



ชีววิทยารังสี ทางการแพทย์

มนตรี ตั้งใจ

ภาควิชารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

คำนำ

ชีววิทยารังสี เป็นศาสตร์ทางคลินิกและวิทยาศาสตร์การแพทย์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลกระทบของรังสีก่อไอออนต่อสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบต่อสุขภาพ ความรู้ด้านชีววิทยารังสีมีความสำคัญและจำเป็นต่อการประกอบวิชาชีพรังสีเทคนิคอย่างยิ่ง ผู้เขียน แต่งและเรียบเรียงหนังสือเล่มนี้ขึ้นมา โดยมีจุดประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ด้านชีววิทยารังสีให้กับนักศึกษารังสีเทคนิค นักรังสีเทคนิค นักรังสีการแพทย์ และผู้ที่สนใจ

หนังสือเล่มนี้ประกอบด้วย 10 บท ได้แก่ บทที่ 1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเซลล์ บทที่ 2 รังสี บทที่ 3 ผลกระทบของรังสีต่อดีเอ็นเอและโครโมโซม บทที่ 4 กราฟการรอดชีวิตของเซลล์ บทที่ 5 การตอบสนองต่อรังสีของเซลล์ บทที่ 6 ผลของรังสีต่อเนื้อเยื่อและอวัยวะ บทที่ 7 ผลกระทบจากการรับรังสีทั้งตัว บทที่ 8 ชีววิทยารังสี: รังสีรักษา เวชศาสตร์นิวเคลียร์ และรังสีวินิจฉัย บทที่ 9 การป้องกันอันตรายจากรังสี และ บทที่ 10 รังสีปริมาณต่ำ: เพิ่มความเสี่ยงหรือไม่ ? โดยในแต่ละบทเรียนผู้เขียนได้สอดแทรกประสบการณ์จากการทำวิจัยทางด้านรังสีเทคนิค อีกทั้งผู้เขียนยังได้แสดงข้อคิดเห็น ข้อเสนอแนะและข้อสังเกตต่าง ๆ ไว้ด้วย

อนึ่ง ผู้เขียนหวังว่าหนังสือเล่มนี้สามารถก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้อ่านได้

รศ.ดร.มนตรี ตั้งใจ

สารบัญ

คำนิยาม.....	III
คำนำ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XIII
บทที่ 1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเซลล์.....	1
• โครงสร้างของเซลล์.....	1
• การแบ่งตัวของเซลล์.....	6
• เนื้อเยื่อ.....	11
บทที่ 2 รังสี.....	17
• รังสีเอกซ์.....	18
• ถอดบทเรียนจากงานวิจัยของผู้เขียน.....	19
• รังสีแกมมา.....	19
• อนุภาค.....	20
• หน่วยวัดรังสี.....	21
• อันตรกิริยาของอนุภาคมีประจุไฟฟ้า.....	27
• อันตรกิริยาของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า.....	28
• การถ่ายเทพลังงานเชิงเส้น.....	31
• ผลทางชีววิทยาสัมพัทธ์.....	32
• ผลกระทบโดยตรง.....	34
• ผลกระทบโดยอ้อม.....	35
• ระยะเวลาผลกระทบของรังสีชีววิทยา.....	36
บทที่ 3 ผลกระทบของรังสีต่อดีเอ็นเอและโครโมโซม.....	41
• ผลของรังสีต่อดีเอ็นเอ.....	42
• ผลกระทบของรังสีต่อโครโมโซม.....	44

• ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายของดีเอ็นเอและโครโมโซม.....	44
• ถอดบทเรียนจากงานวิจัยของผู้เขียน.....	47
บทที่ 4 กราฟการรอดชีวิตของเซลล์.....	51
• กราฟการรอดชีวิตในระดับหลอดทดลอง.....	52
• รูปแบบของกราฟสัดส่วนการรอดชีวิต.....	55
• รูปแบบ 1 เป้าหมาย ได้รับรังสี 1 ครั้ง.....	56
• รูปแบบหลายเป้าหมาย.....	60
• รูปแบบเชิงเส้น-กำลังสอง.....	64
• ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกราฟรอดชีวิต.....	66
• ถอดบทเรียนจากงานวิจัยของผู้เขียน.....	72
บทที่ 5 การตอบสนองต่อรังสีของเซลล์.....	77
• ผลของรังสีต่อไขมัน.....	77
• ผลของรังสีต่อโปรตีน.....	80
• ผลของรังสีต่อเซลล์.....	82
• ผลของรังสีต่อระยะต่างๆ ในวงจรชีวิตของเซลล์.....	93
• ถอดบทเรียนจากงานวิจัยของผู้เขียน.....	96
บทที่ 6 ผลของรังสีต่อเนื้อเยื่อและอวัยวะ.....	99
• การตอบสนองของเนื้อเยื่อต่อรังสีตามเซลล์ตัวอ่อน.....	99
• การแบ่งความไวต่อรังสีของเนื้อเยื่อในรูปแบบต่าง ๆ.....	101
• ผลของรังสีต่อเนื้อเยื่อและอวัยวะต่าง ๆ.....	107
• ถอดบทเรียนจากงานวิจัยของผู้เขียน.....	114
บทที่ 7 ผลกระทบจากการรับรังสีทั้งตัว.....	117
• อาการเจ็บป่วยอย่างเฉียบพลันหลังจากได้รับรังสี.....	118
• อาการเจ็บป่วยจากระบบสร้างเม็ดเลือดเสียหาย.....	118
• อาการเจ็บป่วยจากระบบทางเดินอาหารเสียหาย.....	119
• อาการเจ็บป่วยจากระบบหลอดเลือดและเส้นประสาท.....	119

• ระยะอาการเจ็บป่วยอย่างเฉียบพลันหลังจากได้รับรังสี.....	120
• ถอดบทเรียนจากงานวิจัยของผู้เขียน.....	123
บทที่ 8 ชีววิทยารังสี : รังสีรักษา เวชศาสตร์นิวเคลียร์และรังสีวินิจฉัย.....	127
• ชีววิทยารังสี: รังสีรักษา.....	127
• ชีววิทยารังสี: เวชศาสตร์นิวเคลียร์.....	133
• ชีววิทยารังสี: รังสีวินิจฉัย.....	142
• ถอดบทเรียนจากงานวิจัยผู้เขียน.....	147
บทที่ 9 การป้องกันอันตรายจากรังสี.....	161
• หลักการการป้องกันอันตรายจากรังสี.....	162
• อันตรายจากรังสีภายนอกร่างกาย.....	162
• ซีดจำกัดของปริมาณรังสี.....	165
• อันตรายจากรังสีภายในร่างกาย.....	167
• สัญลักษณ์เตือนภัยทางรังสี.....	168
• ถอดบทเรียนจากงานวิจัยผู้เขียน.....	169
บทที่ 10 รังสีปริมาณต่ำ : เพิ่มความเสี่ยงหรือไม่ ?.....	173
• ผลกระทบของรังสีปริมาณต่ำ.....	174
• ถอดบทเรียนจากงานวิจัยของผู้เขียน.....	178
ดัชนี.....	187

CHIANG MAI
UNIVERSITY PRESS

ประโยชน์และโทษของรังสี

อันตรายจากรังสี

ต่อชีวิตมนุษย์

เราป้องกันได้อย่างไร

พบคำตอบได้ใน

ชีววิทยารังสีทางการแพทย์

รศ.ดร.มนตรี ตังไจ



Ebook 260 บาท

**แนวคิดและความรู้
ชีววิทยารังสีการแพทย์
สร้างจากงานวิจัย จุดเด่นของหนังสือ
เล่มนี้คือ
การสอดแทรกและถอดบทเรียน
จากงานวิจัยของผู้เขียน
สู่ความรู้ชีววิทยารังสีการแพทย์**



CHIANG MAI
UNIVERSITY PRESS

ISBN (e-book): 978-616-398-459-3



9

786163

984593

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเซลล์

1

เค้าโครงบท

- โครงสร้างของเซลล์
- การแบ่งตัวของเซลล์
- เนื้อเยื่อ

เซลล์ คือ หน่วยชีวิตที่เล็กที่สุดของสิ่งมีชีวิต เซลล์หลาย ๆ เซลล์มารวมตัวกันและมีหน้าที่เดียวกันประกอบกันเป็นเนื้อเยื่อ เนื้อเยื่อรวมตัวกันประกอบกันเป็นอวัยวะต่าง ๆ และเมื่อหลายอวัยวะทำหน้าที่รวมกันประกอบกันเป็นระบบต่าง ๆ และร่างกายในที่สุด ร่างกายมนุษย์ประกอบด้วยเซลล์ประมาณล้านล้านเซลล์ ซึ่งเซลล์มีหลายรูปร่างและทำหน้าที่แตกต่างกัน เซลล์บางชนิดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เช่น เซลล์เม็ดเลือด ในขณะที่บางชนิดอยู่เป็นส่วนหนึ่งของเนื้อเยื่อและอวัยวะนั้นตลอดช่วงชีวิตของเซลล์ เช่น เซลล์ไขกระดูก เป็นต้น

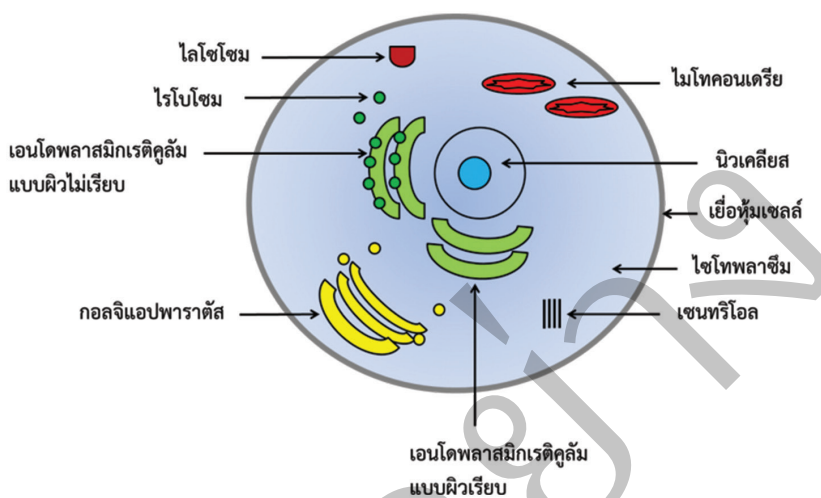
โครงสร้างของเซลล์

เซลล์ปกติประกอบด้วยส่วนประกอบย่อยต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 1.1 ซึ่งประกอบด้วย คือ

1. เยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane)
2. ไซโทพลาซึม (Cytoplasm)
3. ออร์แกเนลล์ (Organelles) ต่าง ๆ เช่น
 - เอนโดพลาสมิกเรติคูลัม (Endoplasmic reticulum)
 - ไรโบโซม (Ribosome)
 - กอลจิแอปพาราตัส (Golgi apparatus)
 - ไมโทคอนเดรีย (Mitochondria)



- ไลโซโซม (Lysosome)
- เซนทริโอล (Centriole)
- นิวเคลียส (Nucleus)



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของเซลล์

เยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane)

เยื่อหุ้มเซลล์ เป็นเยื่อบางอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่น อาจจะมีลักษณะเรียบหรือพับไปมา เป็นเยื่อกึ่งซึมผ่านได้ (Semipermeable) เยื่อหุ้มเซลล์ทำหน้าที่ห่อหุ้มเซลล์ ควบคุมการซึมผ่านเข้าออกของโมเลกุลต่าง ๆ เช่น น้ำ สารอาหาร และไอออนต่าง ๆ เยื่อหุ้มเซลล์ประกอบด้วยสารประกอบหลัก 2 ชนิด คือ ไขมันชนิดฟอสโฟไลปิด (Phospholipid) และโปรตีน เยื่อหุ้มเซลล์มีการจัดเรียงตัวลักษณะเป็น 2 ชั้น (Bilayer)

ไซโทพลาซึม (Cytoplasm)

ไซโทพลาซึม คือ ส่วนประกอบของเซลล์ที่อยู่ภายใต้เยื่อหุ้มเซลล์ แต่อยู่นอกนิวเคลียส ไซโทพลาซึมประกอบไปด้วย ส่วนที่เป็นโครงสร้างย่อย ๆ ภายในเซลล์ เรียกว่าออร์แกเนลล์ (Organelles) และส่วนที่เป็นของกึ่งเหลว เรียกว่าไซโทซอล (Cytosol) กระบวนการที่สำคัญต่าง ๆ เกิดขึ้นในไซโทพลาซึม เช่น ไกลโคไลซิส (Glycolysis)

เอนโดพลาสมิกเรติคูลัม (Endoplasmic reticulum) หรือร่างแหเอนโดพลาซึม

เอนโดพลาสมิกเรติคูลัม เป็นออร์แกเนลล์ชนิดหนึ่งของเซลล์ มีเยื่อหุ้ม 2 ชั้น มีลักษณะเป็นท่อแบนทบกันไปมา เรียกว่า ซิสเทิร์น (Cisternae) เอนโดพลาสมิกเรติคูลัม จะอยู่ต่อจากเยื่อชั้นนอกของเยื่อหุ้มนิวเคลียส เอนโดพลาสมิกเรติคูลัม มี 2 ชนิด คือ

เอนโดพลาสมิกเรติคูลัมแบบผิวไม่เรียบ (Rough endoplasmic reticulum)

เป็นชนิดที่มีไรโบโซมเกาะอยู่ที่ผิวด้านนอก ทำให้ลักษณะผิวดูขรุขระ มีหน้าที่ คือ การสังเคราะห์โปรตีนของไรโบโซมที่เกาะอยู่และลำเลียงสาร ได้แก่ โปรตีนที่สร้างได้ และสารอื่น ๆ เช่น ลิพิด

เอนโดพลาสมิกเรติคูลัมแบบผิวเรียบ (Smooth endoplasmic reticulum)

เป็นชนิดที่ไม่มีไรโบโซมเกาะอยู่ ทำให้ลักษณะผิวดูเรียบ และผนังของมันจะยอมให้สารประกอบ โมเลกุลใหญ่บางชนิดผ่านได้ มีหน้าที่คือลำเลียงสารต่าง ๆ เช่น อาร์เอ็นเอ (RNA) ลิพิด โปรตีน เอนไซม์ รวมทั้งกำจัดสารพิษซึ่งพบมากในเซลล์ของตับและสร้างสารสเตอรอยด์ซึ่งพบในเซลล์ที่ต่อมหมวกไต เซลล์ในอวัยวะ เซลล์ในรังไข่

ไรโบโซม (Ribosome)

ไรโบโซม เป็นออร์แกเนลล์ที่ไม่มีเยื่อหุ้มเซลล์ มีขนาดเล็กที่สุดและมีมากที่สุด มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 นาโนเมตร และประกอบด้วยไรโบโซมอล อาร์เอ็นเอ (Ribosomal RNA) 65% และโปรตีน 35% ไรโบโซมมีบทบาทสำคัญในการสังเคราะห์โปรตีนในสิ่งมีชีวิต โดยอ่านข้อมูลจากเอ็มอาร์เอ็นเอ (mRNA) ไปเป็นโปรตีน ซึ่งโปรตีนที่ถูกสังเคราะห์จะถูกส่งไปยังภายในเซลล์หรือภายนอกเซลล์

กอลจิแอปพาราตัส (Golgi apparatus)

กอลจิแอปพาราตัส มีรูปร่างเป็นลักษณะคล้ายขนม เรียกว่า ซิสเทิร์นนา (Cisterna หรือ Flattened sac) เป็นถุงแบน ๆ หรือเป็นท่อเรียงซ้อนกัน เป็นชั้น ๆ มีจำนวนไม่แน่นอน มีประมาณ 5-10 ชั้น มักพบ 2-8 อัน ตรงปลายของถุงมักโป่งออก ถุงเหล่านี้มีผนัง 2 ชั้น หรือยูนิตเมมเบรนเหมือน ๆ กับเยื่อหุ้มนิวเคลียส และเยื่อหุ้มเซลล์ และมีโครงสร้างคล้ายเอนโดพลาสมิกเรติคูลัมแบบผิวเรียบ ภายในถุงมีของเหลวบรรจุอยู่ กอลจิแอปพาราตัส ทำหน้าที่เก็บสะสมสารที่เซลล์สร้างขึ้น ก่อนที่จะปล่อยออกนอกเซลล์ ซึ่งสารส่วนใหญ่ เป็นสารโปรตีน มีการจัดเรียงตัวหรือจัดสภาพใหม่ ให้เหมาะสมกับสภาพของการใช้งาน



ไมโทคอนเดรีย (Mitochondria)

ไมโทคอนเดรีย มีลักษณะเป็นรูปร่างคล้ายไข่ ยาว 5-7 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2-1 ไมโครเมตร มีเยื่อหุ้ม 2 ชั้น คือชั้นนอกและชั้นใน โดยเยื่อชั้นในพับเข้าไปเป็นรอยหยักเรียกว่า คริสตี้ (Cristae) ภายในบรรจุของเหลวประกอบด้วยสารหลายชนิด เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) ไมโทคอนเดรียทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานของเซลล์ ภายในไมโทคอนเดรียสามารถพบดีเอ็นเอ (DNA) ได้เช่นเดียวกับในนิวเคลียสโดยเรียกว่า เอ็มทีดีเอ็นเอ (mtDNA)

ไลโซโซม (Lysosome)

ไลโซโซม เป็นออร์แกเนลล์ ที่มีเยื่อหุ้มเพียงชั้นเดียว มีหน้าที่ คือ ย่อยสลายอนุภาคและโมเลกุลของสารอาหาร เช่น โปรตีน ลิพิด คาร์โบไฮเดรต ภายในเซลล์ ย่อยหรือทำลายเชื้อโรคและสิ่งแปลกปลอมต่าง ๆ ที่เข้าสู่ร่างกายหรือเซลล์ ย่อยสลายเซลล์แบคทีเรีย ทำลายเซลล์ที่ตายแล้วหรือเซลล์ที่มีอายุมาก

เซนทริโอล (Centriole)

เซนทริโอล เป็นออร์แกเนลล์ส่วนที่อยู่ใกล้นิวเคลียส มีขนาดเล็ก มีรูปร่างคล้ายท่อทรงกระบอก ในแต่ละเซลล์จะมีเซนทริโอล 2 อัน เรียงในลักษณะตั้งฉากกัน หน้าที่ของเซนทริโอล คือ ช่วยในการเคลื่อนที่ของโครโมโซมในขณะที่มีการแบ่งเซลล์

นิวเคลียส (Nucleus)

นิวเคลียส คือ ออร์แกเนลล์ที่มีเยื่อหุ้ม ภายในบรรจุพันธุกรรม (Genetic) ซึ่งจัดเรียงตัวเป็น ดีเอ็นเอสายยาวพันรอบโปรตีนฮิสโตน (Histone protein) เป็นโครโมโซม (Chromosome) ยีน (Gene) ต่าง ๆ ภายในโครโมโซมเหล่านี้ รวมเรียกว่า นิวเคลียส จีโนม (Nuclear genome) หน้าที่ของนิวเคลียส คือ การคงสภาพการรวมตัวของยีนเหล่านี้ และควบคุมการทำงานของเซลล์โดยการควบคุมการแสดงออกของยีน (Gene expression) สารประกอบทางเคมีของนิวเคลียส ประกอบด้วย

1. ดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (Deoxyribonucleic acid) หรือ ดีเอ็นเอ (DNA)

เป็นส่วนประกอบของโครโมโซมนิวเคลียส

2. ไรโบนิวคลีอิก (Ribonucleic acid) หรือ อาร์เอ็นเอ (RNA)

ซึ่งเป็นส่วนที่พบภายในนิวเคลียสโดยเป็นส่วนประกอบของนิวคลีโอลัส (Nucleolus)

3. โปรตีน

ที่สำคัญคือโปรตีนฮิสโตน โปรตีนโพรตามีน (Protamine protein) ทำหน้าที่เชื่อมเกาะอยู่กับดีเอ็นเอและโปรตีนเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก (Nucleic acid) และเมแทบอลิซึมของกรดนิวคลีอิก

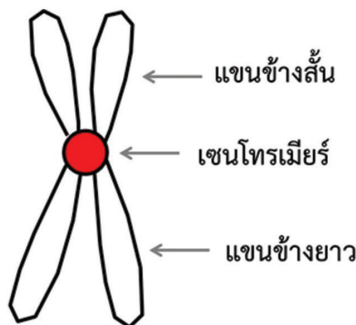
เยื่อหุ้มนิวเคลียส (Nuclear envelope)

เป็นเยื่อ 2 ชั้นที่หุ้มทั้งออร์แกเนลล์ และทำหน้าที่แยกองค์ประกอบภายในออกจากไซโทพลาซึม เนื่องจากเยื่อหุ้มนิวเคลียสมีลักษณะ เป็นเยื่อเลือกผ่านที่โมเลกุลส่วนใหญ่ผ่านทะลุเข้าออกไม่ได้ ดังนั้น เยื่อหุ้มนิวเคลียสจึงต้องมีนิวเคลียร์พอร์ (Nuclear pore) หรือช่องที่จะให้สารเคลื่อนผ่านเยื่อหุ้ม ช่องเหล่านี้ทะลุผ่านเยื่อหุ้มนิวเคลียสให้โมเลกุลขนาดเล็กและไอออนเคลื่อนที่เข้าออกนิวเคลียสได้ การเคลื่อนที่เข้าออกของสารโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน ต้องมีการควบคุมและต้องใช้โปรตีนช่วยขนส่งสาร (Carrier protein)

โครโมโซม (Chromosome)

เป็นที่เก็บของหน่วยพันธุกรรม หรือ ยีน ซึ่งยีนประกอบด้วยดีเอ็นเอทำหน้าที่กำหนดลักษณะทางพันธุกรรมต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิต

ในภาวะปกติ โครโมโซมมีลักษณะคล้ายเส้นด้ายบาง ๆ เรียกว่า โครมาทิน (Chromatin) ขดตัวอยู่ในนิวเคลียส เมื่อเซลล์เริ่มแบ่งตัว เส้นโครมาทินจะหดตัวสั้นเข้ามีลักษณะเป็นแท่ง เรียกว่า โครโมโซม แต่ละโครโมโซมประกอบด้วยแขนสองข้าง เรียกว่า โครมาทิด (Chromatid) โดยแขนอันสั้น เรียกว่า แขนสั้น อันยาว เรียกว่า แขนยาว ซึ่งแขนทั้งสองข้างจะมีจุดเชื่อมกัน เรียกว่า เซนโทรเมียร์ (Centromere) แสดงดังภาพที่ 1.2

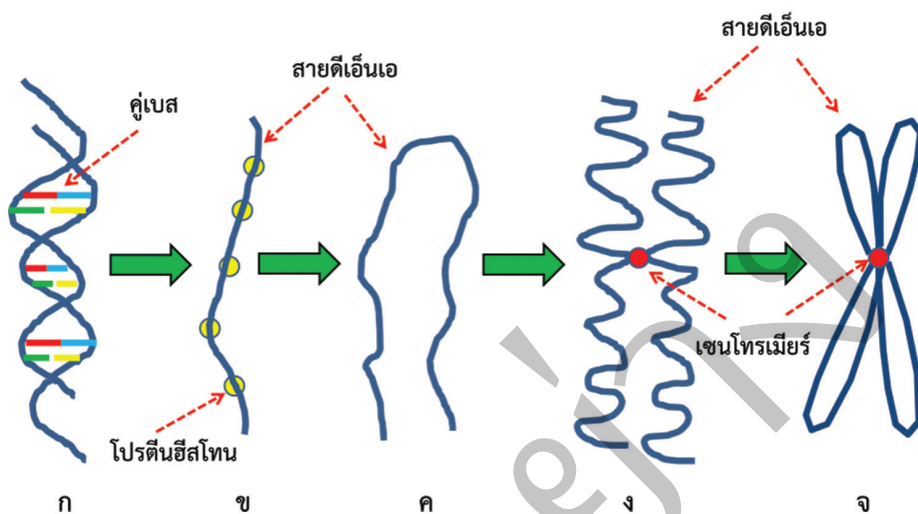


ภาพที่ 1.2 โครโมโซม



โครมาทิน เป็นสารนิวคลีโอโปรตีน ซึ่งก็คือดีเอ็นเอสายยาวสายเดียวที่พันรอบโปรตีนฮิสโตนเอาไว้ ทำให้รูปร่างโครมาทินคล้ายลูกปัดที่เรียงต่อ ๆ กัน แล้วมีดีเอ็นเอพันรอบลูกปัดนั้น

ความสัมพันธ์ระหว่างดีเอ็นเอ โครมาทิน โครมาทิด และ โครโมโซม แสดงดังภาพที่ 1.3



ภาพที่ 1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างดีเอ็นเอกับโครโมโซม
ก คือ ดีเอ็นเอ ข คือ ดีเอ็นเอ + โปรตีนฮิสโตน ค คือ โครมาทิน ง คือ โครมาทิด จ คือ โครโมโซม

การแบ่งตัวของเซลล์ (Cell division)

การแบ่งตัวของเซลล์ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังภาพที่ 1.4 ได้แก่

1. การแบ่งนิวเคลียสของเซลล์ (Karyokinesis หรือ Nuclear division)

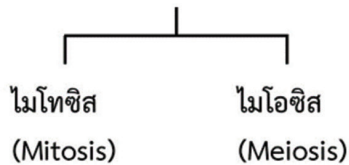
มี 2 รูปแบบ คือ

1.1 การแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส (Mitosis) เป็นการแบ่งซึ่งทำให้นิวเคลียสที่ได้ทั้งหมดมีคุณภาพและปริมาณเหมือนกัน โครโมโซมหรือหน่วยพันธุกรรมภายในเท่าเดิม การแบ่งเซลล์แบบไมโทซิสทำให้ได้เซลล์ใหม่ 2 เซลล์ เซลล์ที่แบ่งตัวแบบนี้คือเซลล์ร่างกาย (Somatic cell) ก่อนที่จะแบ่งเซลล์ เซลล์จะมีการเตรียมตัวให้พร้อมก่อน ระยะเวลาที่เซลล์เตรียมความพร้อมก่อนการแบ่งจนถึงการแบ่งนิวเคลียสและไซโทพลาซึมจนเสร็จสิ้น เรียกว่า วงจรชีวิตของเซลล์ (Cell cycle) ดังภาพที่ 1.5 ซึ่งพบเฉพาะการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส

1.2 การแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส (Meiosis) เป็นการแบ่งเซลล์ที่มีขั้นตอนมากกว่าการแบ่งแบบไมโทซิส สิ่งที่ได้คือนิวเคลียสที่มีหน่วยพันธุกรรมลดลงครึ่งหนึ่ง การแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสทำให้ได้เซลล์ใหม่ 4 เซลล์ เซลล์ที่แบ่งตัวแบบนี้ คือ เซลล์สืบพันธุ์

2. การแบ่งไซโทพลาซึม (Cytokinesis หรือ Cytoplasm division)

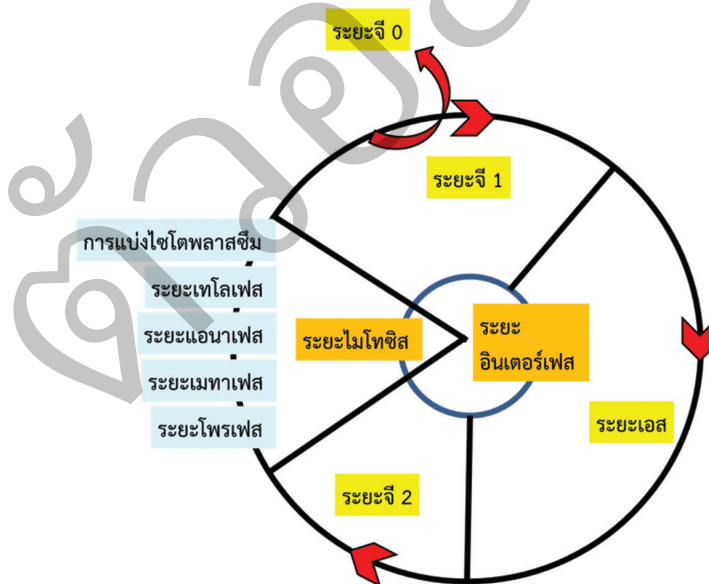
การแบ่งตัวของเซลล์
(Cell division) = การแบ่งนิวเคลียส
(Karyokinesis) + การแบ่งไซโทพลาซึม
(Cytokinesis)



ภาพที่ 1.4 ขั้นตอนโดยรวมการแบ่งตัวของเซลล์

การแบ่งเซลล์ไมโทซิส (Mitosis)

เซลล์ของมนุษย์โดยทั่วไป ใช้เวลาที่จะแบ่งเซลล์ครบ 1 รอบประมาณ 24 ชั่วโมง วงจรชีวิตเซลล์ประกอบด้วย 2 ระยะใหญ่ ๆ ได้แก่ ระยะอินเตอร์เฟส (Interphase) และ ระยะไมโทซิส (Mitosis phase, M phase) แสดงดังภาพที่ 1.5



ภาพที่ 1.5 วงจรชีวิตของเซลล์



1. ระยะอินเตอร์เฟส เป็นระยะที่เซลล์เจริญเติบโต และคัดลอกโครโมโซม กินระยะเวลาถึง 90% ของวงจรชีวิตเซลล์ อาจเรียกระยะนี้ว่า ระยะเตรียมพร้อม สามารถแบ่งออกเป็น 3 ระยะย่อย ๆ ได้แก่

- **ระยะจี 1 (G1 phase)** : เซลล์เจริญเติบโต โดยมีการสร้างโปรตีนและส่วนประกอบต่าง ๆ ของเซลล์ออร์แกเนลล์ เช่น ไมโทคอนเดรีย
- **ระยะเอส (S phase)** : เซลล์เจริญเติบโตมากขึ้น S ย่อมาจาก Synthesis คือการเพิ่มจำนวนโครโมโซม มีการจำลองตัวของดีเอ็นเอ เพิ่มจาก 1 ชุดเป็น 2 ชุด เพื่อเตรียมสารพันธุกรรมไว้ให้เซลล์ใหม่ต่อไป ระยะนี้ใช้เวลาประมาณ 10-12 ชั่วโมง หรือเกือบครึ่งหนึ่งของเวลาที่ใช้ทั้งหมดของวงจรชีวิตของเซลล์
- **ระยะจี 2 (G2 phase)** : เซลล์เจริญเติบโตพอ พร้อมสำหรับการแบ่งเซลล์

2. ระยะไมโทซิส เป็นระยะที่เซลล์แบ่งตัว สามารถแบ่งย่อยออกเป็น ไมโทซิส และการแบ่งไซโทพลาสซึม ระยะไมโทซิส แบ่งออกเป็นระยะย่อย ๆ ได้แก่

- **ระยะโพรเฟส (Prophase)** ระยะนี้ในนิวเคลียส สารพันธุกรรมจะพันกันแน่นเข้าจนเริ่มเห็นเป็นรูปโครโมโซม เซนทริโอลเคลื่อนที่ไปยังแต่ละขั้วของเซลล์ เมื่อถึงช่วงสุดท้ายของระยะนี้ที่บางครั้งเรียกว่า โพรเมทาเฟส (Prometaphase) จะมีการสร้างเส้นใยสปินเดิล (Spindle fiber) ไปจับยังบริเวณไคโนโตคอร์ (Kinetochore) ของโครโมโซม เยื่อหุ้มนิวเคลียสสลายไป
- **ระยะเมทาเฟส (Metaphase)** เส้นใยสปินเดิลสร้างเสร็จสมบูรณ์ โครโมโซมเรียงตัวอยู่บริเวณตรงกลางเซลล์
- **ระยะแอนาเฟส (Anaphase)** ซิสเตอร์โครมาติด (Sister chromatid) ของโครโมโซมแต่ละอันถูกดึงแยกจากกันไปยังขั้วของเซลล์ การดึงนี้ใช้พลังงานอะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (Adenosine triphosphate, ATP) ระยะนี้สิ้นสุดเมื่อโครโมโซมทั้งหมดไปถึงขั้วของเซลล์
- **ระยะเทโลเฟส (Telophase)** และการแบ่งไซโทพลาสซึม เป็นระยะที่ตรงข้ามกับโพรเฟส คือโครโมโซมคลายตัวเป็นเส้นใยโครมาตินเหมือนเดิม มีการสร้างเยื่อหุ้มนิวเคลียสขึ้นอีกครั้ง จากนั้นจึงตามมาด้วยการแบ่งไซโทพลาสซึม

ในเซลล์บางชนิด จะไม่แบ่งตัวอีกต่อไป คือ เซลล์จะไม่เข้าสู่วงจรชีวิตของเซลล์อีก เข้าสู่ระยะจี 0 (G0 phase) จนกระทั่งเซลล์ชราภาพ (Cell aging) และตายไปในที่สุด แต่เซลล์บางชนิด จะพักตัวหรืออยู่ใน ระยะจี 0 ช่วงระยะเวลาหนึ่ง ถ้าจะกลับมาแบ่งตัวอีก

ก็จะเข้าวงจรชีวิตของเซลล์ต่อไป เช่น เซลล์ประสาทจะเข้าไปในระยะจี 0 ซึ่งเป็นช่วงที่เซลล์จะไม่มี การแบ่งเซลล์อีกและจะไม่สามารถออกจากระยะนี้ได้

การแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส (Meiosis)

การแบ่งแบบไมโอซิสนั้นไม่เป็นวงจรชีวิตของเซลล์ เนื่องจากการแบ่งนิวเคลียสของเซลล์แบบไมโอซิสเกิดขึ้นในเซลล์สืบพันธุ์ซึ่งไม่สามารถเจริญเติบโตหรือแบ่งต่อไปได้ หากไม่ได้รับการผสมพันธุ์เซลล์จะตาย

การแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส (แสดงดังภาพที่ 1.6) เป็นการแบ่งเซลล์ที่พบในการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ แบ่งเป็นระยะได้ 2 ระยะ ดังนี้

1. ระยะอินเตอร์เฟส มีการจำลองดีเอ็นเอ มีการสังเคราะห์อาร์เอ็นเอ และโปรตีนเพื่อเตรียมพร้อมที่จะแบ่งตัว โครโมโซมประกอบด้วย 2 โครมาทิด เยื่อหุ้มนิวเคลียสยังไม่สลายไป

2. ระยะแบ่งเซลล์ แบ่งออกเป็น 2 ระยะคือ

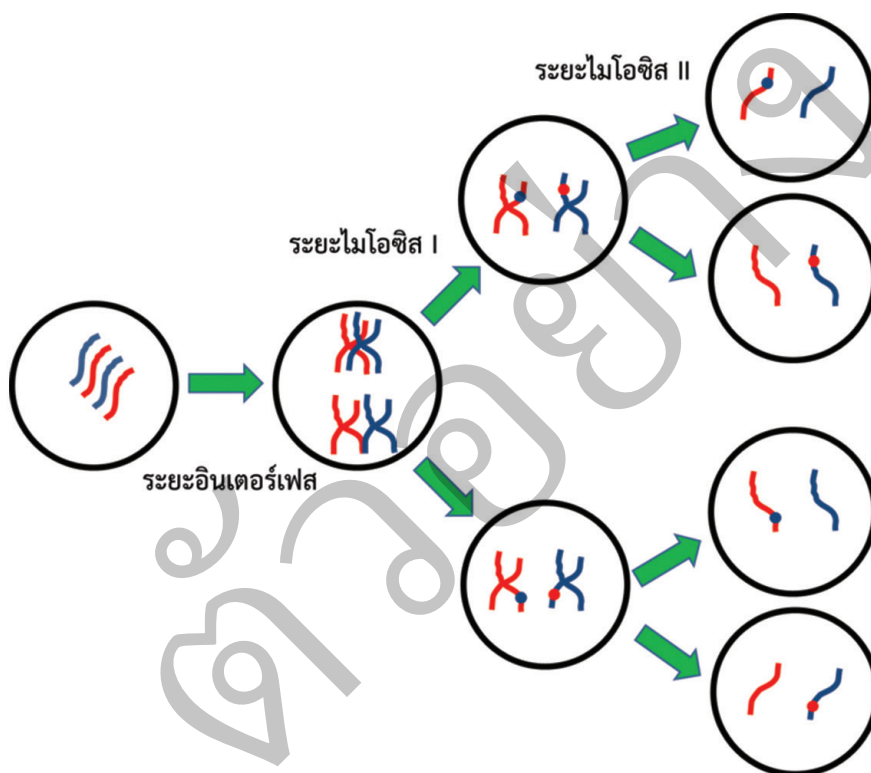
2.1 ระยะไมโอซิส I (Meiosis I) เป็นระยะที่จำนวนโครโมโซมลดลงครึ่งหนึ่ง คือ

- **ระยะโพรเฟส I (Prophase I)** เป็นช่วงที่ใช้เวลาถึง 90% ของการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส โครมาทินหดตัวเข้ามาเป็นโครโมโซม โครโมโซมที่เป็นคู่กัน (Homologous chromosome) มาเข้าคู่กัน ทำให้เห็นแต่ละคูมี 4 โครมาทิด เกิดการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนระหว่างซิสเตอร์ โครมาทิด ซึ่งเรียกว่า ครอสซิง โอเวอร์ (Crossing over)
- **ระยะเมทาเฟส I (Metaphase I)** โครโมโซมที่มี 4 โครมาทิดมาเรียงตัวที่ระนาบกลางเซลล์ มีเส้นใยสปินเดิลจับที่ไคเนโทคอร์
- **ระยะแอนาเฟส I (Anaphase I)** เป็นระยะที่มีการดึงโครโมโซมที่เป็นคู่กันออกจากกัน เป็นระยะที่เกิดการลดจำนวนโครโมโซม
- **ระยะเทโลเฟส I (Telophase I)** และการแบ่งไซโทพลาสซึม แต่ละขั้วของเซลล์ มีโครโมโซมเป็นแฮพลอยด์ (Haploid, n) 2 ชุด (แต่ยังมีซิสเตอร์ โครมาทิดอยู่) มีการแบ่งไซโทพลาสซึมและสร้างเยื่อหุ้มนิวเคลียสขึ้นใหม่

2.2 ระยะไมโอซิส II (Meiosis II) ระยะโพรเฟส II (Prophase II) เป็นระยะที่สร้างเส้นใยสปินเดิลเพื่อดึงซิสเตอร์ โครมาทิด ออกจากกัน



- **ระยะเมทาเฟส II (Metaphase II)** ซิสเตอร์โครมาทิดเรียงอยู่กึ่งกลางเซลล์
- **ระยะแอนาเฟส II (Anaphase II)** เป็นระยะที่ดึงซิสเตอร์โครมาทิดออกจากกัน
- **ระยะเทโลเฟส II (Telophase II)** และการแบ่งไซโทพลาสซึม มีการสร้างเยื่อหุ้มนิวเคลียสและแบ่งไซโทพลาสซึมตามมา ในที่สุดจะได้เซลล์ลูก 4 เซลล์ ซึ่งมีโครโมโซมเป็นแฮพลอยด์ (n)



ภาพที่ 1.6 การแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส

เมื่อเปรียบเทียบการแบ่งเซลล์แบบ ไมโทซิสและไมโอซิสพบว่ามี ความแตกต่างกันหลายข้อ แสดงดังตารางที่ 1.1