การลำเลียงสารเข้าและออกจากเซลล์

ประเภทของการลำเลียงสารเข้าและออกจากเซลล์

การลำเลียงสารเข้าและออกจากเซลล์

จำแนกออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

❶ **การลำเลียงสารโดยผ่านเยื่อหุ้มเซลล์** แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การลำเลียงสารผ่านเยื่อหุ้มเซลล์โดยไม่ใช้พลังงานจากเซลล์ (Passive transport) ได้แก่

- การแพร่ (Diffusion)
  - การแพร่โดยอาศัยตัวพา (Facilitated diffusion)
  - การแพร่ธรรมดา (Simple diffusion)
- ออสโมซิส (Osmosis)
- ไดอะไลซิส (Dialysis)
- อิมบิบิชั่น (Imbibition)
- การแลกเปลี่ยนอิออน (Ion exchange)

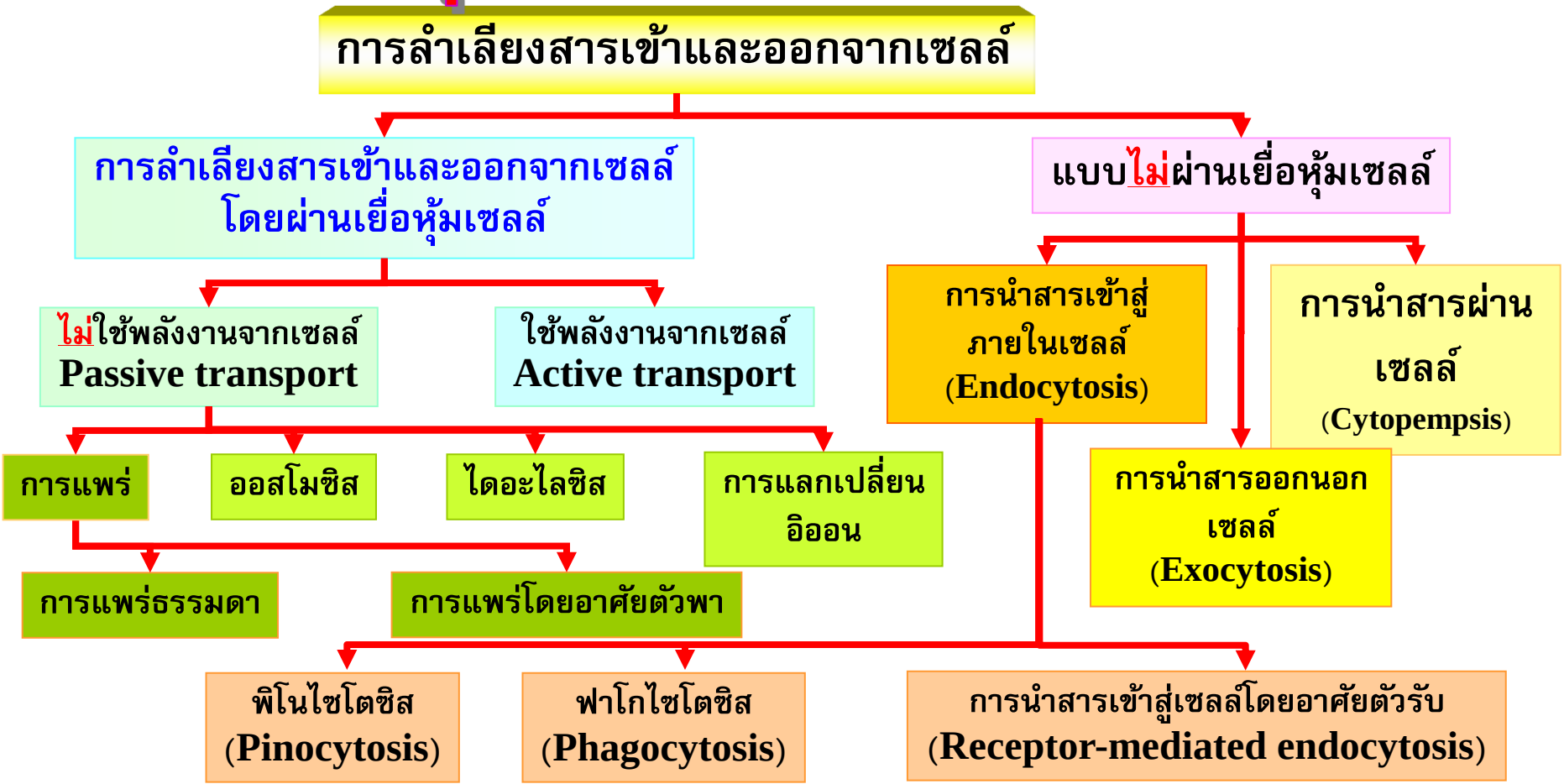
2. การลำเลียงสารผ่านเยื่อหุ้มเซลล์โดยใช้พลังงานจากเซลล์ (Active transport)

❷ การลำเลียงสารโดยไม่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ โดยการสร้างถุง

จากเยื่อหุ้มเซลล์ มี 3 ลักษณะ คือ

1. การนำสารเข้าสู่ภายในเซลล์ (Endocytosis) 3 วิธี คือ
   - ➢ พิโนไซโตซิส (Pinocytosis)
   - ➢ ฟาโกไซโตซิส (Phagocytosis)
   - ➢ การนำสารเข้าสู่เซลล์โดยอาศัยตัวรับ (Receptor-mediated endocytosis)
2. การนำสารออกจากนอกเซลล์ (Exocytosis)
3. การนำสารผ่านเซลล์ (Cytopempsis)

สรุปการลำเลียงสาร



ก. การลำเลียงสาร โดยผ่านเยื่อหุ้มเซลล์

1. การลำเลียงโดยผ่านเยื่อหุ้มและไม่ใช้พลังงานจากเซลล์

1.1 การแพร่ (Diffusion)

➲ การเคลื่อนที่ของโมเลกุล หรืออิออนของสารโดยอาศัยพลังงานจลน์ในโมเลกุลหรืออิออนของสารเอง

➲ ทิศทางการแพร่จะเกิดจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำเสมอ

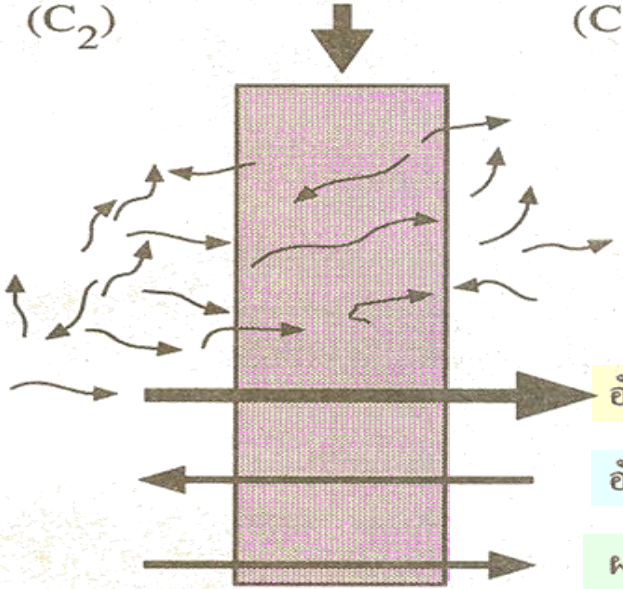
➲ ในที่สุด บริเวณทั้งสองจะมีความเข้มข้นเท่ากัน ซึ่งเรียกว่าจุดสมดุลของการแพร่ ณ จุดนี้ อัตราการแพร่ไปและกลับมีค่าเท่ากัน จึงเรียกเป็นสมดุลจลน์ (Dynamic equilibrium)

การแพร่แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

การแพร่ธรรมดา (Simple diffusion)

- การเคลื่อนที่ของโมเลกุล หรืออิออนของสาร เนื่องจากผลต่างความเข้มข้นโดยในการเคลื่อนที่จะอาศัยพลังงานจลน์ในโมเลกุลหรืออิออนของมันเอง
- ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานจากเซลล์และไม่อาศัยตัวพาใด ๆ
- ตัวอย่างเช่น การเคลื่อนที่ของสารละลายชนิดหนึ่งซึ่งอยู่ภายนอกเซลล์ โดยมีเยื่อหุ้มเซลล์กั้นขวางดังรูป

ภายนอกเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ ภายในเซลล์



อัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในเซลล์ (Influx)

อัตราการเคลื่อนที่ออกนอกเซลล์ (Efflux)

ผลรวมสุทธิของอัตราการเคลื่อนที่ (Net flux)

ผลรวมสุทธิของอัตราการเคลื่อนที่ = อัตราการเคลื่อนที่เข้า – อัตราการเคลื่อนที่ออก (เมื่อ $C_2 > C_1$)

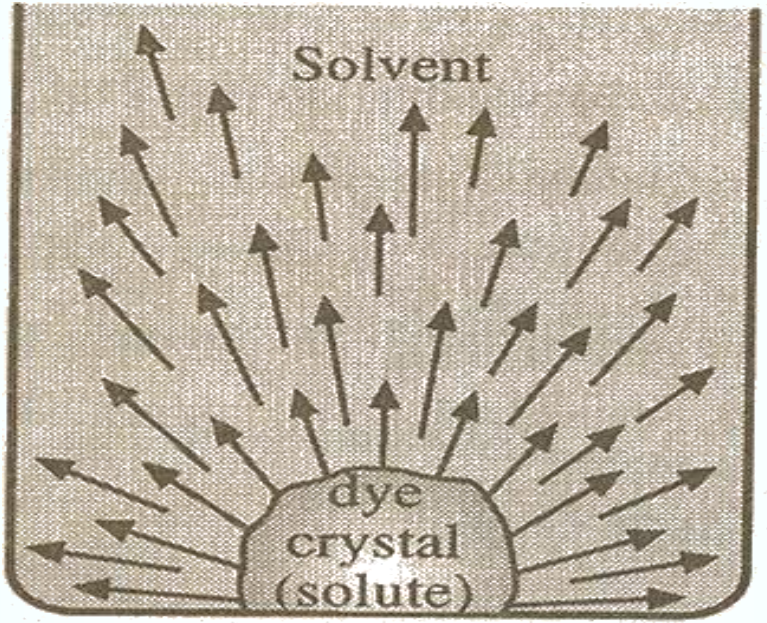
หรือ **Net flux = Influx - Efflux**

การแพร่ของสารนั้นเป็นการเคลื่อนที่อย่างไม่มีทิศทางแน่นอน เพราะทิศทางที่แต่ละโมเลกุลจะเคลื่อนที่ขึ้นกับโอกาสที่จะกระทบกับโมเลกุลของอนุภาคอื่น ๆ ตัวอย่างการแพร่ของสาร เช่น

1.1.1 การแพร่ในของแข็ง เช่น เกล็ดด่างทับทิมเกล็ดเมธีลีนบลู และเกล็ดโพแทสเซียม ไดโครเมต แพร่ในวุ้น

1.1.2 การแพร่ในของเหลว เช่น โมเลกุลน้ำตาลอิออนของเกลือแพร่ในน้ำ

1.1.3 การแพร่ในแก๊ส เช่น การแพร่ของโมเลกุลน้ำหอมในอากาศ, การแพร่ของโมเลกุลน้ำหอมในอากาศ, การแพร่ของแก๊สหรือควันไฟในอากาศ



ภาพแสดงการแพร่ของโมเลกุลของสีจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูง ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ

ปัจจัยที่ควบคุมการแพร่

1. ความเข้มข้นของสารที่จะแพร่ สารชนิดเดียวกันแต่มีความเข้มข้นต่างกัน กลุ่มที่มีความเข้มข้นมากกว่าจะมีความสามารถในการแพร่ดีกว่า

2. อุณหภูมิ การเพิ่มระดับอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับสารจะทำให้สารเกิดการแพร่ไปได้เร็ว

3. ความดัน การเพิ่มความดันให้กับสาร จะมีผลทำให้สารสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น

4. สิ่งเจือปน และตัวกลาง สิ่งเจือปนในสารตัวกลางที่จะแพร่ผ่านจะเป็นสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ของสารทำให้เกิดการแพร่ช้าลง

ตัวอย่างที่สารจะแพร่ผ่าน เช่น การแพร่ของแก๊สออกซิเจนในตัวกลางที่เป็นอากาศจะเร็วกว่าตัวกลางที่เป็นน้ำ เนื่องจากโมเลกุลน้ำอยู่กันอย่างหนาแน่น และมีแรงยึดเหนี่ยวกันสูง ทำให้การแพร่ในน้ำช้าลง

5. สถานะของสารที่จะแพร่ สารชนิดเดียวกันแต่อยู่ต่างสถานะกัน ความเร็วในการแพร่จะไม่เท่ากัน เช่น ไอน้ำ จะแพร่ได้เร็วกว่าน้ำ เพราะไอน้ำเป็นก๊าซมีแรงยึดเหนี่ยวน้อย และมีพลังงานจลน์สูง ส่วนน้ำมีแรงยึดเหนี่ยวสูงกว่าและมีพลังงานจลน์ต่ำกว่า

ปัจจัยที่ควบคุมอัตราการแพร่

อัตราการแพร่วัดได้จากระยะทางที่สารแพร่ไปในหนึ่งหน่วยเวลา หรือการวัดจำนวนของสารที่แพร่ในหนึ่งหน่วยเวลา

1. ระยะทางที่สารแพร่ไปในหนึ่งหน่วยเวลา

ในการเคลื่อนที่ของสารเป็นเส้นตรง และมีทิศทางเดียวกันนั้น เราจะพบว่าระยะทางที่สารเคลื่อนที่จะแปรตามเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ แต่ในการเคลื่อนที่อย่างไร้ทิศทาง โมเลกุลเคลื่อนที่กลับไปกลับมาด้วยความเร็วเท่าเดิม จะพบว่าระยะทางที่สารแพร่ออกไปจะแปรตามรากที่สอง (Square root) ของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ นั้นคือ

$$\text{ระยะทาง } \alpha = \sqrt{\text{เวลา}}$$

ตัวอย่างเช่น :-

- เมื่อสารแพร่ออกไปในระยะทาง 1 หน่วย จะใช้เวลา 1 หน่วย
- เมื่อสารแพร่ออกไปในระยะทาง 2 หน่วย จะใช้เวลา 4 หน่วย
- เมื่อสารแพร่ออกไปในระยะทาง 10 หน่วย จะใช้เวลา 100 หน่วย
- เมื่อสารแพร่ออกไปในระยะทาง 1/2 หน่วย จะใช้เวลา 1/4 หน่วย
- เมื่อสารแพร่ออกไปในระยะทาง 1/10 หน่วย จะใช้เวลา 1/100 หน่วย

2. ขนาดและน้ำหนักของอนุภาคที่จะแพร่

ถ้าอนุภาคของสารมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา อัตราการแพร่จะสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก โทมัส แกรแฮม (Thomas Graham) พบว่า อัตราการแพร่ของก๊าซ (R) จะแปรผกผันกับรากที่สองของความหนาแน่น หรือน้ำหนักโมเลกุลของแก๊ส (M) นั่นคือ

$$R = \frac{1}{\sqrt{M}}$$

เช่น อัตราการแพร่ของ CO_2 (R_{CO}) กับอัตราการแพร่ของ CO_2 (RO_2) เป็นดังนี้

$$\frac{RO_2}{R_{CO_2}} = \sqrt{\frac{M_{CO_2}}{M_{O_2}}} = \sqrt{\frac{44}{32}} = 1.17$$

เพราะฉะนั้นอัตราการแพร่ของ O_2 จะสูงกว่าอัตราการแพร่ของ CO_2 1.17 เท่า

3. อุณหภูมิ

- เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้อัตราการแพร่ของสารสูงขึ้น เพราะสารมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น

4. ความหนาแน่นของตัวกลาง

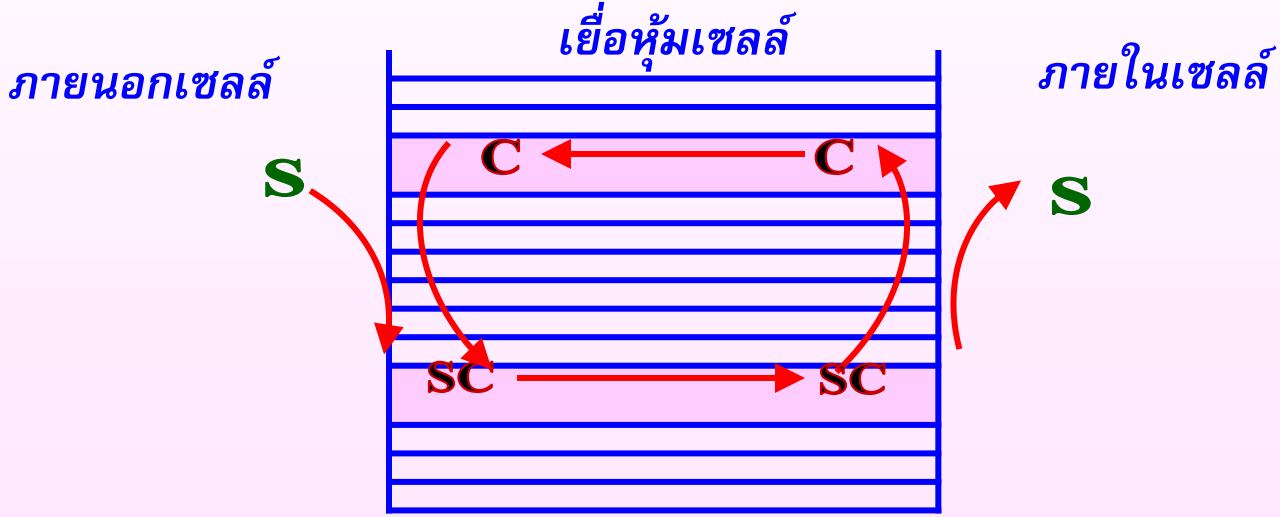
- สารที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน แพร่ผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน อัตราการแพร่จะไม่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น การแพร่ในอากาศจะมีอัตราการแพร่สูงกว่าในน้ำ เพราะน้ำมีความหนาแน่นสูงกว่าอากาศ

5. ความสามารถในการละลาย

- สารที่ละลายได้ดีจะมีอัตราการแพร่สูงกว่าสารที่ละลายได้น้อย

การแพร่โดยอาศัยตัวพา (Facilitated diffusion)

- คือ การแพร่ของโมเลกุลหรืออิออนของสารโดยอาศัยตัวพา (Carrier) ซึ่งเป็นสารจำพวกโปรตีนที่อยู่ภายในเยื่อหุ้มเซลล์เป็นตัวนำไปโดยไม่ต้องใช้พลังงานจากเซลล์



แสดงการเคลื่อนที่ของสาร (S) ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์โดยอาศัยตัวพา carrier (C)

คุณลักษณะของการแพร่โดยอาศัยตัวพา

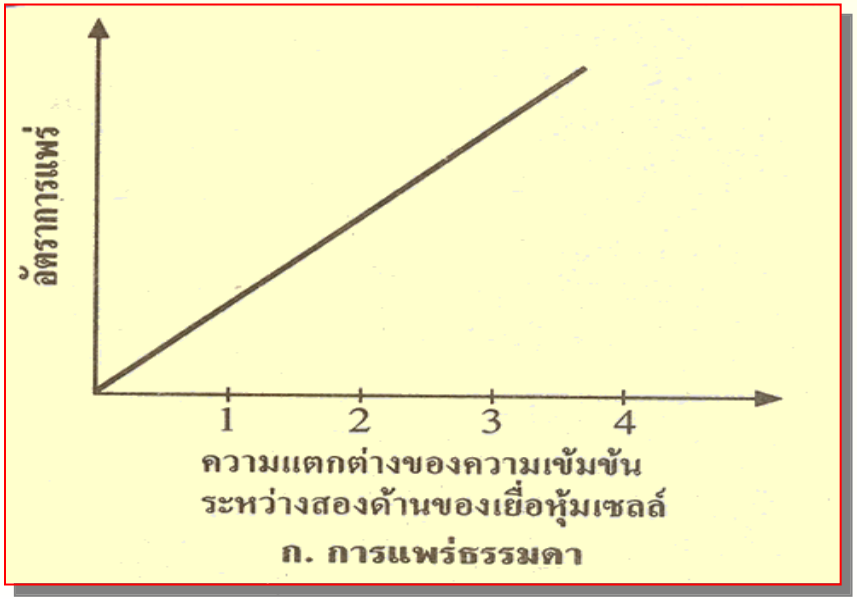
1. การเคลื่อนที่โดยอาศัยตัวพาจะถึงจุดสมดุลของการแพร่เร็วกว่าการแพร่ธรรมดา

- ➲ เนื่องจากตัวพาช่วยขนส่งสาร
- ➲ ตัวอย่างการเคลื่อนที่แบบนี้ เช่น การแพร่ของกลูโคสเข้าสู่เซลล์เม็ดเลือดแดงของคน

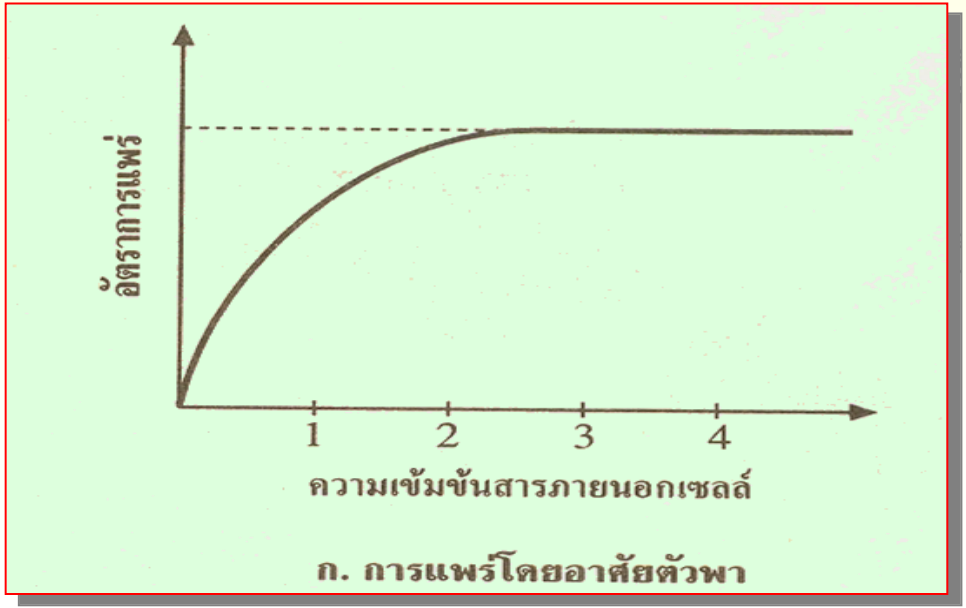
2. ถ้าพิจารณาอัตราการเคลื่อนที่ของสารระหว่างการแพร่ธรรมดากับการแพร่โดยอาศัยตัวพา

- ➲ เมื่อความเข้มข้นระหว่าง 2 ด้านของเยื่อหุ้มเซลล์ต่างกันมาก ๆ
- ➲ จะพบว่าอัตราการแพร่จะไม่แปรตามระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นแต่อย่างใด เนื่องจากตัวพามีปริมาณจำกัด ทุกตัวต้องทำหน้าที่ขนส่งสารทั้งหมด

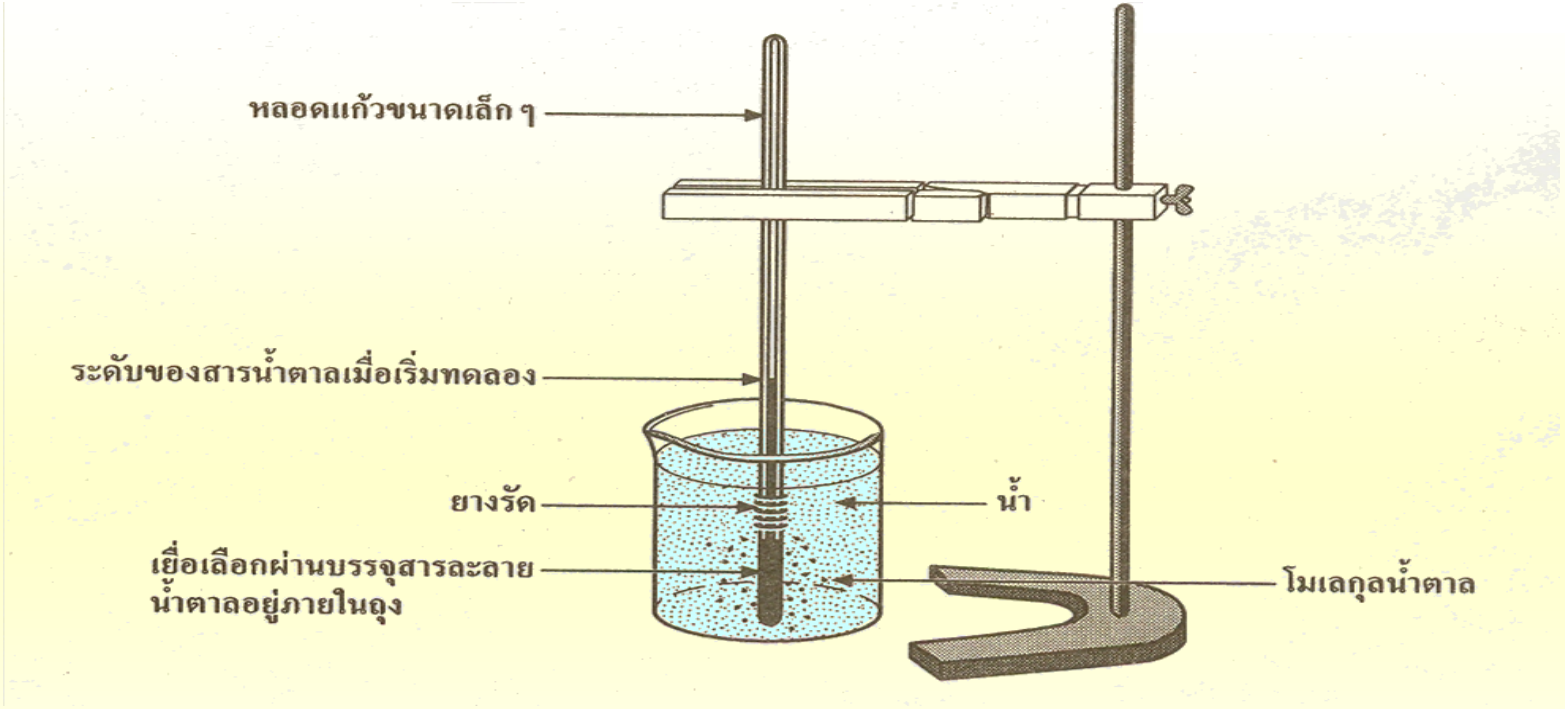
➲ ดังนั้นความเข้มข้นของสารที่มากกว่าเกินไปจึงไม่ทำให้อัตราการแพร่เร็วขึ้นได้อีก ซึ่งต่างจากการแพร่ธรรมดา ดังกราฟ



ก. การแพร่ธรรมดา



ก. การแพร่โดยอาศัยตัวพา



ภาพแสดงการเกิดไดอะไลซิสโดยการแพร่ของโมเลกุลน้ำตาลออกมายังน้ำที่อยู่ภายนอกเยื่อเลือกผ่าน

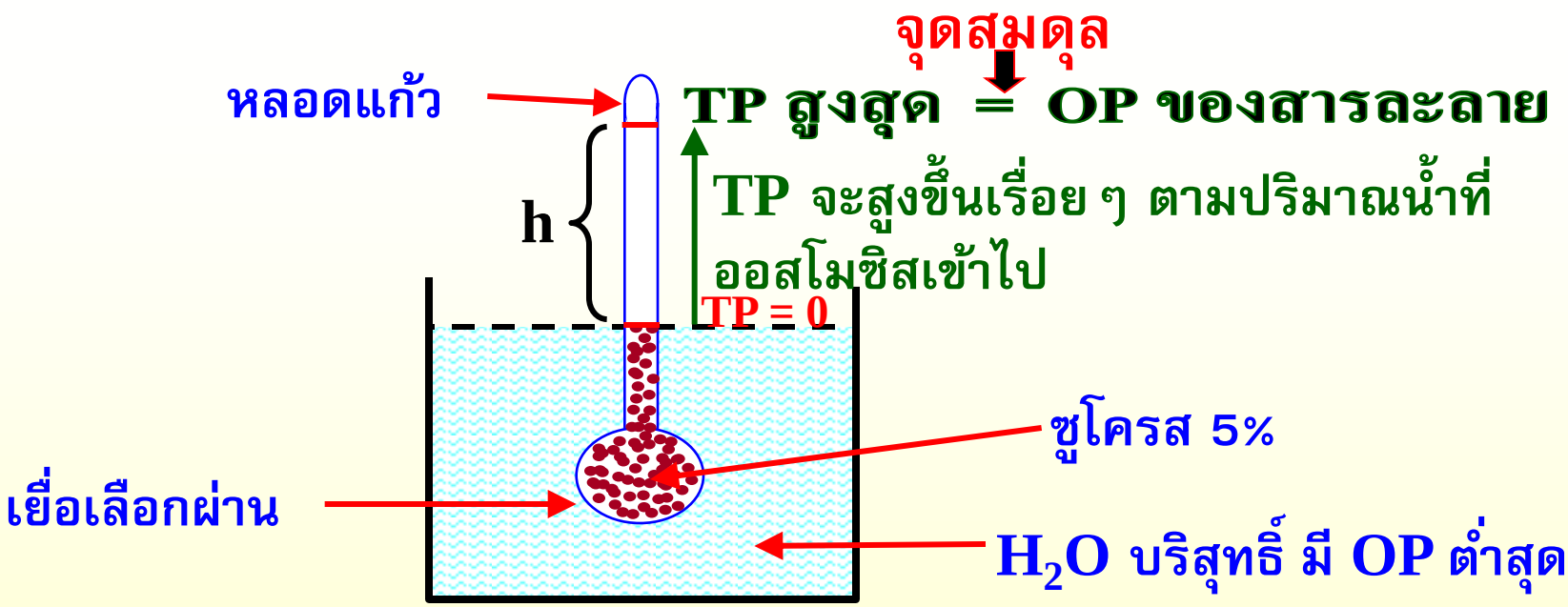
1.2 ออสโมซิส (Osmosis)

ออสโมซิส หมายถึง การเคลื่อนที่ของตัวทำละลาย (solvent) โดยเฉพาะน้ำจากบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารละลายเข้มข้นต่ำ (น้ำมาก) ไปยังบริเวณที่มี ความเข้มข้นของสารละลายสูงกว่า (น้ำน้อย) โดยผ่านเยื่อเลือกผ่าน

- ออสโมซิส จัดเป็นการแพร่อย่างหนึ่ง แต่เป็นการแพร่ของน้ำ
- ออสโมซิสเกิดขึ้นได้เนื่องจากแรงดันออสโมติก (**osmotic pressure = OP**)

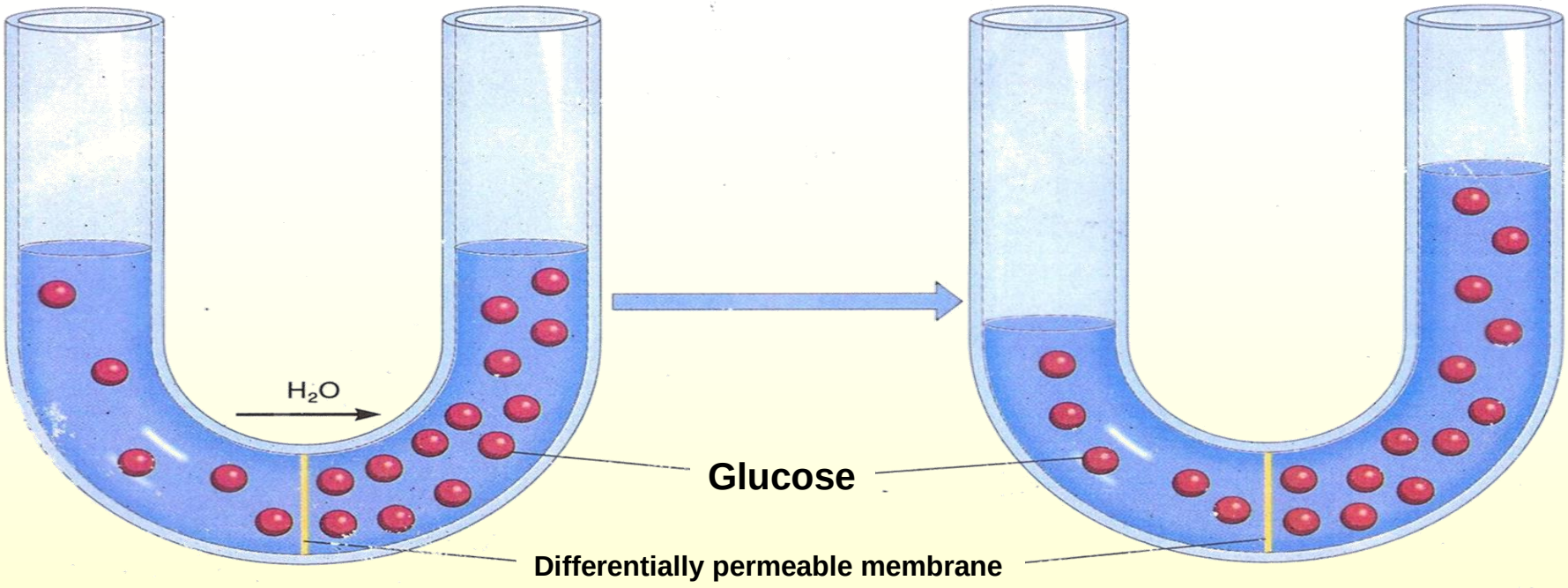
แรงดันออสโมติก หมายถึง แรงดันที่ทำให้เกิดออสโมซิสของน้ำ

ออสโมมิเตอร์ (osmometer) คือ เครื่องมือที่ใช้หาค่าแรงดันออสโมติกของสารละลาย



ที่จุดสมดุลของการแพร่พบว่า

OP ของสารละลาย = TP สูงสุด

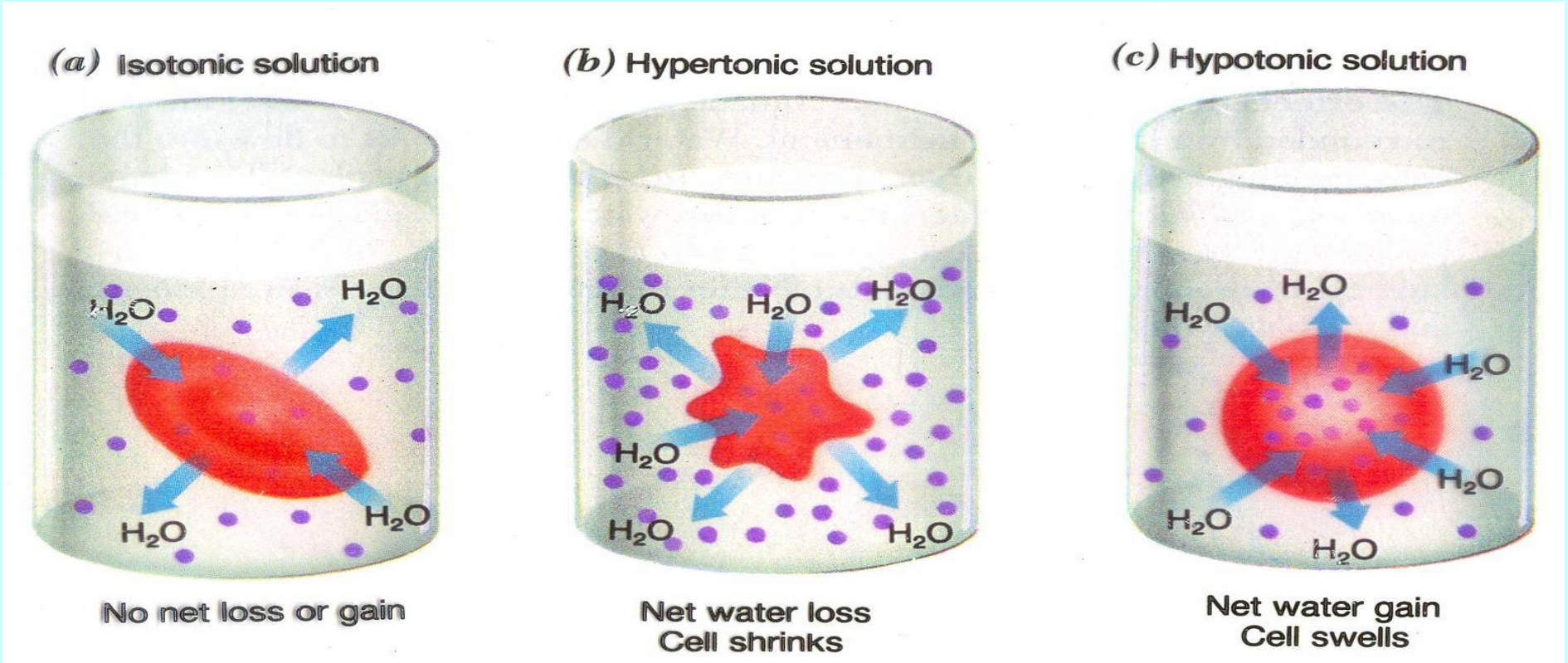

H_2O
Glucose
Differentially permeable membrane

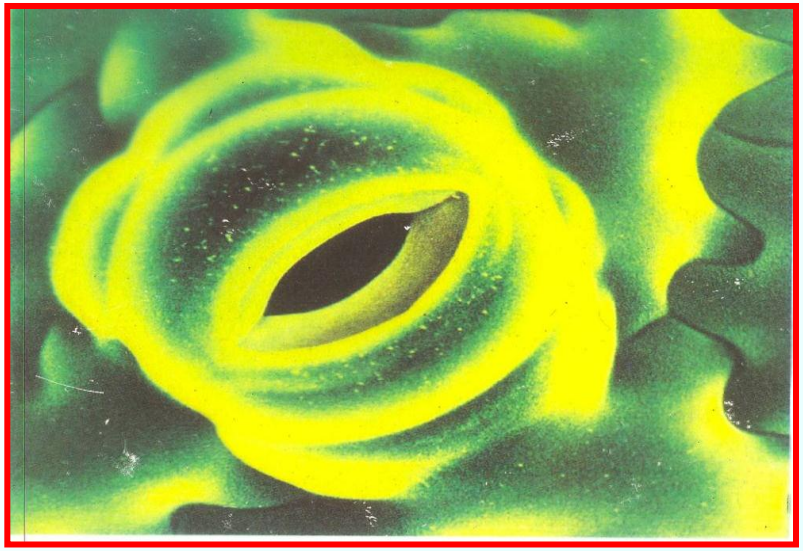
ประเภทของสารละลาย : จำแนกตามแรงดันออสโมติก

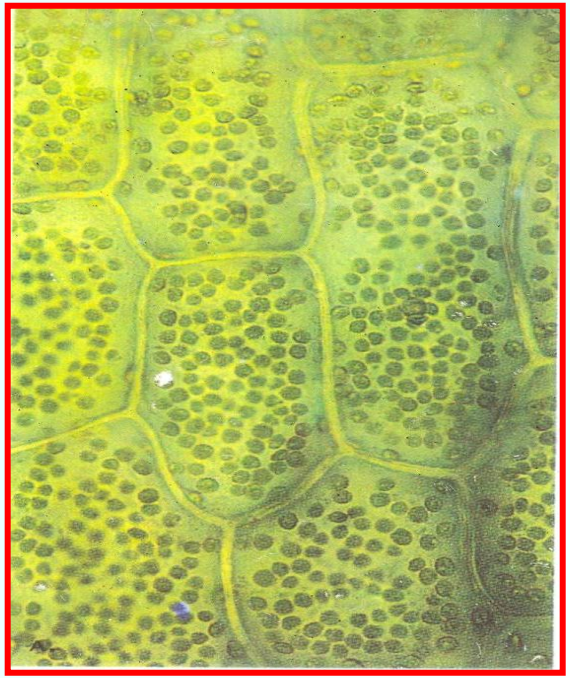
1. สารละลายไฮโปโทนิก (hypotonic solution) เป็นสารละลายที่มีแรงดันออสโมติกต่ำกว่าเซลล์ ดังนั้นน้ำจะออสโมซิสเข้าทำให้เซลล์เกิดแรงดันเพิ่มขึ้นภายในเซลล์เนื่องจากน้ำออสโมซิสเข้าไป เรียกว่า แรงดันเต่ง (turgor pressure) ทำให้เซลล์เต่งขึ้น เรียกเกิด Plasmoptysis ซึ่งถ้าเกิดในเซลล์สัตว์ เช่น เซลล์เม็ดเลือดแดง เซลล์จะแตกออกเรียก haemolysis

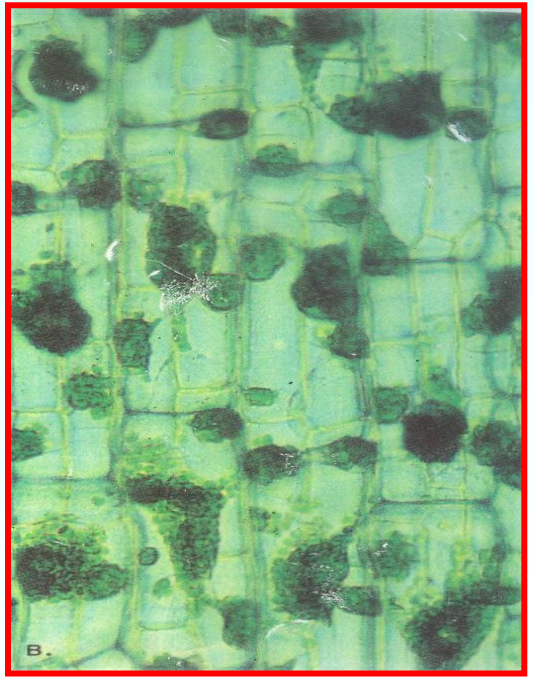
2. สารละลายไฮเปอร์โทนิก (hypertonic solution) เป็นสารละลายที่มีแรงดันออสโมติกสูงกว่าเซลล์ทำให้น้ำออสโมซิสออกจากเซลล์ เซลล์จึงเหี่ยวย่น เรียกว่า เกิด plsamolysis

3. สารละลายไอโซโทนิก (isotonic solution) เป็นสารละลายที่มีแรงดันออสโมติกเท่ากับเซลล์ ดังนั้นเซลล์ไม่เปลี่ยนรูปร่าง


(a) Isotonic solution
H_2O
H_2O
H_2O
H_2O
No net loss or gain
(b) Hypertonic solution
H_2O
H_2O
H_2O
H_2O
H_2O
H_2O
Net water loss
Cell shrinks
(c) Hypotonic solution
H_2O
H_2O
H_2O
H_2O
H_2O
H_2O
Net water gain
Cell swells

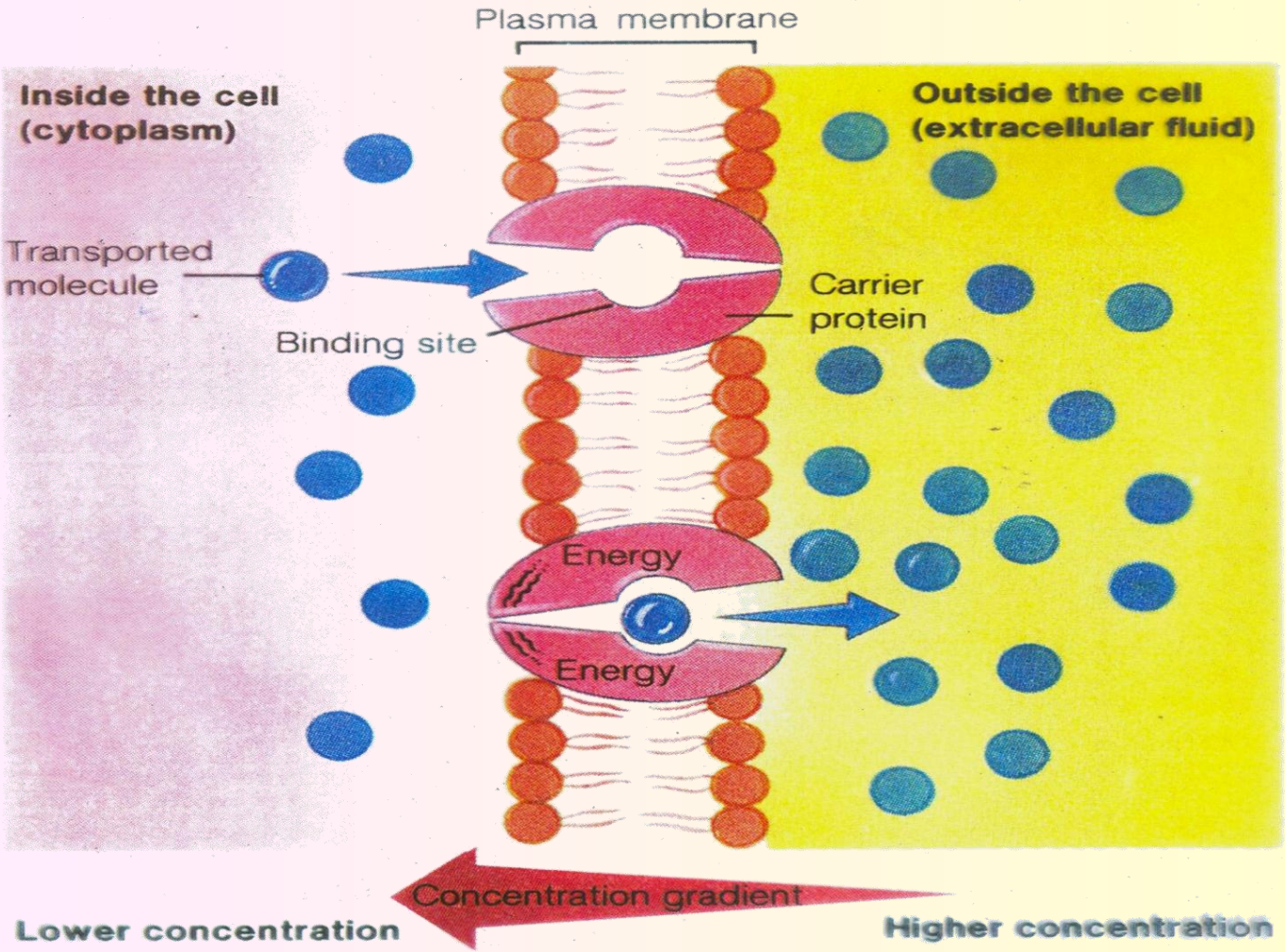





B.

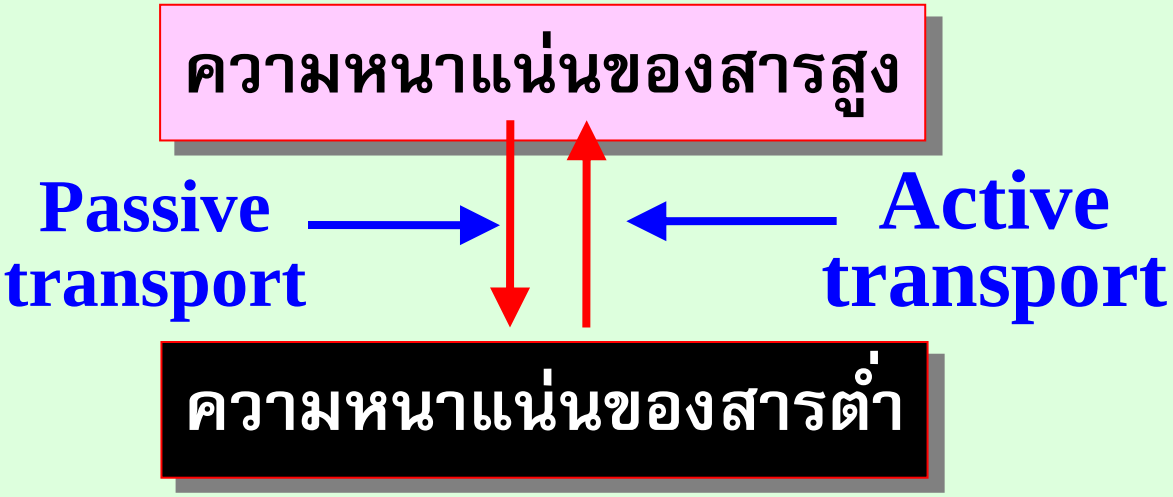
ความแตกต่างของการแพร่และออสโมซิส

	การแพร่	ออสโมซิส
1. ชนิดสาร	ตัวถูกละลาย	ตัวทำละลาย (น้ำ)
2. เยื่อเลือกผ่าน	ผ่านหรือไม่ผ่าน	ต้องผ่านเยื่อ
3. ความเข้มข้นของสารละลาย	จากมากไปน้อย	จากน้อยไปมาก


Plasma membrane
Inside the cell
(cytoplasm)
Outside the cell
(extracellular fluid)
Transported
molecule
Binding site
Carrier
protein
Energy
Energy
Concentration gradient
Lower concentration
Higher concentration

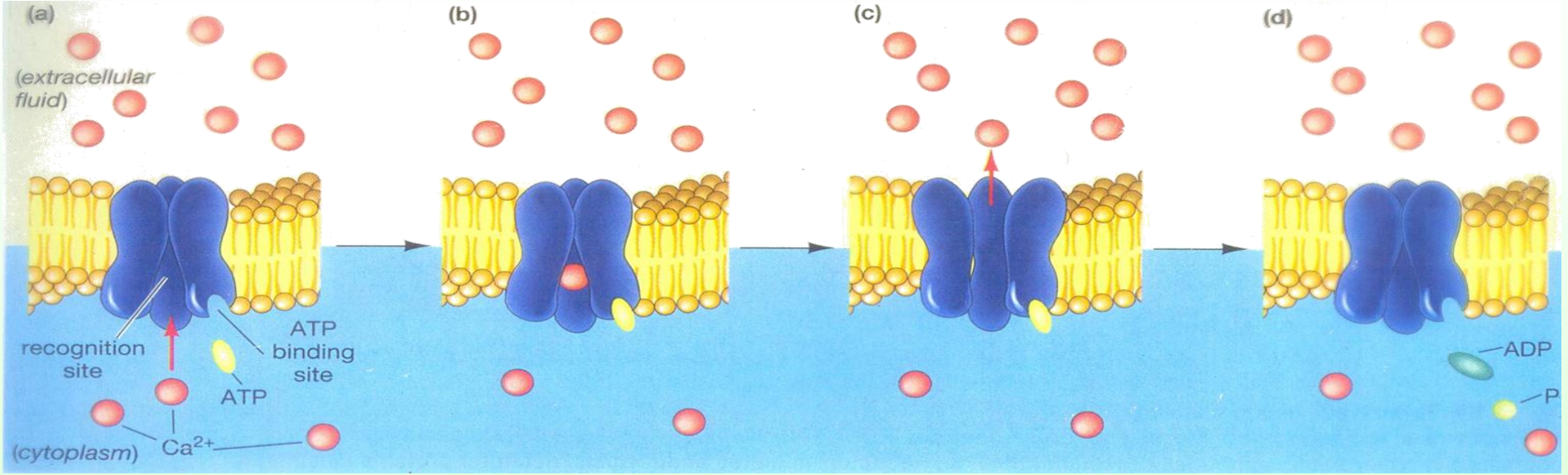
แอกตีฟ ทรานสปอร์ต (Active transport)

แอกตีฟ ทรานสปอร์ต (Active transport) เป็นการเคลื่อนที่ของสารจากบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารต่ำไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารสูงกว่า โดยอาศัยพลังงานจากเซลล์



เพราะฉะนั้น แอกตีฟ ทรานสปอร์ตจึงเกี่ยวข้องกับการหายใจโดยตรง เพราะต้องใช้พลังงานจากการหายใจ *แอกตีฟทรานสปอร์ต* จะต้องใช้ปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ตัวพา (carrier) ซึ่งเป็นสารจำพวกโปรตีนที่เยื่อหุ้มเซลล์
2. เอนไซม์ (enzyme) เพื่อใช้ในการเปลี่ยนรูปของตัวพา
3. พลังงานจากเซลล์ในรูป ATP


(a)
(b)
(c)
(d)
(extracellular fluid)
recognition site
ATP binding site
ATP
Ca2+
(cytoplasm)
ADP
P

ตัวอย่าง :

1. $Na^+ – K^+$ pump ที่เซลล์ประสาท
2. การดูดซึมสารอาหารที่ลำไส้เล็ก
3. การดูดสารมีประโยชน์กลับคืนที่ท่อของหน่วยไต
4. การสะสม K^+ ในเซลล์ สารหร่ายไนเทลลาได้สูงกว่า K^+ ในน้ำจืด 1,065 เท่า
5. การขับเกลือแร่ที่เหงือกของปลาน้ำจืด
6. การดูดเกลือแร่ที่เหงือกของปลาน้ำจืด
7. การดูดเกลือแร่ที่ของรากพืช

ความสำคัญ

1. เป็นกลไกสำคัญที่สุดในการรักษาดุลยภาพของเซลล์
2. เป็นกระบวนการที่ช่วยให้เซลล์ดำเนินกระบวนการต่าง ๆ ได้ตามที่ต้องการ เช่น การขับสาร การดูดสาร

1.3 ไดอะไลซิส (Dialysis)

หมายถึง การแพร่ของตัวถูกละลาย (Solute) จากบริเวณที่มีสารละลายเข้มข้นสูงกว่าผ่านเยื่อเลือกผ่านไปยังบริเวณที่มีสารละลายเข้มข้นต่ำ หรือเจือจางกว่า

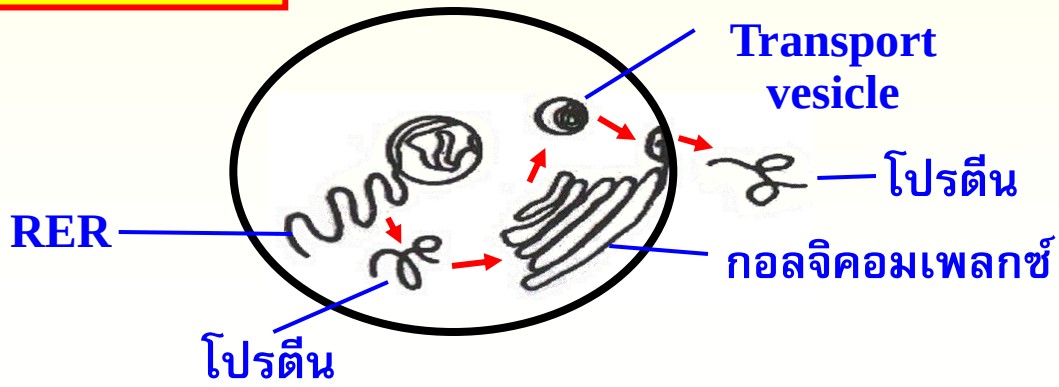
➢ เช่น การแพร่ของน้ำตาลกลูโคสภายในถุงเยื่อเลือกผ่านออกมายังน้ำกลั่นที่อยู่ข้างนอกถุง

การลำเลียงสารโดยไม่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์

1. การลำเลียงสารออกนอกเซลล์ (Exocytosis)

เช่น การหลั่งฮอร์โมน เอนไซม์ และแอนติบอดี้

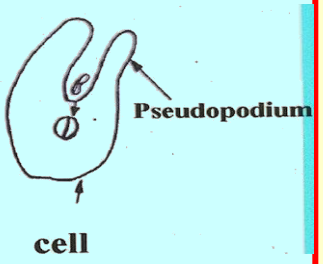
สารที่สร้างขึ้นจากในเซลล์ เช่น โปรตีนจาก RER → โปรตีน → กอลจิคอมเพลกซ์ → Transport vesicle → เยื่อหุ้มเซลล์ → โปรตีน



2. การลำเลียงสารเข้าในเซลล์ (Endocytosis) มีวิธีที่สำคัญคือ

1. Phagocytosis 2. Pinocytosis 3. Receptor mediated endocytosis

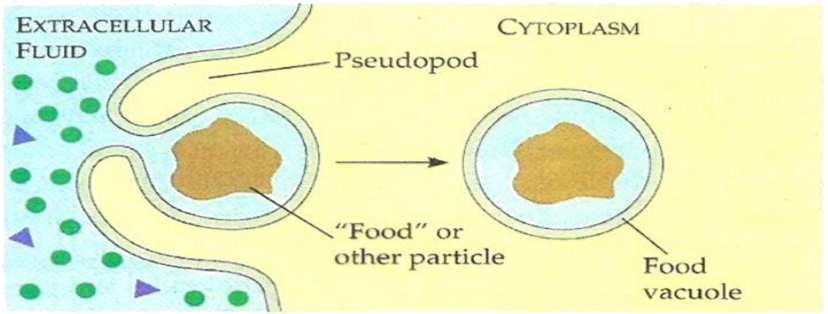
สิ่งเปรียบเทียบ	Phagocytosis	Pinocytosis	Receptor mediated endocytosis
1. ลักษณะของสารที่นำเข้าในเซลล์	ของแข็ง เช่น เซลล์แบคทีเรีย เศษไม้เล็ก ๆ สารเชิงซ้อนของแอนติเจนกับเซลล์เรียก cell eating	ของเหลว เช่น น้ำมัน หรือสาร ละลายโปรตีน	โคเลสเตอรอล, เฟอริติน, สารเชิงซ้อนของแอนติเจน–แอนติบอดี

สิ่งเปรียบเทียบ	Phagocytosis	Pinocytosis	Receptor mediated endocytosis
2. กรรมวิธีการนำเข้าในเซลล์	มีการยื่นของเยื่อหุ้มเซลล์ออก ไปเป็น  **Pseudopodium** อย่างน้อย 2 อันโอบรอบสาร	มีการเว้าของเยื่อหุ้มเซลล์เข้ามาในไซโทพลาซึม กลาย เป็นร่องแคบ ๆ เรียกว่า **Canaliculi** แล้วสารจะหลุดเข้ามาในไซโทพลาซึม	โคเลสเตอรอล, เฟอริติน, สารเชิงซ้อนของแอนติเจน–แอนติบอดี
3. ATP	ใช้		

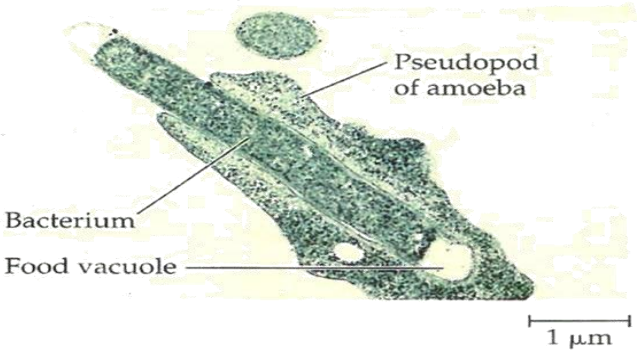
สิ่งเปรียบเทียบ	Phagocytosis	Pinocytosis	Receptor mediated endocytosis
4. ตัวอย่าง	อะมีบาจับแบคทีเรียเป็นอาหาร, เม็ดเลือดขาวจับแบคทีเรีย, มาโครฟาจ (Macrophage) จับแบคทีเรีย, โพรโตซัว Trichonympha กินเศษไม้จากปลวก	การดูดสารละลายโปรตีนกลับคืนที่ท่อของหน่วยไต, การดูดซึมไขมันที่วิลลัสในลำไส้เล็ก	การลำเลียงโคเลสเตอรอล, เฟอริตินเข้าเซลล์

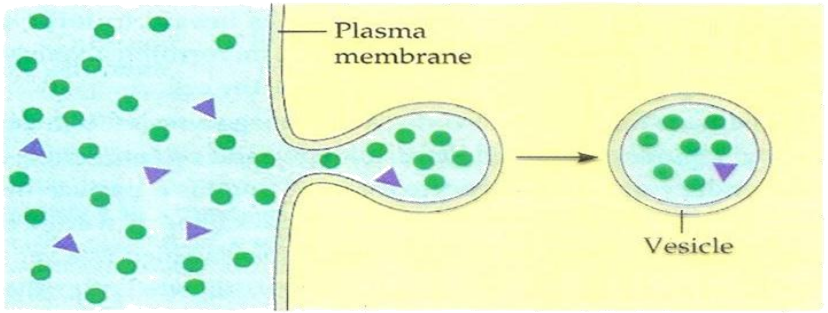
Receptor-mediated endocytosis

การนำสารเข้าในเซลล์โดยอาศัยตัวรับ (Receptor) เป็นตัวกลางที่เยื่อหุ้มเซลล์ เช่น การนำอนุภาคไลโปโปรตีนเข้าในเซลล์จะต้องอาศัยตัวรับที่เยื่อหุ้มเซลล์และสารที่ช่วยทำให้เกิดถุงคือ คลาทริน (Clathrin) ที่เยื่อหุ้มเซลล์เช่นกัน เมื่อเกิดเป็นถุงผิวหยาบ (Coated vesicle) ภายในไซโทพลาสซึมของเซลล์แล้ว คลาทรินจะหลุดออกไปเป็นโมเลกุลเดี่ยว ๆ (Clathrin triskelions) และถุงผิวหยาบจะกลายเป็นถุงผิวเรียบ (Uncoated vesicle) เรียกเอนโดโซม (Endosome) หลังจากนั้นจะมีถุงบรรจุสารที่มี pH ต่ำประมาณ 5.0 เข้ารวมกับเอนโดโซม เพื่อทำให้ตัวรับแยกตัวออกมากลับไปเป็นตัวรับที่เยื่อหุ้มเซลล์ใหม่ หลังจากนั้น ถุงเอนโดโซมที่บรรจุไลโปโปรตีนจะถูกย่อยโดยน้ำที่ย่อยจากไลโซโซมกลายเป็นสารโมเลกุลเดี่ยวภายในไซโทพลาสซึม

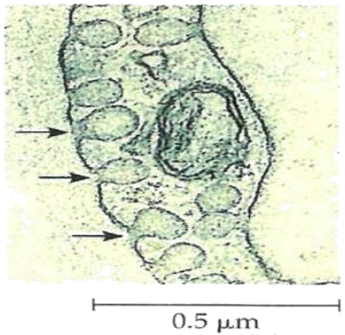


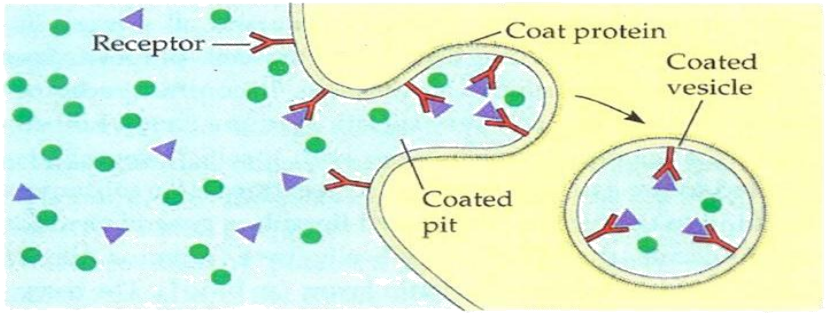
(a) Phagocytosis

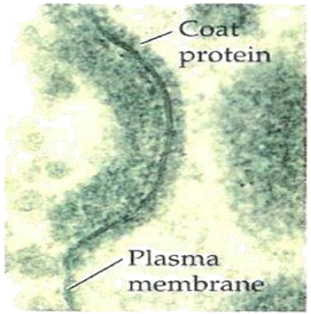


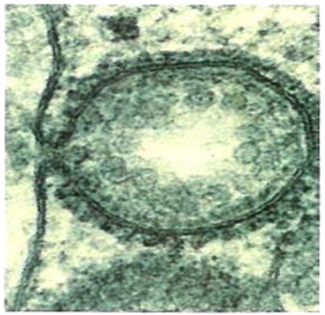


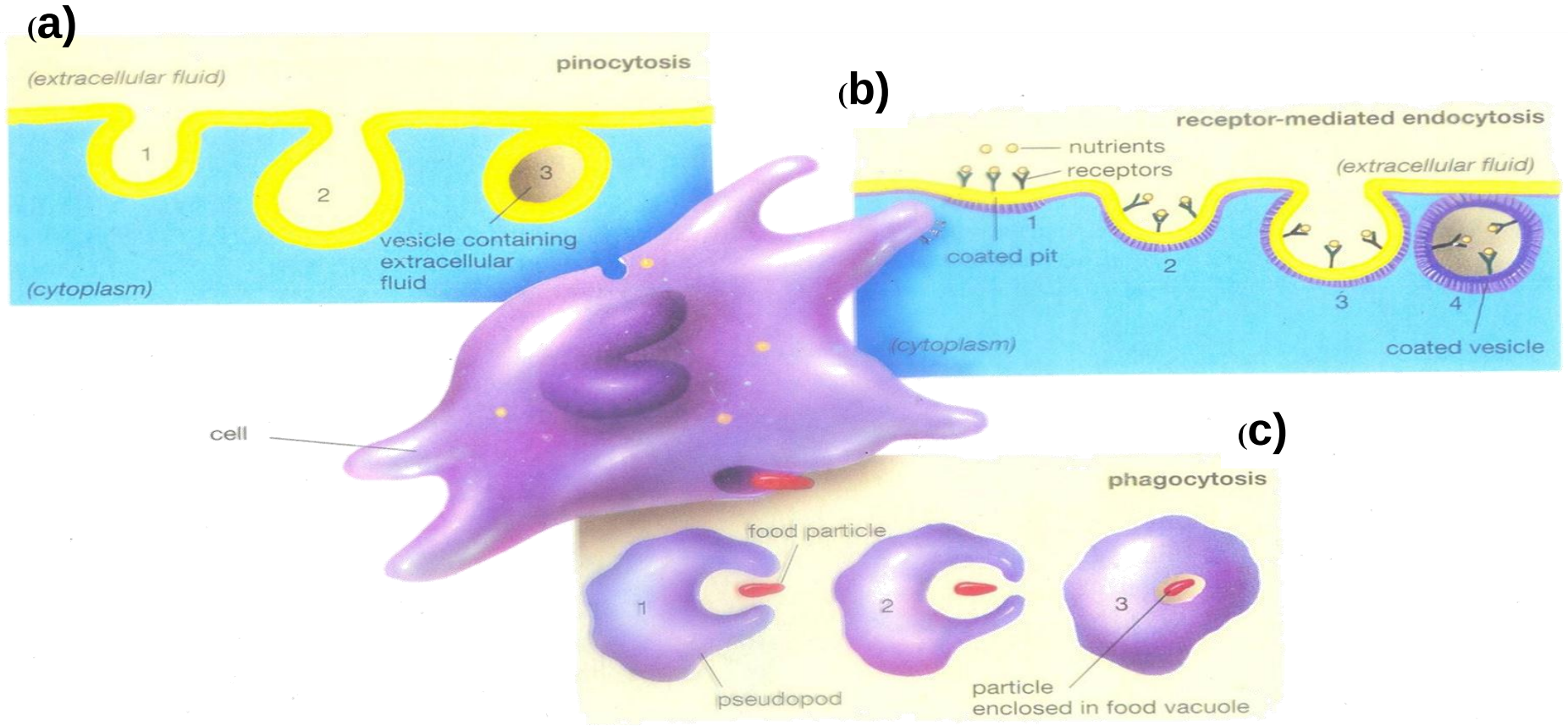
(b) Pinocytosis

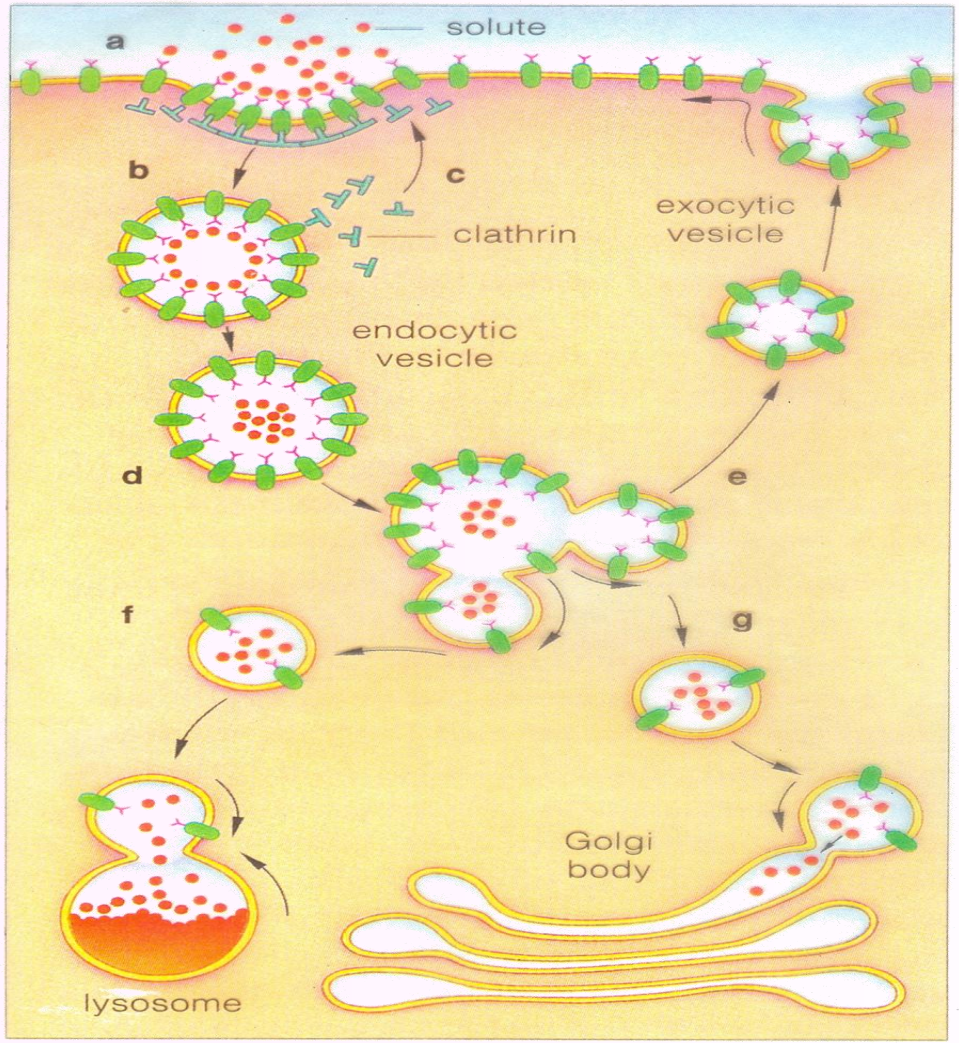









(a)
pinocytosis
(extracellular fluid)
1
2
3
vesicle containing extracellular fluid
(cytoplasm)
(b)
receptor-mediated endocytosis
nutrients
receptors
(extracellular fluid)
coated pit
1
2
3
4
(cytoplasm)
coated vesicle
cell
(c)
phagocytosis
food particle
1
2
3
pseudopod
particle enclosed in food vacuole



a Molecules get concentrated inside coated pits of plasma membrane.

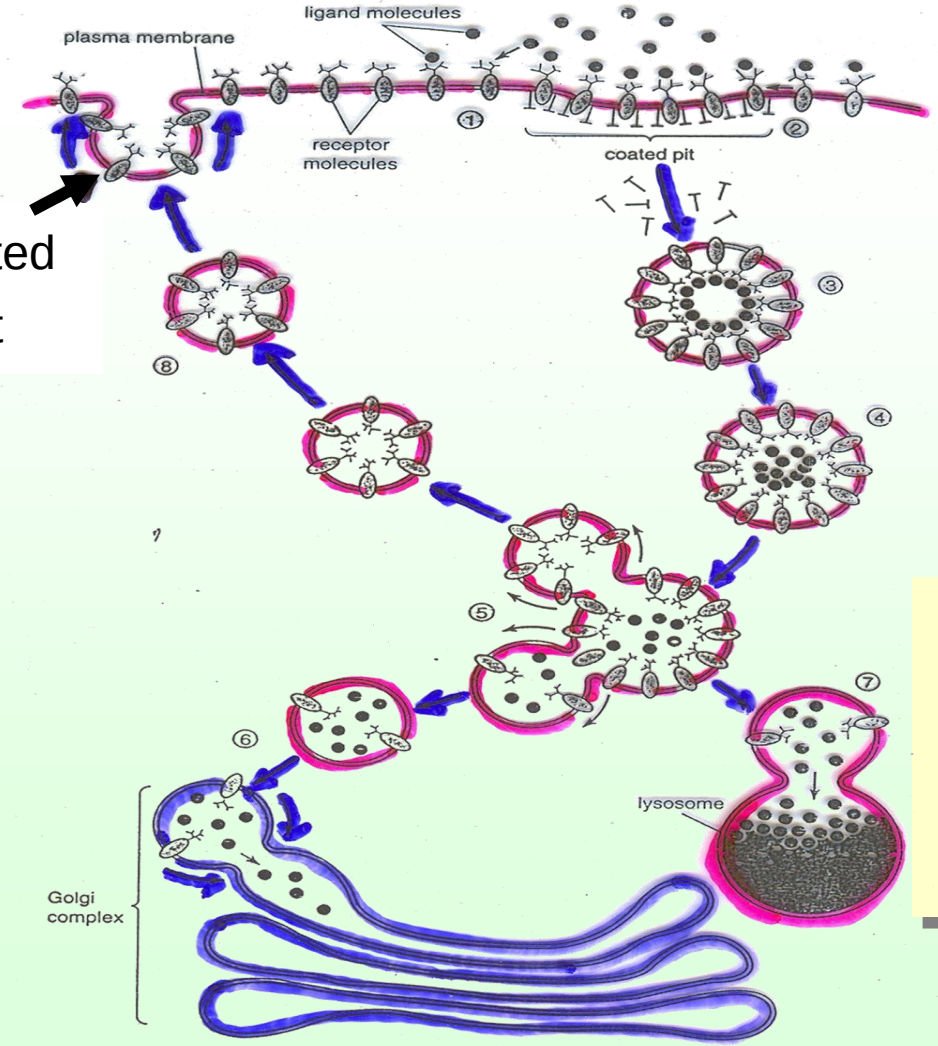
b Endocytic vesicles form from the pits.

c Vesicles lose molecules of clathrin, which then return to the plasma membrane.

d Enclosed molecules are sorted and often released from receptors.

e Many sorted molecules are cycled back to the plasma membrane.

f,g Many other sorted molecules are delivered to lysosomes and stay there. Still others are routed to spaces in the nuclear envelope and inside ER membranes, and still others to Golgi bodies.



❶ ❷ สารรวมกับตัวรับที่เยื่อหุ้มเซลล์

❸ สารที่รวมกับตัวรับที่เยื่อหุ้มเซลล์หลุดเข้าไปในไซโทพลาซึม เป็นผิวของถุงหลุดออกไป coated pit และ ผิวของถุงหลุดออกไป

❹ สารในถุงหลุดออกจากตัวรับในถุง

❺ ❻ ❼ สารในถุงอาจไปรวมกับไลโซโซมหรือส่งไปที่กอลจิ บอดี

❽ receptor molecule ในถุงเคลื่อนกลับไปยังเยื่อหุ้มเซลล์