บทที่ 3
เซลล์ : อันตรกริยาต่อสิ่งแวดล้อมภายนอก

เค้าโครงเรื่อง

3.1 หน้าที่และข้อจำกัดของเซลล์

3.2 ผนังเซลล์

3.3 เยื่อหุ้มเซลล์

3.3.1 โครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์

3.3.2 หน้าที่ของเยื่อหุ้มเซลล์

3.4 การขนส่งผ่านเยื่อหุ้มเซลล์

3.4.1 การขนส่งแบบกสานติ์

3.4.2 การขนส่งแบบมีอุปกรณ์ช่วย

3.4.3 การขนส่งแบบกัมมันต์

3.5 การติดต่อและสื่อสารระหว่างเซลล์

เซลล์ถือเป็นหน่วยเล็กสุดของสิ่งมีชีวิต ความรู้เกี่ยวกับเซลล์เริ่มจาก **โรเบิร์ท ฮุค (Robert Hooke,** 1635-1703) ชาวอังกฤษ และ **แอนโทนี แวน ลีเวนฮอค (Antoni van Leeuvenhoek)** ผู้ร่วมงานชาวดัชท์ ได้ร่วมกันประดิษฐ์กล้องจุลทัศน์อย่างง่ายขึ้นเพื่อใช้ศึกษาเซลล์ของไม้คอร์ค และมีนักวิทยาศาสตร์อื่นศึกษาเซลล์ของพืชอย่างต่อเนื่องมาเป็นเวลาถึง 150 ปี จนกระทั่งถึงปี 1839 **ธีโอดอร์ ชวานน์ (Theodor Schwann)** นักสัตววิทยาชาวเยอรมัน ได้รายงานลักษณะของเซลล์สัตว์เป็นครั้งแรกจากการศึกษาเนื้อเยื่อของกระดูกอ่อน ชวานน์และนักพฤกษศาสตร์ชาวเยอรมันชื่อ **แมทินอส ชไลเดน (Mathias Schleiden)** ได้ร่วมกันเสนอ **ทฤษฎีของเซลล์** ขึ้น โดยมีหลักการว่า

(1) สิ่งมีชีวิตทุกชนิดต้องประกอบด้วยเซลล์

(2) เซลล์เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่ของสิ่งมีชีวิต

ในช่วงทศวรรษ 1840 ถึง 1850 มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านศึกษาการเจริญและการแบ่งเซลล์ ทำให้ทราบว่าเซลล์มิได้เกิดขึ้นเอง แต่เกิดจากการแบ่งเซลล์ที่มีอยู่เดิม จนกระทั่งปี 1855 นักพยาธิวิทยาชาวเยอรมันชื่อ **รูดอล์ฟ เวอร์ชาว (Rudolph Virchow)** จึงได้เพิ่มหลักการเข้าไปในทฤษฎีของเซลล์อีกข้อหนึ่งคือ

(3) เซลล์ทุกเซลล์ย่อมเกิดมาจากเซลล์ที่มีอยู่ก่อนแล้ว

ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันแล้วว่า เซลล์เป็นหน่วยที่ง่ายที่สุดของสิ่งมีชีวิต ที่สามารถแสดงลักษณะพื้นฐานต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตได้ เช่นการมีโครงสร้างและหน้าที่ที่แน่นอน มีการเจริญและมีการสืบพันธุ์ ในบทนี้จะกล่าวถึงเซลล์ในเรื่องที่เกี่ยวกับการจัดระเบียบและวิธีการแลกเปลี่ยนสารกับสิ่งแวดล้อมภายนอกของเซลล์

3.1 หน้าที่และข้อจำกัดของเซลล์

เซลล์คือโมเลกุลเชิงซ้อนที่มีหน้าที่หลัก 3 ประการคือ (1) ดำรงโครงสร้างที่เป็นเอกลักษณ์ของแต่ละแบบไว้ตลอดเวลา (2) มีการเจริญ และ (3) สามารถสืบพันธุ์ได้ (อาจเป็นแบบอาศัยเพศหรือไม่อาศัยเพศ) หน้าที่อื่น คือ เคลื่อนไหว ตอบสนองต่อสิ่งเร้า บทบาทเกี่ยวข้องกับประจุไฟฟ้า คัดหลั่งสาร ฯลฯ ขนาดของเซลล์มีตั้งแต่เล็กสุดประมาณ 1-100 ไมโครมีเตอร (10^{-6} เมตร) เช่นพวกแบคทีเรีย ขึ้นมาจนถึงขนาดใหญ่ที่สุดคือ ไข่ของพวกนกและสัตว์เลื้อยคลาน ไม่ว่าเซลล์จะมีขนาดและรูปร่างเป็นแบบใด เซลล์ทุกชนิดต้องมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ (1) **เยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane)** ทำหน้าที่แยกหรือล้อมส่วนที่อยู่ภายในออกจากสภาพแวดล้อมภายนอก และควบคุมกลไกการผ่านเข้าออกของสาร (2) **ไซโทพลาซึม (cytoplasm หรือ cytosol)** คือสารที่อยู่ภายในเซลล์ ได้แก่ น้ำ ของเหลวต่าง ๆ เกลือ น้ำตาล เอนไซม์ และส่วนที่มีสัณฐาน คือ **เซลล์ออร์แกเนลล์ (cell organella)** และ (3) **สารพันธุกรรม (genetic material)** คือ DNA ที่ทำหน้าที่ควบคุมกลไกการทำงานต่าง ๆ ของเซลล์

เป็นที่น่าสังเกตว่าสิ่งมีชีวิตทุกชนิดโดยเฉพาะพวกสัตว์และพืชชั้นสูงและมีขนาดใหญ่จะมีเซลล์ขนาดเล็กประกอบกันเป็นอวัยวะและโครงสร้างของระบบต่าง ๆ ของร่างกาย ที่เป็นเช่นนั้นอาจเนื่องมาจากข้อจำกัด 2 ประการ คือ

(1) การมีสารพันธุกรรมอยู่ที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของเซลล์ และมักอยู่บริเวณกลางเซลล์ เพื่อเป็นจุดศูนย์กลางสำหรับส่งกลไกควบคุมการทำงานไปยังส่วนต่าง ๆ ที่กระจายอยู่โดยรอบได้ง่าย ถ้าเซลล์มีขนาดใหญ่ระยะทางจะเป็นอุปสรรคต่อการทำงานโดยเฉพาะการถ่ายรหัสจาก DNA ไปสู่ RNA เพื่อทำหน้าที่ในกระบวนการเมแทบอลิซึมและกระบวนการอื่นซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 6 เซลล์ขนาดใหญ่เช่นโปรติสท์พวก *Paramecium* มีวิวัฒนาการชดเชยข้อจำกัดของการส่งสารควบคุมการทำงานของเซลล์โดยมีจำนวนชุดของสารพันธุกรรมหลายชุด คือ อาจมีถึง 4 ชุด และมีนิวเคลียส (DNA อยู่ภายใน) 2 อัน แบ่งหน้าที่การทำงาน

(2) ข้อจำกัดในการที่เซลล์มีขนาดใหญ่จะเป็นปัญหาต่อการแลกเปลี่ยนสารกับสภาพแวดล้อมภายนอกผ่านทางเยื่อหุ้มเซลล์ (หรือเซลล์เมมเบรน) ในกรณีที่เซลล์รูปทรงกลม สารที่อยู่ภายในส่วนที่ลึกที่สุดก็จะไกลจากพื้นผิวของเยื่อหุ้มเซลล์มากที่สุดเมื่อคิดระยะทางตามแนวรัศมี และถ้าคิดเทียบปริมาตรต่อรัศมี สัดส่วนจะเป็นกำลัง 3 ต่อความยาวรัศมี ดังนั้นถ้าเซลล์เพิ่มขนาดจากเดิมเพียงหนึ่งเท่าตัว ปริมาตรจะเพิ่มขึ้นถึง 8 เท่า แต่พื้นที่ผิวเยื่อหุ้มเซลล์จะเพิ่มขึ้นเพียง 4 เท่า เมื่อเซลล์มีปริมาตรเพิ่มขึ้น กระบวนการชีวเคมีก็เพิ่มมากขึ้น จึงจำเป็นต้องได้อาหารและออกซิเจนเพื่อนำมาใช้ ขณะเดียวกันของเสียก็จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อกระบวนการต่าง ๆ เช่น การ**แพร่ (diffusion)** จำเป็นต้องผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ทั้งเข้าและออก จึงเป็นข้อจำกัดให้เซลล์ต้องมีขนาดเล็ก ในบางกรณีเซลล์ที่มีขนาดใหญ่มีวิวัฒนาการชดเชยข้อจำกัดพื้นที่ผิวเยื่อหุ้มเซลล์ โดยมีการพับย่นให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นเช่น เซลล์ขนของเยื่อบุผิวหนังลำไส้เล็ก แต่โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตขนาดใหญ่จะเพิ่มขนาดเซลล์ให้ใหญ่มิได้ เพราะไม่สามารถทนต่อแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม จึงทำให้มีวิวัฒนาการมาสู่การมีอวัยวะและระบบต่าง ๆ เพื่อการหมุนเวียนสารและแลกเปลี่ยนสารระหว่างภายในและภายนอกร่างกาย

3.2 ผนังเซลล์

ผนังเซลล์ (cell wall) พบเฉพาะในเซลล์แบคทีเรีย โปรติสท์พวกแอลจี ฟังไจ และเซลล์พืช โดยทั่วไปผนังเซลล์เป็นสารประกอบพอลิแซกคาไรด์ ซึ่งมีรายละเอียดโครงสร้างของโมเลกุลต่างกันเล็กน้อยในสิ่งมีชีวิตแต่ละกลุ่ม

(1) ผนังเซลล์ของแบคทีเรียมีโครงสร้างเป็นสารไคทินและมีกรดอะมิโนกับสารอื่น

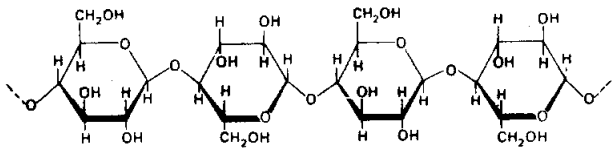
บางสารเป็นส่วนประกอบรอง ขึ้นอยู่กับว่าจะเป็นแบคทีเรียแท้จริงหรือไซแอโนแบคทีเรีย

(2) ผนังเซลล์ของฟังไจมีโครงสร้างหลักเป็นสารพวกไคทินที่เปลี่ยนแปลง จากการแทนที่หมู่ -OH ของเซลลูโลสด้วย สารประกอบมีไนโตรเจน (รูป 3-1 ก) จึงทำให้ไคทินมีคุณลักษณะแข็งเหนียว โค้งงอได้

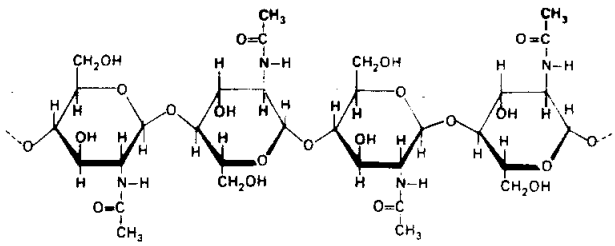
(3) ผนังเซลล์ของโปรติสท์พวกแอลจีและพืช มีโครงสร้างหลักเป็นเซลลูโลส ซึ่งมีโมโนเมอร์เป็นกลูโคสเช่นเดียวกับ แป้งและไกลโคเจน แต่การจัดเรียงพันธะระหว่างโมโนเมอร์ต่างกัน (รูป 3-1 ข) คือมีการพลิกคว่ำระนาบของโมเลกุลของกลูโคสสลับกัน

รูป 3-1 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิแซกคาไรด์ที่เป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์

ก. เซลลูโลส



ข. ไคทิน



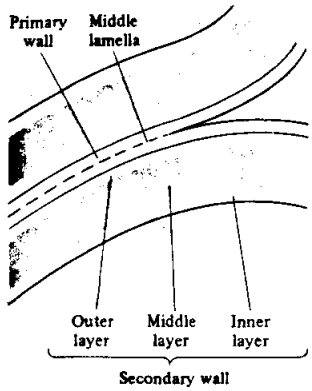
ผนังเซลล์ของพืชประกอบด้วยชั้นกลางซึ่งเป็นชั้นที่ผนังเซลล์สองเซลล์ติดกัน เกิดขึ้นตั้งแต่ระยะการแบ่งเซลล์ช่วงสุดท้าย (anaphase และ telophase) เรียกชั้นนี้ว่า **middle lamella** ซึ่งเป็นสารพวกเพคทิน เมื่อเซลล์เจริญขึ้นมีการสร้างผนังเซลล์ชั้นแรกเพิ่มเข้าไป เรียก **primary cell wall** เพื่อเพิ่มความแข็งแกร่งทนต่อ **แรงเต่ง (turgor pressure)** ภายในเซลล์ได้ ผนังเซลล์ยังคงมีความยืดหยุ่นอยู่ เซลล์ในพืชแต่ละชนิด หรือในเซลล์ของเนื้อเยื่อแต่ละประเภทต่างกันที่การสร้างผนังเซลล์ชั้นที่สอง **(secondary cell wall)** ซึ่งเป็นสารประกอบเซลลูโลส เพิ่มเข้าไป ซึ่งอาจมีถึง 3 ชั้น (รูป 3-2 ก และ ข) เซลลูโลสเป็นเส้นใยเล็ก ๆ ของพอลิแซกคาไรด์ของกลูโคสขนาบเส้นใยของเซลลูโลส คือ เฮมิเซลลูโลสซึ่ง

เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโทสและเฮกโซส ระหว่างมัดของเส้นใยเซลลูโลสมีเส้นใยโปรตีนแทรกผสาน (รูป 3-2 ค) จึงทำให้ผนังเซลล์ชั้นที่สองแข็งแกร่ง พบในเซลล์เนื้อเยื่อของระบบท่อลำเลียงโดยเฉพาะในพืชที่ให้เนื้อไม้

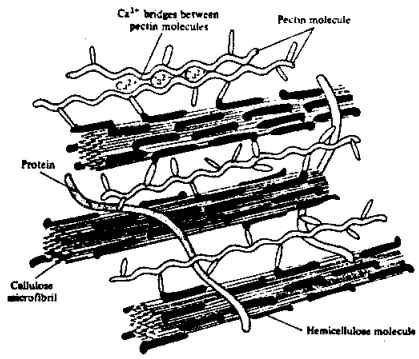
รูป 3-2 แผนภาพผนังเซลล์ของพืชแสดงส่วนประกอบหลัก

ก. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทัศน์อิเล็กตรอน

ข. ภาพจำลองของ ก.



ค. ภาพจำลองแสดงส่วนประกอบผนังเซลล์ชั้นที่สอง



จาก Barrett, James M., et al. 1986

ผนังเซลล์ชั้นที่สองเพิ่มขนาบเข้าไปบนผนังเซลล์ชั้นแรกโดยมีเยื่อหุ้มคั่นกลาง การเพิ่มจะมีช่องว่างเว้นเป็นระยะเรียกช่องนี้ว่า **พิท (pit)** ของเหลวในไซโทพลาซึม ไหลผ่านระหว่างเซลล์ได้โดยผ่านพิท และผ่านช่อง **พลาสโมเดสมาทา (plasmodesmata)** ซึ่งอยู่ระหว่างผนังเซลล์ชั้นแรก

3.3 เยื่อหุ้มเซลล์

เยื่อหุ้มเซลล์เป็นขอบเขตที่กั้นสิ่งมีชีวิตกับสภาพแวดล้อมภายนอกที่ไม่มีชีวิต ทำหน้าที่

หลักในการควบคุมและเลือกการส่งผ่านเข้าและออกจากเซลล์ รวมทั้งหน้าที่อื่นที่สลับซับซ้อน จึงมีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด เพื่อให้เข้าใจบทบาทของเยื่อหุ้มเซลล์จึงควรทราบโครงสร้างทั่วไปและหน้าที่พอเป็นสังเขป คือ

3.3.1 **โครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์** นับตั้งแต่ปี ค.ศ.1895 ที่ C.Overton ได้เสนอแนวคิดว่าเยื่อหุ้มเซลล์ประกอบด้วยลิพิดเนื่องจากสังเกตว่า สารที่ละลายในลิพิดได้สามารถผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้เร็วกว่าสารที่ไม่ละลายในลิพิด มีการศึกษาต่อเนื่องจนล่วงถึงทศวรรษ 1950 กล้องจุลทัศน์อิเล็กตรอนพัฒนามากขึ้นจึงสามารถเห็นรายละเอียดของเยื่อหุ้มเซลล์มากขึ้น ความรู้เก่าที่ไม่สมบูรณ์ได้รับการแก้ไขเพื่อให้สามารถเข้าใจหน้าที่ทั่วไปของเยื่อหุ้มเซลล์ได้อย่างสมเหตุสมผล จนกระทั่งปี ค.ศ.1972 ซิงเกอร์ และนิคอลสัน (S.Singer and G.Nicolson) ได้เสนอแบบจำลองของเยื่อหุ้มเซลล์ซึ่งเป็นที่ยอมรับมาจนถึงปัจจุบันเรียกว่า **fluid mosaic model of cell membrane)** (รูป 3-3)

เยื่อหุ้มเซลล์มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ

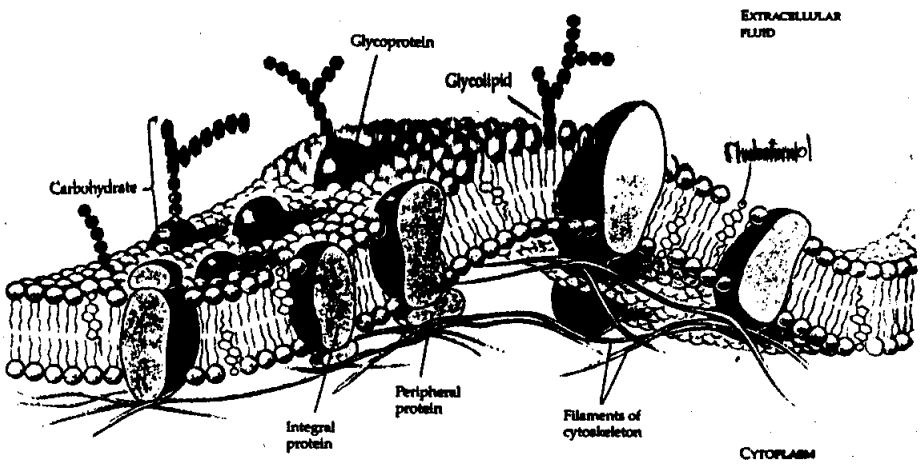
(1) ชั้นของลิพิด **(lipid bilayers)** มี 2 ชั้น ห่างกันประมาณ 200 แองสตรอม แต่ละชั้นหนาประมาณ 200 แองสตรอม ชั้นนอกสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอก (ของเหลว อากาศ หรือ เซลล์ที่อยู่ติดกัน) ชั้นในสัมผัสกับไซโทพลาซึม โมเลกุลของลิพิดซึ่งส่วนใหญ่เป็นฟอสโฟลิพิด เรียงตัวหันด้านที่ชอบน้ำออกสู่ด้านนอก และหันด้านไม่ชอบน้ำเข้าหากัน แต่ละโมเลกุลที่เรียงในแนวระดับดึงดูดกันด้วยแรงหนีน้ำ (hydrophobic attraction) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดอ่อนกว่าพันธะโคแวเลนท์ จึงทำให้แต่ละโมเลกุลไม่อยู่นิ่ง มีทั้งแรงดึงดูดและแรงดันส่วนใหญ่จะอยู่ในแนวราบ ซึ่งเป็นลักษณะไดนามิคส์ (dynamics) ของเยื่อหุ้มเซลล์

(2) โปรตีน มีลักษณะเป็นก้อน แทรกกระจายไม่สม่ำเสมออยู่ระหว่างชั้นของลิพิด ถ้าแทรกอยู่ระหว่างชั้นลิพิดชั้นใดชั้นหนึ่งเรียก **เพอริเฟรัลโปรตีน (peripheral protein)** ถ้าแทรกทะลุระหว่างชั้นทั้งสองของลิพิดเรียก **อิมเทกรัลโปรตีน (integral protein)** ปริมาณและชนิดของโปรตีนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและหน้าที่ของเซลล์ จากการศึกษาเยื่อหุ้มเซลล์ของเม็ดเลือดแดงพบว่ามีโปรตีนมากกว่า 50 ชนิด และเคลื่อนที่ได้เช่นเดียวกับลิพิด

(3) คาร์โบไฮเดรต ส่วนใหญ่เป็นโอลิโกแซกคาไรด์ ที่รวมเป็นโมเลกุลเชิงซ้อนอยู่กับโปรตีนหรือลิพิด มีทั้งแบบที่เป็นเส้นเดียวและแตกแขนงขึ้นอยู่กับหน้าที่ของเซลล์

ส่วนประกอบอื่นที่สำคัญคือ คอเลสเทรอล ซึ่งแทรกอยู่ระหว่างชั้นของลิพิดโดยมีพันธะอยู่กับโมเลกุลของลิพิดช่วยให้โมเลกุลของลิพิดจับตัวกันแน่นขึ้นเป็นบางตำแหน่ง พบคอเลสเทรอลมากในเยื่อหุ้มเซลล์ของเม็ดเลือดแดงและเซลล์ประสาท สารอื่นที่สำคัญคือ เอนไซม์ ถ้ามีหน้าที่เกี่ยวข้องกับสารบริเวณนอกของเยื่อหุ้มเซลล์เรียก **ectoenzyme** ถ้ามีหน้าที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาภายในเยื่อหุ้มเซลล์ (ในไซโทพลาซึม) เรียก **endoenzyme** เท่าที่พบในปัจจุบันมีมากกว่า 20 ชนิด เช่น acetylphosphatase, acetylcholinesterase, adenosine triphosphatase, lactase, maltase, sucrase เป็นต้น ส่วนประกอบของเหล่านี้มีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและหน้าที่ของเซลล์

รูป 3-3 ภาพจำลองฟลูอิดโมเสกของเยื่อหุ้มเซลล์ ให้สังเกตการเชื่อมต่อโมเลกุลของก้อนโปรตีนกับเส้นใยค้ำจุนโครงสร้างของเซลล์ (cytoskeleton)



จาก Campbell, Neil A. 1990

3.3.2 **หน้าที่ของเยื่อหุ้มเซลล์** ดังได้กล่าวแล้วแต่ต้นว่าหน้าที่หลักของเยื่อหุ้มเซลล์คือการเลือกให้สารชนิดใดชนิดหนึ่งผ่านเข้าหรือออกจากเซลล์ การพิจารณาหน้าที่จึงนิยมพิจารณาตามส่วนประกอบที่เป็นโครงสร้างหลักเพื่อจะได้เข้าใจกลไกการทำงานได้ดีขึ้น

(1) ส่วนประกอบที่เป็นลิพิด ยอมให้โมเลกุลของสารบางอย่างผ่านได้ตามลักษณะคุณสมบัติของโมเลกุลที่เป็นลิพิดซึ่งกระจายอยู่ในชั้นลิพิดของเยื่อหุ้มเซลล์ เช่น น้ำผ่านได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากผ่านช่องระหว่างโมเลกุลของลิพิด โดยส่วนที่เป็นเส้นกรดไขมันหลีกทางให้

(ดูข้อ 2.3.2 (2)) แต่กลูโคสและโมเลกุลที่มีไอออนหรือประจุผ่านไม่ได้ เนื่องจากขนาดใหญ่กว่าช่องระหว่างโมเลกุลของลิพิด และยังถูกผลักโดยประจุไฟฟ้าที่อยู่บนชั้นของลิพิดด้วย (ดูตาราง 3-1)

ตาราง 3-1 ตัวอย่างชนิดของสารที่สามารถผ่านและไม่ผ่านชั้นของลิพิด สารที่อยู่ลำดับต้นผ่านได้เร็วกว่าสารในลำดับรองของแต่ละกลุ่ม

ลักษณะโมเลกุลของสาร	ตัวอย่างสาร	การผ่านตลอด (permeability)
ชอบน้ำ	N_2, O_2 ไฮโดรคาร์บอน	ผ่านตลอด
ขนาดเล็ก, มีขั้ว	H_2O, CO_2 กลิเซรอล, ยูเรีย	ผ่านตลอด
ขนาดใหญ่, มีขั้ว	กลูโคส, โมโนแซกคาไรด์ และไดแซกคาไรด์ที่ไม่มีประจุ	ไม่ผ่าน
ไอออน, โมเลกุลมีประจุ	กรดอะมิโน, H^+, HCO_3^- Na^+, K^+, Ca^{2+}, Cl^-, Mg^{2+}	ไม่ผ่าน

สารที่ไม่ผ่านชั้นของลิพิดสามารถผ่านเข้าและออกจากเซลล์ได้โดยผ่านทางส่วนประกอบอื่นและวิธีการอื่น (ดู 3.4)

(2) ส่วนประกอบที่เป็นโปรตีน ส่วนที่เป็นอินเทกรัลโปรตีนมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการขนส่งผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ (ข้อ 3.4) สารที่เซลล์ยอมให้ผ่านได้ส่วนมากเนื่องมาจากกลไกการทำงานของส่วนประกอบที่เป็นโปรตีน นอกจากนี้ยังมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเอนไซม์ การยึดติดของเยื่อหุ้มเซลล์ที่อยู่ชิดกัน การยึดเยื่อหุ้มเซลล์กับโครงสร้างค้ำจุนภายในเซลล์ (เส้นใยแอกทิน) การเคลื่อนที่ของเซลล์ และหน้าที่อื่นโดยทำงานร่วมกับส่วนประกอบอื่นของเยื่อหุ้มเซลล์

(3) ส่วนประกอบที่เป็นคาร์โบไฮเดรต โอลิโกแซกคาไรด์ที่พันธะอยู่กับโปรตีนเป็นไกลโคโปรตีน หรือพันธะอยู่กับลิพิดเป็นไกลโคลิพิดนั้นมักมีการแตกแขนงและมีจำนวนโมโนเมอร์

ไม่เกิน 15 หน่วย โมโนเมอร์เหล่านี้อาจเป็นโมโนแซกคาไรด์พันธะอยู่กับอะมิโนชูการ์ จึงทำให้ผิวนอกของเยื่อหุ้มเซลล์ต่างกันตามลักษณะหน้าที่ของเซลล์แต่ละชนิด แต่ละเนื้อเยื่อ และแต่ละชนิดของสิ่งมีชีวิต เนื่องจากโอลิโกแซกคาไรด์มีคุณสมบัติชอบน้ำ จึงอาจเป็นไปได้ที่ช่วยให้การจัดตัวผิวนอกของชั้นเยื่อหุ้มเซลล์สัมผัสสภาพแวดล้อมภายนอกที่เป็นของเหลวไว้ได้ตลอดเวลา และอาจมีการหมุนตัวกลับเข้ามาด้านในที่ไม่ชอบน้ำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงประจุ โปรตีนในน้ำเลือด ฮอร์โมน และเอนไซม์บางชนิด เป็นไกลโคโปรตีนเช่นเดียวกันกับไกลโคโปรตีนของชั้นนอกของเยื่อหุ้มเซลล์ จึงเป็นไปได้ที่โอลิโกแซกคาไรด์จะมีบทบาทสำคัญต่อกลไกการทำงานที่เกี่ยวข้องกับกลไกการทำงานของทั้งไกลโคโปรตีน และไกลโคลิพิด ซึ่งเป็นเรื่องที่กำลังศึกษากันมากในหมู่นักเซลล์วิทยาและสรีรวิทยา อย่างไรก็ตาม หน้าที่ของคาร์โบไฮเดรตที่ทราบแล้ว คือการจำเซลล์ชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดได้ ซึ่งเป็นที่มาของหน้าที่ต่าง ๆ คือ

ก. การกำหนดหมู่เลือดของมนุษย์ หมู่เลือดหลักของมนุษย์คือ แบบ ABO หมู่เลือดรองคือ MN Rh และอื่น ๆ ชนิดและลำดับการเรียงตัวของน้ำตาลและอะมิโนชูการ์ในโอลิโกแซกคาไรด์ของผู้ที่มีหมู่เลือด A ต่างจากผู้ที่มีหมู่เลือด B AB และ O ตามลำดับ ซึ่งเป็นพื้นฐานคุณสมบัติการเกิดแอนติเจน แอนติบอดีของระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย

ข. การยึดติดระหว่างผิวนอกของเยื่อหุ้มเซลล์ที่อยู่ติดกัน Oppenheimer และผู้ร่วมงานพบว่า ถ้าเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อเมื่อเซลล์เจริญ และแบ่งตัวจนเซลล์มาติดกันแล้ว จะไม่มีการแบ่งเซลล์อีก ซึ่งเขาเชื่อว่าเกิดจากการมีพันธะระหว่างคาร์โบไฮเดรตที่ผิวนอกของเซลล์ที่อยู่ติดกัน

ค. การจับกับ **เลกทิน (lectin)*** เลกทินมีคุณสมบัติจับก้อนเม็ดเลือดแดงได้ การทำงานมีลักษณะเฉพาะแบบเดียวกับการทำงานของเอนไซม์ แต่ไม่ใช่การทำงานแบบระบบภูมิคุ้มกัน เลกทินชนิดใดชนิดหนึ่งจะพันธะกับน้ำตาลชนิดหนึ่งของไกลโคโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบ

---

*lectin มาจากคำภาษาลาติน legeres มีความหมายว่า เลือก เป็นกลุ่มของโปรตีนในเมล็ดพืชที่สามารถพันธะกับคาร์โบไฮเดรตได้ พบครั้งแรกในเซลล์พืชโดย H.Stilmark ตั้งชื่อว่า phytohemagglutinin ปัจจุบันพบเลกทินในสิ่งมีชีวิตหลายชนิดรวมทั้งเยื่อหุ้มเซลล์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

ของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก (ดูตาราง 3-2) เนื่องจากเลกทินมีตำแหน่งพันธะ (binding site) หลายตำแหน่ง จึงทำให้เลือดจับก้อนได้ ความรู้นี้ใช้ประยุกต์หาปริมาณเซลล์มะเร็งชนิดไม่ร้ายแรงในเลือดได้ เนื่องจากไกลโคโปรตีนของเยื่อหุ้มเซลล์มะเร็งจับตัวกันอย่างหลวม จึงมาจับกับเลกทินง่าย จึงใช้ความเข้มข้นของเลกทินในปฏิกิริยาจับก้อนน้อยกว่าเลือดของคนปกติ

ตาราง 3-2 เลกทินบางชนิดที่มีพันธะเฉพาะกับน้ำตาลหรืออนุพันธ์ของน้ำตาล

เลกทิน	น้ำตาลหรืออนุพันธ์ของน้ำตาล
concanavalin A	D-mannose
pea lectin	N-acetyl -D-glucosamine
wheat germ agglutinin	
potato lectin	
tomato lectin	
caster bean (เมล็ดละหุ่ง) *Ricinis communis* agglutinin)	D-galactose
peanut agglutinin (ถั่วลิสง)	N-acetyl-D-galactosamine
soybean agglutinin (ถั่วเหลือง)	
lima bean lectin	
Limulus lectin	N.acetylneuraminic acid

ง. การเกิดแอนติเจน-แอนติบอดี โดยทั่วไปไกลโคโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ มีคุณสมบัติเป็นแอนติเจนเช่นเดียวกับสิ่งแปลกปลอมประเภทอื่น เมื่อมีสิ่งแปลกปลอมหลุดเข้าสู่ร่างกายโดยเฉพาะ แอนติเจนที่ผิวเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลชีพ (แบคทีเรีย โปรโตซัว) ไกลโคโปรตีนที่เยื่อหุ้มเซลล์ของเม็ดเลือดขาว (T-lymphocyte) จะจำได้ว่าไม่ใช่เซลล์ของร่างกาย มีกลไกกระตุ้นเอนไซม์ให้เซลล์สร้างแอนติบอดี (โปรตีน) ขึ้น ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 12

3.4 การขนส่งผ่านเยื่อหุ้มเซลล์

ในกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ สารสามารถแพร่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวและแก๊สได้อย่างไม่มีขอบเขตจำกัด แต่ในสิ่งมีชีวิต เยื่อหุ้มเซลล์ทำหน้าที่กั้นขอบเขตระหว่างสิ่งแวดล้อมภายนอกและสารที่อยู่ภายในเซลล์ไว้จึงทำให้มีข้อจำกัดการผ่านเข้า-ออกของสาร แต่เซลล์จำเป็นต้องได้รับสารบางอย่างเข้าไปและขจัดสารบางอย่างออกมา เพื่อการดำรงชีวิตที่สมบูรณ์ เยื่อหุ้มเซลล์จึงต้องมีคุณสมบัติในการเลือกสารให้ผ่านเข้าออกด้วยกลไกหลัก 3 ประเภท คือ **สารขนส่งแบบกสานต์ (passive transport) การขนส่งแบบมีอุปกรณ์ช่วย (facilitated transport)** และ **การขนส่งแบบกัมมันต์ (active transport)**

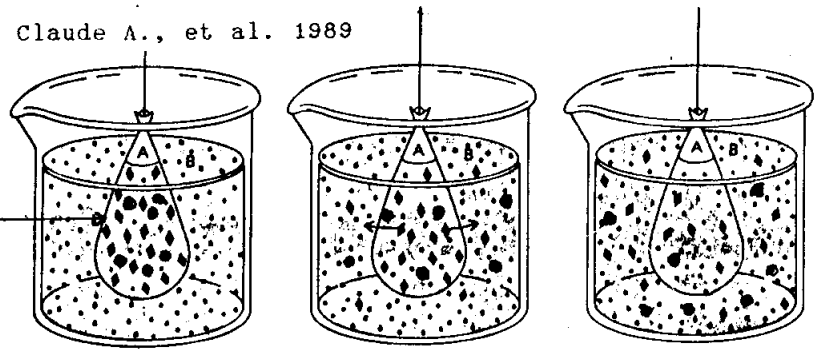
3.4.1 **การขนส่งแบบกสานต์ การแพร่ (diffusion)** เป็นรูปแบบหนึ่งของการขนส่งแบบกสานต์ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงาน สารโมเลกุลเล็กหรืออนุภาคขนาดเล็กเคลื่อนผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ในทิศทางความเข้มข้นของสารมากไปสู่ความเข้มข้นของสารน้อย ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่คือพลังงานจลน์ที่มีอยู่ในตัวสาร และอุณหภูมิซึ่งถ้าเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้เคลื่อนที่ได้ดีและเร็วขึ้น สารที่จะผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้คือ **ตัวทำละลาย (solvent)** แต่ **ตัวถูกละลาย (solute)** ไม่สามารถผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ที่มีชีวิตโดยวิธีการแพร่ได้ ผ่านได้ในกรณีทำการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้เยื่อบางที่มีคุณสมบัติกึ่งสภาพซึมผ่านได้คล้ายเยื่อหุ้มเซลล์เช่น เซลโลเฟน

(1) **ไดอะไลซิส (dyalysis)** คือการแพร่ของตัวถูกละลายผ่านเยื่อบาง (เซลโลเฟน) ที่มีคุณสมบัติกึ่งสภาพซึมผ่านได้ ทดลองทำได้ง่ายโดยนำน้ำหวานใส่สีใส่ในถุงเซลโลเฟน แล้วนำมาห้อยแขวนไว้ในภาชนะที่มีน้ำกลั่น ตัวถูกละลาย (น้ำตาลและสารสี) จะแพร่ผ่านเยื่อเซลโลเฟนออกมาอยู่ในน้ำ และน้ำก็สามารถแพร่เข้าไปในถุงเซลโลเฟนได้ แต่ความเข้มข้นในถุงและนอกถุง (เมื่อหยุดการแพร่) ไม่จำเป็นต้องเท่ากัน (รูป 3-4)

รูป 3-4 แผนภาพการแพร่ของตัวถูกละลายผ่านเยื่อเซลโลเฟน จุดกลมสีเข้มแทนโมเลกุลของน้ำตาล จุดเหลี่ยมสีจางแทนโมเลกุลของสารสีและจุดกลมเล็กแทนโมเลกุลของน้ำ

ก. เมื่อเริ่มต้น ข. ขณะมีการแพร่ ค. เมื่อหยุดการแพร่

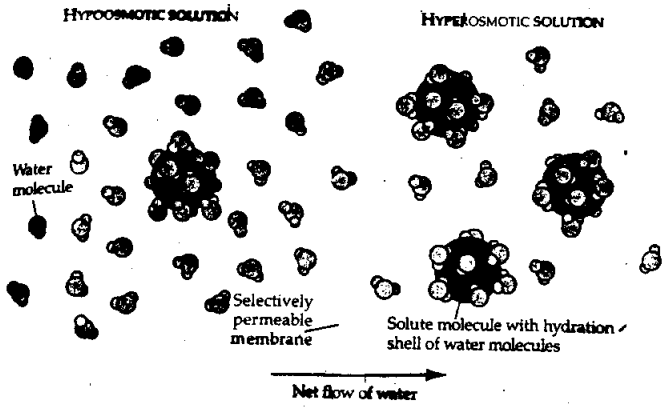
จาก Villee, Claude A., et al. 1989

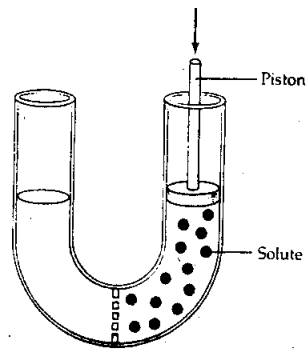


(2) **ออสโมซิส (osmosis)** เป็นการแพร่แบบพิเศษที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของตัวทำละลายคือน้ำผ่านเยื่อกึ่งสภาพซึมผ่านได้ น้ำจะแพร่จากสารละลายที่มีความเข้มข้นของน้ำสูง (สารละลายเจือจางมีโมเลกุลของน้ำมาก มีโมเลกุลของตัวถูกละลายน้อย) ไปสู่สารละลายที่มีความเข้มข้นของน้ำต่ำ (สารละลายเข้มข้น) แต่ตัวถูกละลายจะคงอยู่ที่เดิม กลไกการทำงานเนื่องมาจาก จำนวนโมเลกุลของน้ำในสารละลายเจือจางมีมากกว่าจำนวนโมเลกุลของน้ำในสารละลายเข้มข้น ซึ่งโมเลกุลของน้ำจะไปรวมอยู่รอบบริเวณตัวถูกละลาย (รูป 3-5ก) ทำให้โมเลกุลของน้ำที่จะแพร่โดยอิสระลดลง สารละลายที่มีความเข้มข้นของน้ำสูงเรียกว่า **hyperosmotic solution** จะมี**แรงดันออสโมซิส (osmotic pressure)** สูงกว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นของน้ำต่ำ ซึ่งเรียกว่า **hypoosmotic solution** ดังนั้นโมเลกุลของน้ำอิสระจึงแพร่ผ่านเยื่อกึ่งสภาพซึมผ่านได้ตลอด จนกระทั่งความเข้มข้นของน้ำทั้งสองข้างเท่ากัน หลักความจริงนี้สามารถทดลองในห้องปฏิบัติการได้ นำหลอดแก้วรูปตัว U มาคั่นกลางด้วยเยื่อกึ่งสภาพซึมผ่านได้ ด้านขวาใส่น้ำกลั่น ด้านซ้ายใส่น้ำเชื่อม (ความเข้มข้นของน้ำน้อยกว่า) โดยให้มีปริมาตรเท่ากัน ใส่ลูกสูบที่มีหน้าตัดพอดีกับหน้าตัดภายในของหลอดแก้ว ใช้ดินสอสีเขียนระดับความสูง ทั้งสองข้าง (รูป 3-5 ข) ด้วยแรงดันออสโมซิส น้ำจะแพร่จากด้านขวาผ่านเยื่อกึ่งสภาพซึมผ่านได้ไปยังด้านซ้ายที่บรรจุน้ำเชื่อมไว้ ซึ่งจะดันลูกสูบให้สูงขึ้นพอสังเกตเห็นได้ แต่ลูกสูบจะไม่ขึ้นสูงมาก และจะหยุดเคลื่อนที่เนื่องจากแรงดึงดูดของโลก ถึงแม้ว่าโมเลกุลของน้ำจะแพร่ผ่านเยื่อกึ่งสภาพซึมผ่านได้อยู่ตลอดเวลาก็ตาม

รูป 3-5 การแพร่แบบออสโมซิส

ก. อิทธิพลของตัวถูกละลายต่อการเคลื่อนที่ของน้ำ ข. การวัดแรงดันออสโมซิส





จาก Campbell, Neil A. 1990

เมื่อต้องการเปรียบเทียบแรงดันออสโมซิสของสารละลาย 2 ชนิดมีคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องคือ **ไอโซโทนิก (isotonic) ไฮเพอร์โทนิก (hypertonic)** และ **ไฮพอโทนิก (hypotonic)**

สารอนินทรีย์ที่มีอยู่ในเซลล์มีชีวิตทุกชนิด คือ เกลือโดยเฉพาะเกลือแกง และน้ำตาล รวมทั้งสารละลายอื่นซึ่งทำหน้าที่ควบคุมให้เซลล์เหล่านั้นมีแรงดันออสโมซิสที่เหมาะสม เมื่อนำเซลล์ไปใส่ในสารละลายที่มีแรงดันออสโมซิสเท่ากัน ไม่มีการแพร่ของน้ำเข้าหรือออกจากเซลล์ จึงไม่มีการบวมพองหรือหดของเซลล์ เรียกสารละลายที่มีแรงดันออสโมซิสเท่ากับเซลล์ว่าไอโซโทนิก เช่น น้ำเลือด และของเหลวต่าง ๆ ของร่างกาย อาจทำไอโซโทนิกเทียมขึ้นได้โดยละลายเกลือแกง 0.85 กรัมในน้ำ 1 ลิตร ได้สารละลายเรียกว่า normal saline หรือ physiological saline ที่มีแรงดันออสโมซิสเท่ากับน้ำเลือดและของเหลวของร่างกาย (มนุษย์) ปริมาณของเกลือแกงในสัตว์ต่างชนิดจะต่างกันเพียงเล็กน้อย

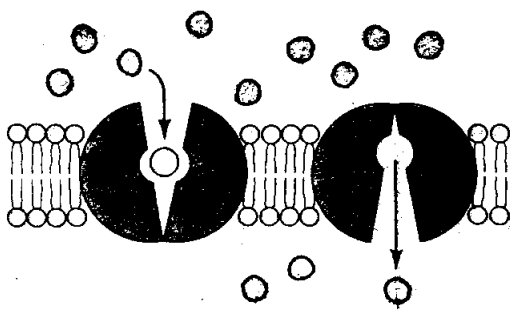
ถ้านำเม็ดเลือดแดงไปใส่ในน้ำเกลือข้นร้อยละ 1.3 ซึ่งแรงดันออสโมซิสจะต่ำกว่าภายในเซลล์เม็ดเลือดแดง เป็นผลให้น้ำแพร่ออกมาจากเม็ดเลือดแดงและทำให้เหี่ยว เกิด **พลาสโมไลซิส (plasmolysis)** เรียกสารละลายเกลือข้นร้อยละ 1.3 ว่าเป็นไฮเพอร์โทนิกต่อเม็ดเลือดแดงในทำนองเดียวกัน ถ้านำเม็ดเลือดแดงไปใส่ในน้ำกลั่นซึ่งมีแรงดันออสโมซิสสูงกว่าเซลล์เม็ดเลือดแดง น้ำจะแพร่เข้าไปในเม็ดเลือดแดงดันเซลล์ให้โป่งพองออกจนเยื่อหุ้มเซลล์ไม่สามารถทนต่อแรงดันออสโมซิสที่เพิ่มขึ้นภายในเซลล์ได้ เซลล์จะแตกเรียก **ฮีโมไลซิส**

(hemolysis) น้ำกลั่นถือว่ามีสภาพเป็นไฮพอโทนิกต่อเซลล์เม็ดเลือดแดง โปรติสท์บางชนิด เช่น อะมีบา และพารามีเซียม ขดเซยแรงดันออสโมซิสที่เพิ่มขึ้นโดยเก็บน้ำไว้ในคอนแทรกไทล์แวคิวโอลแล้วปล่อยออกสู่ภายนอกเป็นครั้งคราว

เยื่อหุ้มเซลล์ที่มีผนังเซลล์เสริมความแข็งแรง สามารถทนแรงดันออสโมซิสภายในเซลล์ได้เมื่อน้ำแพร่เข้าสู่เซลล์มากขึ้น และมีแรงดันมากขึ้น แรงดันที่มีต่อผนังเซลล์นี้เรียกว่า **ความเต่ง (turgor pressure)** ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการค้ำจุนโครงสร้างเนื้อเยื่อพืชที่ไม่มีเนื้อไม้หรือส่วนของพืชที่ไม่มีเซลล์ของเนื้อเยื่อระบบท่อลำเลียงเช่น กลีบดอก ซึ่งจะเหี่ยวเมื่อความเต่งลดลง

3.4.2 **การขนส่งแบบมีอุปกรณ์ช่วย** เป็นการขนส่งสารโดยไม่ใช้พลังงานเช่นเดียวกับการขนส่งแบบกสานติ์ แต่จะมีสารประกอบพวกโปรตีนช่วยทำหน้าที่จับแล้วลำเลียงสารที่จับไว้ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ โดยนำโมเลกุลขนาดใหญ่ของสารผ่านโดยวิธีกสานติ์ แต่ไม่ใช่จากแหล่งที่มีความเข้มข้นของโมเลกุลสารนั้นสูงไปสู่แหล่งที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า (รูป 3-6) เช่นการขนส่งน้ำตาลกลูโคสผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เม็ดเลือดแดงซึ่งมีไกลโคโปรตีนทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ช่วยนำกลูโคสอยู่ร้อยละ 2 ของโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ กลูโคสจะไม่แพร่ย้อนกลับออกสู่ภายนอกเซลล์ด้วยเอนไซม์ที่มาช่วยเติมหมู่ฟอสเฟตเข้าไปที่โมเลกุลของกลูโคสได้เป็นกลูโคสฟอสเฟตมีประจุผ่านกลับออกไปไม่ได้ และยังช่วยให้ความเข้มข้นของโมเลกุลของกลูโคสอยู่ในระดับต่ำกว่าภายนอกอยู่ตลอดเวลาได้ด้วย

รูป 3-6 ภาพจำลองกลไกการขนส่งแบบมีอุปกรณ์ช่วยโดยผ่านร่องที่อยู่ระหว่างไกลโคโปรตีนของเยื่อหุ้มเซลล์



จาก Campbell, Neil A. 1990

มีผู้แย้งว่าถ้าช่องตามธรรมชาติที่มีอยู่ระหว่างไกลโคโปรตีนแคบเกินกว่าโมเลกุลของกลูโคสจะผ่านได้ ทำไมกลูโคสจึงสามารถผ่านเข้าสู่เซลล์ได้ มีทฤษฎีอธิบายว่า กลูโคสอาจมีพันธะที่ตำแหน่งหนึ่งของโมเลกุลของไกลโคโปรตีนเป็นผลให้รูปร่างของโมเลกุลเปลี่ยนแปลงไปเปิดเป็นช่อง (**channel**) ขึ้นเมื่อปล่อยกลูโคสเข้าสู่ภายในเซลล์แล้วโมเลกุลของไกลโคโปรตีนคืนรูปกลับดังเดิม

สารประกอบที่มีขั้วเช่น กลูโคส กรดอะมิโนบางชนิด ถูกขนส่งผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ด้วยกลไกการขนส่งแบบมีอุปกรณ์ช่วย ในกรณีที่เกิดความบกพร่องก็เป็นสาเหตุของการเกิดโรค เช่น อาการน้ำปัสสาวะมีซิสเทอีน (**cystinuria**) ซึ่งเป็นอาการผิดปกติในหน้าที่การทำงานของไตแบบหนึ่ง ปกติเซลล์เยื่อบุผิวผนังของหลอดไตฝอยจะดูดกรดอะมิโน (รวมทั้ง cysteine ด้วย) จากน้ำปัสสาวะกลับเข้าสู่ระบบหมุนเวียนโลหิต เมื่อการทำงานของเยื่อหุ้มเซลล์บุผนังของหลอดไตฝอยบกพร่อง ดูดกรดอะมิโนซิสเทอีนกลับไม่ได้จึงมีการสะสมของซิสเทอีนอยู่ในน้ำปัสสาวะ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการจับเป็นนิวเคลียสของก้อนนิ่วในหลอดไตฝอยได้

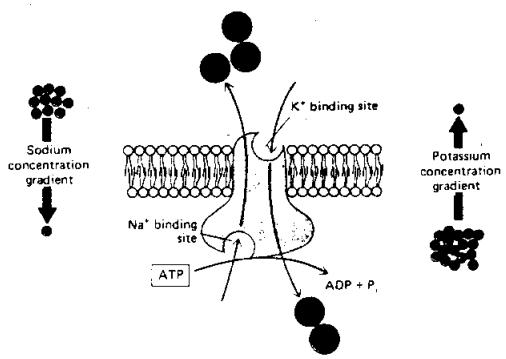
3.4.3 **การขนส่งแบบกัมมันต์** สารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตมีคุณสมบัติต่างกัน การขนส่งสารที่มีโมเลกุลใหญ่หรือมีประจุจึงเป็นเรื่องยากที่จะให้ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ด้วยวิธีการแพร่แบบธรรมดาหรือวิธีการแพร่แบบพิเศษ เซลล์ของสิ่งมีชีวิตจึงต้องนำพลังงานในรูปของ ATP มาใช้เพื่อการนำสารดังกล่าวผ่านเข้าหรือออกจากเซลล์ด้วยการผ่านความเข้มข้นหรือศักย์ ซึ่งมีกลไกหลายแบบคือ

(1) **carrier-mediated active transport** เป็นการขนส่งแบบกัมมันต์ที่ใช้พลังงาน ATP ดันสารผ่านเยื่อหุ้มเซลล์โดยมีโปรตีนของเยื่อหุ้มเซลล์เป็นตัวพาไอออนของสารซึ่งจำเป็นในการเป็นอิเล็กโทรไลท์ การสื่อสารของเซลล์ประสาทใช้กลไกนี้ ตัวอย่างในรูป 3-7 คือ **การดันโซเดียม-พอแทสเซียม (sodium-potassium pump)** โดยใช้พลังงาน ATP จากการศึกษาเซลล์ของสัตว์พบว่าโปรตีนที่เป็นตัวพามีความเฉพาะในการมีตำแหน่งจับกับ Na^+ และ K^+ ด้วยความช่วยเหลือของ ATP และเอนไซม์โซเดียม-พอแทสเซียม ATPase ดัน Na^+ 3 ไอออนออกไปจากเซลล์ขณะเดียวกันก็ดัน K^+ 2 ไอออนเข้ามาในเซลล์ (รูป 3-7 ก) ปกติความเข้มข้นของ K^+ ในเซลล์จะมีมากกว่านอกเซลล์ประมาณ 10 เท่า ขณะเดียวกัน ความเข้มข้นของ Na^+ นอกเซลล์ก็จะมากกว่าในเซลล์ ประมาณ 10-15 เท่า การดันไอออนต้าน

ความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าข้ามผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ เซลล์ประสาทใช้พลังงานร้อยละ 70 ของพลังงานที่ใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึมเพื่อให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้น กลไกการทำงานของการดันโซเดียม-พอแทสเซียม (รูป 3-7 ข) เริ่มจาก Na^+ เข้าไปกับโปรตีนที่ตำแหน่งรับ Na^+ (1) หมู่ฟอสเฟตจาก ATP เข้าไปมีพันธะกับโปรตีน (2) ทำให้โปรตีนเปลี่ยนรูปร่างแล้วปล่อย Na^+ (3) ออกสู่ภายนอก ขณะเดียวกันก็เปิดช่องให้ตำแหน่งรับ K^+ เข้ามาพันธะกับโปรตีน (4) และมีผลให้โปรตีนคลายพันธะกับหมู่ฟอสเฟต (5) ทำให้โปรตีนคืนรูปกลับมาอยู่ในสภาพเดิมปล่อยให้ K^+ หลุดเข้ามาภายในเซลล์

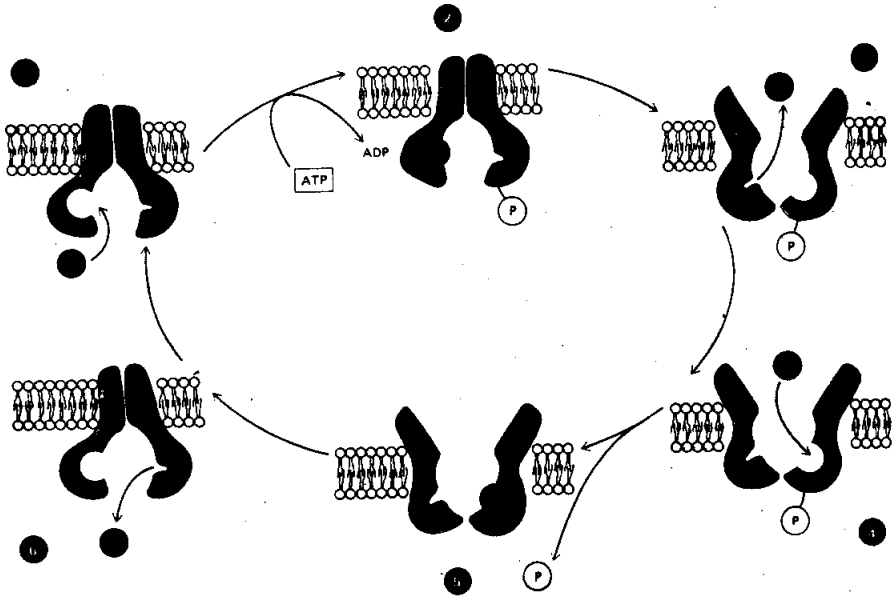
รูป 3-7 แผนภาพการดันโซเดียม-พอแทสเซียมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์โดยวิธีการขนส่งแบบกัมมันต์ ให้สังเกตตำแหน่งรับ Na^+ และ K^+ ที่มีอยู่บนโมเลกุลของโปรตีน

ก. ภาพจำลองการใช้พลังงาน ATP หนึ่งโมเลกุลดัน Na^+ ออกได้ 3 ไอออน และดัน K^+ เข้าได้ 2 ไอออน



จาก Villee, Claude A., et al. 1989

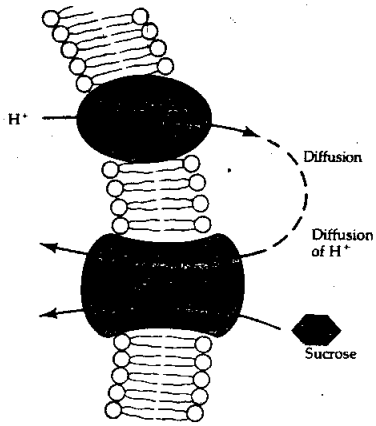
ข. ภาพจำลองขั้นตอนกลไกการทำงานของการดันโซเดียม-พอแทสเซียมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์โดยมี ATP และโปรตีนของเยื่อหุ้มเซลล์เป็นตัวช่วย



จาก Villee, Claude A., et al. 1989

(2) **cotransport** ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการดันโซเดียม-พอแทสเซียม ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์มีมากพอที่จะทำให้โมเลกุลของสารอื่นถูกขนส่งแบบกัมมันต์ตามไปด้วยได้ เช่นกรณีของเซลล์พืชที่ใช้อัตราความเข้มข้นของ H^+ สร้างแรงดันโปรตอน (proton pump) เพื่อการขนส่งแบบกัมมันต์ สารพวกกรดอะมิโน น้ำตาล และสารอาหารอื่นที่จำเป็นเข้าสู่เซลล์ (รูป 3-8) ที่เยื่อหุ้มเซลล์ของพืชมีโปรตีนเฉพาะที่สามารถสะสมน้ำตาลซูโครสได้ เมื่อมีการแพร่ H^+ กลับผ่านโปรตีนเฉพาะเข้าสู่ภายในเซลล์ น้ำตาลซูโครสก็เกาะติด H^+ ตามมาด้วย โดยมี **sucrose -H^+ symport** เป็นตัวช่วย

รูป 3-8 แผนภาพแสดงการขนส่งแบบกัมมันต์ชนิด cotransport ของน้ำตาลและซูโครส

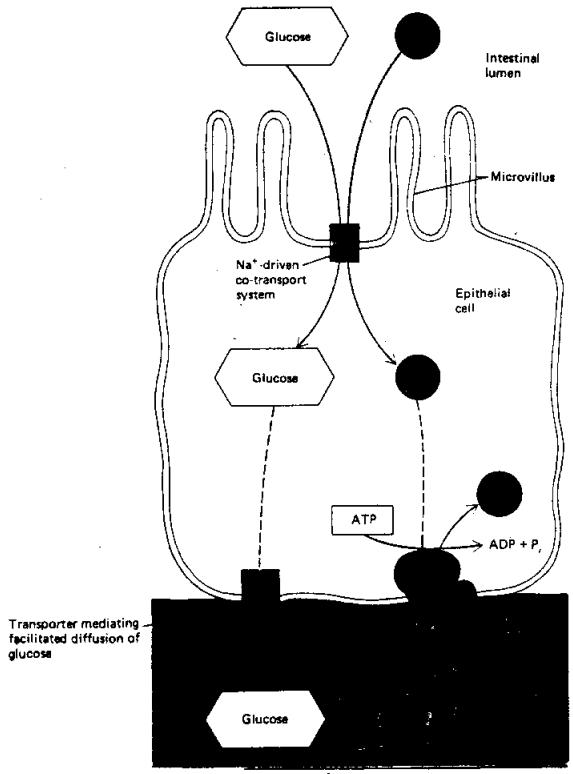


จาก Campbell, Neil A. 1990

(3) **integrated multiple transport system** เป็นระบบการขนส่งแบบกัมมันต์ ที่ใช้กลไกระบบการทำงานมากกว่าหนึ่งระบบ เพื่อการขนส่งสารที่เฉพาะบางสาร เช่น การดูดซึมกลูโคสเข้าสู่เซลล์เยื่อบุผิวผนังลำไส้เล็กแล้วส่งต่อไปยังกระแสโลหิต (รูป 3-9) กลูโคสจากช่องว่างในลำไส้ถูกส่งผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เนื้อเยื่อบุผิวด้วยวิธี cotransport เอนไซม์โซเดียม-พอแทสเซียม ATPase จะดัน Na^+ จากไซโทพลาซึมของเซลล์เยื่อบุผิวเข้าไปยังกระแสโลหิต ทำให้ Na^+ ในไซโทพลาซึมลดลง เมื่อกลูโคสถูกดันเข้ามาอยู่ในไซโทพลาซึมของเนื้อเยื่อบุผิวมากขึ้นก็จะทำให้มีความเข้มข้นมากขึ้น มีแรงดันออสโมซิสมากขึ้น เป็นผลให้กลูโคสแพร่ผ่านโปรตีนที่เยื่อหุ้มเซลล์บุผิวด้านติดกับกระแสโลหิตด้วยวิธีขนส่งแบบมีอุปกรณ์ช่วย

(4) **การขนส่งสารโมเลกุลใหญ่** บางครั้งสารโมเลกุลใหญ่หรือมีลักษณะเป็นอนุภาค เช่นอาหาร หรือเซลล์ขนาดเล็กจำเป็นต้องนำเข้าหรือส่งออกไปจากเซลล์ การซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ไม่สามารถทำได้ จึงต้องนำพลังงานมาใช้ดันให้เยื่อหุ้มเซลล์ไปโอบล้อมสารเหล่านั้น จนเยื่อหุ้มเซลล์มาบรรจบกัน การนำเข้าเซลล์เรียก **endocytosis** การขจัดสารออกไปจากเซลล์เรียก **exocytosis** ตัวอย่างของเอ็นโดไซโทซิส ที่เห็นได้ชัดคือการโอบล้อมเซลล์แบคทีเรียด้วยเยื่อหุ้มเซลล์ของเม็ดเลือดขาวเพื่อกิน **(phagocytosis)** เซลล์แบคทีเรียเข้าไป แล้วใช้เอนไซม์มาย่อยทำลายแบคทีเรีย ของเสียที่เกิดจากการย่อยสลายแบคทีเรียซึ่งอยู่ภายในเยื่อหุ้มจะถูกดันไปติดเยื่อหุ้มเซลล์ เยื่อทั้งสองส่วนผสานกันเปิดเป็นช่องปล่อยของเสียออกไป (exocytosis)

รูป 3-9 แผนภาพการขนส่งแบบกัมมันต์ชนิด integrated multiple transport systems



จาก Villee, Claude A., et al. 1989

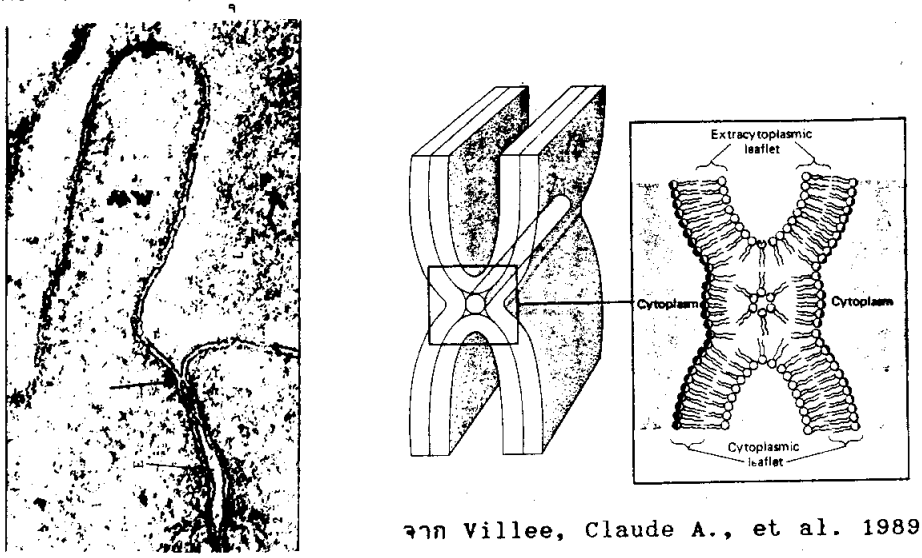
3.5 การติดต่อและสื่อสารระหว่างเซลล์

สิ่งมีชีวิตที่มีเซลล์ประกอบกันเป็นเนื้อเยื่อ อวัยวะ ระบบ และเป็นโครงร่างของตัว ประกอบด้วยเซลล์นับจำนวนไม่ถ้วน เซลล์ของแต่ละเนื้อเยื่อจะมีเยื่อหุ้มเซลล์ติดกันเพื่อการติดต่อถึงกันได้ทั้งด้านการแลกเปลี่ยนสารและศักย์ไฟฟ้า การต่อสัมผัสของเซลล์ที่ควรทราบมี 4 แบบคือ

(1) **tight junction (zonula occludens)** คือการที่เยื่อหุ้มเซลล์ของเซลล์ที่อยู่ชิดกัน ผสานเข้าด้วยกันตั้งแต่หนึ่งแห่งขึ้นไป จนไม่มีช่องระหว่างเซลล์ (รูป 3-10 ก) การผสานกันอาจเนื่องมาจากโปรตีนที่อยู่ชั้นนอกของเยื่อหุ้มเซลล์แต่ละเซลล์มารวมกัน (รูป 3-10 ข) ทำให้ไม่มีสภาพซึมผ่านได้ พบลักษณะเช่นนี้ในกลุ่มเซลล์ที่ทำหน้าที่ปิดล้อมช่องของลำตัว เช่น ที่เซลล์เยื่อบุผิวภายในของลำไส้ การติดกันเช่นนี้เป็นการป้องกันไม่ให้อาหารที่ย่อยแล้วผ่านไปรอบเซลล์ (เพื่อที่เยื่อหุ้มเซลล์ด้านที่สัมผัสช่องจะได้ทำหน้าที่ขนส่งสารได้อย่างสมบูรณ์)

รูป 3-10 tight junction ของเซลล์เยื่อบุผิวภายในลำไส้ ให้สังเกตตำแหน่งที่ผสานติดกัน (ลูกศร) MV คือไมโครวิลไลของเซลล์

ก. ภาพจากกล้องจุลทัศน์อิเล็กตรอน ข. แผนภาพตำแหน่งที่ติดผสานกัน

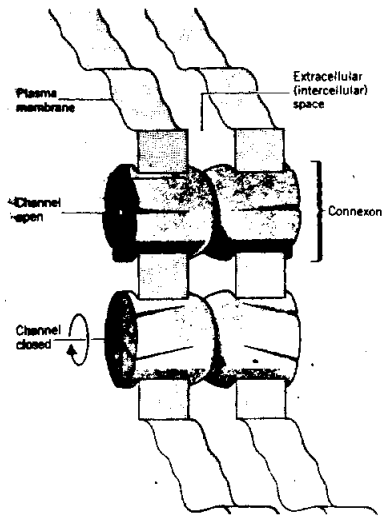


จาก Villee, Claude A., et al. 1989

(2) **gap junction (connexons หรือ nexon)** เป็นการชิดกันของเยื่อหุ้มเซลล์โดยการเชื่อมผสานของอินเทกรัลโปรตีน 6 หน่วย ทำให้เกิดรูทะลุระหว่างเยื่อหุ้มเซลล์สารโมเลกุลเล็กหรือไอออนสามารถผ่านทางรูนี้ได้ พบที่เนื้อเยื่อของสัตว์ในหลายอวัยวะ เช่น หัวใจ gap junction ทำหน้าที่ส่งกระแสไฟฟ้าไปยังเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจแล้วทำให้เซลล์อื่นหดตัวสัมพันธ์กัน นอกจากนี้ยังพบที่เนื้อเยื่อบุผิวของรังไข่เท่าที่ศึกษาแล้วพบว่าไอออนของเกลือ กรดอะมิโนบางชนิด น้ำตาล วิตามิน ฮอร์โมน cAMP และสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 800 สามารถผ่านรูนี้ได้ กลไกการควบคุมการผ่านของสารทำโดยการหมุนบิดหน่วยย่อยของโปรตีน (รูป 3-11)

(3) **desmosome (intermediate junction, terminal bar หรือ zonula adherens)** เป็นตำแหน่งที่ติดกันของเยื่อหุ้มเซลล์ข้างเคียง โดยมีช่องระหว่างเซลล์ประมาณ 24 นาโนมิเตอร์ สองข้างของเยื่อหุ้มเซลล์มีการสะสมของโปรตีน เยื่อหุ้มเซลล์ถูกยึดไว้ด้วยกันด้วยเส้นใยโปรตีนที่ก่ายผสานกันแล้วสอดทะลุผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้ามายึดกับเส้นใยโปรตีนที่ค้ำจุนโครงสร้างของเซลล์ทั้งสอง (รูป 3-12 ข) เชื่อกันว่าเดสโมโซมทำหน้าที่ยึดให้เซลล์สามารถเรียงแผ่เป็นแผ่นและบิดตัวได้ โดยที่สารยังสามารถผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์ได้ พบเดสโมโซมในเนื้อเยื่อบุผิว เช่นที่ผิวหนัง

รูป 3-11 แผนภาพ การเกิด gap junction ระหว่างเซลล์ชิดกัน ให้สังเกตโปรตีนที่มีหน่วยย่อย 6 หน่วยประกอบกันเป็นท่อ connexon มีรูตรงกลาง การควบคุมการผ่านของสารเกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนปิด connexon ด้านใดด้านหนึ่ง

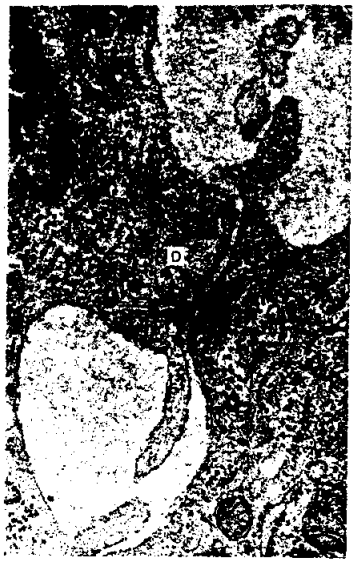


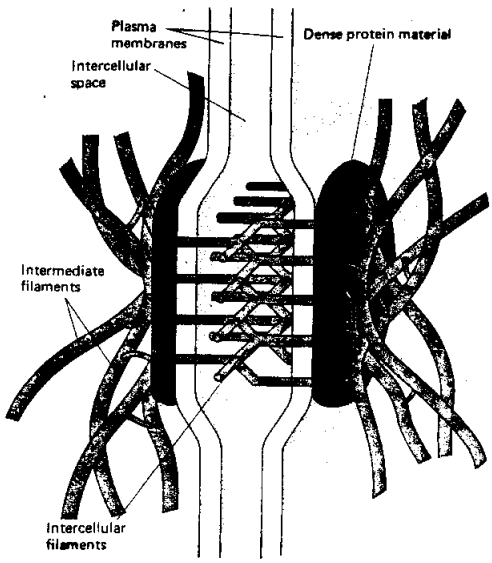
จาก Sheeler P, & Donald E. Bianci 1987

รูป 3-12 เดสโมโซมระหว่างเซลล์เนื้อเยื่อบุผิวของรังไข่กระต่าย D คือบริเวณเดสโมโซม

จาก Villee, Claude A., et al. 1989

ก. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทัศน์อิเล็กตรอน ข. แผนภาพแสดงรายละเอียดของเดสโมโซม





(4) **พลาสโมเดสมาตา (plasmodesmata)** เซลล์พืชได้รับการเสริมความแข็งแรงด้วยผนังเซลล์ แต่ยังมีช่องรัศมีประมาณ 20-30 นาโนมิเตอร์ แทรกอยู่ระหว่างผนังเซลล์ซึ่งทำหน้าที่เป็นช่องผ่านของไซโทพลาซึมไปยังเซลล์ที่อยู่ติดกันได้ เรียกช่องนี้ว่า พลาสโมเดสมา (พหูพจน์ พลาสโมเดสมาตา) เยื่อหุ้มเซลล์ของทั้งสองเซลล์เชื่อมติดกัน ลักษณะเป็นหลอดเรียก เดสโมทิวบุล (desmotubule) แทรกผ่านเข้าไปในช่องของผนังเซลล์ทำหน้าที่เชื่อมต่อระบบท่อของเอ็นโดพลาสมิกเรทิคิวลัมของเซลล์ที่อยู่ติดกัน