**1. บทนำ: ทฤษฎีเซลล์และภาพรวมการทำงานของเซลล์**

• **ทฤษฎีเซลล์ (Cell Theory)** ○ สิ่งมีชีวิตทุกชนิดประกอบด้วยเซลล์ (หนึ่งเซลล์หรือหลายเซลล์) ○ เซลล์เป็นหน่วยโครงสร้างและหน้าที่พื้นฐานของสิ่งมีชีวิต ○ เซลล์ใหม่เกิดจากการแบ่งตัวของเซลล์เดิม (การสืบพันธุ์ของเซลล์) • **ระดับโครงสร้างและการจัดระเบียบ**: โมเลกุล → ออร์แกเนลล์ → เซลล์ → เนื้อเยื่อ → อวัยวะ → ระบบอวัยวะ → สิ่งมีชีวิต → ประชากร → ชุมชน → ระบบนิเวศ • **ประเภทของเซลล์** ○ **โพรแคริโอต**: ไม่มีนิวเคลียสแท้จริง ดีเอ็นเอกลมอยู่ในนิวคลีออยด์ ไม่มีออร์แกเนลล์มีเยื่อหุ้มแบบซับซ้อน (เช่น แบคทีเรีย อาร์เคีย) ○ **ยูแคริโอต**: มีนิวเคลียสและออร์แกเนลล์มีเยื่อหุ้ม (พืช สัตว์ รา โปรติสท์) • **เซลล์พืช vs เซลล์สัตว์ (ภาพรวม)** ○ พืช: มี **ผนังเซลล์เซลลูโลส**, **คลอโรพลาสต์**, **แวคิวโอลถาวรขนาดใหญ่** ○ สัตว์: **ไม่มีผนังเซลล์**, มี **เซนทริโอล/ไลโซโซม** ชัดเจนกว่า, แวคิวโอลเล็ก/ชั่วคราว

**2. กล้องจุลทรรศน์: หลักการ ส่วนประกอบ เทคนิค และการคำนวณ**

**2.1 ประเภทและหลักการทำงาน** • **แสงเชิงประกอบ (Compound Light Microscope)**: ใช้แสงผ่านตัวอย่างและเลนส์หลายชิ้น ขยายภาพได้ ~40×–1000×; **กำลังแยกภาพ (resolution)** ~0.2 µm • **สเตอริโอ/กล้องแยกภาพ (Dissecting Microscope)**: สำหรับวัตถุชิ้นใหญ่ ภาพ 3D กำลังขยายต่ำ • **อิเล็กตรอน (TEM/SEM)**: ใช้ลำอิเล็กตรอน ○ **TEM**: ผ่านตัวอย่างบาง → เห็นโครงสร้างภายใน ความละเอียดระดับนาโนเมตร ○ **SEM**: สแกนผิว → ภาพพื้นผิว 3 มิติ ความละเอียดสูง

**2.2 ส่วนประกอบหลัก (กล้องแสง)** • **เลนส์ใกล้วัตถุ** (4×, 10×, 40×, 100×(ออยล์)) + **เลนส์ใกล้ตา** (เช่น 10×) → **กำลังขยายรวม = เลนส์ใกล้วัตถุ × เลนส์ใกล้ตา** • **แท่นวางสไลด์**, **ไดอะแฟรม/คอนเดนเซอร์**, **ปุ่มปรับหยาบ/ละเอียด**, **แหล่งกำเนิดแสง**

**2.3 เทคนิคพื้นฐาน** • การเตรียมสไลด์ (ชื้น/แห้ง), การย้อมสี (เมทิลีนบลู ไอโอดีน ฯลฯ), การใช้น้ำมัน immersive ที่ 100× • การโฟกัส: ใช้กำลังต่ำเริ่มก่อน ปรับหยาบ แล้วค่อยเพิ่มกำลังและปรับละเอียด • ความปลอดภัยและการดูแลรักษา: ปิดไฟ ลดกำลังขยาย เก็บด้วยฝาครอบ เช็ดเลนส์ด้วยกระดาษเลนส์เท่านั้น

**2.4 การคำนวณและการประเมินภาพ** • **กำลังขยายรวม** และการประมาณ **ขนาดวัตถุ** จากเส้นผ่านศูนย์กลางลานตา • ปัจจัยที่มีผลต่อความคมชัด/คอนทราสต์: ช่องรับแสง, การย้อม, ความหนาของตัวอย่าง

**3. โครงสร้างและหน้าที่ของออร์แกเนลล์**

**3.1 เยื่อหุ้มเซลล์และโมเดลฟลูอิดโมเสก** • **ฟอสโฟลิพิดสองชั้น**: หัวชอบน้ำ‑หางไม่ชอบน้ำ → เป็นเกราะเลือกผ่าน (selective permeability) • **โปรตีนเยื่อ**: ช่องทาง/ตัวพา/ตัวรับ/เอนไซม์/ยึดเกาะ • **คอเลสเทอรอล**: ควบคุมความลื่นไหลของเยื่อหุ้ม • **คาร์โบไฮเดรตบนผิว** (ไกลโคโปรตีน/ไกลโคลิพิด): เอกลักษณ์เซลล์ สื่อสาร/จำแนกเซลล์

**3.2 นิวเคลียสและสารพันธุกรรม** • **เยื่อหุ้มนิวเคลียสสองชั้น** + **รูนิวเคลียร์พอร์** • **โครมาติน/โครโมโซม**: DNA + โปรตีนฮิสโตน; มี **นิวคลีโอลัส** สังเคราะห์ rRNA/ประกอบไรโบโซม

**3.3 ระบบเอนโดเมมเบรน** • **ไรโบโซม**: แปลรหัสสร้างโปรตีน (อิสระในไซโทซอล/เกาะ rER) • **rER (Endoplasmic Reticulum ขรุขระ)**: สังเคราะห์โปรตีนส่งออก/แทรกเมมเบรน • **sER (เรียบ)**: สังเคราะห์ลิพิด/สเตอรอยด์, กำจัดพิษ, เก็บ Ca²⁺ (กล้ามเนื้อ) • **กอลจิบอดี**: รับ‑ปรับแต่ง‑แพ็กและส่งโปรตีน/ลิพิด (cis → trans) • **ไลโซโซม**: ย่อยภายใน (autophagy) และย่อยวัตถุที่รับเข้า (heterophagy) • **เวสิเคิล/แวคิวโอล**: เก็บ/ลำเลียง/ควบคุมน้ำ (แวคิวโอลกลางในพืช)

**3.4 ออร์แกเนลล์พลังงาน** • **ไมโทคอนเดรีย**: ศูนย์กลางการสร้าง ATP แบบใช้ออกซิเจน; มี DNA/ไรโบโซมของตนเอง • **คลอโรพลาสต์** (พืช/สาหร่าย): สังเคราะห์ด้วยแสง; มีไทลาคอยด์‑สโตรมา‑DNA ของตนเอง

**3.5 ไซโทสเกเลตอนและการเคลื่อนไหว** • **ไมโครทูบูล (tubulin)**: โครงร่าง การลำเลียงภายใน ไมโทติกสปินเดิล; ซิเลีย/แฟลเจลลา • **ไมโครฟิลาเมนต์ (แอกติน)**: การหดตัวของเซลล์/ไมโครวิลไล • **อินเตอร์มีเดียตฟิลาเมนต์**: ความทนทานเชิงกล/ยึดออร์แกเนลล์ • **จังค์ชันระหว่างเซลล์**: ไทต์/แอดฮีเรนส์/เดสมอโซม/แกปจังค์ชัน; **พลาสโมเดสมาตา**ในพืช

**4. การลำเลียงสารผ่านเยื่อหุ้มเซลล์**

**4.1 การแพร่ (Diffusion) และออสโมซิส (Osmosis)** • การเคลื่อนจากเข้มข้นสูง → ต่ำ (ตามกราเดียนต์) จนถึงดุลยภาพ • **ออสโมซิส**: การแพร่น้ำผ่านเยื่อเลือกผ่านเพื่อตอบสนองความต่างศักย์น้ำ/ศักย์ออสโมติก • **สถานะสารละลายและผลต่อเซลล์** ○ **ไฮเปอร์โทนิก**: น้ำออกจากเซลล์ → สัตว์เหี่ยว/พืชพลาสโมไลซิส ○ **ไฮโปโทนิก**: น้ำเข้าสู่เซลล์ → เซลล์สัตว์สลาย (เฮโมไลซิส)/พืชเต่ง **turgid** (ผนังช่วยพยุง) ○ **ไอโซโทนิก**: น้ำเข้าออกเท่ากัน → สมดุลปริมาตร

**4.2 การแพร่แบบมีตัวพา (Facilitated Diffusion)** • ผ่าน **โปรตีนช่องทาง (channel)** หรือ **โปรตีนตัวพา (carrier)** เฉพาะเจาะจง ไม่ใช้พลังงาน

**4.3 การลำเลียงแบบใช้พลังงาน (Active Transport)** • **ปฐมภูมิ**: ใช้พลังงานโดยตรงจาก ATP (เช่น **ปั๊ม Na⁺/K⁺** ในเซลล์สัตว์) • **ทุติยภูมิ**: ใช้กราเดียนต์ไอออนที่สร้างไว้พาคู่ (co‑transport)

**4.4 การลำเลียงแบบมวล (Bulk Transport)** • **เอกโซไซโทซิส**: ส่งออกสารโดยหลอมเวสิเคิลกับเยื่อหุ้ม • **เอนโดไซโทซิส**: ฟาโกไซโทซิส/พิโนไซโทซิส/รับจำเพาะผ่านตัวรับ (RME)

**4.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการลำเลียง** • อุณหภูมิ ขนาดโมเลกุล ความต่างความเข้มข้น พื้นที่ผิว ความสามารถละลายในไขมัน และจำนวนโปรตีนพา/ช่องทาง

**5. เมแทบอลิซึมระดับเซลล์และเอนไซม์**

**5.1 พลังงานและ ATP** • **ATP** เป็น “สกุลเงินพลังงาน” ของเซลล์: ATP → ADP + Pi ปล่อยพลังงานขับเคลื่อนปฏิกิริยาดูดพลังงาน

**5.2 เอนไซม์** • ลดพลังงานก่อกำเนิด โดยไม่ถูกใช้หมด/ไม่เปลี่ยนดุลเคมี • **Active site** จับสารตั้งต้น → **ES complex** → ผลิตภัณฑ์ • ปัจจัยที่มีผล: อุณหภูมิ pH ความเข้มข้นเอนไซม์/สารตั้งต้น ตัวร่วม (cofactor/coenzyme) ตัวยับยั้ง (แข่งขัน/ไม่แข่งขัน)

**5.3 การหายใจระดับเซลล์ (Aerobic Respiration)** • **ไกลโคไลซิส (ไซโทซอล)**: กลูโคส → ไพรูเวต 2 โมเลกุล; ได้ **ATP สุทธิ 2** + **NADH 2** • **เชื่อมต่อ (Pyruvate oxidation/Link reaction; ไมโทคอนเดรีย)**: ไพรูเวต → อะเซทิล‑CoA + CO₂; ได้ **NADH 2**/กลูโคส • **วัฏจักรเครบส์ (เมทริกซ์ไมโทคอนเดรีย)**: ต่ออะเซทิล‑CoA → CO₂; ได้ **NADH 6, FADH₂ 2, GTP/ATP 2**/กลูโคส • **ETC + เคมีออสโมซิส (คริสตี/เยื่อชั้นใน)**: อิเล็กตรอนไหลผ่านคอมเพล็กซ์ → ปั๊ม H⁺ → **ATP synthase** สร้าง ATP รวมราว **~30–32 ATP/กลูโคส** (ขึ้นกับชัตเติล/สภาวะ)

**5.4 การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน/การหมัก (Anaerobic/Fermentation)** • **กล้ามเนื้อลาย**: ไพรูเวต → **แลกเตต** (รีไซเคิล NAD⁺); เมื่อมี O₂ ตับเปลี่ยนแลกเตตกลับเป็นไพรูเวต (**Cori cycle**) • **ยีสต์**: ไพรูเวต → เอทานอล + CO₂ (การเกิดฟอง/กลิ่นในของหมัก)

**6. การสื่อสารของเซลล์ (กล่าวโดยย่อเพื่อเชื่อมโยงการทำงาน)**

• รูปแบบสัญญาณ: ออโตครายน์ พาราครายน์ เอ็นโดครายน์ ซินแนปติก • ขั้นตอน: รับสัญญาณ (reception; ตัวรับเมมเบรน/ภายใน) → ส่งต่อสัญญาณ (transduction; second messengers เช่น cAMP, Ca²⁺) → ตอบสนอง (response)

**7. วัฏจักรของเซลล์และการแบ่งเซลล์**

**7.1 วัฏจักรของเซลล์ (Cell Cycle)** • **G₁**: เซลล์เติบโต สังเคราะห์โปรตีน/ออร์แกเนลล์ • **S**: จำลอง DNA (duplicated chromosomes) • **G₂**: เตรียมเข้าสู่การแบ่ง (สังเคราะห์ไมโครทูบูล/โปรตีนสไปนเดิล) • **M phase**: ไมโทซิส + ไซโตไคเนซิส • **จุดควบคุม (Checkpoints)**: G₁, G₂, M; ควบคุมโดย cyclins‑CDKs; ความผิดปกติอาจนำไปสู่การแบ่งไม่จำกัด/มะเร็ง

**7.2 ไมโทซิส (Mitosis)** • **โพรเฟส**: โครมาตินข้นเป็นโครโมโซม นิวเคลียร์เอนเวลอปสลาย สไปนเดิลก่อตัว • **เมทาเฟส**: โครโมโซมเรียงบนระนาบกึ่งกลาง (metaphase plate) • **แอนาเฟส**: โครมาทิดพี่น้องถูกดึงแยกไปคนละขั้ว • **เทโลเฟส**: เกิดนิวเคลียร์เอนเวลอปใหม่ โครโมโซมคลาย • **ไซโตไคเนซิส**: เซลล์สัตว์เกิด **ร่องรัด (cleavage furrow)**; พืชสร้าง **แผ่นเซลล์ (cell plate)**

**7.3 ไมโอซิส (Meiosis)** • ลดจำนวนชุดโครโมโซมจาก **2n → n** สร้างเซลล์สืบพันธุ์ (แกมีต) • **ไมโอซิส I**: จับคู่โครโมโซมเหมือน (synapsis; จิ๋งก์) และ **แลกเปลี่ยนชิ้นส่วน (crossing‑over)**; แยกโครโมโซมเหมือนไปคนละขั้ว → สิ้นสุดได้เซลล์ **n** • **ไมโอซิส II**: แยกโครมาทิดพี่น้อง คล้ายไมโทซิส → รวมได้ 4 เซลล์ **n** ที่ไม่เหมือนกัน • แหล่งความหลากหลาย: crossing‑over + การเรียงตัวอิสระ (independent assortment) + การผสมของแกมีต • ความผิดปกติ: **nondisjunction** → aneuploidy (เช่น Trisomy 21)

**7.4 เปรียบเทียบสรุป** • **ไมโทซิส**: เจริญเติบโต/ซ่อมแซม → 2 เซลล์ **2n** เหมือนกัน • **ไมโอซิส**: สืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ → 4 เซลล์ **n** ต่างกัน

**8. ศัพท์สำคัญ (Glossary) และกรอบคิด**

• **Selective permeability**: ความสามารถของเยื่อหุ้มในการเลือกผ่าน • **Tonicity**: สถานะเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายภายนอก/ภายในเซลล์ • **Endomembrane system**: rER‑sER‑Golgi‑vesicle‑lysosome • **Chemiosmosis**: กลไกสร้าง ATP จากการไหลของโปรตอนผ่าน ATP synthase • **Checkpoint (G₁/G₂/M)**: ระบบควบคุมการก้าวหน้าของวัฏจักร • **Nondisjunction**: การไม่แยกตัวของโครโมโซม/โครมาทิดระหว่างไมโอซิส