใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง โดยการฉายรังสีในทางเกษตรจะนำไปใช้ผลิตพันธุ์พืชใหม่ ๆ หรือเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้นโดยการฉายรังสี หรือใช้สารเคมีทำให้จำนวนโครโมโซมเปลี่ยนไป เช่น ทำให้โครโมโซมเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่าของจำนวนปกติ จะทำให้พืชนั้นมีลำต้น ใบ ดอก หรือผลใหญ่ขึ้น ในเมืองไทย ได้มีผู้ผลิตกล้วยไม้พันธุ์ใหม่ โดยทำให้โครโมโซมเพิ่มเป็น 2 หรือการทำให้แตงโมไม่มีเมล็ด ดังนั้น การศึกษาการแบ่งเซลล์จึงนำไปใช้ประโยชน์ต่อการดำรงชีพเราได้เป็นอย่างมาก

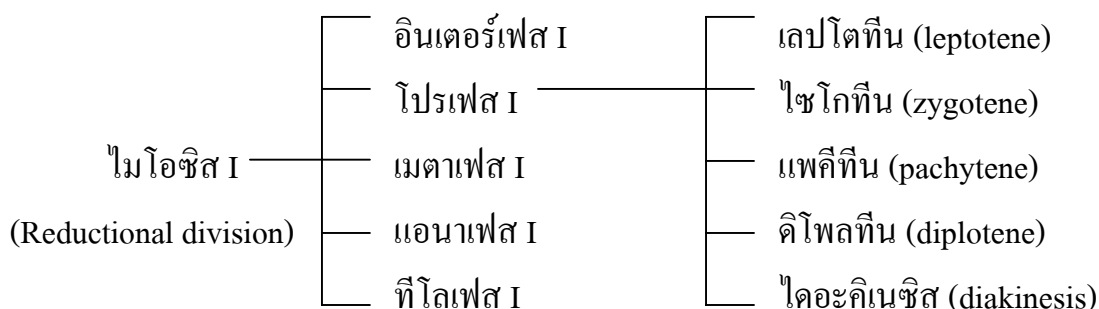
## การแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส

การแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสเป็นการแบ่งเซลล์เพื่อสร้างเซลล์สืบพันธุ์ในสัตว์ และเป็นการแบ่งเพื่อสร้างสปอร์ในพืช ผลจากการแบ่งจะทำให้ได้เซลล์สืบพันธุ์หรือสปอร์มีจำนวนโครโมโซมเหลือเพียงครึ่งเดียวของเซลล์เริ่มต้นก่อนการแบ่งเมื่อเซลล์สืบพันธุ์มารวมกันก็จะทำให้โครโมโซมในรุ่นลูกมีจำนวนเท่ากับรุ่นพ่อแม่ การแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสจึงเป็นกลไกสำคัญยิ่งประการหนึ่งที่ทำให้สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นมีจำนวนโครโมโซมคงที่ทุก ๆ รุ่น

## ขั้นตอนการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส

การเปลี่ยนแปลงในขบวนการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส แบ่งเป็น 2 ระยะ คือ

1. ไมโอซิส I (Meiosis I) หรือ **Reductional division** การแบ่งในขั้นนี้โครโมโซมที่เป็นคู่กัน (homologous chromosome) จะมาจับคู่กันและแยกจากกันไปสู่คนละขั้วของเซลล์ ดังนั้น เมื่อสิ้นสุดการแบ่งจึงได้เซลล์เกิดขึ้น 2 เซลล์ และมีจำนวนโครโมโซมเป็นแฮพลอยด์ (n)



1.1 **ระยะอินเทอร์เฟส I** เป็นระยะที่โครโมโซมจำลองตัวเองขึ้นมาอีกชุดหนึ่ง และยังคงกันอยู่ที่เซนโตรเมียร์ ในระยะนี้โครโมโซมแต่ละท่อนที่อยู่ในเซลล์จึงประกอบด้วย 2 โครมาติด

1.2 **ระยะโปรเฟส I** แบ่งเป็น 5 ระยะย่อย คือ

1.2.1 **เลปโตทีน** เป็นระยะที่โครโมโซมมีลักษณะเป็นเส้นยาว ๆ สานพันกันอยู่ภายในนิวเคลียส เรียกว่า โครโมนีมา (chromonema) บางส่วนพันกันถี่มาก เวลาข้อมสียจะติดสีเข้ม และดูคล้ายลูกบิดเรียกลักษณะคล้ายลูกบิดนี้ว่า โครโมเมียร์ (chromomere)

1.2.2 **ไซโกทีน** มีเหตุการณ์สำคัญดังนี้

1. โฮโมโลกัส โครโมโซม จะมาจับคู่กันโดยแนบชิดกันตามความยาวของโครโมโซมการจับคู่กันของโฮโมโลกัส โครโมโซมเรียกว่า ไซแนปซิส (synapsis)

2. คู่ของโฮโมโลกัส โครโมโซม ที่มาเกาะแนบชิดกันแล้ว เรียกไบวาเลนต์ (bivalents) ดังนั้น ในคนมีโครโมโซม 46 ท่อน จึงมี 23 ไบวาเลนต์

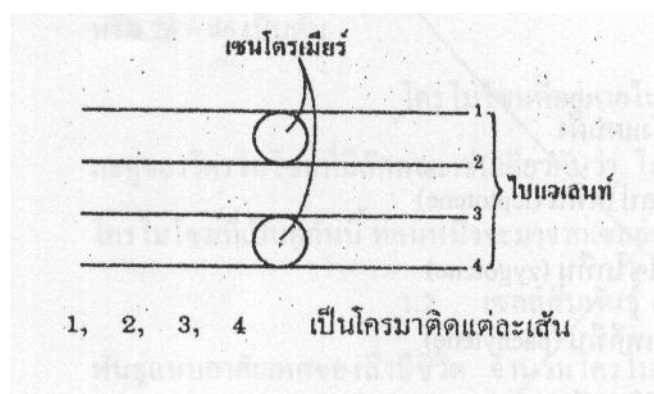
3. ในเซลล์ของสัตว์ เซนทริโอลจะแบ่งตัวจากหนึ่งเป็นสอง

1.2.3 **แพลทีน** มีเหตุการณ์สำคัญดังนี้

1. เห็นโครโมโซมเป็นเส้นหนาชัดเจนขึ้น และจะเห็นได้ว่าไบวาเลนต์ประกอบด้วยโครมาติด 4 เส้น เรียกสภาพเช่นนี้ว่า เตตราด (Tetrad)

2. โครมาติดที่เป็นส่วนประกอบของโครโมโซมท่อนเดียวกัน เรียกว่าซิสเตอร์ โครมาติด (sister chromatid) ส่วนโครมาติดที่เป็นส่วนประกอบของโครโมโซมต่างท่อนกัน แต่เป็นโฮโมโลกัสกัน เรียก นอนซิสเตอร์ โครมาติด (non-sister chromatid)

3. เห็นนิวคลีโอลัสชัดเจนและเซนทริโอลทั้งสองเริ่มเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้าม



โครมาติด 1 และ 2 เป็นซิสเตอร์ โครมาติด

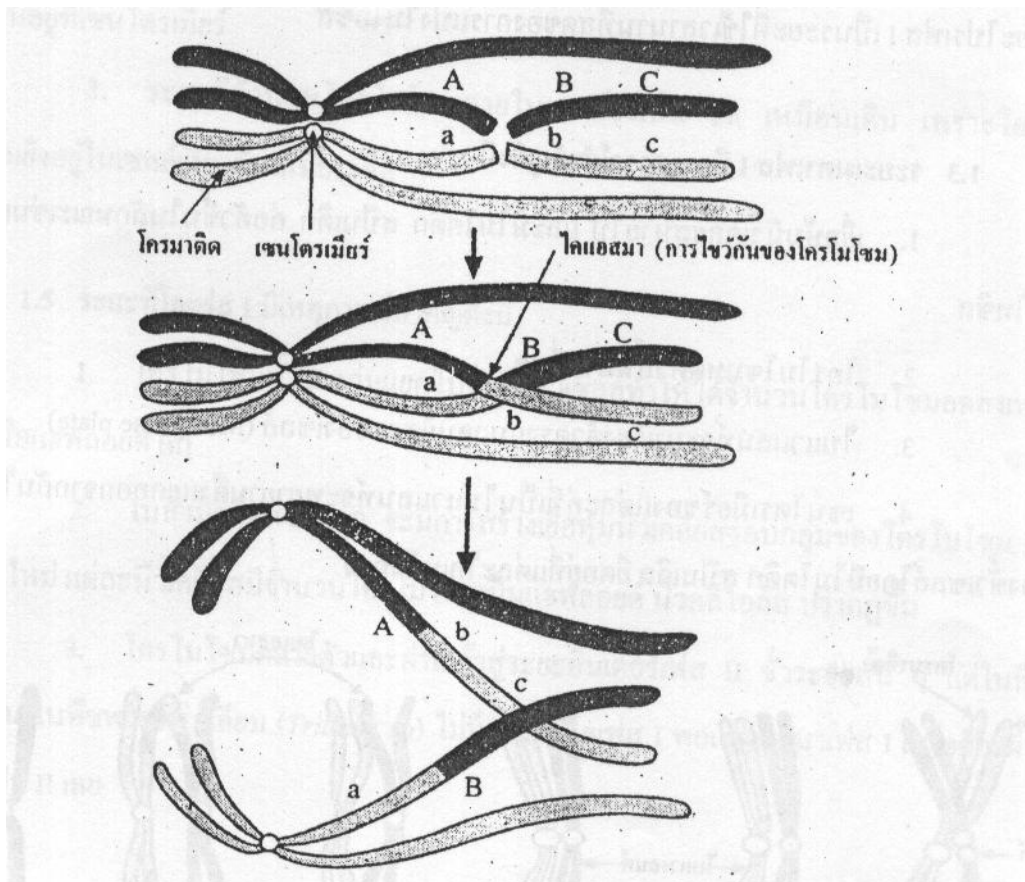
โครมาติด 3 และ 4 เป็นซิสเตอร์ โครมาติด

โครมาติด 1 และ 2 เป็นนอนซิสเตอร์ โครมาติด

โครมาติด 2 และ 3 เป็นนอนซิสเตอร์ โครมาติด

#### 1.2.4 ไดโพลทีน มีเหตุการณ์สำคัญดังนี้

1. โฮโมโลกัส โครโมโซม ที่มาแนบชิดกันจะผลัดตัวออกจากกันตามแกนยาว โดยเฉพาะบริเวณเซนโตรเมียร์จะแยกกันมากกว่าตำแหน่งอื่น การผลัดออกจากกันของโฮโมโลกัส โครโมโซมยังไม่สมบูรณ์มีบางส่วนยังติดกันอยู่ ตำแหน่งที่ติดกันอยู่เรียก ไคแอสมา (chiasma)
2. มีการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนของโครมาติดระหว่างโครโมโซมที่เป็นคู่โฮโมโลกัสกันเรียกว่า เกิดครอสซิง โอเวอร์ (crossing over)
3. ผลจากการเกิดครอสซิงโอเวอร์จะมีการสลับชิ้นส่วนของโครมาติดขึ้นดังรูปทำให้ DNA หรือยีน gene ที่อยู่ในโครโมโซมมีการเรียงตัวใหม่ การเรียงตัวใหม่ของยีนที่เกิดจากการครอสซิงโอเวอร์จะช่วยทำให้เกิดการแปรผันของลักษณะต่าง ๆ (variation) ของสิ่งมีชีวิต
4. จำนวนและตำแหน่งของไคแอสมาขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและสัตว์ และความสั้นยาวของโครโมโซม ถ้าโครโมโซมยาวก็จะมีจำนวนไคแอสมาเกิดขึ้นมากกว่าโครโมโซมที่สั้น และถ้ายีนยังอยู่ห่างกันมาก โอกาสที่จะเกิดครอสซิงโอเวอร์ระหว่างยีนทั้งสองนั้นยิ่งมากขึ้น
5. นิวคลีโอไลต์ ลดขนาดลง



ภาพแสดงการเกิดครอสซิงโอเวอร์ที่เกิดขึ้นกับนอนซิสเตอร์โครมาติดของคู่โฮโมโลกัส ทำให้การเรียงตัวของยีนจาก A B C, a b c กลายเป็น A b c และ a B C

### ข้อควรทราบพิเศษ

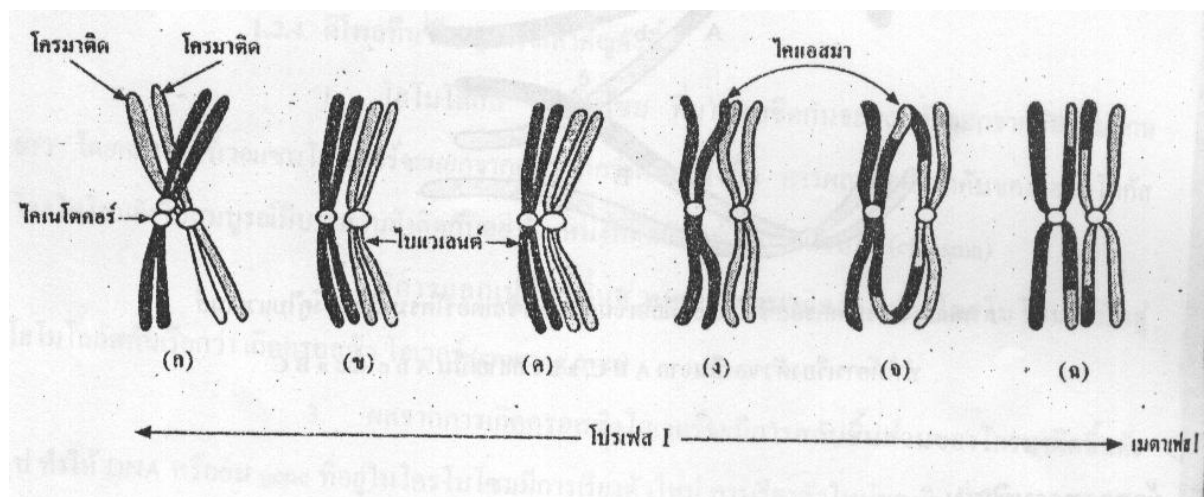
ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนของโครมาติดระหว่างโครโมโซมที่ไม่เป็นคู่โฮโมโลกัสกัน จะเรียกว่า ทรานสโลเคชัน (translocation) ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการจัดกลุ่มใหม่ของยีน (gene recombination) ได้เช่นเดียวกับการเกิดครอสซิงโอเวอร์

#### 1.2.5 ไคอะคิเนซิส มีเหตุการณ์สำคัญดังนี้

1. โครโมโซมจะคล้ายกับในระยะดิโพลทีน แต่จะมีการหดตัวสั้นมากขึ้น
2. ไบแวเลนต์พยายามแยกตัวจากกันมากขึ้น จึงทำให้เห็นไบแวเลนต์ที่มีลักษณะเป็นวงกลม โดยที่โฮโมโลกัส โครโมโซมจะเชื่อมติดกันอยู่เฉพาะตรงส่วนปลายสุด
3. เชื้อหุ้มนิวเคลียสเริ่มสลายทำให้เห็นไบแวเลนต์กระจายทั่วไปในบริเวณกลางเซลล์ระยะโปรเฟส I เป็นระยะที่ใช้เวลานานที่สุดของการแบ่งไมโอซิส

#### 1.3 ระยะเมตาเฟส I มีเหตุการณ์สำคัญดังนี้

1. เชื้อหุ้มนิวเคลียสหายไป และมีไมโทติก สปินเดิล ก่อตัวขึ้นในลักษณะเช่นเดียวกับการแบ่งไมโทซิส
2. โครโมโซมหดตัวสั้นมากที่สุด
3. ไบแวเลนต์จะมาเรียงตัวตรงแนวศูนย์สูตรของเซลล์ (Metaphase plate)
4. เซนโตรเมียร์ของแต่ละคู่ที่เป็นไบแวเลนต์จะพยายามดึงแยกออกจากกันไปทิศทางตรงข้ามของขั้วเซลล์โดยมีไมโทติก สปินเดิล ยึดอยู่ที่แต่ละไคนेटออร์



#### 1.4 ระยะแอนาเฟส มีเหตุการณ์สำคัญดังนี้

1. โฮโมโลกัส โครโมโซมที่มาจับคู่กันเป็นไบแวเลนต์จะเคลื่อนตัวแยกออกจากกันไปสู่คนละขั้วของเซลล์ ระยะนี้จึงเป็นการแยกคู่ของโฮโมโลกัส โครโมโซม
2. แต่ละโครโมโซมที่เคลื่อนไปสู่ขั้วของเซลล์ จะยังคงประอบด้วยโครมาติด 2 อัน และยังคงติดกันอยู่ที่เซนโตรเมียร์

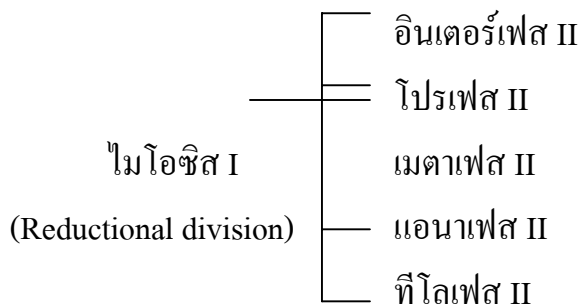
3. ระยะที่จำนวนโครโมโซมภายในเซลล์ยังเป็น  $2n$  เหมือนเดิม เพราะ โยโมโลกัส โครโมโซมยังอยู่ในเซลล์เดียวกันเหมือนเดิม

### 1.5 ระยะทีโลเฟส I มีเหตุการณ์สำคัญดังนี้

1. โครโมโซมทั้ง 2 กลุ่มแยกไปจนถึงขั้วเซลล์ทำให้จำนวนโครโมโซมลดลง เหลือครึ่งเดียวหรือแฮพลอยด์ ( $n$ )
2. ในสิ่งมีชีวิตส่วนมาก จะมีการสร้างเยื่อหุ้มนิวเคลียสรอบกลุ่มของโครโมโซม เกิดเป็น 2 นิวเคลียสใหม่ แต่ละนิวเคลียสมีจำนวนโครโมโซมเป็นแฮพลอยด์ นิวคลีโอลัสปรากฏขึ้น
3. โครโมโซมคลายตัวและผ่านเข้าสู่ระยะอินเทอร์เฟส II ช่วงระยะสั้น ๆ แต่ในสิ่งมีชีวิตบางชนิด เช่น ในพืชพวกทริลเลียน (*Trillium* sp) ไม่มีระยะทีโลเฟส I พอแบ่งแอนาเฟส I เสร็จก็จะผ่านเข้าสู่ระยะเมตาเฟส II เลย

2. ไมโอซิส II (Meiosis II) หรือ Equational division เป็นขั้นตอนที่โครมาติดของแต่ละโครโมโซมในนิวเคลียสที่เป็นแฮพลอยด์แยกออกจากกันไปสู่คนละขั้วของเซลล์ซึ่งมีกระบวนการต่าง ๆ เหมือนกับการแบ่งตัวแบบไมโทซิส เว้นแต่ในขั้นนี้จะไม่มีการจำลองโครโมโซมขึ้นมาใหม่ เมื่อเสร็จสิ้นการแบ่งตัวในขั้นนี้ ทำให้ได้ผลลัพธ์ทั้งสิ้น 4 เซลล์ แต่ละเซลล์มีโครโมโซมเป็นแฮพลอยด์

ขั้นตอนของการแบ่งไมโอซิส II มีดังนี้



### ลำดับการเปลี่ยนแปลงขั้นไมโอซิส II สรุปได้ดังนี้

2.1 อินเทอร์เฟส II เป็นระยะพักสั้น ๆ แต่ไม่มีการจำลอง DNA หรือจำลองโครโมโซมแต่อย่างใด ระยะนี้อาจมีหรือไม่มีก็ได้ขึ้นกับของเซลล์

### 2.2 โปรเฟส II มีเหตุการณ์สำคัญดังนี้

1. เยื่อหุ้มนิวเคลียสหายไป
2. โครโมโซมหดสั้นมากขึ้นทำให้เห็นว่าแต่ละโครโมโซมประกอบด้วย 2 โครมาติดชัดเจน

## ข้อควรทราบพิเศษ

1. โครโมโซมในระยะโปรเฟส II แตกต่างจากระยะโปรเฟสของไมโทซิสตรงที่ว่า แต่ละโครโมโซมของไมโทซิส จะมีคู่ซิสเตอร์โครมาติดเหมือนกันทุกประการ แต่ซิสเตอร์โครมาติดของไมโอซิส ระยะนี้จะไม่เหมือนกันทีเดียว โดยถ้ามีการเกิดครอสซิงโอเวอร์ (ในระยะโปรเฟส I) จะทำให้ชิ้นส่วนของซิสเตอร์โครมาติดสลับกัน

2. ระยะโปรเฟส II ไม่มีไซแนปซิส, ไคแอสมา, ครอสซิงโอเวอร์ใดๆ ทั้งสิ้น

### 2.3 เมตาเฟส II มีเหตุการณ์สำคัญดังนี้

1. โครโมโซมมาเรียงตัวกันอยู่ในแนวกลางเซลล์
2. เซนโตรเมียร์เริ่มแบ่งตัวเพื่อช่วยให้ซิสเตอร์โครมาติดแยกออกจากกันไป

### 2.4 แอนาเฟส II มีเหตุการณ์สำคัญดังนี้

1. เซนโตรเมียร์แยกเป็นสองอัน
2. มีการแยกจากกันของซิสเตอร์โครมาติดของแต่ละโครโมโซม ไปยังขั้ว

ตรงข้ามของเซลล์กลายเป็นโครโมโซมอิสระเหมือนกับการแบ่งแอนาเฟสของไมโทซิส

3. ระยะนี้โครโมโซมเพิ่มจาก  $n \rightarrow 2n$  เพราะมีการแยกโครมาติดไปเป็นโครโมโซมอิสระ

### 2.5 ทีโลเฟส II มีเหตุการณ์สำคัญดังนี้

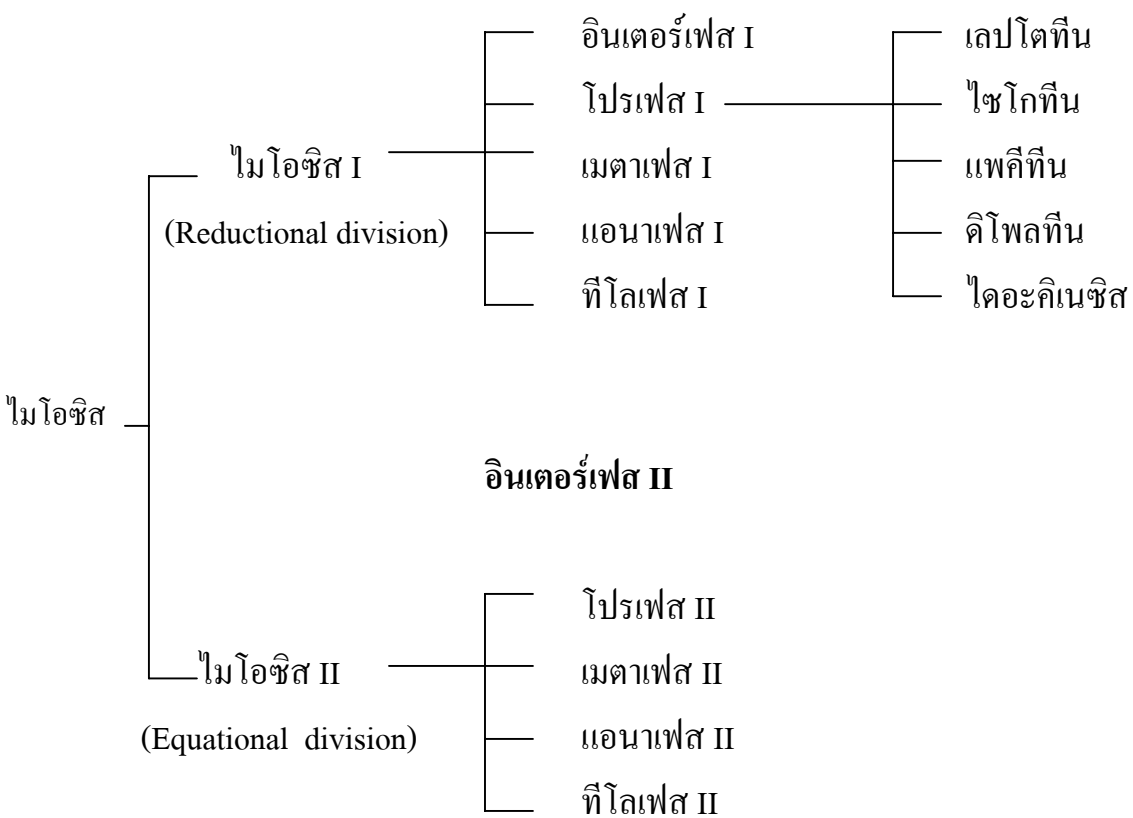
1. โครโมโซมใหม่จะรวมกันที่แต่ละขั้วของเซลล์
2. มีการสร้างเยื่อหุ้มนิวเคลียสทำให้ได้นิวเคลียสใหม่ 4 อัน แต่ละนิวเคลียสมีจำนวนโครโมโซมเป็นแฮพลอยด์

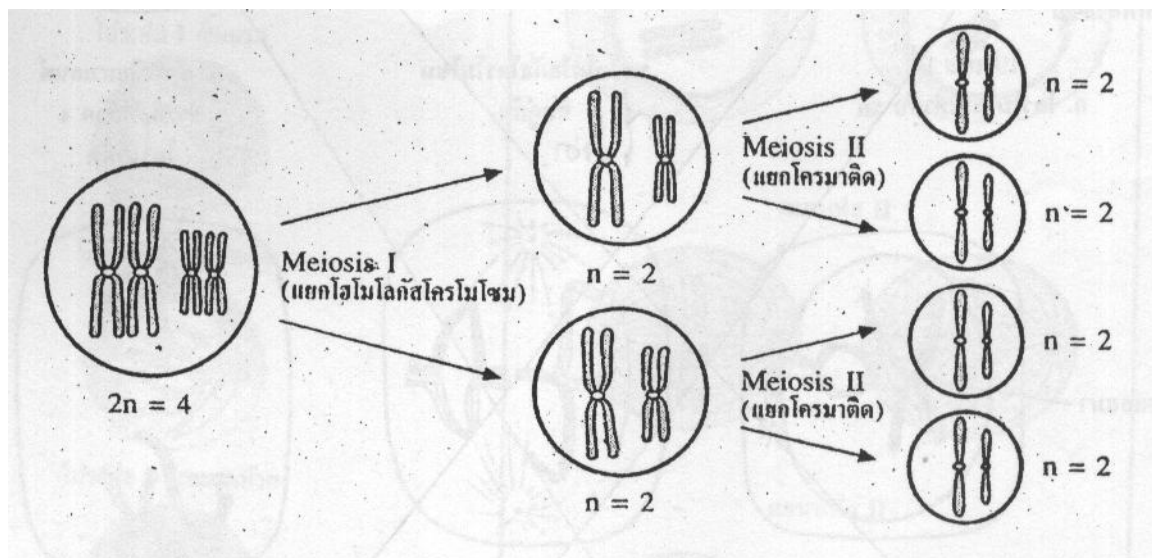
3. มีการแบ่งไซโทพลาสซึมแยกออกเป็นเซลล์ใหม่

การแบ่งไซโทพลาสซึมหลังไมโอซิส อาจแตกต่างกันไปบ้างตามชนิดของสิ่งมีชีวิต เช่น บางชนิดหลังเกิดไมโอซิส I จะแบ่งเป็น 2 เซลล์ และหลังไมโอซิส II ก็แบ่งอีกครั้ง แต่บางชนิดจะแบ่งพร้อมกันเกิดเป็น 4 เซลล์ สมบูรณ์ก็เป็นการสิ้นสุดของกระบวนการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส

4. ในเซลล์ 4 เซลล์ ที่เกิดขึ้นนั้น เซลล์จะมียีนเหมือนกันอย่างละ 2 เซลล์ ถ้าไม่เกิดครอสซิงโอเวอร์ และจะมียีนต่างกันทั้ง 4 เซลล์ ถ้าเกิดครอสซิงโอเวอร์

## สรุปแผนการแสดงระยะการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส

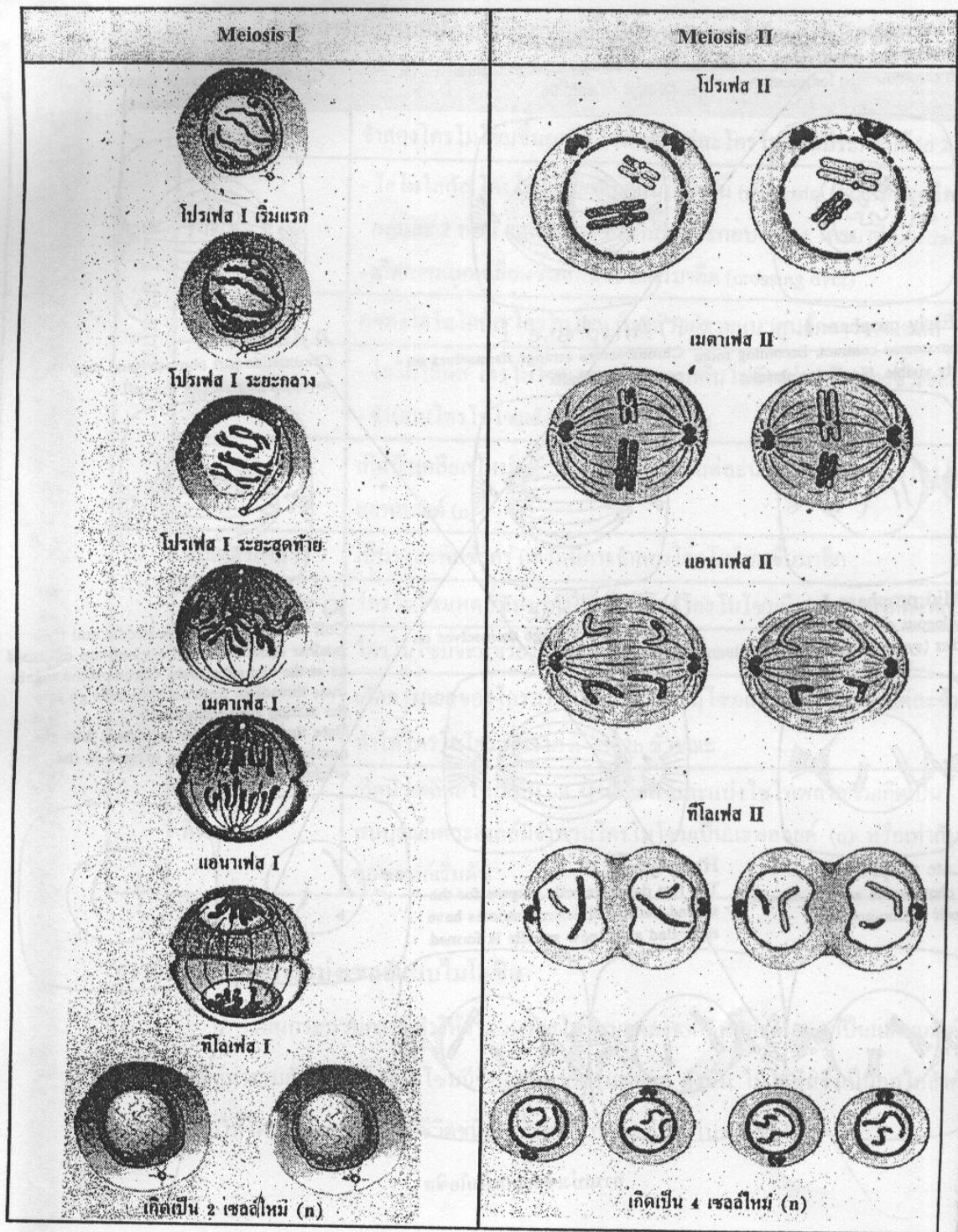




แผนภาพสรุปการแบ่งเซลล์ไมโอซิส เมื่อเริ่มต้นจากเซลล์ที่มีโครโมโซม

$2n = 4$  เมื่อเสร็จสิ้นจะได้เซลล์ ทั้งหมด 4 เซลล์เซลล์ละ  $n$

เปรียบเทียบการแบ่งเซลล์ระหว่างไมโอซิส I และไมโอซิส II



## สรุปการเปลี่ยนแปลงสำคัญที่เกิดขึ้นในการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส

| ระยะ       |                | การเปลี่ยนแปลงสำคัญ                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ไมโอซิส I  | อินเตอร์เฟส I  | จำลองโครโมโซมขึ้นมาอีก 1 เท่าตัว แต่ละโครโมโซมประกอบด้วย 2 โครมาติด                                                                                                                                                                                       |
|            | โพรเฟส I       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- โฮโมโลกัส โครโมโซมมาจับคู่แนบชิดกัน (synapsis) ทำให้มีกลุ่มโครโมโซมกลุ่มละ 2 ท่อน (bivalent) แต่ละกลุ่มประกอบด้วย 4 โครมาติด (tetrad)</li> <li>- เกิดการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนของโครมาติด (crossing over)</li> </ul> |
|            | เมตาเฟส I      | คู่ของโฮโมโลกัส โครโมโซม เรียงตัวอยู่ตามแนวศูนย์กลางของเซลล์                                                                                                                                                                                              |
|            | แอนาเฟส I      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- โฮโมโลกัส โครโมโซม แยกคู่ออกจากกันไปยังแต่ละข้างของขั้วเซลล์</li> <li>- จำนวนโครโมโซมยังเป็น <math>2n</math> เหมือนเดิม</li> </ul>                                                                               |
|            | ทีโลเฟส I      | เกิดนิวเคลียสใหม่ 2 นิวเคลียส และแต่ละนิวเคลียสมีจำนวนโครโมโซมเป็นแฮพลอยด์ ( $n$ )                                                                                                                                                                        |
| ไมโอซิส II | อินเตอร์เฟส II | เป็นระยะพักชั่วคราว แต่ไม่มีการจำลองโครโมโซมขึ้นมาอีก                                                                                                                                                                                                     |
|            | โพรเฟส II      | โครโมโซมหดสั้นมากทำให้เห็นแต่ละโครโมโซมมี 2 โครมาติดชัดเจน                                                                                                                                                                                                |
|            | เมตาเฟส II     | โครโมโซมจะเรียงตัวอยู่บนศูนย์กลางของเซลล์                                                                                                                                                                                                                 |
|            | แอนาเฟส II     | เกิดการแยกของโครมาติดอยู่ในโครโมโซมเดียวกันไปยังขั้วแต่ละข้างของเซลล์ ทำให้โครโมโซมเพิ่มจาก $n \rightarrow 2n$ ชั่วขณะ                                                                                                                                    |
|            | ทีโลเฟส II     | เกิดนิวเคลียสใหม่เป็น 4 นิวเคลียส และแบ่งไซโทพลาสซึมเกิดเป็น 4 เซลล์สมบูรณ์ แต่ละเซลล์มีจำนวนโครโมโซมเป็นแฮพลอยด์ ( $n$ ) หรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของเซลล์เริ่มต้น                                                                                           |

ความสำคัญของการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส

- 1. เป็นกระบวนการที่ทำให้จำนวนโครโมโซมลดลงจากดิพลอยด์ (2n) เป็นแฮพลอยด์ (n) เมื่อเซลล์สืบพันธุ์มารวมกันทำให้โครโมโซมมีจำนวนเท่ากับรุ่นพ่อแม่ ดังนั้น ไมโอซิสจึงเป็นกลไกสำคัญขบวนการหนึ่งที่ทำให้โครโมโซมของสิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่ง ๆ มีจำนวนเท่ากันในทุก ๆ รุ่น
- 2. เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแปรผันของลักษณะสิ่งมีชีวิต เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนส่วนของโครมาติด (crossing over) เป็นเหตุให้ลูกจากพ่อแม่เดียวกันไม่มีโอกาสที่จะเหมือนกันได้เลย (ยกเว้นแฝดแท้)

ข้อเปรียบเทียบการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิสและไมโอซิส

| ไมโทซิส                                                                                                           | ไมโอซิส                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. โดยทั่วไปเป็นการแบ่งเซลล์ของร่างกาย เพื่อเพิ่มจำนวนเซลล์เพื่อการเติบโต หรือการสืบพันธุ์ในสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว | 1. โดยทั่วไปกับเซลล์ที่จะทำหน้าที่ให้กำเนิดเซลล์สืบพันธุ์ จึงเป็นการแบ่งเซลล์เพื่อสร้างเซลล์สืบพันธุ์                                    |
| 2. เริ่มจาก 1 เซลล์ แบ่งครั้งเดียวได้เป็น 2 เซลล์ใหม่                                                             | 2. เริ่มจาก 1 เซลล์ แบ่ง 2 ครั้งได้เป็น 4 เซลล์ใหม่                                                                                      |
| 3. เซลล์ใหม่ที่เกิดขึ้น 2 เซลล์สามารถแบ่งตัวแบบไมโทซิสได้อีก                                                      | 3. เซลล์ใหม่ที่เกิดขึ้น 4 เซลล์ ไม่สามารถแบ่งตัวแบบไมโทซิสได้อีก แต่อาจแบ่งตัวแบบไมโอซิสได้                                              |
| 4. การแบ่งแบบไมโทซิส จะเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่ระยะโปรเฟส และเกิดสืบต่อเนื่องกันไปตลอดชีวิต                           | 4. ส่วนใหญ่จะแบ่งแบบไมโทซิสเมื่อมีอวัยวะสืบพันธุ์เจริญเต็มที่แล้ว หรือเกิดในไซโกตของสหาหร่ายและรบบางชนิด                                 |
| 5. จำนวนโครโมโซมหลังการแบ่งจะเท่าเดิม (2n) เพราะไม่มีการแยกคู่ของโฮโมโลกัสโครโมโซม                                | 5. จำนวนโครโมโซมจะลดครึ่งหนึ่งในระยะไมโอซิส I เนื่องจากการแยกคู่ของโฮโมโลกัส โครโมโซมทำให้เซลล์ใหม่มีจำนวนโครโมโซมครึ่งหนึ่งของเซลล์เดิม |
| 6. ไม่มีไซแนปซิส, ไม่มีไคแอสมมา และไม่มีคอสซิงโอเวอร์                                                             | 6. เกิดไซแนปซิส, ไคแอสมมา และมักเกิดคอสซิงโอเวอร์                                                                                        |
| 7. ลักษณะของสารพันธุกรรม (DNA) และโครโมโซมในเซลล์ใหม่ทั้งสองจะเหมือนกันทุกประการ                                  | 7. ลักษณะของสารพันธุกรรม และโครโมโซมในเซลล์ใหม่อาจเปลี่ยนแปลงและแตกต่างกัน ถ้าเกิดครอสซิงโอเวอร์ระหว่างโครโมโซมที่มียีนต่างกัน           |