

บทที่ 2

เซลล์และการแบ่งเซลล์ Cell and Cellular Division

ในปี ค.ศ. 1665 Robert Hook ได้นำคำว่า "เซลล์" มาใช้กับเนื้อเยื่อของคอร์ก (Cork) เป็นครั้งแรก ซึ่งต่อมาได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย และในระหว่างปี ค.ศ. 1838 - 1839 Schleiden และ Schwann ได้เสนอทฤษฎีของเซลล์ใจความว่า "พืชและสัตว์ทั้งหมดประกอบด้วยโครงสร้างพื้นฐานและหน่วยทางสรีรวิทยา เซลล์มีความสามารถในการสร้างตัวเอง การหายใจ การตอบสนองต่อความเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม การลำเลียงน้ำหรือสารอื่นๆ จากภายในหรือภายนอกเซลล์รวมทั้งกิจกรรมต่างๆ ของสิ่งมีชีวิตก็เป็นผลมาจากกระบวนการต่างๆ ภายในเซลล์"

ความหมายของเซลล์

เซลล์ หมายถึง หน่วยโครงสร้างพื้นฐานเล็กที่สุดของสิ่งมีชีวิตซึ่งสามารถแสดงออกถึงการมีชีวิตอยู่ได้อย่างสมบูรณ์

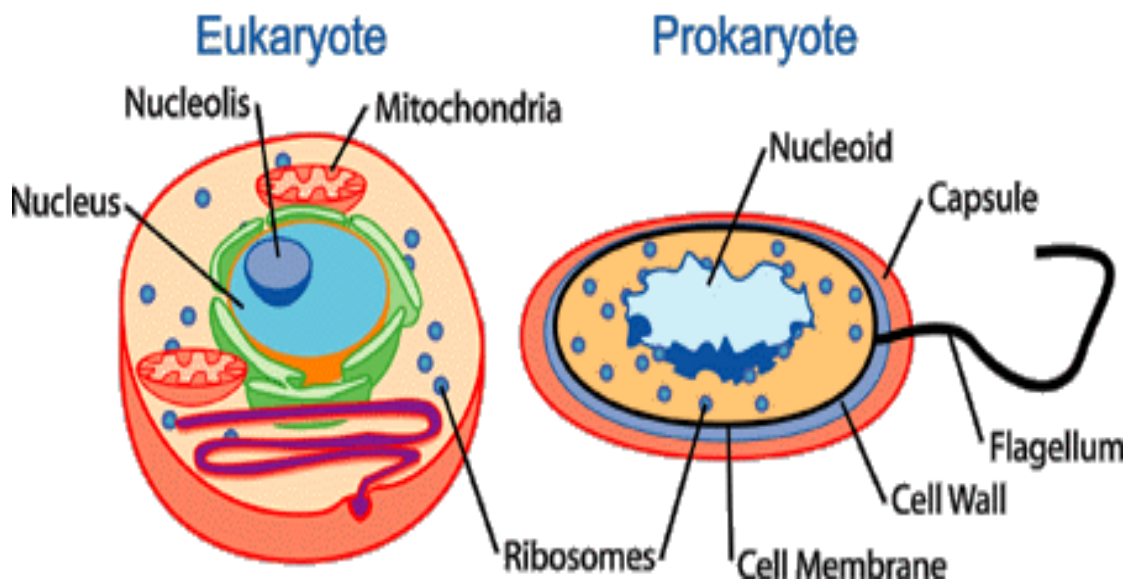
ในสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว เซลล์นี้สามารถทำกิจกรรมต่างๆ และสร้างสารที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตได้ทั้งหมด แตกต่างจากสิ่งมีชีวิตที่มีหลายเซลล์ซึ่งจะมีการจัดเรียงตัวและแบ่งหน้าที่เฉพาะแตกต่างกันไป เช่น เซลล์คุม (guard cell) จะทำหน้าที่ควบคุมการปิด - เปิดของปากใบ เซลล์ที่มีคลอโรฟิลล์ทำหน้าที่สังเคราะห์อาหาร หรือเซลล์บุผิวของรากทำหน้าที่ดูดน้ำและเกลือแร่ เป็นต้น จะพบว่าเซลล์แต่ละเซลล์มีลักษณะพิเศษเฉพาะตัว จึงมีรูปร่าง ขนาด และหน้าที่แตกต่างกันไป

ชนิดของเซลล์

เซลล์ของสิ่งมีชีวิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะโครงสร้าง ได้แก่

1. เซลล์โพรคาริโอติก (Prokaryotic Cell) พบในสิ่งมีชีวิตชั้นต่ำพวกแบคทีเรียและสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียสและออร์แกเนลล์อื่นๆ เซลล์ประกอบด้วยสารพันธุกรรมกระจายตัวอยู่ในไซโทพลาซึม ไม่มีฮิสโตน รงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงไม่อยู่ในพลาสติด

2. เซลล์ยูคาริโอติก (Eukaryotic Cell) พบในพืชส่วนใหญ่ทั่วๆ ไป ส่วนของนิวเคลียสและออร์แกเนลล์อื่นๆ ภายในเซลล์มีเยื่อหุ้ม เซลล์มีรูปร่างหลายแบบ ขนาดต่างๆ กัน



ภาพที่ 2.1 ชนิดของเซลล์แบบโพรคาริโอติกและยูคาริโอติก

(ที่มา : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/d/d4/Celltypes.png>)

โครงสร้างของเซลล์พืช

สามารถจำแนกองค์ประกอบของเซลล์พืชตามความมีชีวิตได้ดังนี้ คือ

1. **โครงสร้างที่มีชีวิต** เป็นโครงสร้างที่สามารถแบ่งตัวเพิ่มจำนวนเซลล์จากหน่วยเดิมที่มีชีวิตอยู่ก่อนได้ เช่น เยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) ร่างแหเอนโดพลาซิม (endoplasmic reticulum) กอลจิบอดี (golgi body) ไมโทคอนเดรีย (mitochondria) ไมโครบอดี (microbody) นิวเคลียส (nucleus) พลาสทิด (plastid) ไมโครทิวบูล (microtubule) และไรโบโซม (ribosome) เป็นต้น

2. **โครงสร้างที่ไม่มีชีวิต** เป็นผลผลิตจากโครงสร้างที่มีชีวิต เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีภายในเซลล์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือมีจำนวนเพิ่มขึ้น เช่น ผนังเซลล์ (cell wall) แวกิวโอล (vacuole) หยดน้ำมัน ไขมัน เม็ดแป้ง และผลึกของสารชนิดต่างๆ เป็นต้น

โดยทั่วไปเซลล์พืชจะมีความผันแปรได้ทั้งขนาด รูปร่าง และโครงสร้าง ซึ่งมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับเซลล์แต่ละแบบ เซลล์พืชสามารถแบ่งตามตำแหน่งของโครงสร้างออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่อยู่นอกสุดคือ ผนังเซลล์ (Cell Wall) และส่วนที่อยู่ภายในของเซลล์ คือ โปรโทพลาสต์ (Protoplast)

ผนังเซลล์ (cell wall)

ผนังเซลล์เป็นส่วนประกอบของเซลล์พืชที่ไม่มีชีวิต ทำหน้าที่เป็นเกราะห่อหุ้มเซลล์ ทำให้เซลล์พืชมีรูปร่างคงที่ รวมทั้งช่วยปกป้องเซลล์ให้รอดพ้นอันตรายจากสิ่งแปลกปลอมภายนอก ณ ตำแหน่งต่างๆ บนผนังหุ้มเซลล์จะมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ การย้าย และไฮโดรไลซิสของโมเลกุลใหญ่ๆ บริเวณผนังหุ้มเซลล์ รวมทั้งการลำเลียงสารเมทาบอลิต์เข้าสู่เซลล์ การตรวจสอบเอนไซม์ในผนังหุ้มเซลล์ พบว่ามี

เอนไซม์หลายชนิด เช่น เอนไซม์แอซิดฟอสฟาเทส (acid phosphatase) และเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (peroxidase) เป็นต้น

ผนังหุ้มเซลล์จะเกิดในระหว่างการแบ่งเซลล์ เมื่อการแบ่งนิวเคลียสใกล้เสร็จสมบูรณ์ในระยะทีโลเฟส (telophase) ตรงกลางเซลล์จะมีแผ่นกั้นเซลล์ (cell plate) เกิดขึ้น ต่อมาแผ่นกั้นเซลล์จะขยายออกไปสองข้างจนชนขอบเซลล์เรียกว่า มิดเดิลลามลลา (middle lamella) ซึ่งประกอบด้วยเพกทิน (pectin) ทำหน้าที่เป็นกาวยึดระหว่างเซลล์ เมื่อเซลล์มีการเติบโตแต่ละเซลล์ขยายขนาดขึ้น เซลลูโลสและเพกทินจะรวมตัวเป็นผนังบางๆ สะสมอยู่ที่ทั้งสองข้างของมิดเดิลลามลลา ผนังหุ้มของเซลล์ใหม่เรียกว่าผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall) ลักษณะบางและยืดหยุ่น สามารถขยายได้จนไปเชื่อมกับผนังด้านข้างของเซลล์ ทราบว่าที่ผนังหุ้มเซลล์ยังคงรักษาความสามารถในการเพิ่มปริมาตรและความหนาได้ เช่น ผนังของแคมเบียม พาเรนไคมา และคอลเลนไคมา เมื่อเซลล์หยุดขยายตัวจะมีการสร้างเซลลูโลสและลิกนินมาเกาะด้านในของผนังเซลล์ปฐมภูมิอาจจะบางหรือหนาก็ได้เกิดเป็นผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell wall) ซึ่งผนังเซลล์จะมีความแข็งแรงแตกต่างกันไป ทุกเซลล์จะมีมิดเดิลลามลลาและผนังเซลล์ปฐมภูมิ แต่สำหรับผนังเซลล์ทุติยภูมิจะพบได้เฉพาะเซลล์บางชนิดเท่านั้น เช่น ไฟเบอร์ (fiber) เซลล์เวสเซล (vessel element) เทรคีต (tracheid) และ เซลล์สโตน (stone cell) เป็นต้น

โครงสร้างพื้นฐานของผนังเซลล์ปฐมภูมิคือ เซลลูโลสเป็นสารประกอบที่เห็นได้ชัดเจนอยู่ตามผนังเซลล์ของพืชชั้นสูง โมเลกุลของเซลลูโลสเป็นสายยาวของโมเลกุลบีตา ดี กลูโคส (β -D-glucose) ผนังเซลล์ปฐมภูมิจึงมีคุณสมบัติในการขยายขนาดและมีความยืดหยุ่นสูงเนื่องจากมีปริมาณของเซลลูโลสมาก รวมทั้งมีสารเพคตินที่จับกับน้ำได้อยู่ในสภาพของเจลในช่องว่างของอินเทอร์ไมเซลล์ลาร์ (intermicellar) และ อินเทอร์ไฟบริลลาร์ (interfibrillar) สำหรับผนังเซลล์ทุติยภูมิจะมีลักษณะแข็งกระด้างเพราะประกอบด้วยผลึกของเซลลูโลสปริมาณมาก นอกจากนี้ในผนังเซลล์ยังสามารถพบสารประกอบชนิดอื่นๆ ด้วย ดังนี้

1. ลิกนิน (lignin) เป็นส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญในผนังหนาๆ ของเซลล์พืชโดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนประกอบที่เป็นเนื้อเยื่อไม้ สามารถแยกเซลลูโลสและลิกนินออกจากกันได้ทางเคมีด้วยกรดกำมะถันความเข้มข้น 72 เปอร์เซ็นต์ เซลลูโลสจะเปลี่ยนเป็นสารที่ละลายน้ำ ส่วนลิกนินยังคงสภาพไม่ละลายน้ำ ผนังเซลล์ที่มีลิกนินไปเกาะโดยมากจะยอมให้น้ำและสารละลายต่างๆ ซึมผ่านได้ดีกว่าผนังเซลล์ที่มีเซลลูโลส

2. คิวติน (cutin) เป็นสารพวกไขมัน โดยมากจะพบที่บริเวณเยื่อหุ้มผิวของใบ ลำต้น ผล และอวัยวะอื่นๆ เมื่อคิวตินรวมอยู่กับเซลลูโลสและเพคตินจะเป็นผนังเซลล์ที่มีโครงสร้างแข็งชอนและไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ซึ่งจะช่วยลดการระเหยของน้ำในเซลล์

3. ซูเบอร์อิน (suberin) มีคุณสมบัติหลายอย่างคล้ายคิวติน พบในผนังเซลล์ของคอร์ก ผนังเซลล์ที่มีซูเบอร์อินจะไม่มีการซึมผ่านของน้ำและแก๊สต่างๆ ส่วนใหญ่พบบริเวณผิวของอวัยวะต่างๆ ของพืชยืนต้น ยกเว้นส่วนของใบ ต้นอ่อน และรากอ่อน เป็นต้น

4. แคลโลส (callose) เมื่อย้อมด้วยสีสะท้อนแสงจะเห็นแคลโลสเป็นสีเหลืองเรืองแสง พบได้ในส่วนของแผ่นตะแกรง (sieve plate) ซึ่งคล้ายกับแคลโลสที่อยู่ในละอองเรณูและหลอดละอองเรณู พบตามผนังชั้นนอกของพืชน้ำหลายชนิด ในเยื่อหุ้มเมล็ด นอกจากนี้ยังพบได้ในขนพวก granular hairs อีกด้วย

ส่วนที่เป็นช่องว่างระหว่างเยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ เรียกว่าพลาสโมเดสมาดา (plasmodesmata) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 - 80 นาโนเมตร พบเรียงรายอยู่ตามผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ นอกจากนี้อาจพบช่องเรียงอยู่ตรงกลางในบางเซลล์ ยังไม่ทราบหน้าที่แน่ชัดแต่เชื่อว่าเป็นช่องทางที่สำคัญในการเคลื่อนย้ายสารและเพื่อการติดต่อระหว่างเซลล์ด้วย

โพรโทพลาสต์ (protoplast)

โพรโทพลาสต์ของแต่ละเซลล์จะรวมถึงเยื่อหุ้มเซลล์และส่วนต่างๆ ที่อยู่ในเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งแต่ละส่วนจะมีหน้าที่เฉพาะ โดยมีโพรโทพลาสซึมเป็นสารที่มีชีวิตอยู่ในโพรโทพลาสต์ต่อมาเปลี่ยนเป็นไซโทพลาสซึม โครงสร้างที่อยู่ภายในเรียกว่าออร์แกเนลล์ (organelle) นอกจากนี้ยังพบสารที่ไม่มีชีวิตอยู่ในไซโทพลาสซึมเรียกว่าสารเออร์แกสติก (ergastic substances) เช่น เม็ดแป้ง ผลึกของเกลือ และโปรตีน เป็นต้น

โพรโทพลาสซึม (protoplasm) มักไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันเนื่องจากมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเสมอ โดยจะมีส่วนที่เรียกไฮยาโลพลาสซึม (hyaloplasm) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของไซโทพลาสซึมที่มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนและมีความสม่ำเสมอเมื่อมองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะพบว่าประกอบด้วยเมมเบรน 2 ระบบ ได้แก่ ร่างแหเอนโดพลาสซึม (endoplasmic reticulum ; ER) และดิกทิโอโซม (dictyosomes) ไฮยาโลพลาสซึมมีส่วนเกี่ยวข้องกับการคัดเลือกสารบางอย่างเข้าสู่เซลล์ การหดตัว การซึมผ่าน การเคลื่อนที่ การขนส่ง รวมทั้งปฏิกิริยาที่มีต่อสิ่งแปลกปลอมต่างๆ

เมื่อเซลล์มีการเปลี่ยนสภาพ โพรโทพลาสซึมจะมีขอบเขตเป็นรูปร่างกลม และศูนย์กลางของโพรโทพลาสซึมจะเต็มไปด้วยของเหลวซึ่งประกอบด้วยเกลือต่างๆ น้ำตาล และสารอื่นๆ ส่วนบริเวณที่เป็นของเหลวคือ แวกิวโอล ซึ่งมีเยื่อหุ้มที่เรียกว่าโทโนพลาสต์ (tonoplast) หรือ แวกิวโอลาร์ เมมเบรน (vacuolar membrane) และสำหรับเยื่อหุ้มโพรโทพลาสต์ เรียกว่า เอ็กโทพลาสต์ (ectoplast) โพรโทพลาสซึมประกอบด้วยส่วนที่เป็นนิวเคลียสและไซโทพลาสซึม นิวเคลียสจะล้อมรอบด้วยเยื่อหุ้มนิวเคลียส (nuclear envelope; nuclear membrane) จะพบนิวคลีโอลัส (nucleolus) และส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่า น้ำเลี้ยงนิวเคลียส (karyolymph) อยู่รอบโครโมโซม ภายในไซโทพลาสซึมจะพบพลาสทิด (plastid) ไมโทคอนเดรีย (mitochondria) ไรโบโซม (ribosome) และส่วนที่เป็นของเหลวใสๆ คือ ไฮยาโลพลาสซึม

ไซโทพลาซึม (cytoplasm) คือ ส่วนที่เป็นของเหลวใสหรือข้นๆ อยู่ในเซลล์เฉพาะส่วนที่อยู่นอกนิวเคลียส เมื่อเซลล์อยู่ในระยะที่มีกิจกรรมต่างๆ ไซโทพลาซึมจะอยู่ในสภาพเป็นของเหลว แต่ถ้าเซลล์อยู่ในระยะพักตัวไซโทพลาซึมจะมีสภาพเป็นเจลหรือข้นคล้ายเมือก มีเอนไซม์หลายชนิดที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เยื่อหุ้มไซโทพลาซึม คือ เอ็กโทพลาสต์ เยื่อหุ้มแควคิวโอล คือ โทโนพลาสต์ เยื่อหุ้มทั้งสองจะประกอบด้วยชั้นของโปรตีนและไขมัน ซึ่งมีความสามารถในการยอมให้สารต่างๆ ซึมผ่านได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ และชนิดของประจุ เป็นต้น

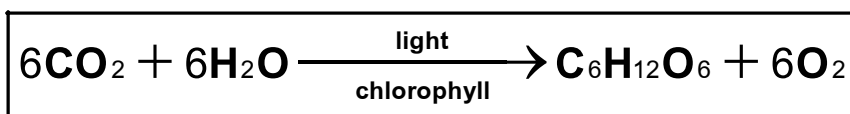
ภายในไซโทพลาซึมประกอบด้วยออร์แกเนลล์ต่างๆ ซึ่งล้วนมีกิจกรรมสำคัญของเซลล์เกิดขึ้นมากมาย ออร์แกเนลล์ต่างๆ เหล่านี้ ได้แก่

ร่างแหเอนโดพลาซึม (endoplasmic reticulum ; ER) ซึ่งจะเห็นเป็นเส้นคู่ขนาดสั้นและมีลักษณะเป็นหลอด บางครั้งจะเห็นเป็นเส้นคู่ขดเป็นวงกลมหรือวงรี นอกจากนี้อาจพบวงกลมเล็กๆ เกาะอยู่ตามเส้นคู่เหล่านี้ด้วย โครงสร้างของร่างแหเอนโดพลาซึมมักมีส่วนต่อกับเยื่อหุ้มนิวเคลียสซึ่งเป็นช่องทางที่ใช้ลำเลียงสารต่างๆ ภายในเซลล์และอาจพบร่างแหเอนโดพลาซึมของเซลล์หนึ่งเชื่อมกับเซลล์ข้างเคียงซึ่งเกี่ยวข้องกับการขนส่งรวมทั้งเป็นการกระตุ้นให้มีการเคลื่อนที่ของสารชนิดต่างๆ จากนิวเคลียสหรือเซลล์หนึ่งไปยังเซลล์อื่นๆ

กอลจิ คอมเพล็กซ์ หรือดิกทิโอโซม (Golgi complex, Dictyosome) มีลักษณะเป็นถุงแบนๆ โค้งซ้อนกันเป็นชั้น โดยมีเวสิเคิล (vesicle) เป็นถุงเล็กๆ อยู่ที่บริเวณปลายถุงแบน ทำหน้าที่ปล่อยคาร์โบไฮเดรตออกมาใช้ภายในเซลล์ และส่งออกไปภายนอกเซลล์ด้วย ระบบเยื่อหุ้มของออร์แกเนลล์ต่างๆ ในไซโทพลาซึมจะมีความสำคัญและอาจจะมีความสัมพันธ์กับการทำงานของเอนไซม์ในปฏิกิริยาต่างๆ รวมทั้งควบคุมการเคลื่อนย้ายสารภายในหรือระหว่างไซโทพลาซึม

พลาสติด (plastid) เป็นออร์แกเนลล์ที่สามารถแปรสภาพและแบ่งตัวได้โดยการแยกเป็นเม็ดเล็กไม่มีสี พบในเซลล์เนื้อเยื่อเจริญของพืชบางชนิด เช่น ลิวโครพลาสต์เป็นรงควัตถุไม่มีสีในผลไม้เมื่อได้รับแสงจะเปลี่ยนเป็นคลอโรพลาสต์มีสีเขียวและเมื่อผลไม้เริ่มสุกคลอโรพลาสต์จะเปลี่ยนเป็นไลโคปีนซึ่งมีสีแดง เป็นต้น สำหรับในพืชชั้นต่ำบางชนิดจะพบพลาสติดมีลักษณะคล้ายนิวเคลียส อยู่ในเซลล์สีบพันธุ์ โดยเฉพาะเซลล์ไข่ เชื่อว่ามีสารทำหน้าที่นำลักษณะพันธุกรรมจากรุ่นหนึ่งไปยังรุ่นถัดไป พลาสติดเป็นออร์แกเนลล์ที่มีขนาดใหญ่สังเกตเห็นได้ชัดเจน มีรงควัตถุให้สีซึ่งทำหน้าที่ต่างๆ กันไป แบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่

1. คลอโรพลาสต์ (chloroplasts) มีรงควัตถุหลายชนิด เช่น สีเขียว (คลอโรฟิลล์) และสีเหลือง (แคโรทีนอยด์) ซึ่งแคโรทีนอยด์ยังประกอบด้วยรงควัตถุสีเหลืองทั้งแคโรทีนและแซนโทฟิลล์ โดยทั่วไปจะเห็นสีเขียวของพืชได้ชัดเจนแต่จะเห็นสีเหลืองได้ต่อเมื่อรงควัตถุสีเขียวหายไป คลอโรพลาสต์จะประกอบด้วยคลอโรฟิลล์เป็นส่วนใหญ่คือ ประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ แคโรทีนประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ และ แซนโทฟิลล์ประมาณ 29 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบไลหะที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของโมเลกุลคลอโรฟิลล์ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการทำงานของคลอโรฟิลล์ในการสังเคราะห์แสง เช่น แมกนีเซียม เหล็ก โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส และสังกะสี คลอโรฟิลล์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานเคมีในรูปของอาหารของพืชได้ ดังปฏิกิริยา



2. โครโมพลาสต์ (chromoplasts) มีรงควัตถุสีเหลืองของแคโรทีนอยด์และสีส้มของแซนโทฟิลล์ที่พบในผลไม้ ผักและกลีบดอกไม้ ไลโคปีนที่ให้สีแดงของผลมะเขือเทศ แต่อย่างไรก็ตามสีแดงอาจเป็นแอนโทไซยานินซึ่งเป็นรงควัตถุที่ละลายน้ำได้ เช่น สีแดงของแอปเปิ้ล บ๊วย เป็นต้น ส่วนรงควัตถุอื่นในพลาสติดไม่ละลายน้ำ อย่างไรก็ตามรงควัตถุเหล่านี้ไม่มีบทบาทต่อการสังเคราะห์แสง

3. ลิวโคพลาสต์ (leucoplasts) มีรงควัตถุพวกที่ไม่มีสี พบในเซลล์ของเนื้อเยื่อเจริญและส่วนสะสมอาหารพวกเมล็ดแป้ง เช่น ในพืชหัว ราก และเมล็ด และเซลล์ชั้นนอกของใบ เป็นต้น

4. โปรพลาสติด (proplastis) เป็นพลาสติดพวกที่ยังไม่มีรงควัตถุ ไม่มีสี อยู่ในสภาพเริ่มต้นที่จะพัฒนาไปเป็นพลาสติดชนิดต่างๆ พบได้ตามปลายยอด ปลายรากและเซลล์ที่กำลังแบ่งตัวในส่วนของเนื้อเยื่อเจริญ

ไมโทคอนเดรีย (Mitochondria) เป็นโครงสร้างที่มองเห็นได้จากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง เห็นเป็นรูปทรงกลมหรือรูปแท่ง แต่ถ้าดูจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะเห็นเป็นรูปทรงกลมหรือรูปรี มีลักษณะเป็นพู่ มีเยื่อหุ้ม 2 ชั้น มีองค์ประกอบเป็นสารประเภทโปรตีนและไขมัน มีดีเอ็นเอ อาร์เอ็นเอโพลิเมอร์เรส (RNA polymerase) ทรานส์เฟอร์อาร์เอ็นเอ (tRNA) และ ไรโบโซม เนื่องจากดีเอ็นเอในไมโทคอนเดรียจะไม่รวมตัวกับดีเอ็นเอในนิวเคลียสจึงมีข้อเสนอแนะว่าดีเอ็นเอทั้งสองส่วนนี้ไม่มีความสัมพันธ์กัน ไมโทคอนเดรียมีการแบ่งตัวตามขวาง พบได้ในเซลล์พืชทุกเซลล์ เป็นแหล่งพลังงานของเซลล์ มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน เอนไซม์ของวัฏจักรกรดซิตริก ออกซิเดชันของกรดไขมัน ออกซิเดทีฟฟอสฟอริเลชัน และ เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับขั้นสุดท้ายของปฏิกิริยาที่เปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ มีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับหน้าที่ทางพันธุศาสตร์ของดีเอ็นเอในไมโทคอนเดรีย 2 ประการ คือ

1. ถ้าเกิดมิวเทชันในไซโทพลาซึม จะมีผลต่อโครงสร้างและหน้าที่ของไมโทคอนเดรียที่มีอยู่เดิม

2. ดีเอ็นเอในไมโทคอนเดรียอาจมีข้อมูลทางพันธุกรรมที่สามารถลอกและแปรรหัสในการสังเคราะห์โปรตีนของไมโทคอนเดรียได้

นิวเคลียส (nucleus) ในนิวเคลียสจะมีโครโมโซมซึ่งเป็นศูนย์กลางควบคุมกระบวนการต่างๆ ของพืช เช่น การเจริญและกระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ นิวเคลียสพบในเซลล์มีชีวิตเกือบทุกเซลล์ ยกเว้นเซลล์ที่ล้าเลียงอาหารในพืช เซลล์พืชบางอย่างไม่มีนิวเคลียส มีชีวิตอยู่ได้หลายปี เช่น เซลล์ของท่อลำเลียงอาหาร (sieve tube) พบในพืชตระกูลปาล์มอาจมีอายุได้ 3 - 200 ปี นิวเคลียสมีเยื่อหุ้มเรียกว่า nuclear membrane แยกนิวเคลียสออกจากไซโทพลาซึมมีลักษณะเป็นเยื่อมี 2 ชั้น มีช่องใหญ่พอที่จะยอมให้ไรโบโซมเคลื่อนที่จากนิวเคลียสไปยังไซโทพลาซึม เยื่อหุ้มชั้นนอกจะติดอยู่กับส่วนของร่างแหเอนโดพลาซึม โครงสร้างต่างๆ ที่พบในนิวเคลียส มีดังนี้

1. คาร์ยโอลิมฟ์หรือนิวเคลียร์แซพ (karyolymph หรือ nuclear sap) เป็นของเหลวใสๆ อยู่ในนิวเคลียส ไม่ติดสี และมองไม่เห็นด้วยกล้องจุลทรรศน์

2. นิวคลีโอลัส (nucleolus) มีลักษณะค่อนข้างกลม ติดสี ประกอบด้วยนิวคลีโอโปรตีน (โปรตีน+อาร์เอ็นเอ) นิวคลีโอลัสอาจเป็นตำแหน่งสะสมอาร์เอ็นเอ นิวคลีโอลัสที่ติดอยู่กับเฉพาะบางส่วนของโครโมโซมเรียกว่านิวคลีโอลาร์โครโมโซม (nucleolar chromosome) เรียกตำแหน่งของโครโมโซมที่ติดกับนิวคลีโอลัสว่า nuclear organizer หรือ nucleolar organizing region (NOR)

บริเวณตรงกลางของนิวคลีโอลัสมีบทบาทต่อการทำหน้าที่ถ่ายทอดข้อมูลพันธุกรรมจากโครโมโซมไปยังไซโทพลาซึม จากการทดลองแสดงให้เห็นว่านิวคลีโอลัสเป็นบริเวณที่มีการสังเคราะห์ไรโบโซมัลอาร์เอ็นเอ (rRNA) จำนวนนิวคลีโอไลต์ต่ออินเทอร์เฟสนิวเคลียสจะเป็นลักษณะเฉพาะของสิ่งมีชีวิตชนิดนั้น จำนวนอาจคงที่หรือผันแปรได้ ยกเว้นในสิ่งมีชีวิตบางชนิดจะพบว่านิวคลีโอไลต์จะหายไปในระยะแรกของการแบ่งเซลล์และปรากฏให้เห็นอีกครั้งในระยะเทโลเฟส

ภายใต้สภาพที่เหมาะสมจะเห็นส่วนที่ติดสีเข้มเป็นเส้นยาวในนิวเคลียสเรียกว่าโครโมโซม ในสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดจะมีจำนวนโครโมโซมคงที่และมียีนเรียงลำดับอยู่บนโครโมโซม ยีนจะมีลำดับเฉพาะของนิวคลีโอไทด์อยู่บนสายดีเอ็นเอหรือ

อาร์เอ็นเอทำหน้าที่ควบคุมการเจริญ การพัฒนาและกระบวนการทางเคมีของสิ่งมีชีวิต

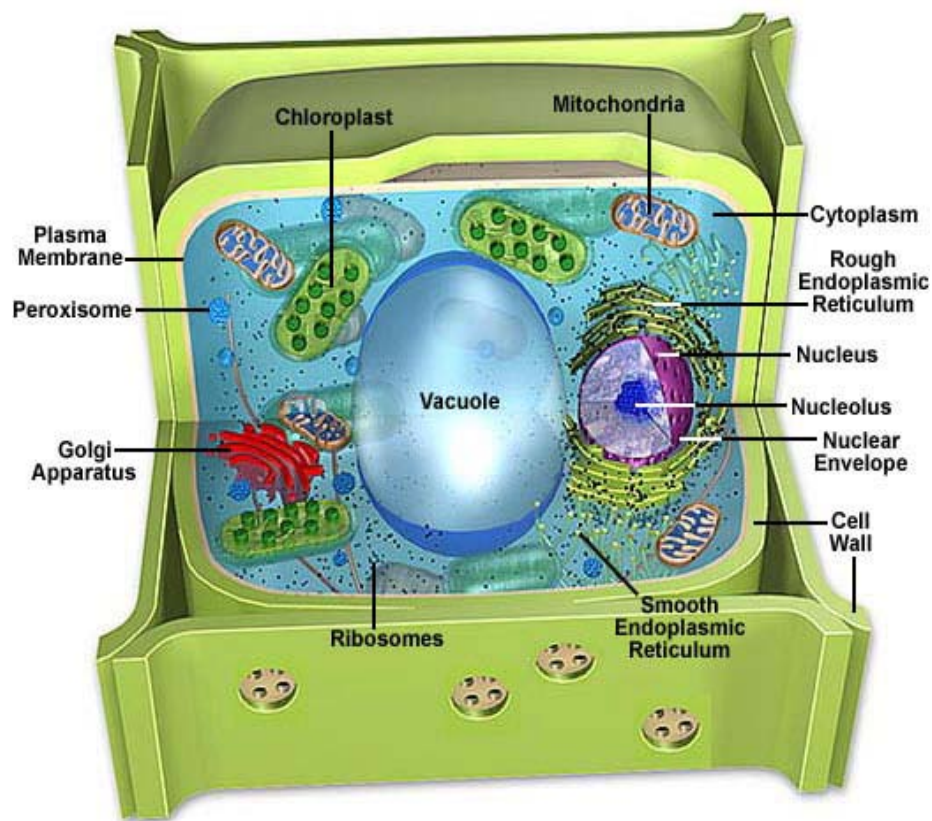
เออร์แกสติก (Ergastic substances) คือ สารที่อยู่ในเซลล์ซึ่งเซลล์ที่มีชีวิตจะมีโครงสร้างบางอย่างที่ไม่มีชีวิตเรียกว่า เซลล์อินคลูชัน (cell inclusions) ได้แก่ แวกิวโอล เม็ดแป้ง และ ผลึก ดังนี้

แวกิวโอล (Vacuole) เป็นโครงสร้างหนึ่งในไซโทพลาซึม ภายในมีของเหลวอยู่ภายในเรียกว่าเซลล์แซป (cell sap) เซลล์ที่อ่อนจะมีแวกิวโอลขนาดเล็ก แต่ละแวกิวโอลล้อมรอบด้วยเยื่อหุ้มแวกิวโอล (tonoplast) เมื่อเซลล์มีอายุมากขึ้นขนาดของแวกิวโอลก็ใหญ่ขึ้นด้วยและมีการรวมกลุ่มกันจึงทำให้จำนวนแวกิวโอลลดลง ในเซลล์ที่โตเต็มวัยจะพบแวกิวโอลอย่างน้อย 1 แวกิวโอล เซลล์แซปในแวกิวโอลประกอบด้วยสารละลายของรงควัตถุที่เจือจาง เช่น แอนโทไซยานิน ซึ่งทำให้ส่วนต่างๆ ของพืช เช่น กลีบดอก ผล ราก และส่วนอื่นๆ มีสีแตกต่างกัน นอกจากนี้อาจจะพบสารประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

1. น้ำตาล เช่น กลูโคส ซูโครส
2. เกลือแร่ต่างๆ เช่น ซัลเฟต ไนเตรท ฟอสเฟต และคลอไรด์ ของโพแทสเซียม โซเดียม แคลเซียม เหล็ก และแมกนีเซียม
3. กรดอินทรีย์ เช่น ซิตริก ออกซาลิก มาลิก ทาร์ทาลิก
4. กรดอะมิโน พวกโปรตีนที่ละลายน้ำได้ และอัลคาลอยด์
5. แก๊ซต่างๆ เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์
6. เกลืออินทรีย์และไกลโคไซด์
7. ไขมันและสารอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

เม็ดแป้ง (starch grains) เป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน เกิดในรูปเม็ดหรือผงในพลาสทิด เป็นอาหารสะสมที่พบในพืชเป็นส่วนมาก สร้างขึ้นระหว่างการสังเคราะห์แสง ถูกย่อยสลายและสังเคราะห์ใหม่ในรูปแอมิโลพลาสต์ (amyloplast)

ผลึก (crystals) เป็นพวกแคลเซียมออกซาเลท มีรูปร่างต่างๆ เช่น ผลึกรูปเข็ม (raphides) ผลึกรูปแท่ง (styloids) และผลึกรูปดาว (stellate) เป็นต้น พบในเนื้อเยื่อหลายชนิด บางครั้งไปรวมกับส่วนของผนังเซลล์ที่ยื่นออกมาภายนอกเรียกว่า ซิสโทลิท (cystolith) ผลึกของกรดออกซาลิกเป็นผลพลอยได้จากกิจกรรมของโพรโทพลาสต์ละลายอยู่ในแวคิวโอล ถ้ามีปริมาณมากจะเป็นพิษกับโพรโทพลาสต์แต่เมื่ออยู่รวมกับแคลเซียมในรูปแคลเซียมออกซาเลทจะไม่ละลายน้ำและไม่เป็นอันตรายต่อโพรโทพลาสต์



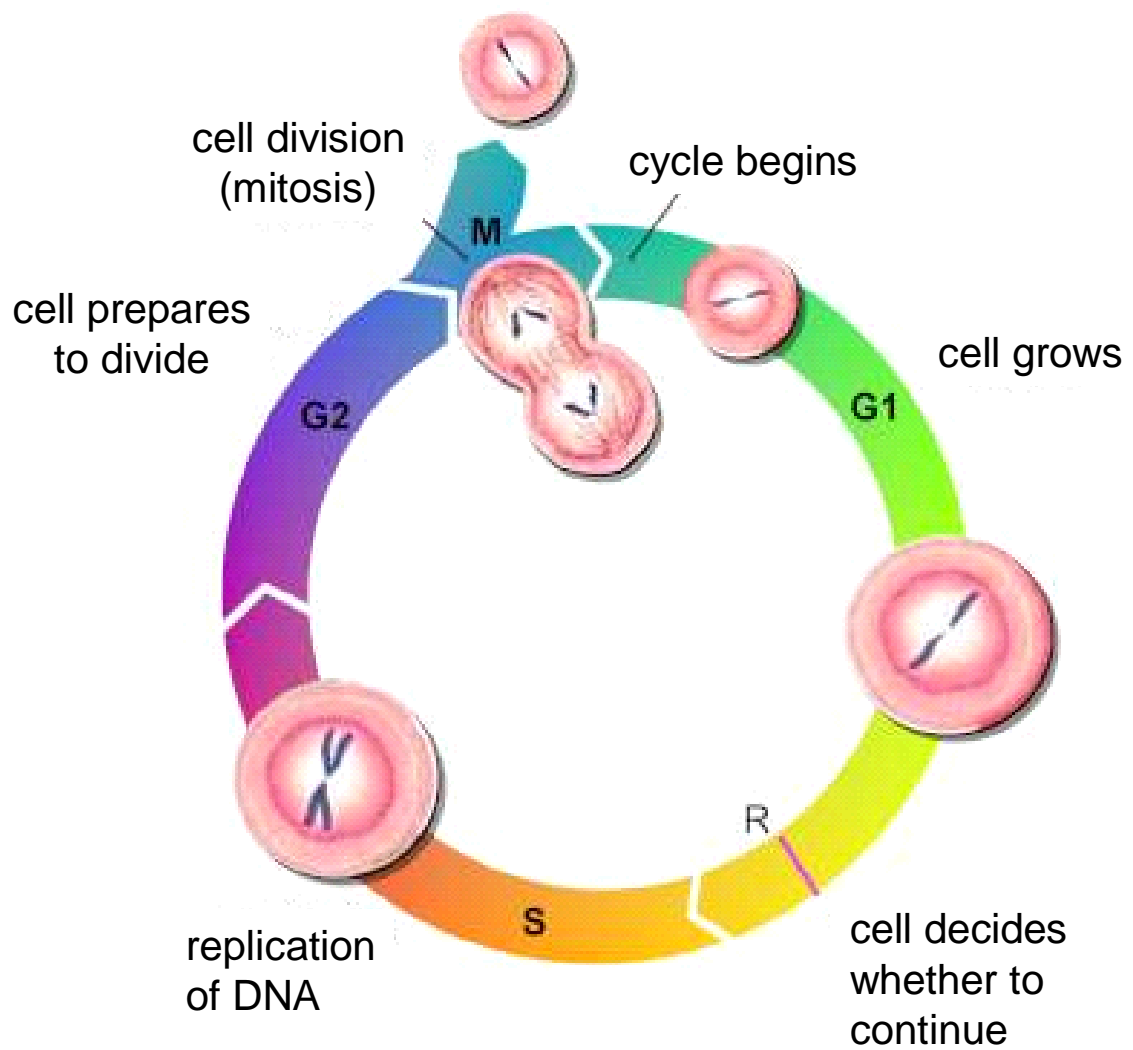
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของเซลล์พืช
(ที่มา : <http://micro.magnet.fsu.edu/cells/plants/plantmodel.html>)

การแบ่งเซลล์

สิ่งมีชีวิตต้องมีการแบ่งเซลล์เพื่อให้ช่วงชีวิตและการเติบโตของเซลล์ยาวนานขึ้น ถ้าไม่มีกระบวนการแบ่งเซลล์สิ่งมีชีวิตเหล่านั้นต้องตายไป ในสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวการแบ่งเซลล์หมายถึงการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศทำให้เกิดสิ่งมีชีวิตรุ่นใหม่ ๆ เพิ่มขึ้นจากต้นกำเนิดเดิม ในสิ่งมีชีวิตที่มีหลายเซลล์การแบ่งเซลล์จะเริ่มจากเซลล์เริ่มเกิด (primordial) เพียงเซลล์เดียวเท่านั้นซึ่งจะได้เป็นเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้และเพศเมีย

ความรู้เกี่ยวกับกลไกการรวมตัวกันของเซลล์และการแบ่งเซลล์เป็นพื้นฐานที่จะทำให้เข้าใจเกี่ยวกับการถ่ายทอดลักษณะพันธุกรรม กระบวนการเหล่านี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องก่อนช่วงที่และสม่าเสมอ ทั้งนี้วัฏจักรของเซลล์แบ่งออกเป็น 4 ระยะ ได้แก่ G1 S G2 และ M (ภาพที่ 2.3) โดยเซลล์ที่เกิดขึ้นใหม่จะเข้าสู่อินเทอร์เฟสในระยะ G1 กิจกรรมการสังเคราะห์สารต่างๆ จะเกิดขึ้นในอัตราค่อนข้างสูง จากนั้นจะเข้าสู่ระยะ S ซึ่งเริ่มมีการสังเคราะห์ดีเอ็นเอและสิ้นสุดเมื่อปริมาณของดีเอ็นเอเพิ่มขึ้นเท่าตัว โครโมโซมมีการจำลองตัวแล้วเข้าสู่ระยะ G2 และสิ้นสุดเมื่อเข้าสู่ระยะ M ซึ่งเป็นระยะที่มีกิจกรรมการแบ่งเซลล์ชัดเจน โดยกระบวนการแบ่งเซลล์นั้นสามารถจำแนกออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การแบ่งนิวเคลียส (karyokinesis หรือ nuclear division) และการแบ่งไซโทพลาซึม (cytokinesis) เมื่อกระบวนการแบ่งเซลล์เสร็จสิ้นเซลล์ลูกที่เกิดขึ้นใหม่จะเข้าสู่ระยะ G1 อีกครั้งเกิดเป็นวัฏจักรของเซลล์ต่อเนื่องไป

การแบ่งเซลล์แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ ไมโทซิส (Mitosis) และไมโอซิส (Meiosis) ดังนี้



ภาพที่ 2.3 วัฏจักรของเซลล์
 (ที่มา : http://www.daviddarling.info/encyclopedia/C/cell_cycle.html)

ไมโทซิส (MITOSIS)

การแบ่งเซลล์แบบไมโทซิสเป็นการคงคุณสมบัติของโครโมโซมทั้งด้านปริมาณและคุณภาพ ดังนั้นเซลล์ลูกที่ได้จะมีลักษณะทางพันธุกรรมเหมือนเดิมทุกประการจึงเป็นการส่งต่อหน่วยทางพันธุกรรมของพ่อ-แม่ไปยังเซลล์ลูกได้อย่างแม่นยำ คุณสมบัติดังกล่าวนี้มีความสำคัญกับพืชชั้นสูงในการแปรสภาพของเซลล์ภายหลังการปฏิสนธิเนื่องจากเซลล์จะยังคงมีศักยภาพเหมือนไซโกตที่สามารถเจริญเติบโตเป็นพืชต้นใหม่ที่สมบูรณ์ได้ เรียกว่าโททิโพเทนซี (totipotency) ซึ่งคุณสมบัตินี้แสดงออกเป็นปกติโดยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช

เนื่องจากดีเอ็นเอและฮิสโตนเป็นส่วนประกอบสำคัญของโครโมโซมในกระบวนการแบ่งเซลล์จึงจำเป็นต้องมีการสังเคราะห์ดีเอ็นเอ ดังนั้นปริมาณสารเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นในระยะเริ่มการแบ่งเซลล์ แต่บางครั้งพบว่าเซลล์ที่มีการสังเคราะห์ดีเอ็นเอเพิ่มขึ้นอีกเท่าตัวอาจไม่จำเป็นต้องมีแบ่งเซลล์เกิดขึ้นเสมอไปเรียกว่ากระบวนการเอนโดไมโทซิส (endomitosis) พบเมื่อเซลล์ได้รับสารบางชนิดเช่น โคลชิซิน (colchicine) ซึ่งจะไปมีผลรบกวนการสร้างไมโครทิวบูล (microtubules) ของไมโททิกสปีนเดิล (mitotic spindle) ระยะเมทาเฟสจึงมีผลให้การแบ่งเซลล์ไม่สมบูรณ์

เพื่อความสะดวกในการศึกษาขั้นตอนการแบ่งเซลล์จึงจำแนกการแบ่งนิวเคลียสเป็น 5 ระยะ ได้แก่ อินเทอร์เฟส (Interphase) โพรเฟส (Prophase) เมทาเฟส (Metaphase) แอนาเฟส (Anaphase) และ เทโลเฟส (Telophase) ดังนี้

อินเทอร์เฟส

เป็นระยะแรกของการแบ่งเซลล์ เริ่มตั้งแต่ G₁ - S - G₂ ในระยะนี้ จะเห็นนิวคลีโอลัสซึ่งเป็นกลุ่มก้อนของ RNA ได้ค่อนข้างชัดเจนและโครโมโซมเป็นเส้นยาวๆ พันกันเรียกว่า โครมาทิน (chromatin) มีการสร้างดีเอ็นเอและฮิสโตน รวมทั้งสะสมพลังงานต่างๆ ที่จำเป็นต่อการแบ่งเซลล์ โครมาทินมีลักษณะค่อนข้างบางและยาวติดสีกาง

การเปลี่ยนแปลงของนิวเคลียสในระยะนี้ไม่สามารถเห็นได้ชัดเจนจึงอาจเรียกว่าระยะพัก (resting stage) แต่ความจริงมีกิจกรรมสำคัญเกิดขึ้นอย่างมากมาย กระบวนการทางเคมีที่เห็นได้ชัดคือ การเพิ่มปริมาตรนิวเคลียส กิจกรรมของอาร์เอ็นเอในนิวเคลียส และความหนืดของไซโทพลาซึมซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนสภาพของเซลล์จากอินเทอร์เฟสเข้าสู่ระยะต่างๆ ของการแบ่งเซลล์

โพรเฟส

โครโมโซมมีการหดตัวเห็นเป็นรูปร่างได้ชัดเจน แต่ละโครโมโซมมี 2 โครมาทิด โดยจะมีการบิดตัวไปในทางเดียวกันเรียกว่า relational coiling ในระยะปลายโพรเฟสจะเริ่มเกิดสปินเดิลไฟเบอร์และออร์แกเนลล์ขนาดใหญ่เริ่มเคลื่อนที่ออกจากบริเวณกลางเซลล์ นิวคลีโอลัสเริ่มลดขนาดลงและสลายไปก่อนเข้าสู่เมทาเฟส ซึ่งการสลายตัวของนิวคลีโอลัสอาจมีสาเหตุมาจากสารในนิวเคลียสบางส่วนหรือทั้งหมดมีส่วนช่วยในการสร้างสปินเดิลไฟเบอร์และสารในนิวคลีโอลัสเคลื่อนไปยังโครโมโซมเพื่อมีส่วนร่วมในกิจกรรมของไมโททิกสามารถถ่ายทอดไปยังนิวเคลียสของลูกได้ รวมทั้งมีการแลกเปลี่ยนสารพวกไรโบนิวคลีโอโปรตีนและอื่นๆ ระหว่างนิวเคลียสกับไซโทพลาซึม

นอกจากนิวคลีโอลัสจะเป็นสิ่งจำเป็นต่อการแบ่งเซลล์แล้วยังอาจพบลักษณะเฉพาะของพืชบางชนิดที่นิวคลีโอลัสไม่สลายตัวเรียก persistent nucleoli ซึ่งมีประโยชน์ต่อการศึกษาทางอนุกรมวิธานสามารถใช้จัดจำแนกชนิดพืชได้

เมทาเฟส

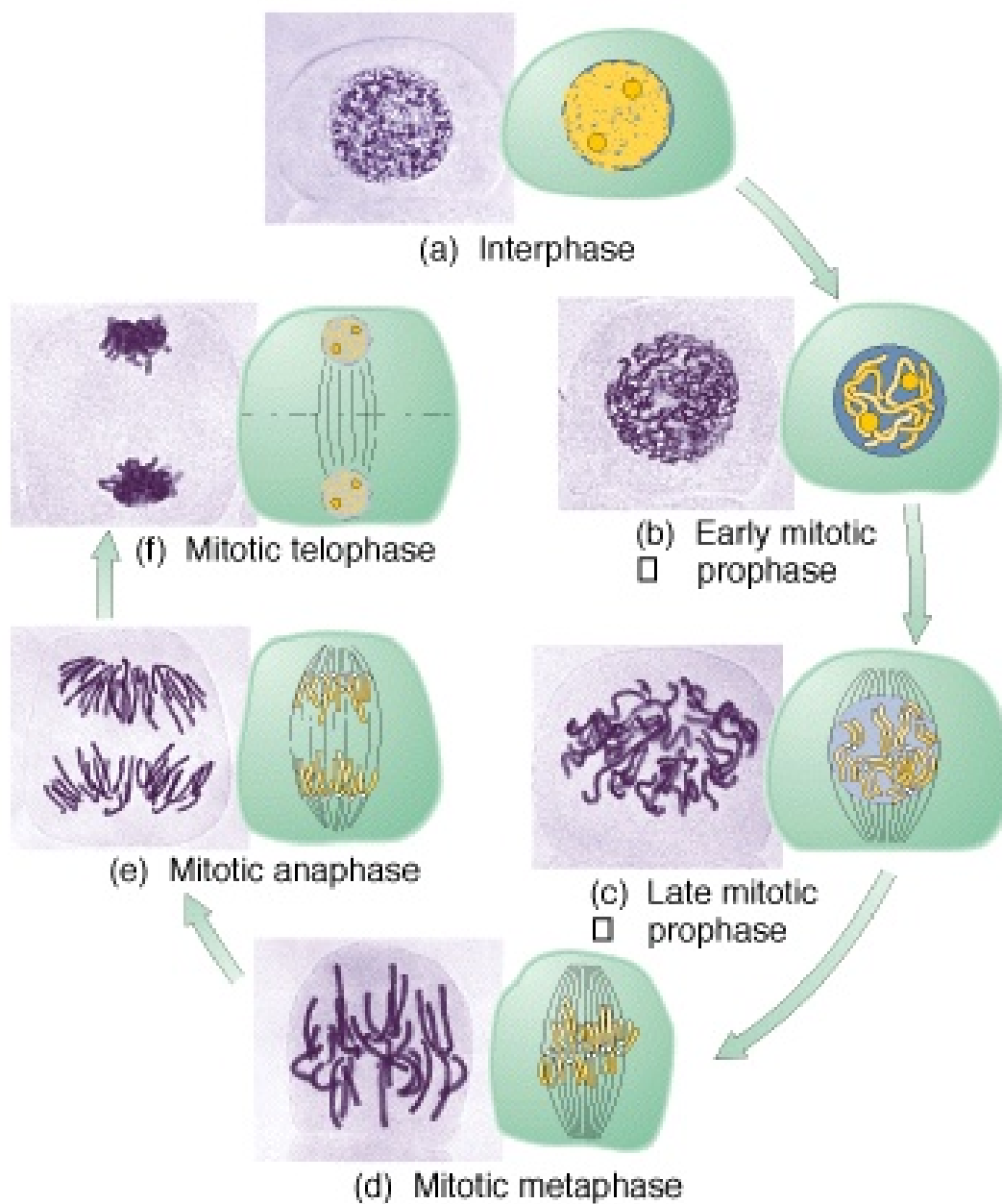
ระยะนี้โครโมโซมจะหดตัวสั้นที่สุด มองเห็นชัดเจนเป็นอิสระอยู่ในไซโทพลาซึม เคลื่อนเข้าสู่กลางเซลล์แล้วจัดเรียงในแนวเมทาเฟสเพลท (metaphase plate, equatorial plate) แต่ละโครโมโซมประกอบด้วย 2 โครมาทิดพันกันอย่างแน่นหนา มีเซนโทเมียร์เป็นตัวยึดไว้และสร้างสปินเดิลไฟเบอร์เห็นเป็นเส้นรัศมีเชื่อมโยงระหว่างเซนโทเมียร์กับขั้วเซลล์

แอนาเฟส

โครโมโซมจะเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้วเซลล์ทั้งสองด้านโดยการหดตัวสั้นเข้าของสปินเดิลไฟเบอร์ การที่โครมาทิดเคลื่อนไปยังแต่ละขั้วอาจจะเป็นกลุ่มหรือเดี่ยว โดยแต่ละโครมาทิดจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วแตกต่างกันผันแปรได้จาก 0.2 – 5.0 ไมครอน ต่อนาที ซึ่งถ้าซิสเทอร์โครมาทิด (sister chromatid) มีการแยกออกจากกันจะเคลื่อนที่ไปคนละขั้วโดยเซนโทเมียร์จะเป็นส่วนของโครโมโซมที่มีความสำคัญในการเคลื่อนที่

ทีโลเฟส

มีการเคลื่อนที่ของนิวเคลียสทั้ง 2 กลุ่ม ไปยังเซลล์ลูก โดยเกิดการจำลองออร์แกเนลล์ในไซโทพลาซึมเพื่อแยกไปสู่ลูก เช่น ร่างแหเอนโดพลาสมิก โทโนพลาสม พลาสมาเลมมา กอลจิคอมเพล็กซ์ หลังจากนั้นจะมีการแบ่งไซโทพลาซึม โดยในเซลล์พืชจะเกิดเซลล์เพลท (cell Plate) บริเวณกลางเซลล์และขยายสู่ขอบเซลล์ ซึ่งบริเวณเซลล์เพลทจะมีช่องเล็กๆ ต่อมาจะเป็นช่องเชื่อมผ่านระหว่างเซลล์ที่เรียกว่า พลาสโมเดสมاتا (plasmodesmata) เป็นช่องทางลำเลียงสารระหว่างเซลล์



ภาพที่ 2.4 การแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส
 (ที่มา : <http://www.bio.miami.edu/dana/250/mitosis.jpg>)

ไมโอซิส (Meiosis)

วิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการคัดเลือกเพื่อให้สิ่งมีชีวิตสามารถอยู่รอดได้ กระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นได้จากการรวมกันอย่างสุ่มของโครโมโซมในเซลล์สืบพันธุ์ซึ่งจะเกิดเป็นยีนลักษณะใหม่ๆ อย่างไรก็ตามเซลล์สืบพันธุ์ที่มาวมกันนั้นจำเป็นต้องมีกลไกในการลดจำนวนโครโมโซมก่อนที่จะมารวมกันโดยผ่านการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสซึ่งมีลักษณะสำคัญคือ การเข้าคู่กันของโครโมโซมที่เหมือนกัน (homologous chromosome) การแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนของโครโมโซม (crossing over) การจัดเรียงตัวใหม่ของยีน (genetic recombination) และการลดจำนวนโครโมโซมลงครึ่งหนึ่ง พฤติกรรมของโครโมโซมในไมโอซิส มี 2 ระยะ ได้แก่ ไมโอซิส I และ ไมโอซิส II รายละเอียดดังนี้

ไมโอซิส I

อินเทอร์เฟส I

ระยะอินเทอร์เฟสในการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสจะคล้ายกับการแบ่งแบบไมโทซิส มีการสังเคราะห์ดีเอ็นเอเพิ่มขึ้นซึ่งการเพิ่มปริมาณดีเอ็นเออีกเท่าตัวเป็นการบ่งชี้ถึงการสร้างโครโมโซมเพิ่มขึ้นอีกเท่าตัวเนื่องจากดีเอ็นเออยู่บนโครโมโซมในนิวเคลียส อย่างไรก็ตามปริมาณดีเอ็นเอของเซลล์จะเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละระยะของการแบ่งเซลล์ ถ้าให้ C แทนปริมาณดีเอ็นเอในนิวเคลียสของเซลล์สืบพันธุ์ (n) นิวเคลียสของเซลล์ดิพลอยด์ ($2n$) จะมีปริมาณดีเอ็นเอเป็น $2C$ พบว่าเมื่อเซลล์เตรียมพร้อมที่จะแบ่งตัวในระยะอินเทอร์เฟสจะมีการสังเคราะห์ดีเอ็นเอเพิ่มขึ้นเป็น $4C$ แล้วคงที่ไปจนกระทั่งเข้าสู่ระยะแอนาเฟส II จึงลดลงเหลือ $2C$ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสจะได้ 4 เซลล์ แต่ละเซลล์จะมีปริมาณดีเอ็นเอเท่ากับ $1C$ จำนวนโครโมโซมลดลงครึ่งหนึ่งและยีนที่แสดงลักษณะแตกต่างไปจากพ่อและแม่ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของยีนเกิดขึ้น

โพรเฟส I

เพื่อความสะดวกในการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์จึงมักมีการแบ่งโพรเฟสออกเป็น 5 ระยะ ได้แก่ เลปโทนีมา (leptonema) ไซโกนีมา (zygonema) แพคไคโนมา (pachynema) ดิโพลนีมา (diplonema) และ ไดโคนีซิส (diakinesis) ดังนี้

เลปโทนีมา : เซลล์และนิวเคลียสมีการเพิ่มปริมาตรและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของนิวเคลียส ระยะนี้โครโมโซมจะเริ่มพันกันและหดตัวแน่นขึ้น

ไซโกนีมา : โครโมโซมมาตาสั้นขึ้นและมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น มีการจับคู่ของโครโมโซม (synapsis) ในพวกดิพลอยด์ โครโมโซมที่มาเข้าคู่กันจะมาจากเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้และเพศเมียอย่างละหนึ่ง การเข้าคู่มี 3 แบบ คือ

- procentric คือ เข้าคู่ที่กลางโครโมโซมแล้วขยายไปส่วนปลาย
- proterminal คือ เข้าคู่จากบริเวณปลายแล้วขยายเข้าส่วนกลาง
- intermediate คือ การเข้าคู่แบบสุ่มหลายตำแหน่งพร้อมกัน

แพคไคโนมา : ระยะนี้ค่อนข้างยาวนาน การเข้าคู่สมบูรณ์แบบถ้ายังมีบางส่วนของโครโมโซมที่ไม่เข้าคู่กันก็จะคงสภาพนั้น โครโมโซมที่มาเข้าคู่กันประกอบด้วย 4 โครมาทิด (tetrad; bivalents) ซึ่งจะสั้นและหนาขึ้น โครโมโซมที่มาเข้าคู่กันนั้นจะหดตัวแบบที่เรียกว่า relational coiling ซึ่งมีบทบาทที่สำคัญต่อการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนของโครโมโซม

ดิโพลนีมา : โครโมโซมที่เข้าคู่กันจะมีการเกิดครอสซิงโอเวอร์ หลังจากนั้นจะเริ่มแยกออกจากกันแต่ยังคงติดกันตรงบริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วน เรียกว่าไคแอสมา (chiasma) เมื่อโครโมโซมแยกออกจากกันจะเห็นเป็นลูป (loop) เกิดมีไคแอสมาอยู่บริเวณปลายโครโมโซม

ไดโคไนซิส : โครโมโซมมีการหดตัวมากขึ้น มีการสลายตัวของ นิวคลีโอไลต์และเยื่อหุ้มนิวเคลียส โครโมโซมเคลื่อนไปด้านข้างของนิวเคลียส มีการจัดเรียงตัวของแต่ละโครโมโซมอยู่ห่างกัน

เมทาเฟส I

การสลายตัวของเยื่อหุ้มนิวเคลียสและการสร้างสปินเดิลไฟเบอร์ เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ การจัดเรียงตัวของเซนโทเมียร์เรียงอยู่ในแนวเมทาเฟสเพลท

แอนาเฟส I

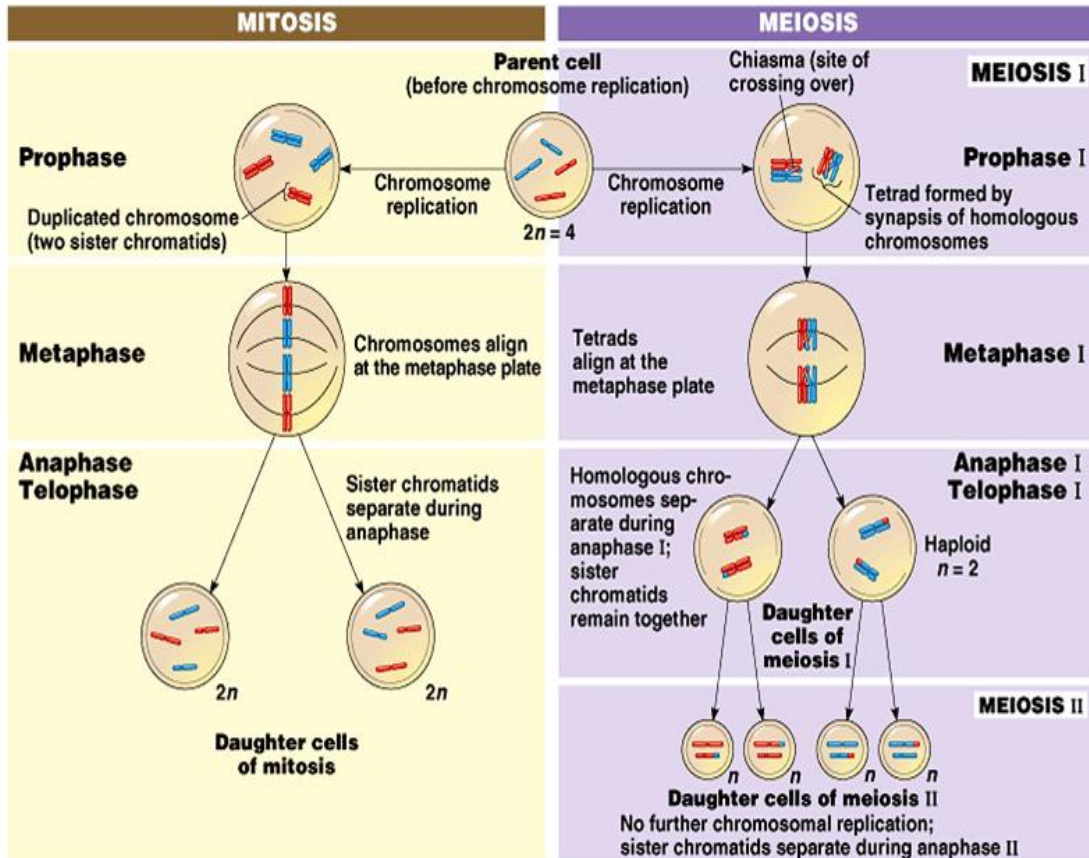
แต่ละโครโมโซมจะถูกแยกออกเป็นข้างละ 2 โครมาทิด เคลื่อนไป ยังแต่ละขั้วแต่ละโครโมโซมมี 2 โครมาทิดอยู่ในสภาพที่มี 2 โครมาทิด (dyad) แต่ละโครมาทิดประกอบด้วย 2 แขน ดังนั้นจะเห็นโครโมโซมมีรูปร่างได้ต่างกัน เช่น รูปตัววี (V) รูปตัวเจ (J) หรือเป็นแท่ง ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเซนโทเมียร์

ทีโลเฟส I และ อินเทอร์เฟส II

ระยะทีโลเฟส I โครโมโซมจะแยกไปแต่ละขั้ว มีการสร้างนิวเคลียส และเยื่อหุ้มนิวเคลียส โครโมโซมมีการยึดตัวออกและเข้าสู่อินเทอร์เฟส II ช่วงสั้นๆ ซึ่งในพืชบางชนิดอาจไม่มีการเข้าสู่อินเทอร์เฟสอีกก็ได้

ไมโอซิส II

กระบวนการในขั้นตอน ไมโอซิส II อาจจะเรียกว่า ไมโอติก ไมโทซิส เนื่องจากมีความคล้ายกับการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิสดังแสดงในภาพที่ 2.5



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

ภาพที่ 2.5 เปรียบเทียบการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิสและไมโอซิส

(ที่มา : <http://faculty.ircc.edu/faculty/tfischer/images/mitosis%20vs%20meiosis.jpg>)

โทรเฟส II

แต่ละโครโมโซมที่มี 2 โครมาทิด ซึ่งยึดกันอยู่ด้วยเซนโทเมียร์และแขนทั้งสี่แยกออก โครโมโซมยาวกว่าในทีโลเฟส I ไม่มีการบิดตัวไปทางเดียวกัน ส่วนประกอบทางพันธุกรรมขึ้นกับชนิดและจำนวนในการเกิดครอสซิงโอเวอร์

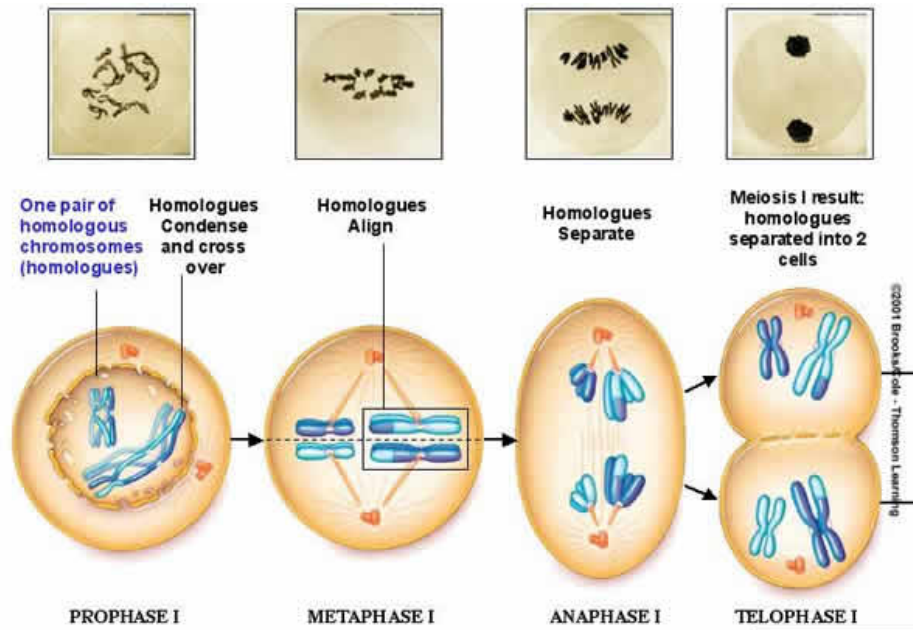
เมทาเฟส II และ แอณาเฟส II

โครโมโซมมีการจัดเรียงตัวโดยเซนโทเมียร์วางเรียงในแนวเมทาเฟสเพลทโดยเซนโทเมียร์ของทั้ง 2 โครมาทิดจะทำหน้าที่แทนโครมาทิดไฟเบอร์ยึดเซนโทเมียร์กับขั้วแล้วดึงแต่ละโครมาทิดให้เคลื่อนไปยังขั้วตรงข้าม ระยะแอณาเฟส II โครโมโซมอยู่ในสภาพที่มี 1 โครมาทิด (monad)

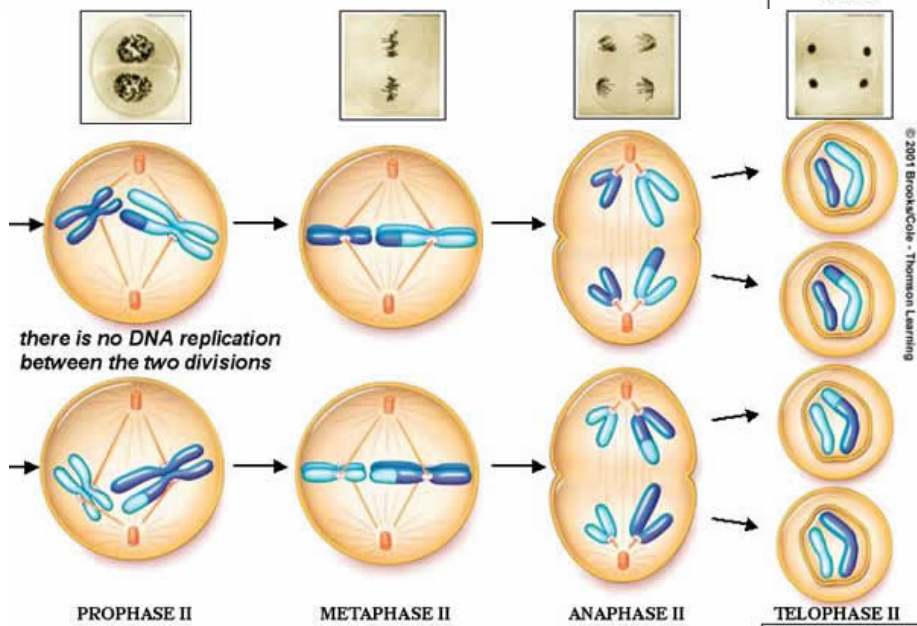
ทีโลเฟส II

เมื่อโครโมโซมในแอณาเฟส II ถูกดึงไปยังขั้วทั้ง 2 ของเซลล์ มีการสร้างนิวคลีโอลและเยื่อหุ้มนิวเคลียสจากนั้นโครโมโซมจะคลายตัวออกยาวขึ้น

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการแบ่งนิวเคลียสแล้วเซลล์จะสร้างผนังในแนวตั้งฉากกับแนวเดิม ได้เป็น 4 เซลล์ ที่มีสภาพเป็นแฮพลอยด์ (haploid) มีจำนวนโครโมโซมลดลงจากเดิมครึ่งหนึ่ง การแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสนี้จะเกิดขึ้นเพื่อสร้างเซลล์สืบพันธุ์



MEIOSIS I: Separate the Homologues



MEIOSIS II: Separate the Sister Chromatids (by mitosis)

ภาพที่ 2.6 การแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส
 (ที่มา : <http://www.biology.iupui.edu/biocourses/N100/2k4ch9meiosisnotes.html>)

การแบ่งเซลล์แบบ ไมโอติก ไมโทซิส หรือ ไมโอซิส II และโซมาติก ไมโทซิส สามารถจำแนกข้อแตกต่างกันได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างไมโอติก ไมโทซิส และ โซมาติก ไมโทซิส

ไมโอติก ไมโทซิส (ไมโอซิส II)	โซมาติก ไมโทซิส
1. ไข่ 4 เซลล์ มีโครโมโซมเป็นแฮพลอยด์ มีความแตกต่างทางพันธุกรรม	1. ไข่ 2 เซลล์ เป็นแบบดิพลอยด์ ไม่มีความแตกต่างทางพันธุกรรม
2. ไม่มีการสังเคราะห์ดีเอ็นเอ	2. มีการสังเคราะห์ดีเอ็นเอ
3. โครมาทิดแยกห่างออกจากกัน ไม่มีการบิดตัวไปในทิศทางเดียวกัน	3. โครมาทิดแยกห่างออกจากกัน แสดงการบิดตัวไปในทิศทางเดียวกัน เรียกว่า relational coiling
4. แต่ละโครมาทิดมีส่วนประกอบทางพันธุกรรมต่างกัน เนื่องจากคลอสซิงโอเวอร์	4. แต่ละโครมาทิดมีส่วนประกอบทางพันธุกรรมเหมือนกันทุกประการ

ในขั้นตอนสุดท้ายของการแบ่งเซลล์จะมีการแบ่งไซโทพลาซึมเกิดขึ้นโดยการสร้างเยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ ผลผลิตจากการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสจะได้เซลล์สืบพันธุ์ที่มีจำนวนโครโมโซมเป็นแฮพลอยด์ แต่อย่างไรก็ตามอาจพบกลไกการแบ่งเซลล์ที่ต่างไปเป็นผลให้เซลล์สืบพันธุ์ของพืชบางชนิดมีโครโมโซมเป็นดิพลอยด์ได้เช่นกัน