

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและสมมติฐาน

#### แบคทีเรีย (Bacteria)

แบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์กลุ่มหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยเซลล์เดี่ยว ลักษณะของเซลล์เป็นแบบ prokaryotic cell กล่าวคือ ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส (nucleus membrane) ห่อหุ้มสารพันธุกรรม (genetic materials) ขนาดเล็ก มองด้วยตาเปล่าไม่เห็น พบว่ามีอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม แม้นบนผิวหนัง หรือภายในร่างกายของคน และสัตว์

#### 1. รูปร่างลักษณะของแบคทีเรีย (Bacterial Morphology)

แบคทีเรียถูกแบ่งแยกออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ โดยดูพื้นฐานจากการสังเกตรูปร่าง และขนาดจากกล้องจุลทรรศน์ สังเกตปฏิกิริยาของเซลล์ชนิดเดียวกันที่มีต่อกัน และการย้อมสีดูลักษณะพิเศษของแต่ละเซลล์

##### 1.1 ขนาดของเซลล์ (Cell Size)

โดยทั่วไปเซลล์ prokaryote มีขนาดเล็กกว่าเซลล์ eukaryote โดยมีขนาดประมาณ mitochondria ของเซลล์เหล่านั้น (ความยาวเฉลี่ย 2 ไมครอนและเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 0.5 ไมครอน) เนื่องจากขนาดเล็กของพวกมันทำให้เซลล์ prokaryote มีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของเซลล์สูงกว่าในเซลล์ eukaryotic สัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่เพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารอาหาร และของเสียระหว่างสภาพแวดล้อมกับภายในเซลล์ โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยการไหลของ cytoplasmic และโครงข่ายของเมมเบรนภายในที่ซับซ้อน เช่น โครงข่าย endoplasmic การที่มีขนาดเล็กทำให้เซลล์มีโครงสร้างอย่างง่าย ๆ และเพิ่มจำนวนได้อย่างรวดเร็ว

แบคทีเรียที่เล็กที่สุดมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.2 ไมครอน มีเซลล์ prokaryote ทรงกลมน้อยมากที่จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 2 ไมครอน ตัวที่ใหญ่กว่านั้น และเซลล์ทรงกลมทั่วไปจะไม่สามารถเคลื่อนย้ายสารไปยังทุก ๆ ส่วนของไซโตพลาสซึม (cytoplasm) ของพวกมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม แบคทีเรียที่มีรูปร่างเป็นแท่ง (rod-shape) ไม่ได้ถูกจำกัดด้วยข้อจำกัดในเรื่องของขนาด พวกมันมักจะมีความยาวมากกว่า 60 ไมครอน (ในความเป็นจริง

แล้ว ถึงแม้ว่าจะมีสิ่งยับยั้งการแบ่งตัวของเซลล์ แต่แบคทีเรียชนิดแท่งหลายตัวที่ยาวเพียง 2 ไมครอนก็สามารถเติบโตจนมีความยาวมากกว่า 100 ไมครอนได้) รูปร่างของพวกมันทำให้พวกมันสามารถมีขนาดที่ใหญ่กว่าแบคทีเรียทรงกลม ถึงแม้ว่าความยาวจะเพิ่มขึ้น แต่เส้นผ่าศูนย์กลางของชนิดแท่งก็ยังคงมีขนาดเล็กไม่เปลี่ยนแปลง (ปกติเล็กกว่า 2 ไมครอน) เพื่อที่ว่าระยะทางจากผิวของเซลล์จนถึงศูนย์กลางของเซลล์จะไม่เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม เซลล์ prokaryote ที่ใหญ่ที่สุดที่มีการรายงานล่าสุด คือ ยาวกว่า 500 ไมครอน และกว้างกว่า 40 ไมครอน (รูปที่ 2.1) แบคทีเรียชนิดนี้ คือ *Epulopiscium fishelsoni* ซึ่งถูกพบได้เพียงในกระเพาะของปลาในเขตร้อนเท่านั้น มันยังคงไม่เป็นที่กระจ่างชัดว่า เหตุใดแบคทีเรียที่ถูกค้นพบใหม่นี้จึงสามารถเอาชนะข้อจำกัดในเรื่องสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของมัน

## 1.2 รูปร่างของเซลล์

แบคทีเรียส่วนใหญ่จะมีรูปร่างที่แน่นอน ซึ่งจะเป็นหนึ่งในสามของรูปร่างพื้นฐาน คือ รูปร่างเป็นทรงกลม รูปร่างเป็นแท่ง หรือขดเป็นวง (รูปที่ 2.2)

### 1.2.1 รูปร่างของแบคทีเรียโดยทั่วไป (Typical Bacterial Shapes)

1.2.1.1 รูปร่างเป็นทรงกลม (cocci) (ตัวเดียวเรียกว่า coccus = berry) เป็นจุลชีพทรงกลมที่ปกติมักมีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 2 ไมครอน (เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 1 ไมครอน)

1.2.1.2 รูปร่างเป็นแท่ง (bacilli) (ตัวเดียวเรียกว่า bacillus = stick) เป็นจุลชีพรูปร่างเป็นแท่ง ซึ่งปกติจะมีความยาวอยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 ไมครอน bacillus บางตัวมีขนาดสั้นและเตี้ยมากจนดูเหมือนทรงแจ และถูกจัดให้เป็นชนิด *coccobacilli* ขณะที่ bacillus บางตัวถูกทำให้โค้งจนเหมือนตัวคอบมา ( , ) เซลล์เหล่านี้ถูกเรียกว่า vibrios เช่นใน *Vibrio cholerae* ซึ่งเป็นชนิดที่ก่อให้เกิดโรค โดยมักเป็นสาเหตุของโรคระบาดจากเชื้อโรคในกระเพาะอาหาร และมักเกิดในประเทศที่กำลังพัฒนา

1.2.1.3 ขดเป็นเกลียว (spiral) แบคทีเรียชนิดขดเป็นวงถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ *spirilla* (ตัวเดียวเรียกว่า *spirillum*) และ *spirochetes* (ซึ่งรวมเอาเชื้อซิฟิลิส (syphilis) ด้วย) ถึงแม้ว่าจะมีรูปร่างเหมือนกันแต่ *spirochetes* จะยึดหยุ่นได้ ในขณะที่ *spirilla* จะแข็ง แบคทีเรียชนิดขดเป็นวงบางตัวมีขนาดบางเกินกว่าที่จะเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ brightfield แต่ต้องดูโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบ darkfield

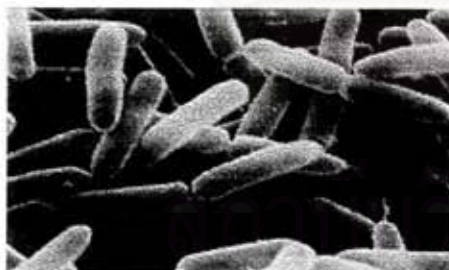


รูปที่ 2.1 แบคทีเรียที่ใหญ่ที่สุดคือ *Epulopiscium fishelsoni*  
โดยมีความยาวกว่า 500 ไมครอน  
ที่มา McKane and Kandel (1996)



(a)

3 μm



(b)

2 μm



(c)

1.5 μm

รูปที่ 2.2 รูปร่างของแบคทีเรียโดยทั่วไป คือ (a) ทรงกลม

(b) แท่ง (c) ชดเป็นเกลียว

ที่มา McKane and Kandel (1996)

### 1.2.2 รูปร่างของแบคทีเรียชนิดพิเศษ (Atypical Bacterial Shapes)

แบคทีเรียบางชนิดสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และขนาดได้มากมาย เช่น จุลชีพที่ถูกเรียกว่า *pleomorphic* (pleo = มาก morph = รูปร่าง) แบคทีเรียชนิดอื่น ๆ มีรูปร่างคงที่ซึ่งไม่เหมือนกับรูปร่างปกติทั้ง 3 แบบข้างต้น ในจำพวกแบคทีเรียพิเศษเหล่านี้ จะเป็นจุลชีพที่เจริญเติบโตเป็นเส้นใย (Filament) ทรงเหลี่ยม (squares) และรูปดาว (stars) (รูปที่ 2.3)

### 1.3 การจัดเรียงตัวของเซลล์ (Cell Arrangement)

การจัดเรียงตัวของเซลล์มีเสถียรภาพ โดยขึ้นอยู่กับลักษณะสปีชีส์ของแบคทีเรีย ดังนั้นมันจึงสามารถถูกใช้เพื่อบรรยายและแสดงถึงแบคทีเรียแต่ละชนิด การรวมตัวของเซลล์ในการจัดเรียงตัวเฉพาะแบบ ถูกกำหนดโดยระนาบ หรือระนาบการแบ่งลักษณะของจุลชีพ ตัวอย่างเช่น *Neisseria gonorrhoeae* ซึ่งเป็นเชื้อของโรคหนองในมีการแบ่งตามระนาบเดียว ในการผลิตเซลล์คู่ซึ่งติดกันเซลล์เหล่านี้แยกแบ่งตัวออกเป็นสองส่วน สร้างเซลล์เป็นคู่ ๆ เรียกว่า *diplococci* (รูปที่ 2.4) cocci อื่น ๆ แบ่งตัวแตกต่างกันออกไป และสร้างเป็นโซ่ยาว เรียกว่า *streptococci* หรือการไหลรวมกัน ซึ่งถูกกำหนดโดยการแบ่งตัวที่ไม่สมบูรณ์ของเซลล์ระหว่างการขยายพันธุ์

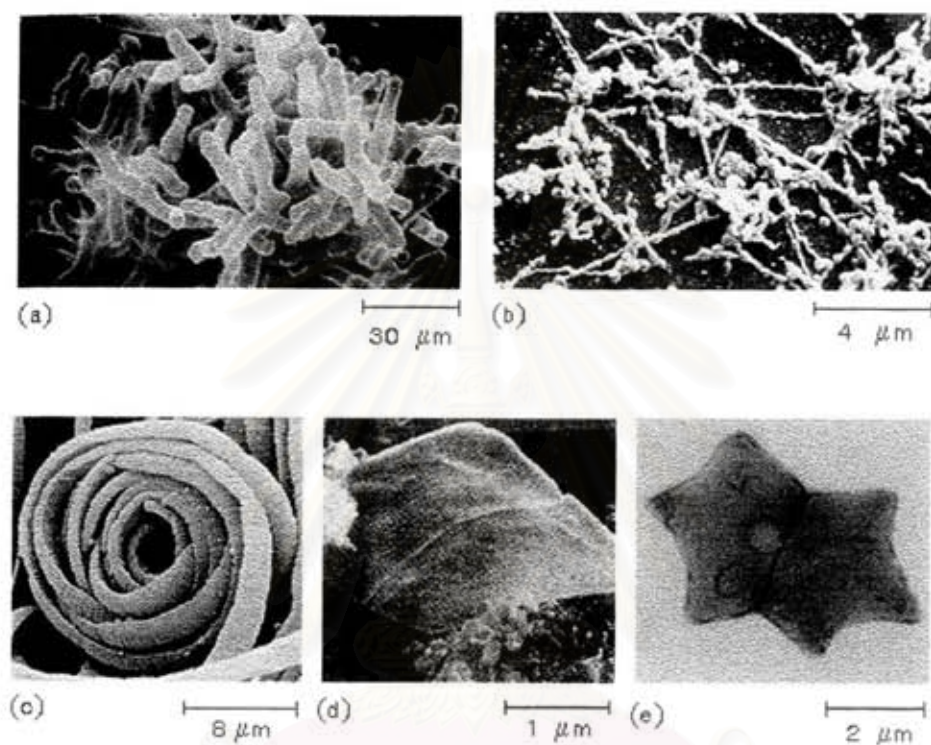
การจัดเรียงตัวของเซลล์ bacilli ง่ายกว่าของเซลล์ cocci เซลล์ bacilli มักแบ่งตัวตามระนาบเดียว ซึ่งตั้งฉากกับแกนตั้ง พวกมันมักเจริญเติบโตเป็นเซลล์เดี่ยว ถึงแม้ว่า บางครั้งอาจเกิดเป็นเซลล์คู่ (*diplobacilli*) หรือลูกโซ่ (*streptobacilli*) จุลชีพบางชนิด เช่น *Corynebacterium diphtheriae* มีการเบี่ยงเบนจุดของการแบ่งตัวตามการขยายพันธุ์ ผลิตรูปร่างเป็นเหลี่ยม ๆ ซึ่งดูคล้ายตัวอักษรจีน หรือการส่งผลต่อการจัดเรียงตัวเป็นทิวเขาซึ่งดูคล้ายการล้อมรั้ว

แบคทีเรียชนิดชนิดเป็นเกลียวมักเกิดเป็นตัวเดี่ยว ๆ ซึ่งแม้ว่า จะมีบางสปีชีส์จะเกิดเป็นเส้นใยคดเคี้ยวประกอบด้วยหลาย ๆ เซลล์ต่อกัน

ถึงแม้ว่า การจัดเรียงตัวของเซลล์สามารถให้เงื่อนไขในการแยกแยะจุลชีพ แต่ภายใต้สภาวะที่แปลกออกไป แบคทีเรียจะล้นเหลือในการเจริญเติบโตในรูปร่างลักษณะของพวกมัน ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงอาหารเพาะเลี้ยง อุณหภูมิในการเจริญเติบโต และการเตรียมตัวอย่าง มักจะมีผลต่อการจัดเรียงตัว ดังนั้นการสังเกตการจัดเรียงตัวของเซลล์อาจเป็น ค่าการวิเคราะห์ที่มีข้อจำกัด

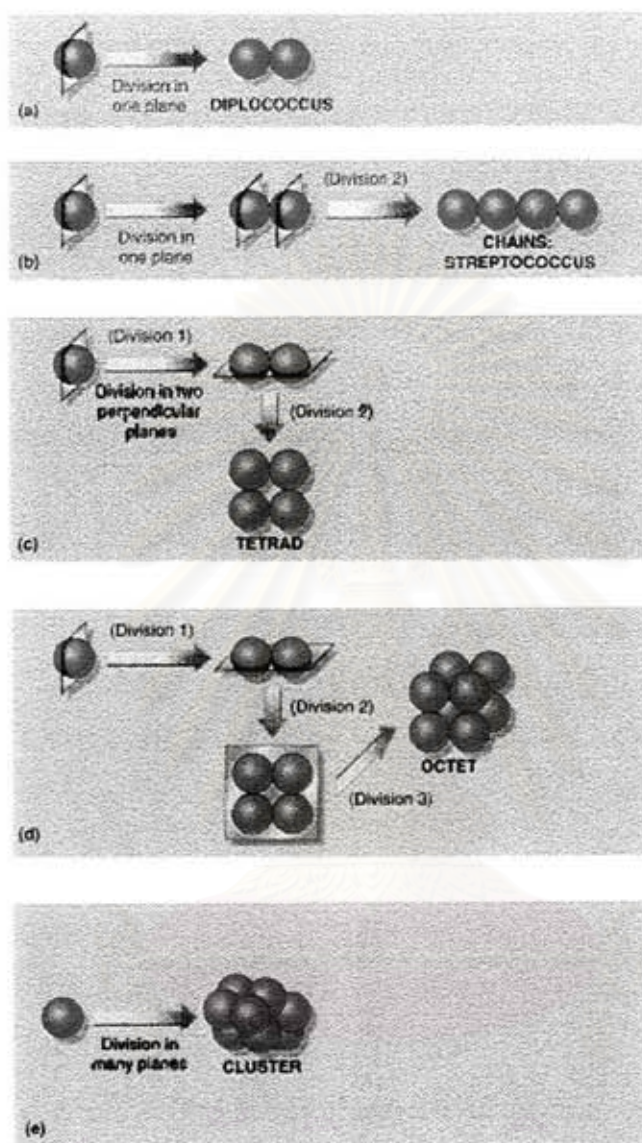
### 1.4 โครงสร้างของเซลล์ (Cell Structure)

เซลล์ prokaryotes มีนิวคลีโอล ไลโบโซม และเยื่อพลาสมา แบคทีเรียส่วนใหญ่ยังประกอบด้วยผนังเซลล์ และบางชนิดถูกห่อหุ้มไว้ด้วยแคปซูล หรือชั้นบาง ๆ อีกชั้นหนึ่งด้วยแบคทีเรียบางชนิดยังมี cytoplasmic inclusions และแขนขา (appendages) ต่าง ๆ อีกด้วย (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.3 รูปร่างของแบคทีเรียชนิดพิเศษ (a) แบคทีเรียชนิดเส้นใย  
 (b) mycoplasma (c) complex (d) ทรงเหลี่ยม (e) รูปดาว  
 ที่มา McKane and Kandel (1996)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 การจัดเรียงตัวของเซลล์ (a) diplococci (b) streptococci

(c) tetrads (d) octets (e) staphylococci

ที่มา McKane and Kandel (1996)



จากการที่เซลล์ prokaryotes มีความแตกต่างจากเซลล์ eukaryotes ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า ดังนั้น โครงสร้างของแบคทีเรียจึงมีความยาก หรืออาจเป็นไปได้ที่จะแบ่งแยกได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ light รายละเอียดเล็ก ๆ น้อย ๆ ของโครงสร้างเซลล์ย่อย ๆ ถูกมองเห็นได้ดีที่สุดโดยอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน มันเป็นหลักฐานที่แสดงให้เห็นว่าเซลล์ prokaryotes มีโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยกว่าเซลล์ eukaryotes

## 2. เยื่อพลาสมา (Plasma Membrane)

ในเซลล์ prokaryotes อื่น ๆ ส่วนประกอบของ cytoplasmic ถูกแยกออกจากสิ่งแวดล้อมโดยเยื่อพลาสมา การถูกทำลายอย่างหนักในผนังกันนี้จะส่งผลต่อ การสูญเสียไซโตพลาสซึมจากเซลล์ และการตายของจุลชีพ เยื่อพลาสมาของเซลล์ prokaryotes เป็นที่ตั้งของฟังก์ชันมากมาย ซึ่งทำงานได้โดยอาศัยอวัยวะภายในชนิดพิเศษในเซลล์ eukaryotes ฟังก์ชันเหล่านี้ได้แก่

1. การเลือกเส้นทางของโมเลกุลในการเข้าและออกจากเซลล์
2. การปกปิดเอ็นไซม์ของเซลล์ภายนอก
3. การหายใจ และสังเคราะห์แสง
4. กฎการขยายพันธุ์
5. การสังเคราะห์ผนังเซลล์
6. การติดตามผลด้านสิ่งแวดล้อม

## 3. ผนังเซลล์ (Cell Wall)

ผนังเซลล์ของแบคทีเรียเป็นโครงสร้างซึ่งล้อมรอบเยื่อพลาสมาไว้ การที่มีผนังเซลล์ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผนังเซลล์ และเยื่อพลาสมา สิ่งนี้เรียกว่า periplasm รูปร่างของผนังเซลล์ทำให้แบคทีเรียมีรูปร่างเฉพาะของมันเอง

หน้าที่ที่สำคัญที่สุดของผนังเซลล์คือ การปกป้องเซลล์ทางกายภาพ การปกป้องนี้เป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากเยื่อพลาสมาไวต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพ หรือ osmotic lysis (การทำลาย) ในสภาพแวดล้อมที่เป็นน้ำ แบคทีเรียจะสะสมน้ำเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากแรงดันออสโมซิส การที่น้ำไหลเข้ามาทำให้ขนาดของเซลล์เพิ่มขึ้น และอาจจะทำให้เซลล์ระเบิด (เหมือนลูกบอลลูกที่ถูกเป่าลมเข้าไปมากเกินไป) ถ้าเซลล์ไม่ได้รับการป้องกันการขยายตัวของเซลล์ ในแบคทีเรียบางชนิดผนังเซลล์มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับแรงดันได้ถึง 25 atm (375 psi) จากแรงดันออสโมซิสภายในเซลล์

ถัดจากเยื่อพลาสมา เซลล์ที่ถูกกักเก็บไว้ในผนังเซลล์ถูกเรียกว่า protoplast การกำจัดผนังเซลล์ซึ่งมักอาศัยการย่อยของเอ็นไซม์เพื่อปลดปล่อย protoplast และเซลล์ที่ไม่ได้รับการปกป้องซึ่งมี



เพียงสิ่งท่หุ้มภายนอกคือ เยื่อพลาสมา เซลที่ถูกปกป้องอย่างมดีเหล่านี้จะยิ่งทำให้เกิดการไหลเข้ามาของน้ำที่ไม่สามารถควบคุมได้ (รูปที่ 2.6) protoplast ซึ่งเติบโตในห้องปฏิบัติการจะถูกทำให้ตกตะกอนในสารละลายซึ่งมีความเข้มข้นของเกลือ หรือน้ำตาลสูง การใช้สารละลายแต่ละอย่างช่วยป้องกัน protoplast lysis ด้วยการทำให้การเปลี่ยนแปลงของน้ำที่ผ่านเข้าออกเยื่อพลาสมามีความสมดุล

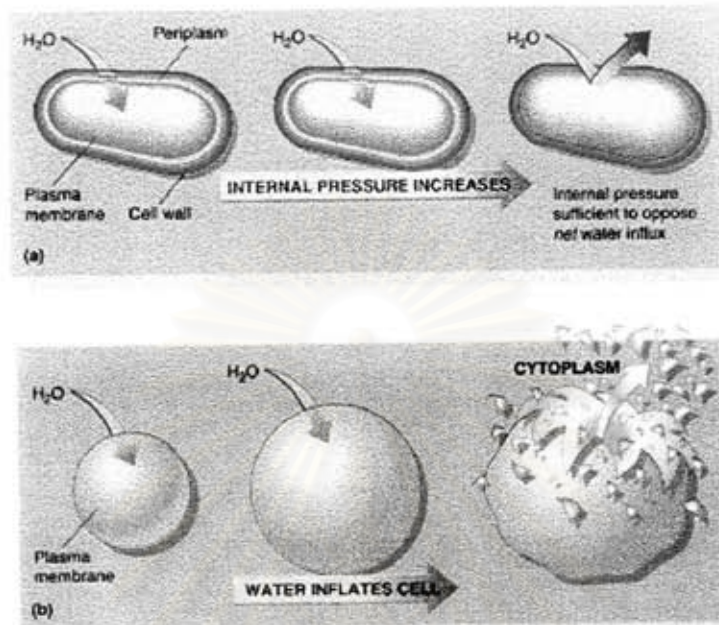
protoplast ทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นรูปร่างทรงกลมขนาดใหญ่ขึ้น หรือเล็กลงโดยไม่ขึ้นกับรูปร่างของแบคทีเรียเดิมของพวกมัน อย่างไรก็ตามระหว่างที่ยังคงอยู่ในผนังเซลล์ รูปร่างของ protoplast จะถูกกำหนดตายตัวให้มีรูปร่างตามสปีชีส์เฉพาะของตัวนั้น ๆ ดังรูปที่ 2.7 ส่วนชั้นส่วนของผนังเซลล์ภายหลังจากที่ protoplast ออกไปแล้วจะยังคงมีรูปร่างลักษณะของเซลล์ดั้งเดิมอยู่

#### 4. Capsule, Slime layer และ Glycocalyx

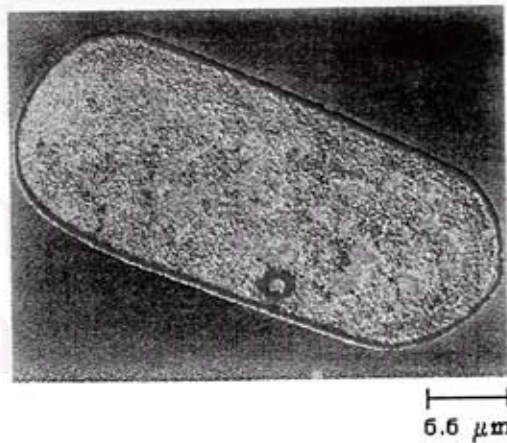
แบคทีเรียส่วนใหญ่จะปล่อยสารบางอย่างที่เก็บไว้ภายนอกผนังเซลล์ เพื่อสร้างชั้นของผิวเพิ่มขึ้น แคปซูลก็เป็นชั้นที่ถูกติดไว้กับผิวของเซลล์ และสร้างรัศมีที่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนกับสภาพแวดล้อมเพื่อที่เซลล์จะได้มีสีและทำให้สภาพรอบ ๆ มีความเข้มข้นกว่าตัวของแคปซูลเอง (รูปที่ 2.8a) ชั้นที่ผิวซึ่งกระจายอย่างหลวม ๆ รอบ ๆ เซลล์ และแพร่เข้าสู่ส่วนกลางถูกเรียกว่า slime layer โครงสร้างที่แตกต่างอีกอันหนึ่งคือ glycocalyx ซึ่งเป็นมวลซึ่งซับซ้อนของ polysaccharide fibers บาง ๆ ซึ่งอยู่ถัดจากผิวของแบคทีเรีย (รูป 2.8b) แคปซูลที่ย้อมสีไม่ปรากฏว่าสามารถเห็น glycocalyx ซึ่งสามารถถูกเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

#### 5. ไซโตพลาสซึม (Cytoplasm)

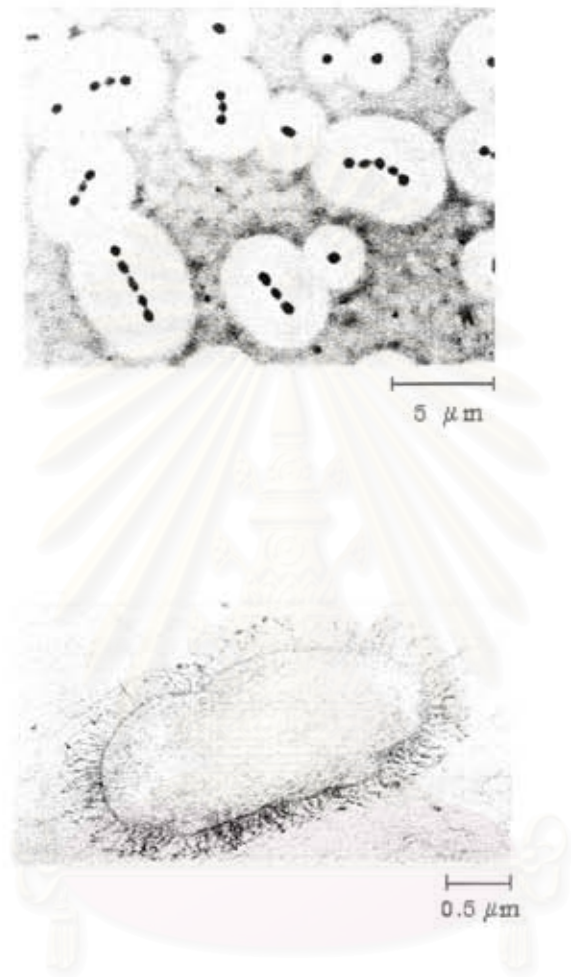
ในเซลล์ prokaryote ส่วนใหญ่จะมีส่วนประกอบพิเศษด้านรูปร่างน้อยมากที่จะสามารถถูกพบได้ในไซโตพลาสซึม สิ่งแขวนลอยในไซโตพลาสซึมของแบคทีเรียทุกชนิดคือ สารโครโมโซมซึ่งเรียกว่า นิวคลีโอิด (nucleoid) ส่วนที่เหลือของไซโตพลาสซึมประกอบด้วย ไลโบโซมจำนวนมากซึ่งทำให้ไซโตพลาสซึมเข้มข้นเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM. (Transmission electron microscopy) ในจุลชีพบางชนิด cytoplasmic inclusions จะปรากฏให้เห็นก็ต่อเมื่อถูกย้อมให้มีสารสะสมเพิ่มขึ้น โครงสร้างเหล่านี้เป็นจะสะสมสารอาหารไว้เป็นจำนวนมากเกินพอเพื่อที่ inclusions จะถูกละทิ้งไว้เมื่อมีสารอาหารเหลือ ไซโตพลาสซึมประกอบไปด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ประมาณ 75 % เอ็นไซม์และโมเลกุลขนาดเล็กเป็นองค์ประกอบสำคัญของของเหลวภายในเซลล์ด้วย



รูปที่ 2.6 การป้องกันเซลล์จาก osmotic lysis (a) ผนังเซลล์ซึ่งจะป้องกันเซลล์แตก  
 (b) เซลล์ชนิดเดียวกันแต่ไม่มีผนังเซลล์ที่จะปกป้อง protoplasts  
 ที่มา McKane and Kandel (1996)



รูปที่ 2.7 ผนังเซลล์ที่ยังคงรูปร่างของเซลล์อยู่  
 ที่มา McKane and Kandel (1996)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างที่ล้อมรอบผนังเซลล์ (a) The bacterial capsule  
(b) Glycocalyx

ที่มา McKane and Kandel (1996)

## 6. แขนขา (Appendages)

มีโครงสร้างหลายส่วนที่ยื่นออกมาจากผนังเซลล์ เพื่อทำหน้าที่เหมือนเป็นแขนขาที่ผิวของเซลล์ แขนขาของแบคทีเรียที่สังเกตได้ง่ายที่สุดคือ flagella, axial filament และ pili

### 6.1 Flagella

มีแบคทีเรียหลายตระกูลที่เคลื่อนที่โดยอาศัย flagella ตำแหน่งและจำนวนของ flagella ในเซลล์หนึ่ง ๆ และจำนวนของลอนคลื่นของ flagella แต่ละอันจะแตกต่างกันไปตามสปีชีส์ของแบคทีเรีย อย่างไรก็ตามปัจจัยทั้งสามนี้จะเหมือนกันในแต่ละสปีชีส์

จุลชีพบางตัวเป็น monotrichous (mono = หนึ่ง , trichous = เส้นผม) พวกมันมี flagellum เส้นเดียว (รูปที่ 2.9a) แบคทีเรียบางชนิดเป็น lophotrichous คือมี flagellum หลายเส้นรวมเป็นกลุ่มหรือเป็นปอยอยู่ที่ปลายสุดข้างใดข้างหนึ่ง (รูปที่ 2.9b) ส่วนชนิดอื่น ๆ เป็น amphitrichous คือมี flagellum ที่ปลายทั้งสองข้าง อาจเป็นเส้นเดียวหรือเป็นปอยอย่างใดอย่างหนึ่ง (รูปที่ 2.9c) เนื่องจาก flagella อยู่ที่ปลายสุดของเซลล์ทั้งสามแบบ ดังนั้นพวกมันจึงถูกเรียกเป็น polar flagella ถ้า flagella กระจายอยู่รอบ ๆ ผิวเซลล์จะถูกเรียกว่า peritrichous (รูปที่ 2.9d)

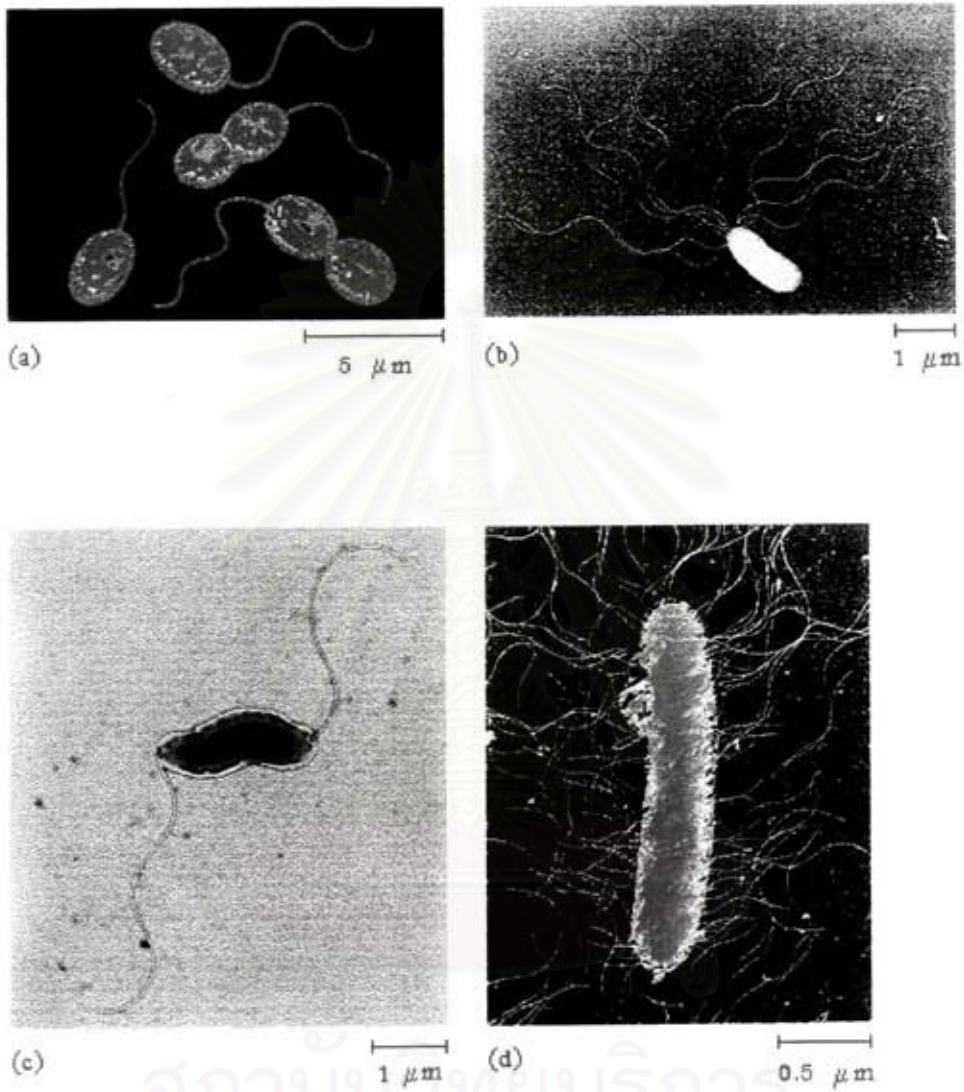
flagella มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 นาโนเมตร ซึ่งบางเกินกว่าจะถูกตรวจพบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ light นอกเสียจากจะใช้กรรมวิธีย้อมสีเฉพาะอย่าง สีย้อม flagella เป็นสารเคมีที่จะตกผลึกบนแขนขาของแบคทีเรีย และยังช่วยเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพื่อให้มีขนาดที่จะสามารถมองเห็นได้

### 6.2 Axial Filament

โครงสร้างของ axial filament ประกอบด้วย กลุ่มของไฟเบอร์ 2 กลุ่ม ซึ่งเกิดอยู่ภายในตรงปลายสุดของเซลล์ และเหลื่อมอยู่ตรงกลาง ถ้ามองด้านโครงสร้างและเคมี ไฟเบอร์ของ axial filament จะเหมือนกับ flagella และบางครั้งพวกมันถูกเรียกว่า endoflagella (endo = ภายใน) อย่างไรก็ตาม ไฟเบอร์เหล่านี้ไม่ได้ถูกปกคลุมด้วยผนังเซลล์ของ spirochete และถูกกักไว้ในที่ว่างของ periplasmic เหมือนกับ flagella โดยแท้จริงแล้วเมื่อเซลล์มีการเคลื่อนที่ มันจะหมุนรอบแกนของมันเอง และจะโค้งและม้วนไปตามความยาวของมัน (รูปที่ 2.10)

### 6.3 Pili และ Fimbriae

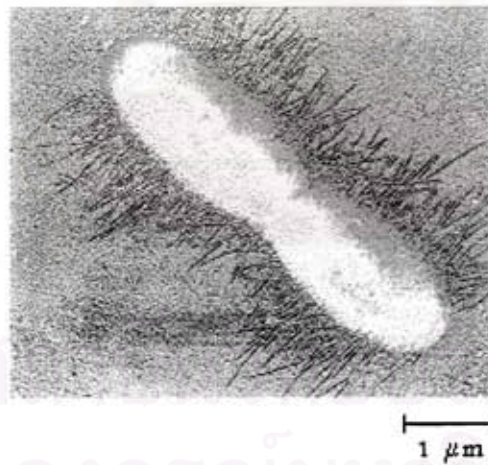
Pili (เอกพจน์ = pilus) เป็นท่อโปรตีนซึ่งยื่นออกมาจากเซลล์ pili ไม่เหมือนกับ flagella ตรงที่ไม่มีหน้าที่ในการเคลื่อนที่ พวกมันมีลักษณะที่ตรงกว่า สั้นกว่า และบางกว่า flagella และสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเท่านั้น (รูปที่ 2.11) พวกมันจะถูกพบได้เฉพาะแต่ในแบคทีเรียชนิดที่ย้อมติดแกรมลบ และมักมีเป็นจำนวนมาก



รูปที่ 2.9 การจัดเรียงตัวของ flagella บนเซลล์แบคทีเรีย (a) monotrichous, polar (b) lophotrichous, polar (c) amphitrichous, polar (d) peritrichous  
ที่มา McKane and Kandel (1996)



รูปที่ 2.10 Axial filaments ซึ่งประกอบด้วย axial fibrils  
ที่มา McKane and Kandel (1996)



รูปที่ 2.11 Pili ซึ่งกระจายล้อมรอบเซลล์โคไล  
ที่มา McKane and Kandel (1996)

Fimbriae (เอกพจน์ = fimbria) เป็นอีกเทอมหนึ่งสำหรับ pili สั้น ๆ ซึ่งเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากอยู่รอบ ๆ เซล พวกมันช่วยแบคทีเรียให้เกาะติดกับผิว และอีกอย่างหนึ่งคือ เพื่อให้แบคทีเรียรวมกันเป็นกลุ่ม หรือฟิล์มบนผิวของของเหลวที่พวกมันกำลังเจริญเติบโต

## 7. ความเป็นมาของ อีโคไล

นักกุมารเวชหนุ่มซึ่งมีชื่อว่า ซีโอดอร์ เอสเชอริช (Theodor Escherich) ซึ่งเป็นผู้ช่วยสอนวิชาแพทยอยู่ที่ โพลีคลินิครักษาเด็ก และโรงพยาบาลเด็ก ฮันเนอร์ (Huner's) ที่เมืองมิวนิค (Munich) ดร.เอสเชอริชอยู่ในยุคที่ยิ่งใหญ่ทางด้านแบคทีเรียวิทยา ซึ่งเกิดขึ้นภายหลังจากการค้นพบที่สำคัญของ โรเบิร์ต คอค (Robert Koch) และหลุยส์ พาสเตอร์ (Louis Pasteur) ในปีค.ศ.1884 เขาได้ไปที่เมืองเนเปิลส์ (Naples) ในฐานะผู้ช่วยนักวิทยาศาสตร์ในการศึกษาถึงการระบาดของอหิวาตกโรค เอสเชอริชได้ทำการวิจัยโดยมุ่งความสนใจพิเศษไปยังลำไส้ของเด็ก ๆ ซึ่งเป็นเงื่อนไขปัญหาที่เป็นไปได้สำหรับการระบาดของโรคท้องร่วง

ในปีค.ศ.1885 เอสเชอริชได้ประสบความสำเร็จในวิชาชีพสูงสุด การศึกษาในปีนั้นได้สิ้นสุดลงที่เอกสารการวิจัยฉบับที่มีหัวข้อว่า "Die Darmbakterien des Neugeborenen und Sauglings" (แบคทีเรียในลำไส้ของเด็กแรกเกิดและทารก) พิมพ์บนหน้า 518 ปีที่ 3 ของหนังสือ Fortschritte ซึ่งเป็นการถูกเผยแพร่ครั้งแรกของ Bacterium coli commune ซึ่งเป็นชื่อเดิมของ E. coli ในปัจจุบันนั่นเอง

Bacterium coli commune ได้กลายเป็นหัวข้องานวิจัยที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก ในช่วงแรกมีชื่อเป็นจำนวนมากที่ถูกใช้เรียกแบคทีเรียตัวนี้ เช่นในปีค.ศ.1889 มันถูกใช้ชื่อว่า Bacillus escherichii ในปีค.ศ. 1895 มันถูกเรียกว่า Bacillus coli และในปีค.ศ.1900 ได้ถูกรู้จักกันในชื่อต่าง ๆ เช่น Bacterium verus, Bacillus coli communis และ Aerobacter coli จนกระทั่งในปีค.ศ.1919 เมื่อการใช้ชื่อจีนัส(genus) ว่า Escherichia ซึ่งได้ถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดย ไมกุลา (Migula) ในปีค.ศ.1895 ได้รับการยอมรับ ในที่สุดเจ้าสปีชีส์อายุ 34 ปีนี้ก็ได้ชื่อถาวรว่า Escherichia coli เป็นเวลาหลายปีแล้วที่ชื่อสปีชีส์ของ Escherich เป็นจำนวนมากได้ถูกเสนอขึ้นมา แต่จากเทคนิคที่ทันสมัยในการแบ่งชนิดได้แสดงให้เห็นว่า สปีชีส์ส่วนใหญ่อยู่ในสกุลอื่น ๆ ในปัจจุบันมีเพียงอีกหนึ่งสปีชีส์ของ Escherichia ที่แตกต่างจาก E.coli คือ E.blattae เนื่องจากมันไม่ได้ผลิตก๊าซจากแลคโตส และน้ำตาลชนิดอื่น ๆ

ก่อนที่ชื่อดังกล่าวจะถูกนำมาใช้อย่างถาวร ได้มีเหตุการณ์ที่มีส่วนทำให้โคโลโลกกลายเป็นจุดสนใจและเป็นที่ยอมรับกันอย่างมากคือ Frederick Twort ในปีค.ศ.1915 และ Felix d'Herelle ในปีค.ศ.1917 ได้ค้นพบแบคทีริโอฟาจซึ่งเป็นไวรัสที่เกาะติดกับแบคทีเรีย เข้าสู่เซลล์แบคทีเรีย ขยายพันธุ์ และทำลายผู้ให้อาศัยในที่สุด โดยสปีชีส์ที่ถูกค้นพบว่ามีพันธุกรรมกับแบคทีริโอฟาจ คือ อีโคไล เมื่อชีววิทยาที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคขนาดเล็ก ๆ ได้ประสบกับช่วงของการเติบโตเป็นอย่างดี

มาก ภายหลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 ได้มีจุดสนใจรวมอยู่ที่อีโคไล และไวรัสของพวกมันซึ่งมีเป็นจำนวนมาก

ชื่อ coli บอกให้รู้ว่ามันอาศัยอยู่ที่ปลายลำไส้ใหญ่หรือลำไส้ใหญ่ มันเป็นส่วนประกอบชั้นต้นของอุจจาระ และเป็นเหตุให้มันเป็นแบคทีเรียที่แพร่หลายมากที่สุดบนพื้นโลก เนื่องจากพวกมันอยู่กับอุจจาระ การปรากฏตัวของอีโคไลจึงถูกใช้ตั้งแต่ช่วงแรกของแบคทีเรียวิทยาในการตัดสินใจปนเปื้อนของน้ำ โดยเฉพาะน้ำดื่ม เนื่องจากคุณภาพทางด้านจุลชีพของน้ำดื่มเป็นจุดที่เป็นที่สนใจมากทางด้านสาธารณสุข ดังนั้นงานทดสอบน้ำเพื่อหาแบคทีเรียจำพวกที่อาศัยอยู่ในอุจจาระจึงเป็นความรู้ซึ่งเป็นที่รู้จักกันเป็นอย่างดีของนักแบคทีเรียวิทยาที่ได้รับการอบรมทุกคนสำหรับทางด้านทางการแพทย์ อีโคไลได้ถูกศึกษากันอย่างกว้างขวาง และเป็นที่รู้จักกันเป็นอย่างดี

### ไวรัส (virus)

หลังจากปลายของศตวรรษที่ 19 ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้คำว่า filterable virus เป็นชื่อเรียกเชื้อโรคทั้งหมดที่สามารถทะลุผ่านตัวกรองซึ่งสามารถกันแบคทีเรีย (bacteria) ฟังไจ (fungi) และโปรโตซัว (protozoa) ได้ ในเวลานั้นคำว่า filterable ได้ถูกยกเลิกไป เหลือเพียงคำว่า ไวรัส (virus) ซึ่งถูกใช้อ้างอิงถึงเชื้อโรคที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ในระหว่างช่วงสิบปีแรกของศตวรรษที่ 20 นักวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่เชื่อว่า ไวรัสเป็นกลุ่มพิเศษของพวกโรคติดต่อ ซึ่งแตกต่างจากพวกอื่น ๆ เพียงแค่เรื่องของขนาดเท่านั้น อย่างไรก็ตาม อีกไม่นานนักก็ได้มีการค้นพบว่า ไวรัสมีวิธีการเฉพาะตัวในการสืบพันธุ์ และผลิตสารเคมีเฉพาะอย่างขึ้นมา จากการที่มีกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope) และวิธีการวิเคราะห์ที่ทันสมัยขึ้น ก่อให้เกิดการค้นพบที่สำคัญทางด้านลักษณะของโครงสร้าง และการดำเนินชีวิตของไวรัส

ไวรัสถูกพบว่าเป็นปรสิตในเซลล์ทุกชนิด ไวรัสที่ก่อให้เกิดโรคต่อคนเป็นที่รู้จักกันมากที่สุดสมควร โรคบางชนิดของพืชและสัตว์ที่มีความสำคัญทางการเกษตรก็ถูกพบว่ามีสาเหตุมาจากไวรัส ไวรัสสามารถเจริญเติบโตได้ทั้งในฟังไจ แบคทีเรีย และบางครั้งก็ในโปรติส (protists) ด้วย

ไวรัสเป็นที่สนใจเป็นพิเศษของนักจุลชีววิทยาด้วยเหตุผลหลายประการ เช่น คุณจะพบว่าไวรัสมีความแตกต่างอย่างมากทั้งด้านโครงสร้าง และวงจรชีวิตจากจุลชีพตัวอื่น ๆ เนื่องจากมียารักษาโรคเป็นจำนวนมากที่ใช้ต่อต้านการติดต่อของแบคทีเรีย แต่ยาป้องกันไวรัสมีเพียงจำนวนน้อยนิด ดังนั้น ไวรัสจึงกลายเป็นตัวแทนการรักษาที่สำคัญของโรคติดต่อในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกา และไวรัสยังมีส่วนที่เกี่ยวข้องกับมะเร็งบางชนิดในมนุษย์ด้วย (Tortaro et al., 1985)



## 1. คุณลักษณะโดยทั่วไปของไวรัส

### 1.1 นิยาม (Definition)

ก่อนที่จะนิยามถึงไวรัส เราควรพิจารณาว่า ไวรัสเป็นสิ่งมีชีวิตหรือไม่ สิ่งมีชีวิตสามารถนิยามว่าเป็นส่วนซับซ้อนของกระบวนการซึ่งมีผลมาจากการกระทำของ นิวคลีอิก แอซิด (nucleic acid) นิวคลีอิก แอซิดของเซลล์สิ่งมีชีวิตจะทำงานอยู่ตลอดเวลา แต่เนื่องจากไวรัสจะเฉื่อย (inert) เมื่ออยู่นอกเซลล์ผู้ให้อาศัย (host cell) ดังนั้น จากความคิดนี้ พวกมันจึงไม่ถูกพิจารณาว่าเป็นสิ่งมีชีวิต อย่างไรก็ตาม เมื่อไวรัสเข้าไปในเซลล์ผู้ให้อาศัย นิวคลีอิก แอซิดของไวรัสก็จะกลับมามีชีวิต และก่อให้เกิดการแตกตัวขยายพันธุ์ไวรัส ในแง่นี้ ไวรัสเป็นสิ่งมีชีวิต เมื่อพวกมันเพิ่มจำนวนในเซลล์ผู้ให้อาศัยที่พวกมันแพร่เข้าไป มองทางการแพทย์แล้ว ไวรัสสามารถถูกพิจารณาให้เป็นสิ่งมีชีวิตได้ เพราะพวกมันเป็นสาเหตุของการติดต่อยุทธของโรค และการก่อให้เกิดโรคขึ้นอยู่กับการมองของแต่ละฝ่าย ไวรัสอาจถูกพิจารณาว่า เป็นสารประกอบทางเคมีซึ่งไม่มีชีวิต หรืออาจถูกมองว่าเป็นจุลชีพที่มีชีวิตชนิดพิเศษก็ได้

แล้วเราจะนิยามไวรัสว่าอย่างไร ไวรัสแตกต่างจากเชื้อโรคอื่น ๆ เนื่องจากพวกมันมีขนาดเล็กมาก ๆ และจากการที่พวกมันเป็นปรสิตที่จำเป็นต้องอาศัยอยู่ในเซลล์ ดังนั้น พวกมันจึงต้องการเซลล์ผู้ให้อาศัยอย่างยิ่งเพื่อการขยายพันธุ์ อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติทั้งสองถูกร่วมโดยแบคทีเรียขนาดเล็ก เช่น rickettsias รูปร่างพิเศษที่แท้จริงของไวรัสเป็นที่รู้จักกันแล้วในปัจจุบันว่า มีความสัมพันธ์กับส่วนประกอบของโครงสร้างอย่างง่าย ๆ และส่วนประกอบต่าง ๆ และกลไกของการขยายพันธุ์ ดังนั้น ไวรัสจึงถูกนิยามว่า (Tortaro et al., 1985)

1. ประกอบด้วยนิวคลีอิก แอซิดเพียงชนิดเดียวอาจเป็น DNAหรือRNA อย่างไม่อย่างหนึ่ง
2. ประกอบด้วยเปลือกโปรตีน (บางครั้งอาจถูกปิดล้อมด้วย envelope ของ lipids, โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต) ซึ่งล้อมรอบนิวคลีอิก แอซิดอยู่
3. มีการขยายพันธุ์ภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต โดยอาศัยกลไกการสังเคราะห์ทางเคมีของเซลล์
4. จากการที่ประกอบขึ้นมาจากสารประกอบเฉพาะอย่าง ดังนั้น นิวคลีอิก แอซิดของไวรัสจึงสามารถเคลื่อนผ่านเข้าสู่เซลล์อื่น ๆ ได้

เนื่องจากไวรัสมีเอนไซม์สำหรับเมตาบอลิซึม (metabolism) น้อยหรือไม่มีเลย ดังนั้น เพื่อที่จะขยายพันธุ์ ไวรัสจึงต้องอาศัยกลไกเมตาบอลิซึมของเซลล์ผู้ให้อาศัยแทน ข้อเท็จจริงนี้มีความสำคัญทางการแพทย์ ในการพัฒนายาเพื่อต่อต้านไวรัส

## 1.2 ขอบเขตของการอาศัย (Host Range)

ขอบเขตของการอาศัยของไวรัสขึ้นอยู่กับขนาดของเซลล์ให้อาศัย ซึ่งไวรัสแพร่เข้าไป ไวรัสขยายพันธุ์ภายในเซลล์อย่างเดียวนั้น ดังนั้น จึงถูกแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ คือ ไวรัสสัตว์ ไวรัสพืช และไวรัสแบคทีเรีย ในแต่ละประเภทและชนิดของไวรัส มักจะสามารถแพร่เข้าไปในเซลล์ชนิดหนึ่งชนิดใดได้เพียงชนิดเดียวเท่านั้น

ขอบเขตของเซลล์ให้อาศัยสำหรับไวรัสถูกจำกัดโดย ความต้องการของไวรัสในการเข้าสู่เซลล์ให้อาศัย และปัจจัยภายในเซลล์ที่จำเป็นต่อการขยายพันธุ์ไวรัสที่สามารถหาได้ภายในเซลล์ให้อาศัย เพื่อที่จะให้ไวรัสสามารถแพร่เข้าสู่เซลล์ให้อาศัย ผิวภายนอกของไวรัสต้องเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับสิ่งรับ (receptor sites) บนผิวของเซลล์ สองสิ่งนี้ถูกทำให้อยู่ติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สำหรับแบคทีริโอฟาจ ตัวรับเป็นส่วนประกอบทางเคมีของผนังเซลล์ของเซลล์ให้อาศัย

## 1.3 ขนาด (Size)

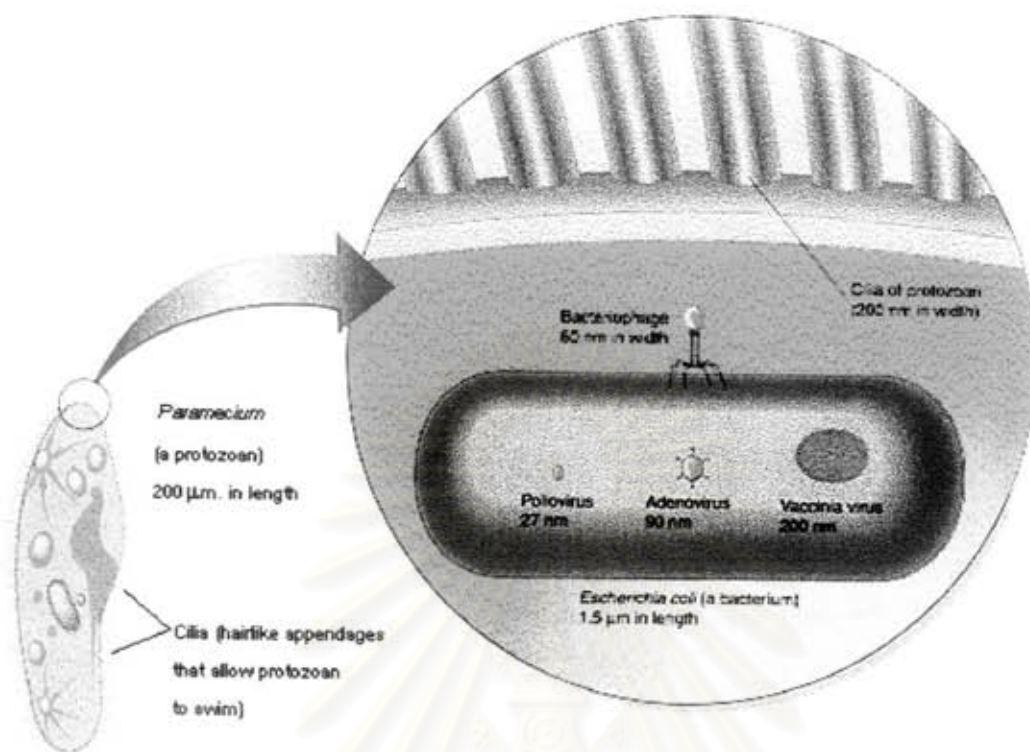
ขนาดของไวรัสถูกคาดการณ์ขึ้นเป็นครั้งแรกโดยการกรองผ่านเมมเบรน ซึ่งรู้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุน ในปัจจุบันขนาดของไวรัสถูกคาดการณ์โดย ultracentrifugation และ electron microscopy เทคนิคล่าสุดนี้ดูเหมือนจะให้ผลที่ได้น่าเชื่อถือที่สุด ไวรัสมิขนาดต่าง ๆ กัน ถึงแม้ว่า ส่วนใหญ่จะค่อนข้างเล็กกว่าแบคทีเรียเล็กน้อย แต่ไวรัสบางชนิดที่มีขนาดใหญ่ (เช่น ไวรัสไข้ทรพิษ (small pox virus) จะมีขนาดใกล้เคียงกับแบคทีเรียขนาดเล็กมากบางชนิด (เช่น mycoplasma, rickettsias และ chlamydias) ไวรัสมิช่วงของเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 20 ถึง 300 นาโนเมตร (รูปที่ 2.12)

## 2. โครงสร้างของไวรัส

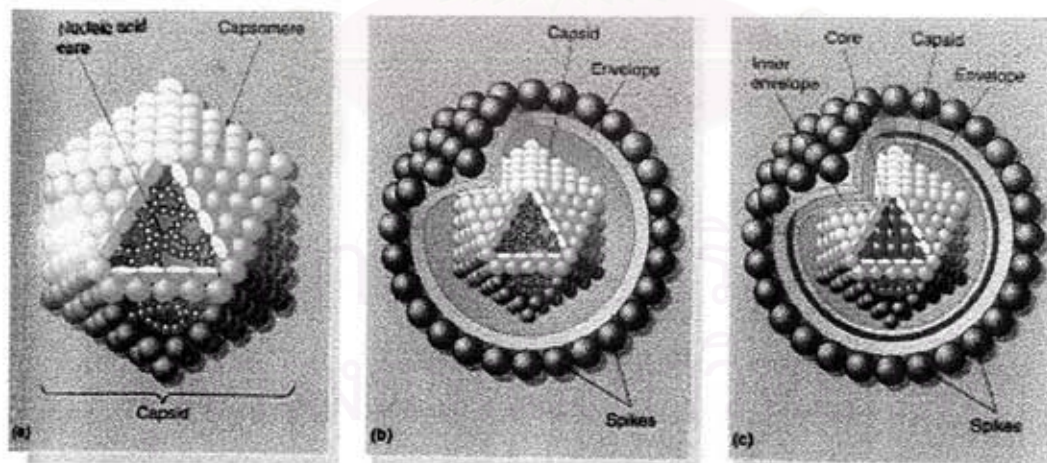
### 2.1 นิวคลีอิก แอซิด (nucleic acid)

แกนของไวรัสจะประกอบด้วย นิวคลีอิก แอซิดชนิดหนึ่งชนิดใดระหว่าง DNA และ RNA ซึ่งเป็นส่วนขยายพันธุ์ เพอร์เซ็นต์ของนิวคลีอิกแอซิด เทียบกับโปรตีนแล้วประมาณ 1 เพอร์เซ็นต์สำหรับไวรัสไข้หวัดใหญ่ (influenza virus) และประมาณ 50 เพอร์เซ็นต์สำหรับแบคทีริโอฟาจโดยทั่วไปจำนวนนิวคลีอิก แอซิดทั้งหมดแตกต่างกันไปตั้งแต่ไม่กี่พันนิวคลีโอไทด์ (nucleotides) (หรือคู่) จนถึง 250,000 นิวคลีโอไทด์

ตรงกันข้ามกับเซลล์ prokaryotic และ eukaryotic ซึ่ง DNA มักจะเป็นตัวถ่ายทอดพันธุกรรมขั้นต้น (และ RNA เป็นตัวช่วย) ไวรัสสามารถมี DNA หรือ RNA เพียงชนิดเดียวไม่



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ด้านขนาดของจุลชีพต่าง ๆ  
ที่มา McKane and Kandel (1996)



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของไวรัส (a) Nonenveloped icosahedral (20-sides) virus.  
(b) และ (c) An enveloped virus with icosahedral capsid.  
ที่มา McKane and Kandel (1996)

สามารถมีพร้อมกันได้ นิวคลีอิก แอซิดของไวรัสสามารถเป็นเกลียวเดี่ยวหรือเกลียวคู่ก็ได้ ดังนั้น จึงมีไวรัสจำพวก DNA เกลียวคู่, DNA เกลียวเดี่ยว, RNA เกลียวคู่ และ RNA เกลียวเดี่ยว ขึ้นอยู่กับชนิดของไวรัส นิวคลีอิก แอซิดสามารถเป็นเส้นตรง หรือเป็นวงกลม และในไวรัสบางชนิด (เช่น ไวรัสไข้หวัดใหญ่) นิวคลีอิก แอซิดเป็นโมเลกุลซึ่งแยกกันเป็นหลาย ๆ โมเลกุล

## 2.2 Capsid และ Envelope

นิวคลีอิก แอซิดของไวรัสถูกล้อมรอบด้วยเปลือกโปรตีน ซึ่งเรียกว่า capsid (รูปที่ 2.13a) รูปร่างของ capsid ขึ้นอยู่กับ นิวคลีอิก แอซิด ของไวรัส และจำนวนมวลส่วนใหญ่ของไวรัส โดยเฉพาะอย่างยิ่งในไวรัสขนาดเล็ก แต่ละ capsid จะประกอบด้วย หน่วยย่อย ๆ ของโปรตีนประกอบกันเป็น capsomeres ในไวรัสบางชนิดโปรตีนที่ประกอบขึ้นเป็น capsomeres จะเป็นชนิดเดียว ในขณะที่ไวรัสอื่น ๆ อาจจะประกอบด้วยโปรตีนหลายชนิด ในแต่ละ capsomeres มักถูกเห็นได้ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนการเรียงตัวของ capsomere เป็นลักษณะเฉพาะของไวรัสแต่ละชนิด

ในไวรัสบางชนิด capsid จะถูกปกคลุมด้วย envelope (รูปที่ 2.13b) ซึ่งมักจะประกอบด้วย การรวมตัวกันของ lipid, protists และ carbohydrates การรวมกันของโมเลกุลของ envelope เหล่านี้ยังไม่เป็นที่รู้จักโดยทั่วไป ไวรัสสัตว์บางชนิดถูกปล่อยออกจากเซลล์ให้อาศัยโดยการแตกออกของชั้นเยื่อพลาสมาของเซลล์ให้อาศัย ซึ่งปกคลุมไวรัสอยู่ โดยชั้นเหล่านี้ก็จะกลายเป็น envelope ของไวรัส มีหลายกรณีที่ envelope ประกอบด้วย โปรตีนซึ่งกำหนดโดย นิวคลีอิก แอซิดของไวรัสแล้ว มันยังประกอบด้วยสารที่ได้มาจากส่วนประกอบของเซลล์ปกติอีกด้วย

envelope อาจจะถูกปกคลุมด้วย spikes ซึ่งเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต-โปรตีน ซึ่งยื่นออกมาจากผิวของ envelope หรือไม่กี่ได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของไวรัส ไวรัสบางชนิดเกาะติดเซลล์ให้อาศัยโดยอาศัย spikes

ไวรัสที่ capsid ปราศจากการปกคลุมด้วย envelope ถูกเรียกว่า naked virus (รูปที่ 2.13a) capsids ของ naked virus ปกป้องนิวคลีอิก แอซิดจากเอ็นไซม์ของนิวเคลียส (nuclease) ในของเหลวชีวภาพ และช่วยการเกาะติดของไวรัสบนเซลล์ให้อาศัยด้วย

## 3. รูปร่างพื้นฐานของไวรัส (Basic Morphology of Virus)

จากการที่มีกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จึงทำให้สามารถทราบถึงลักษณะรูปร่างของไวรัส ไวรัสมิขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 20-300 นาโนเมตร (1นาโนเมตร = 1/1000 ไมครอน) เนื่องจากขนาดของไวรัสส่วนใหญ่เล็กกว่า 150 นาโนเมตร ดังนั้นพวกมันจึงมีข้อจำกัดในการใช้กับกล้องจุลทรรศน์ชนิด light และสามารถมองเห็นได้โดยอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเท่านั้น

จากการอาศัยวัสดุที่รู้ขนาดที่แน่นอนเพื่อการเปรียบเทียบ ดังนั้นนักจุลชีววิทยาจึงสามารถใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนในการหาขนาด และโครงสร้างของไวรัสแต่ละตัว (Pelczar et al., 1986) ไวรัสอาจถูกแบ่งเป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้หลายชนิด ดังนี้

### 3.1 Helical Virus

Helical virus มีรูปร่างที่เหมือนแท่งกลมยาว ซึ่งอาจเป็นแท่งตรง หรือคดโค้ง capsid ของพวกมันเป็นกระบอกกลวงวนเป็นเกลียวล้อมรอบนิวคลีอิก แอซิด ตัวอย่างของ helical virus ซึ่งเป็นแท่งตรง คือ tobacco mosaic virus (รูปที่ 2.14c) ไวรัสอีกตัวคือ โคลิฟาจ ชนิด M13

### 3.2 Polyhedral Virus

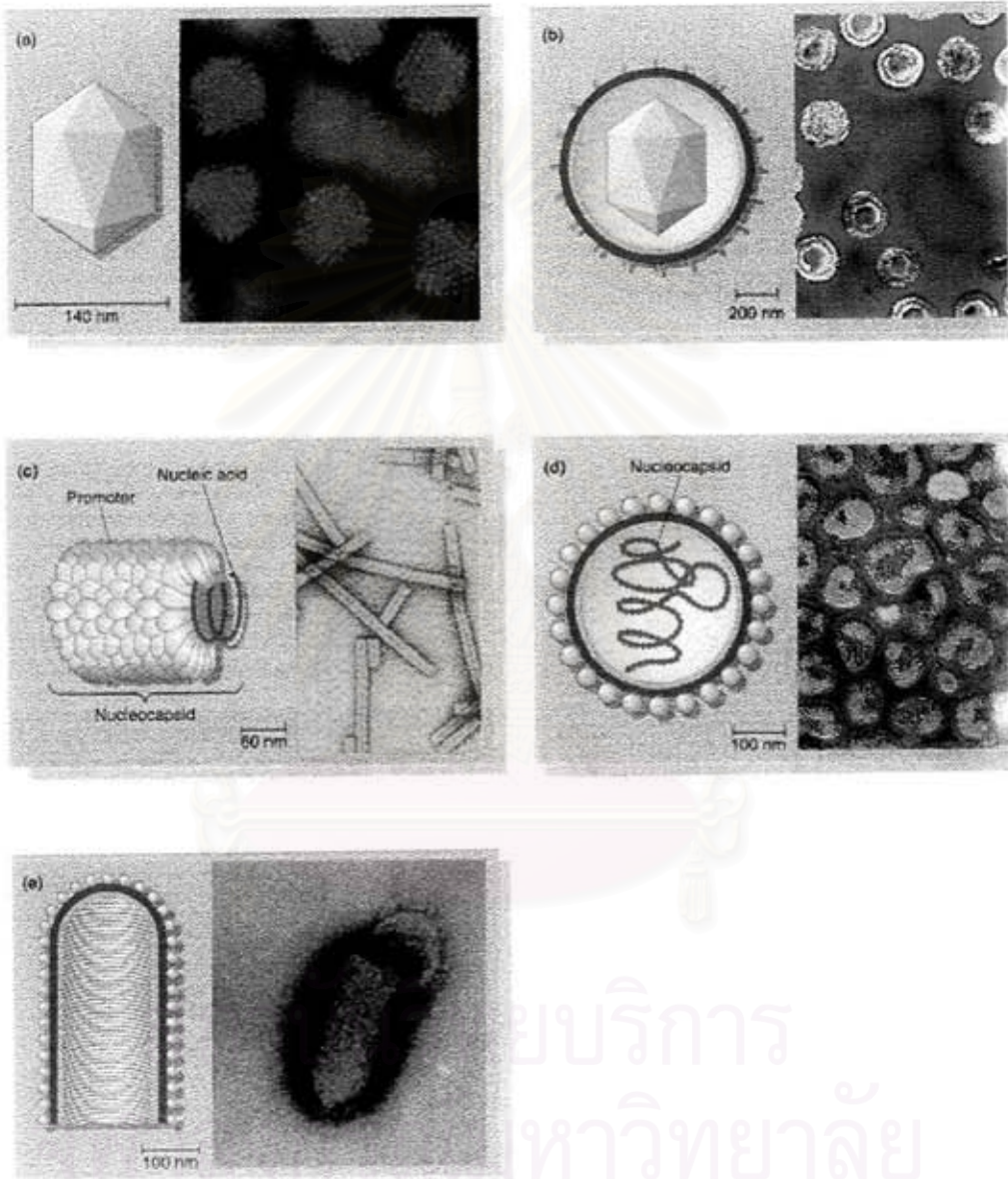
มีไวรัสสัตว์ ไวรัสพืช และไวรัสแบคทีเรียจำนวนมากที่เป็น polyhedral virus ซึ่งพวกมันมีหน้าหลายด้าน capsid ของ polyhedral virus ส่วนมากเป็นรูปทรงของ icosahedron ซึ่งเป็นรูปทรงหลายหน้าทั่วไปที่มีหน้าสามเหลี่ยม 20 ด้าน และมุม 12 มุม capsomeres ของแต่ละรูปด้านเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่า ตัวอย่างของ polyhedral virus ซึ่งมีรูปทรง icosahedron คือ adenovirus (รูปที่ 2.14a) อีกตัวอย่างหนึ่งคือ poliovirus

### 3.3 Envelope Virus

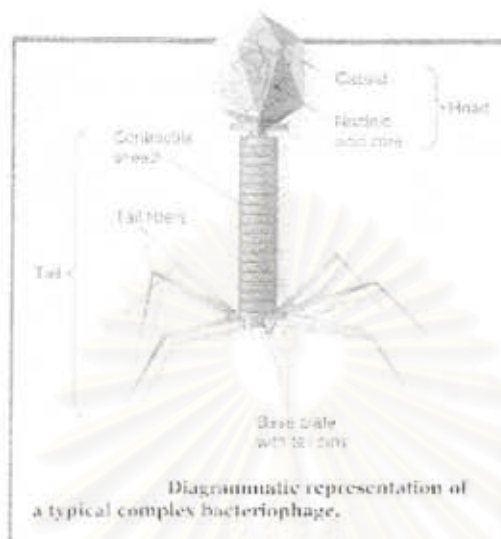
capsid ของไวรัสบางตัวถูกปกคลุมด้วย envelope และไวรัสเหล่านี้ถูกเรียกว่า enveloped viruses ซึ่งมีรูปทรงเป็นทรงกลมอย่างหยาบๆ แต่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปทรงได้มาก เพราะ envelope มีลักษณะที่ไม่คงตัวมากนัก เมื่อ helical virus หรือ polyhedral virus ถูกปกคลุมด้วย envelope พวกมันจะถูกเรียกว่า enveloped helical virus และ envelope polyhedral virus ตัวอย่างของ enveloped helical virus คือ influenza virus และตัวอย่างของ enveloped polyhedral (icohedron) virus คือ herpes simplex virus (รูปที่ 2.14 b, d และ e)

### 3.4 Complex Virus

ไวรัสบางตัวโดยเฉพาะไวรัสแบคทีเรียมักจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อน และถูกเรียกว่า complex viruses ตัวอย่างของ complex viruses คือ poxviruses ซึ่งไม่มี capsids ที่ชัดเจนแต่มีเปลือกหลายชั้นล้อมรอบนิวคลีอิก แอซิดอยู่ และแบคทีริโอฟาจซึ่งมี capsid อยู่ที่โครงสร้างที่ถูกติดเพิ่มเข้ามา (รูปที่ 2.15)



รูปที่ 2.14 รูปทรงต่าง ๆ ของไวรัส (a) Cubic symmetry-naked (b) cubic symmetry-enveloped (c) helical symmetry (d) และ (e) enveloped helix  
ที่มา McKane and Kandel (1996)



รูปที่ 2.15 แบคทีริโอฟาจที่เป็น complex virus  
ที่มา McKane and Kandel (1996)



รูปที่ 2.16 Bacteriophage plaques  
ที่มา McKane and Kandel (1996)

#### 4. การเจริญเติบโตของแบคทีริโอฟาจในห้องปฏิบัติการ

แบคทีริโอฟาจสามารถเจริญเติบโตได้ทั้งในแบคทีเรียที่แขวนลอยในอาหารเหลว หรือแบคทีเรียในอาหารแข็ง การใช้อาหารแข็งทำให้วิธีการนับพลัก (plaque method) มีความเป็นไปได้ในการตรวจสอบ และนับจำนวนไวรัส โดยอาศัยเพียงแก้ววัตถุติด และเครื่องมือธรรมดา ๆ ในการทำวิธีการนี้ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาครั้งแรกสำหรับใช้กับแบคทีริโอฟาจ ตัวอย่างของแบคทีริโอฟาจจะถูกผสมด้วยแบคทีเรียผู้ให้อาศัย และวันที่หลอมเหลว วันกับแบคทีริโอฟาจและแบคทีเรียผู้ให้อาศัยจะถูกเทลงไปในจานเพาะเชื้อ (petri dish) ส่วนผสมของแบคทีเรีย และไวรัสจะแข็งเป็นชั้นบาง ๆ อยู่ชั้นบนสุด ซึ่งจะประกอบด้วยชั้นของแบคทีเรียหนาประมาณ 1 เซล ไวรัสแต่ละตัวจะแพร่เข้าไปในแบคทีเรีย ขยายพันธุ์ และปล่อยไวรัสตัวใหม่หลายร้อยตัวออกมา ไวรัสตัวใหม่ ๆ เหล่านี้ก็จะแพร่เข้าสู่แบคทีเรียตัวอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้ ๆ โดยทันที และไวรัสตัวใหม่เป็นจำนวนมากก็จะถูกผลิตออกมา ภายหลังจากวงจรการขยายพันธุ์ของไวรัสเกิดขึ้นหลาย ๆ ครั้ง แบคทีเรียทั้งหมดในพื้นที่รอบ ๆ ไวรัสตัวแรกก็จะถูกทำลาย สิ่งนี้ทำให้เกิดจำนวนของพลักซึ่งสามารถเห็นได้จากความแตกต่างโดยรอบของการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบนผิววุ้น (รูปที่ 2.16) ระหว่างการเกิดพลัก แบคทีเรียที่ไม่ถูกแพร่เข้าสู่เซลล์ตัวอื่น ๆ ก็จะขยายพันธุ์อย่างรวดเร็ว โดยการสืบพันธุ์แบบแบ่งตัวออกจากกัน และทำให้ความขุ่นเกิดขึ้นโดยรอบ

แต่ละพลักตามทฤษฎีจะแสดงถึงไวรัสหนึ่งตัวในสารแขวนลอยในตอนแรก เนื่องจากพลักหนึ่ง ๆ สามารถเกิดขึ้นจากไวรัสมากกว่าหนึ่งตัวและไวรัสบางตัวอาจไม่ได้แพร่พันธุ์ ความเข้มข้นของไวรัสแขวนลอยจึงวัดโดยจำนวนของพลักซึ่งมักอยู่ในเทอมของ plaque-forming units (pfu)







#### 5. ประเภทของแบคทีริโอฟาจ

การแบ่งกลุ่มของของแบคทีริโอฟาจ จะแบ่งตามลักษณะรูปร่างของ capsid ที่มองเห็นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และธรรมชาติของนิวคลีอิก แอซิด ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 10 แฟมิลี (families) (Matthews, 1983) แต่จะมีเพียง 6 แฟมิลีที่พบได้บ่อย รูปร่าง และขนาดดูได้จากรูป 2.17 หรือ รูปที่ 2.18 และจากตารางที่ 2.1

#### 6. การขยายพันธุ์ของไวรัส (Viral Multiplication)

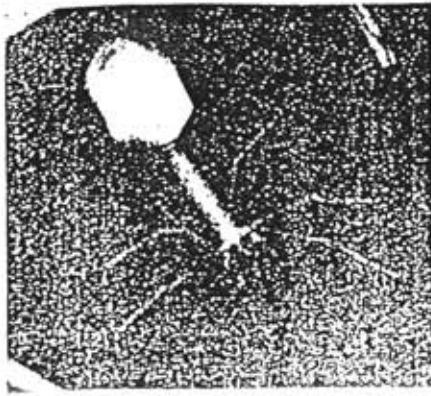
นิวคลีอิกแอซิดในไวรัส ประกอบด้วยยีน (gene) จำนวนเพียงเล็กน้อย ซึ่งจำเป็นสำหรับการประกอบไวรัสตัวใหม่เหล่านี้ รวมไปถึงยีนสำหรับส่วนประกอบทางโครงสร้างของไวรัส เช่นโปรตีนของ capsid และยีนสำหรับเอ็นไซม์จำนวนเล็กน้อยซึ่งใช้ในวงจรชีวิตของไวรัส



<p>A. Myoviridae</p>  <p>ds DNA cell wall 95x65 nm</p> <p>T2</p>	<p>B. Styloviridae</p>  <p>ds DNA cell wall 54 nm</p> <p><math>\lambda</math></p>	<p>C. Podoviridae</p>  <p>ds DNA cell wall 47 nm</p> <p>T7</p>
<p>D. Microviridae</p>  <p>ss DNA cell wall 30 nm</p> <p><math>\phi</math>X174</p>	<p>E. Leviviridae</p>  <p>ss DNA sex pilus 24 nm</p> <p>MS2</p>	<p>F. Inoviridae</p> <p>ss DNA sex pilus 810x6 nm</p> <p>fd</p> 

รูปที่ 2.17 ชื่อ รูปร่าง ลักษณะ ขนาด ของแบคทีริโอเฟจที่พบได้บ่อย  
ที่มา Havelaar, A.H. (1985)

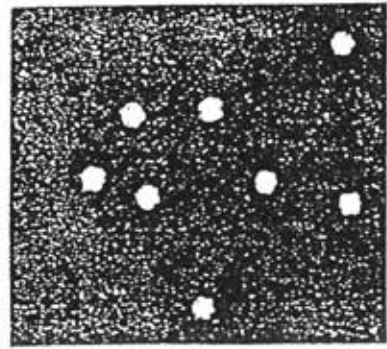
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



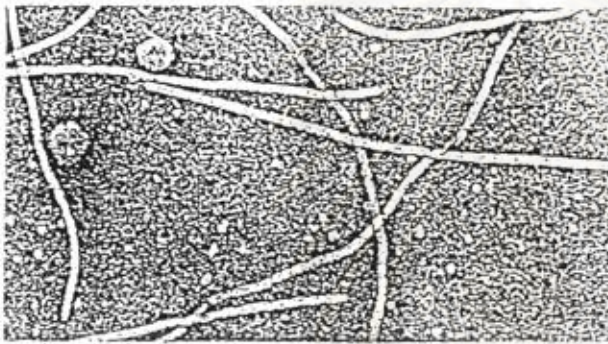
ก. T4



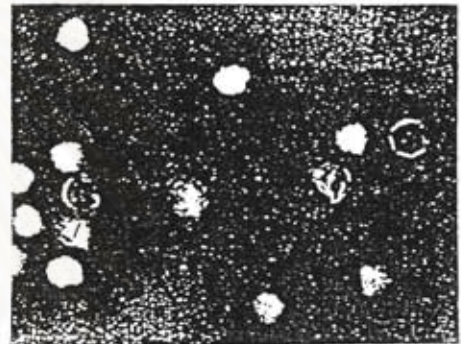
ข. λ



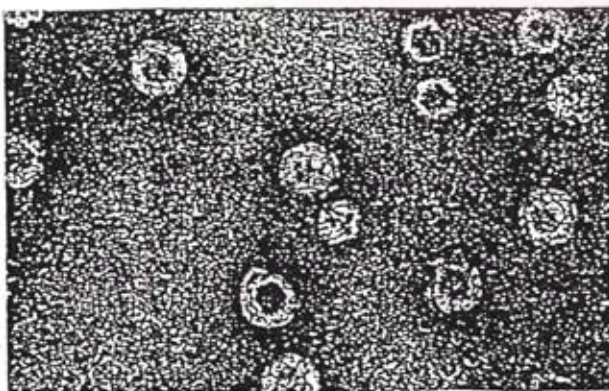
ค. φx174



ง. M13



จ. T7



ฉ. φ6



ช. MS-2

รูปที่ 2.18 รูปร่าง ลักษณะ ของแบคทีริโอฟาจที่เห็นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน  
ที่มา Freifelder, D.M. (1983)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะ และขนาดของไวรัสในแบคทีเรีย

ไวรัส	ขนาด (นาโนเมตร)	
	ส่วนหัว	ส่วนหาง
<b>ก. ฟาจมีหางที่สามารถหดได้</b>		
<i>Alcaligenes faecalis</i> A6	90	16x110
<i>Bacillus subtilis</i> SPO1	90	60x210
<i>Escherichia coli</i> E1	75	17x210
<i>Escherichia coli</i> T2 T4 T6	65x95	25x110
<i>Lactobacillus</i> 206	72	16x138
<i>Myxococcus xanthus</i> MX1	75	25x100
<i>Proteus hauseri</i> 78	61	16x89
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> PB1	75	20x140
<b>ข. ฟาจมีหางที่ไม่สามารถหดได้</b>		
<i>Escherichia coli</i> lambda	54	10x150
<i>Escherichia coli</i> T1	50	10x150
<i>Escherichia coli</i> T3 T7	60	10x15
<i>Escherichia coli</i> T5	65	10x170
<i>Pseudomonas</i> Po	65	10x160
<i>Staphylococcus</i> 6	40x92	10x300
<i>Streptococcus</i> 3ML	40x55	9x100
Typhoid 1	75	9x180
Typhoid S1 BL	50	10x130

ที่มา Knight, C.A. (1975)

เอ็นไซม์ของไวรัสส่วนใหญ่ (เอ็นไซม์ในนิวคลีอิก แอซิดของไวรัส) ไม่ใช่ส่วนหนึ่งของไวรัส พวกมันถูกสังเคราะห์ขึ้นทางเคมี และเป็นเหตุให้มีการทำงานเมื่อไวรัสอยู่ภายในเซลล์ผู้ให้อาศัยเท่านั้น เอ็นไซม์ของไวรัสเกี่ยวข้องกับการถอดแบบ (replication) หรือกระบวนการของนิวคลีอิก แอซิดของไวรัสเกือบทั้งหมด และเกือบจะไม่เกี่ยวข้องกับกลไกของการสร้างโปรตีน หรือการผลิตพลังงานเลย ถึงแม้ว่า naked virus ที่มีขนาดเล็กที่สุดจะไม่มีเอ็นไซม์ต้นแบบ แต่ไวรัสที่มีขนาดใหญ่กว่าก็อาจจะมีเอ็นไซม์แค่หนึ่ง หรือมากกว่านั้นเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งมักจะทำงานในการช่วยให้ไวรัสทะลุผ่านเซลล์ผู้ให้อาศัย หรือถอดแบบจากนิวคลีอิก แอซิดของตัวเอง

ดังนั้น สำหรับไวรัสที่จะขยายพันธุ์ มันจะต้องบุกรุกเข้าไปในเซลล์ผู้ให้อาศัย และยึดครองกลไกทางเมตาบอริซึมของผู้ให้อาศัย ไวรัสหนึ่งตัวสามารถเพิ่มจำนวนไวรัสที่เหมือนกันเป็นจำนวนมากอาจเป็นพัน ๆ ตัวภายในเซลล์ผู้ให้อาศัยเพียงหนึ่งเซลล์เท่านั้น กระบวนการนี้ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงต่อเซลล์ผู้ให้อาศัย และมักเป็นสาเหตุการตายของเซลล์ผู้ให้อาศัย

## 7. การขยายพันธุ์ของแบคทีริโอฟาจ (Multiplication of Bacteriophages)

ถึงแม้ว่าวิธีที่ไวรัสเข้าและออกจากเซลล์ผู้ให้อาศัยอาจมีหลายวิธี แต่กลไกพื้นฐานของการขยายพันธุ์ของไวรัสจะเหมือน ๆ กันทั้งไวรัสสัตว์ ไวรัสพืช และแบคทีริโอฟาจ วงจรชีวิตของไวรัสที่สามารถเข้าใจได้ง่ายที่สุดคือ แบคทีริโอฟาจ หรือฟาจที่ใช้เรียกกันทั่วไป เนื่องจากแบคทีริโอฟาจชนิด T-even (T2, T4 และ T6) ได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง ดังนั้น เราจะอธิบายถึงการขยายพันธุ์ของแบคทีริโอฟาจชนิด T-even ในผู้ให้อาศัยคือ อีโคไล

### 7.1 แบคทีริโอฟาจชนิด T-even

แบคทีริโอฟาจชนิด T-even มีขนาดใหญ่ เป็น naked virus ที่ซับซ้อน โครงสร้างมีหัวและหาง ดังรูปที่ 2.15 ถึงแม้ว่าความยาวของ DNA ในแบคทีริโอฟาจจะประมาณเพียง 6 เพอร์เซ็นต์ของที่บรรจุในอีโคไล แต่แบคทีริโอฟาจก็มี DNA เพียงพอสำหรับยีนกว่า 100 หน่วย วงจรการขยายพันธุ์ของฟาจเหล่านี้เหมือนกับไวรัสทุกชนิด และสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนสำคัญได้หลายขั้นตอน คือ การดูดติด (adsorption) การทะลุเข้าไปสู่เซลล์ (penetration) การสังเคราะห์ ส่วนประกอบของไวรัสขึ้นโดยทางชีวภาพ (biosynthesis of viral components) การโตเต็มวัย (maturation) และการออกจากเซลล์ (release)

#### 7.1.1 การดูดติดของฟาจบนเซลล์ผู้ให้อาศัย

หลังจากการชนกันระหว่างอนุภาคฟาจ และแบคทีเรีย การดูดติดจะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการนี้ ส่วนดูดติดของไวรัสจะจับติดกับส่วนรับสารประกอบบนเซลล์แบคทีเรีย การ



ดูดติดนี้เป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่มีผลต่อกัน ซึ่งพันธะอ่อน ๆ จะเกิดขึ้นระหว่างส่วนดูดติดกับส่วนรับ แบคทีริโอฟาจชนิด T-even ให้ไฟเบอร์ (fibers) ที่อยู่ส่วนปลายของหางเป็นตัวดูดติด ส่วนรับจะอยู่บนผนังเซลล์ของแบคทีเรีย (ฟาจชนิดอื่นดูดติดที่ flagella หรือ pili) (รูปที่ 2.19)

### 7.1.2 การทะลุเข้าสู่เซลล์

หลังจากการดูดติดแล้ว แบคทีริโอฟาจชนิด T-even จะฉีด DNA (นิวคลีอิก แอซิด) ของมันเข้าไปในแบคทีเรีย และเพื่อให้เกิดสิ่งนี้ หางของแบคทีริโอฟาจจะปล่อยเอ็นไซม์ที่เรียกว่า ฟาจไลโซไซม์ (phage lysozyme) ซึ่งจะทำลายผนังเซลล์ของแบคทีเรีย ระหว่างกระบวนการทะลุเข้าสู่เซลล์ ปกอกหางของฟาจจะหดย่อ และแกนหางก็จะดันทะลุผ่านผนังเซลล์ เมื่อปลายของแกนผ่านมาถึงเยื่อพลาสมา DNA จากหัวของแบคทีริโอฟาจจะผ่านทางแกนของหางเข้าสู่เยื่อพลาสมา และเข้าไปในเซลล์แบคทีเรีย capsid ของแบคทีริโอฟาจส่วนใหญ่จะยังคงอยู่ภายนอกเซลล์แบคทีเรีย (รูปที่ 2.16)

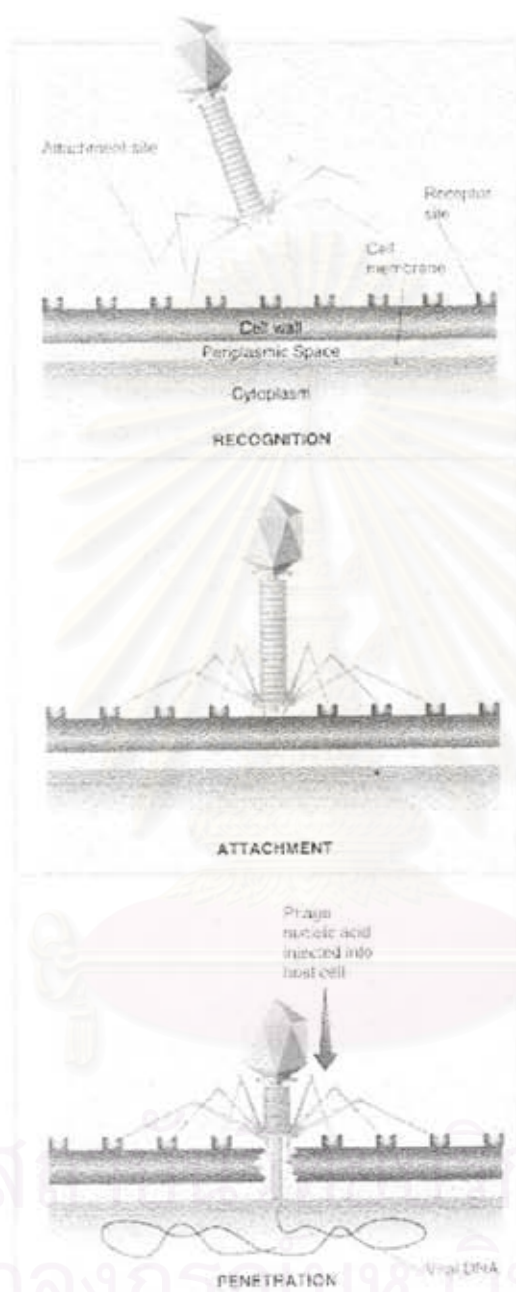
### 7.1.3 การสังเคราะห์ส่วนประกอบของไวรัสขึ้นโดยทางชีวภาพ

ทันทีที่ DNA ของแบคทีริโอฟาจเข้ามาถึงไซโตพลาสซึม (cytoplasm) ของเซลล์ผู้ให้อาศัย การสังเคราะห์ขึ้นทางชีวภาพของนิวคลีอิก แอซิดของไวรัส และโปรตีนจะเกิดขึ้น ในกระบวนการนี้ DNA ของไวรัสจะเข้าครอบครองกลไกการทำงานทางเมตาบอลิซึมของเซลล์ผู้ให้อาศัย การถ่ายทอด RNA จากโครโมโซมของผู้ให้อาศัยจะหยุดลง เนื่องจาก DNA ของเซลล์ผู้ให้อาศัยถูกทำลายลง RNA ที่ถูกถ่ายทอดต่อมาคือ mRNA ซึ่งถูกถ่ายทอดจาก DNA ของฟาจ เนื่องจากเอ็นไซม์ของผู้ให้อาศัยยังคงทำงานอยู่ พวกมันจึงผลิตพลังงานสำหรับการสังเคราะห์ขึ้นทางชีวภาพของ DNA ของฟาจและโปรตีน พร้อมด้วยเอ็นไซม์ของผู้ให้อาศัย เอ็นไซม์ซึ่งถูกถ่ายทอดพันธุกรรมใน DNA ของฟาจจะถูกสังเคราะห์ขึ้น และถูกใช้โดยฟาจ

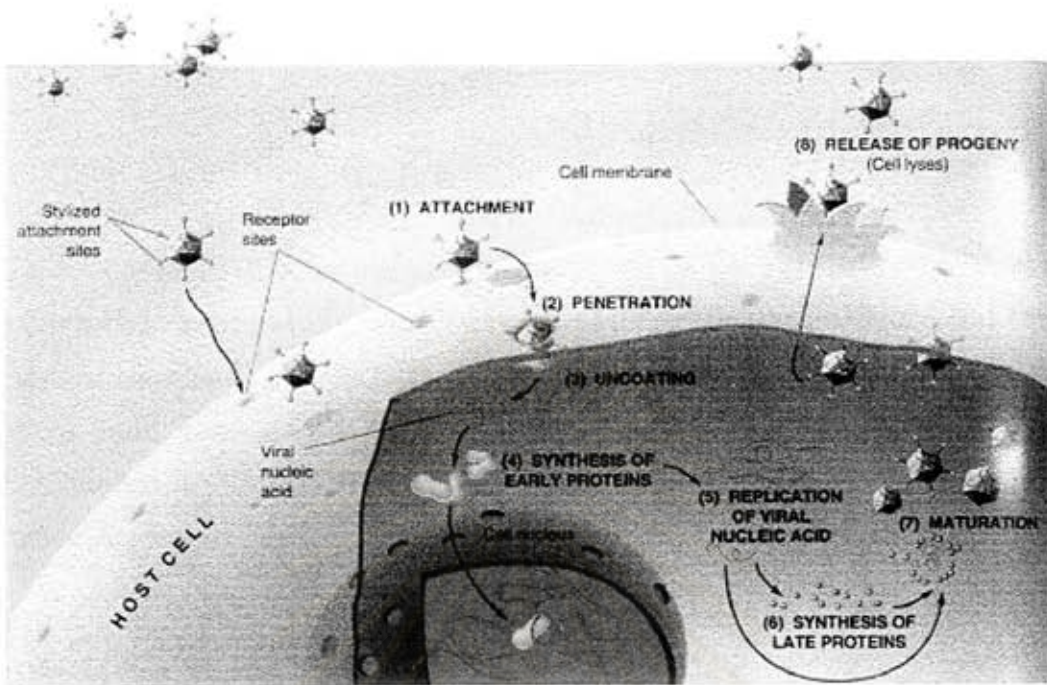
ในตอนแรก ฟาจจะใช้นิวคลีโอไทด์ของเซลล์ผู้ให้อาศัย และบ่อยครั้งที่จะใช้เอ็นไซม์ของตัวเอง เพื่อสังเคราะห์ DNA ของฟาจ และหลังจากนั้น การสังเคราะห์โปรตีนไวรัสโดยทางชีวภาพจึงจะเริ่มขึ้น ไลโมโซม เอ็นไซม์ และกรดอะมิโนของเซลล์ผู้ให้อาศัยถูกใช้เพื่อการสังเคราะห์โปรตีนของไวรัส รวมทั้งโปรตีนของ capsid (รูปที่ 2.20)

ระหว่างการทะลุเข้าสู่เซลล์ capsid ยังคงอยู่ข้างนอก ระหว่างที่ DNA ของฟาจถูกฉีดเข้าสู่เซลล์ผู้ให้อาศัย สิ่งนี้หมายความว่า DNA ของฟาจต้องเตรียม เพิ่มเพล็ท (template) สำหรับการผลิตส่วนประกอบของไวรัสทั้งหมด รวมทั้ง DNA ของฟาจตัวใหม่ mRNA ถูกถ่ายทอดจาก DNA ของฟาจเพื่อการถ่ายย้ายของ เอ็นไซม์ของฟาจ และโปรตีนของ capsid

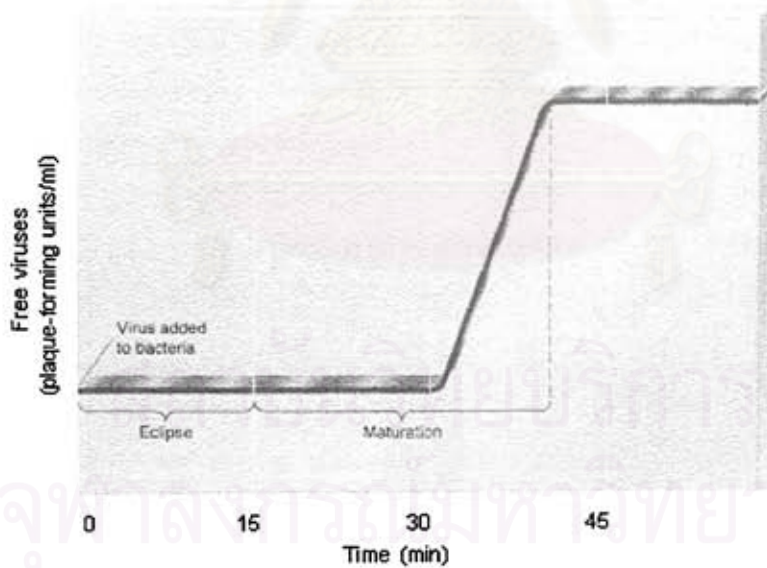
หลังจากการแพร่เข้าสู่เซลล์เป็นเวลาหลายนาที ฟาจที่สมบูรณ์ยังไม่สามารถถูกตรวจพบในเซลล์ผู้ให้อาศัย มีเพียงส่วนประกอบย่อย ๆ ที่สามารถตรวจพบได้ คือ DNA และ



รูปที่ 2.19 การติดต่อกับผนังเซลล์ และการทะลุเข้าสู่เซลล์โฮสต์  
ของแบคทีริโอฟาจชนิด T-2  
ที่มา McKane and Kandel (1996)



รูปที่ 2.20 การขยายพันธุ์ของไวรัส  
ที่มา McKane and Kandel (1996)



รูปที่ 2.21 One-step growth curve ของแบคทีริโอฟาจชนิด T-2  
ที่มา McKane and Kandel (1996)

โปรตีน ช่วงเวลาระหว่างที่การขยายพันธุ์ของไวรัสเสร็จสมบูรณ์ แต่ไวรัสยังไม่แสดงตัวออกมานี้ เรียกว่า eclipse period

#### 7.1.4 ช่วงโตเต็มวัย

ช่วงถัดมาเป็นช่วงโตเต็มวัย ในกระบวนการนี้ DNA ของแบคทีริโอฟาจ และ capsid จะถูกรวบรวมประกอบกันเป็นไวรัสที่สมบูรณ์ กระบวนการประกอบจะถูกชักนำโดยผลผลิตของยีนไวรัสตามลำดับชั้น ทีละขั้นตอน หัวและหางของฟาจจะถูกประกอบแยกออกจากกันโดย หน่วยย่อยของโปรตีน ส่วนหัวจะถูกประกอบด้วย DNA ของฟาจ และส่วนหางจึงจะถูกติดเข้าไป (รูปที่ 2.20) (สำหรับไวรัสตัวอย่างหลาย ๆ ตัว นิวคลีอิก แอซิด และโปรตีนของ capsid จะประกอบกันทันทีเพื่อรวมตัวเป็นไวรัส โดยปราศจากการเข้าแทรกของผลผลิตจากยีนของฟาจตัวอื่น ๆ )

#### 7.1.5 การออกจากเซลล์

ขั้นตอนสุดท้ายของการขยายพันธุ์ของไวรัส คือ การออกจากเซลล์ ซึ่งหมายถึงการปลดปล่อยไวรัสตัวใหม่ออกจากเซลล์ผู้ให้อาศัย โดยทั่ว ๆ ไปเทอม lysis ถูกใช้สำหรับขั้นตอนนี้ในการขยายพันธุ์ของฟาจชนิด T-even ไลโซไซม์เจ้าของโค้ดซึ่งถูกเตรียมไว้โดยยีนของฟาจจะถูกสังเคราะห์ขึ้นภายในเซลล์ เอ็นไซม์นี้เป็นสาเหตุของการแตกออกของผนังเซลล์ของแบคทีเรีย และแบคทีริโอฟาจที่ผลิตขึ้นมาใหม่ก็就会被ปล่อยออกมาจากเซลล์ผู้ให้อาศัย (รูปที่ 2.20) แบคทีริโอฟาจที่ถูกปล่อยออกมาจะแพร่เข้าสู่เซลล์อื่น ๆ ที่อยู่ในพื้นที่รอบ ๆ และวงจรการขยายพันธุ์ของไวรัสก็จะเริ่มใหม่ภายในเซลล์เหล่านั้น

เวลาที่ใช้ตั้งแต่การเกาะติดของฟาจจนถึงการปล่อยออกสู่ภายนอก เรียกว่า เบิร์สทไทม์ (burst time) และเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 20 ถึง 40 นาที จำนวนของอนุภาคฟาจตัวใหม่ที่ปล่อยออกจากเซลล์ ๆ เดียว เรียกว่า เบิร์สทไซส์ (burst size) และมักจะอยู่ในช่วงจาก 50 ถึง 200 ตัว

ช่วงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการขยายพันธุ์ของฟาจสามารถแสดงได้จาก การทดลองในรูปที่เรียกว่า one-step growth experiment (รูปที่ 2.21) ในวิธีการนี้ ฟาจที่แขวนลอยอยู่จะถูกทำให้เจือจาง จนกระทั่งตัวอย่างประกอบด้วยฟาจเพียงเล็กน้อย ฟาจเหล่านี้จะถูกใส่เข้าสู่เซลล์ผู้ให้อาศัยที่เพาะไว้ เมื่อเวลาผ่านไปตัวอย่างของฟาจจะถูกดูดขึ้น และเพาะลงบนจานเพาะเชื้อ วิธีนับปลักจะใช้ในการหาจำนวนของฟาจ ภายในไม่กี่นาทีหลังจากการดูดติดจะยังไม่ปรากฏฟาจขึ้น อย่างไรก็ตาม นิวคลีอิก แอซิดของฟาจถูกพบอยู่ภายในเซลล์ที่ถูกแพร่เข้าไป และโปรตีนของ capsid ก็ถูกสร้างขึ้นมา เวลาที่ต้องการสำหรับการโตเต็มวัย คือ เวลาระหว่างการปรากฏขึ้นของนิวคลีอิก แอซิดของฟาจ และการประกอบขึ้นเป็นรูปร่างของฟาจเต็มวัย หลังจากนั้นไม่กี่นาที จำนวนของฟาจที่ถูกพบใน subculture ก็เริ่มเพิ่มมากขึ้น เบิร์สทไซส์จะคิดจากจำนวนฟาจที่คงที่



แล้ว ซึ่งแสดงว่า ไม่มีการขยายพันธุ์ของฟาจจะเกิดขึ้นแล้ว

## 8. การตรวจสอบไวรัส

### 8.1 ขั้นตอนการตรวจสอบ

การตรวจสอบไวรัสแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ การทำให้ความเข้มข้นของไวรัสในน้ำสูงขึ้น และกระบวนการตรวจหาปริมาณไวรัส (Hurst, Benton, Stetler, 1989)

8.1.1 การทำให้ความเข้มข้นของไวรัสในน้ำสูงขึ้น (Virus concentration) เป็นวิธีการที่จะทำการรวบรวมไวรัสที่อยู่ในตัวอย่างน้ำที่จะตรวจสอบให้มีความเข้มข้นมากขึ้นโดยลดปริมาตรของน้ำที่จะตรวจสอบ เพื่อความสะดวกในการตรวจหาปริมาณไวรัส (assay)

วิธีที่ใช้ทำให้เข้มข้นมีหลายวิธี ดังนี้

- 1.1 พาสซีฟ แอดซอร์พชัน (passive adsorption)
- 1.2 ไคเรกต์ แอดซอร์พชัน (directed adsorption)
- 1.3 อุลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration)
- 1.4 การรวมตะกอนโดยวิธีเคมีกายภาพ และวิธีแยกเฟส  
(direct physiochemical flocculation or phase separation)
- 1.5 อัฟฟินิตี โครมาโตกราฟี (affinity chromatography)

8.1.2 กระบวนการตรวจหาปริมาณไวรัส (Virus assay) แบ่งเป็น

- 8.1.2.1 อิเล็กตรอน ไมโครสโคปี (electron microscopy, EM)
- 8.1.2.2 พลักแอสเส (cytopathogenicity or plaque assay)
- 8.1.2.3 อิมมูโนโลจิคอลแอสเส (immunological assay)
- 8.1.2.4 นิวคลีอิกแอซิดไฮบริดไดเซชัน (nucleic acid hybridization)

### 8.2 พลักแอสเส (Plaque assay)

พลักแอสเส เป็นวิธีที่ใช้ในการทดลอง วิธีการตรวจสอบง่ายไม่ซับซ้อนเหมาะสมสำหรับที่จะใช้ในห้องปฏิบัติการสามารถสังเกตผลที่เกิดขึ้นด้วยตาเปล่า โดยไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์ซับซ้อนในการนับจำนวนฟาจ (phage) ที่เกิดขึ้นโดยการบ่มไวรัสบนอาหารในจานเพาะเลี้ยง ซึ่งมีโฮสต์เซลล์ ที่ไวรัสใช้ในการดำรงชีพ และขยายพันธุ์

ไวรัสจะทำการขยายพันธุ์ และทำลายโฮสต์เซลล์ในจานเพาะเลี้ยงบริเวณที่ถูกทำลายจะสามารถสังเกตเห็น และเรียกว่า พลัก (Plaque) เราเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า "Cytopathogenic effect" หน่วยที่ใช้ับจำนวนไวรัสที่ปรากฏเรียกว่า Plaque Forming unit, PFU

## 9. ไวรัสที่พบในน้ำ

น้ำที่ได้รับการปนเปื้อนจากสิ่งขับถ่ายของมนุษย์ และสัตว์ มักจะมีไวรัสปรากฏอยู่ เนื่องจากไวรัสเหล่านี้จะถูกปล่อยออกมาพร้อมกับสิ่งขับถ่าย ไวรัสประเภทนี้เรียกว่า enteric virus เป็นไวรัสที่ไม่มี lipo-product envelope จึงไม่ถูกน้ำดีย่อย และทนต่อพีเอชต่ำได้ ทำให้เกิดการติดเชื้อในระบบทางเดินอาหาร นอกจากนี้ ยังมีผลแพร่กระจายไปยังระบบประสาท ผิวหนัง ตับ หัวใจ ฯลฯ ในปัจจุบันจะพบ enteric virus (ไวรัสที่อาศัยระบบทางเดินอาหาร โดยเฉพาะบริเวณลำไส้ ในการดำรงชีวิต และขยายพันธุ์) มากกว่า 100 ชนิด ซึ่งไวรัสเหล่านี้ จะมีการติดต่อกันได้จากการรับประทานอาหารที่มีอุจจาระปนเปื้อนเป็นหลัก ตามรายงาน ความเข้มข้นของไวรัสที่พบในน้ำเสียมีสูงถึง 500,000 อนุภาคต่อลิตร (York and Drewry, 1974)

กลุ่มของ enteric virus ที่มีการปนเปื้อนในแหล่งน้ำ หรือตรวจพบเชื้อในผู้ป่วยติดเชื้อไวรัส แสดงดังตารางที่ 2.2 ซึ่งการติดเชื้อไวรัสดังกล่าว เป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดโรคอันตรายกับคนได้ และความรุนแรงของโรคที่เกิดขึ้นกับสุขอนามัย และภูมิคุ้มกันของผู้ป่วยที่มีอยู่ ในผู้ป่วยบางรายก็อาจเป็นโรคได้แม้เพียงได้รับเชื้อไวรัสเพียงหนึ่งอนุภาค (Slade, 1985) Melnick และคณะ (1978) ได้สรุปเส้นทางการติดเชื้อไวรัสกลับสู่คน ในรูปที่ 2.22 นอกจากนี้ยังทำการศึกษา และตรวจสอบ enteric virus จากน้ำดื่มทั้งใน ปารีส โรมานีเย รัสเซีย แอฟริกาใต้ และสหรัฐอเมริกา ผลการทดสอบระยะเวลาที่เชื่อนี้ สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมได้ เป็นดังนี้

สภาพแวดล้อม	ระยะเวลา (วัน)
น้ำประปา	2 - 168
น้ำทะเล	2 - 130
ดิน	25 - 125

Payment และคณะ(1985) ได้รายงานการตรวจสอบไวรัสที่ ประเทศแคนาดา จากโรงผลิตน้ำสะอาด 7 แห่ง พบเชื่อดังนี้ คือ

- Poliovirus types 1, 2 และ 3
- Coxsackievirus types B3, B4 และ B5
- Echovirus type 7
- Untyped picomaviruses

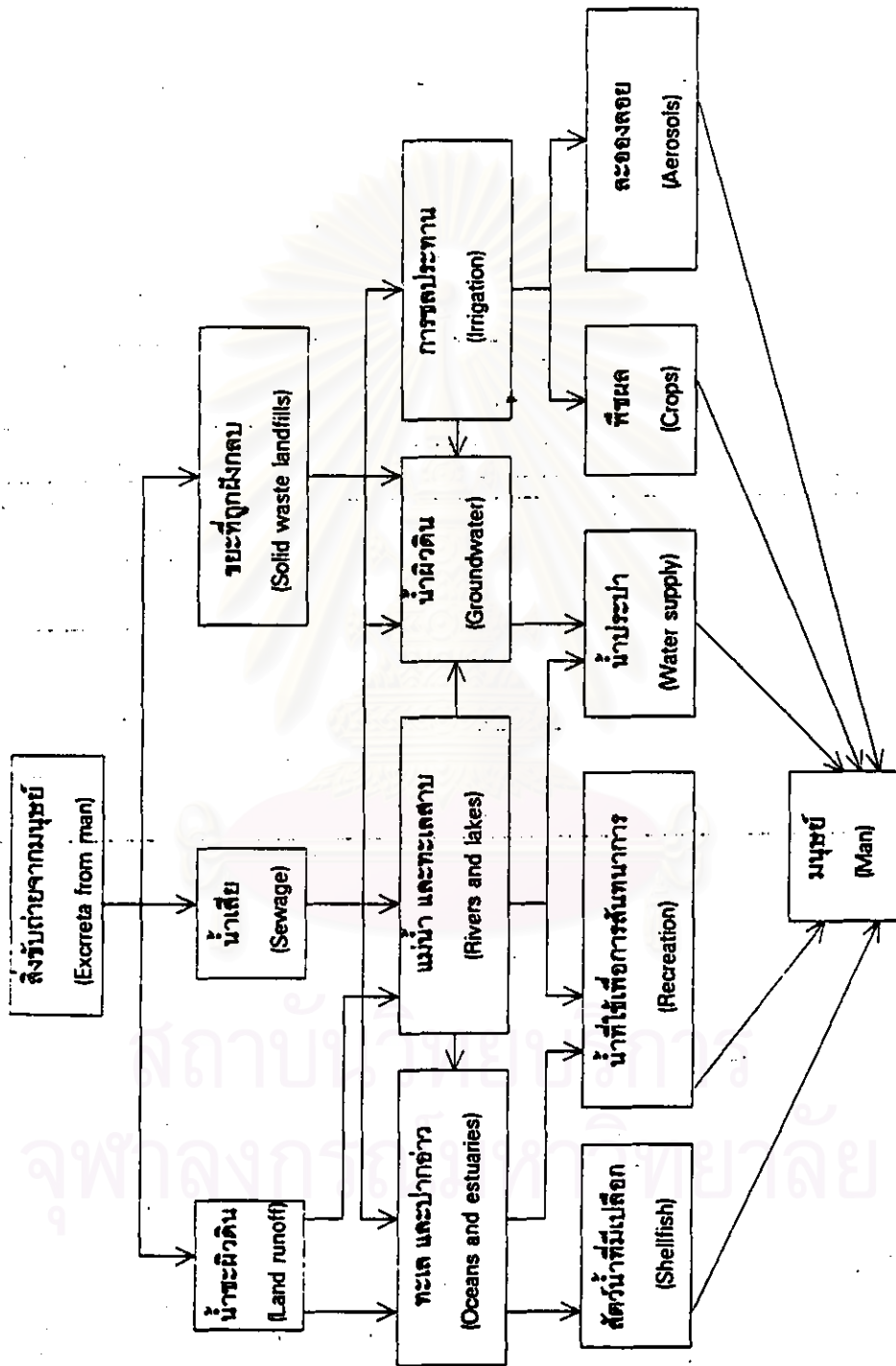
การพบเชื้อไวรัสเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับปริมาณเชื้อไวรัสจากน้ำดิบ ที่นำมาผลิตน้ำสะอาด นอกจากจะต้องพิจารณาปรับปรุงความสามารถของระบบผลิตน้ำสะอาดแล้วก็เห็นสมควรที่จะต้องให้ความสำคัญกับระบบบำบัดน้ำเสีย ในการลดปริมาณไวรัสให้เหลือน้อยที่สุด (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าต้องใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด เป็นน้ำดิบเพื่อผลิตน้ำสะอาด)

ตารางที่ 2.2 โรคต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นโดย Human Enteric Viruses

กลุ่มของไวรัส	จำนวนชนิด	โรค และ อาการ
Enterovirus	3	อัมพาต ไข้สันหลังอักเสบ เป็นไข้
Poliovirus	24	โรคทางเดินหายใจ ไข้สันหลังอักเสบ เป็นไข้
Coxsackievirus A	6	กล้ามเนื้อหัวใจอักเสบ ความผิดปกติของหัวใจแต่กำเนิด เป็นไข้ ผื่นที่ผิวหนัง ปอดอักเสบ เยื่อสมองอักเสบ โรคทางเดินหายใจ
Echovirus	34	ไข้สันหลังอักเสบ โรคทางเดินหายใจ โรคท้องร่วง เป็นไข้ ผื่นที่ผิวหนัง
New enterovirus	4	ไข้สันหลังอักเสบ เยื่อสมองอักเสบ โรคทางเดินหายใจ เลือดไหลไม่หยุด เชื้อตาขาวอักเสบ เป็นไข้
Hepatitis A	1	โรคตับอักเสบ
Norwalk	2	อาเจียน และท้องร่วง
Adenovirus	30	โรคทางเดินหายใจ อาการติดเชื้อที่ตา
Reovirus	3	ไม่ทราบแน่ชัด
Rotavirus	2	อาเจียน และท้องร่วง
Parvovirus	4	ไม่ทราบแน่ชัด แต่มีส่วนทำให้เกิดโรคทางเดินหายใจในเด็ก

ที่มา Slade, J.S. (1985)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.22 เส้นทางความคิดเชื้อไวรัสกลับสู่มนุษย์

ที่มา : Melnick, J.L., Gerba, C.P., and Wallis, C. (1978)

## 10. การใช้โคลิฟาจเป็นตัวบ่งชี้การปนเปื้อนของไวรัสในน้ำ

การที่จะระบุว่าคุณภาพน้ำนั้นถูกสุขอนามัยได้นั้น ต้องมั่นใจว่าจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค ถูกกำจัดออกจนไม่ก่อให้เกิดอันตราย ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจหาปริมาณจุลินทรีย์ในน้ำนั้น ซึ่งแต่เดิมจะตรวจหาจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคโดยตรง แต่เนื่องจากวิธีการตรวจจะยุ่งยาก ค่าใช้จ่ายสูง ใช้เวลามาก และต้องการผู้มีความรู้และทักษะในการตรวจ ดังนั้นการหาจุลินทรีย์ตัวแทนซึ่งจะใช้เป็นตัวบ่งชี้การปนเปื้อนของไวรัสในน้ำ จึงเป็นสิ่งจำเป็นเช่นเดียวกับแบคทีเรีย *Escherichia coli* ซึ่งถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้การปนเปื้อนของน้ำด้วยสิ่งขับถ่าย น้ำที่ตรวจไม่พบอีโคไล จะถูกรับรองได้ว่าน้ำนั้นไม่มีแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคที่เข้าสู่คนโดยทางปาก (faecal-oral route) อย่างไรก็ตาม อีโคไล ไม่สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้การปนเปื้อนของไวรัสได้เลย เพราะไวรัสมีความคงทนในธรรมชาติ และในระบบบำบัดน้ำเสียมากกว่าอีโคไล ได้มีผู้ทดลองใช้ แบคทีรีโอฟาจ เป็นตัวแทนในการบ่งชี้ถึงการปนเปื้อนของไวรัสในน้ำ สำหรับชนิดของแบคทีรีโอฟาจมีผู้เสนอให้ใช้ คือ โคลิฟาจ ในการดำรงชีพของโคลิฟาจโดยอาศัยแบคทีเรียที่มีชื่อว่า *Escherichia coli* (E.Coli) เป็นเซลล์ผู้ให้อาศัย (Stetler, 1984)

หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการเลือกตัวบ่งชี้ในการปนเปื้อนของไวรัส (Olivieri, 1982)

1. ตัวบ่งชี้จะต้องตรวจพบในน้ำเมื่อน้ำนั้นมีไวรัสที่ทำให้เกิดโรค และกรณีที่ในน้ำไม่มีไวรัสที่ทำให้เกิดโรค ตัวบ่งชี้ก็ต้องตรวจไม่พบเช่นกัน
  2. ตัวบ่งชี้จะต้องมีแหล่งกำเนิดเดียวกับไวรัสที่ทำให้เกิดโรค และไม่มีการเพิ่มจำนวนในน้ำ
  3. ตัวบ่งชี้จะต้องมีความทนทานในธรรมชาติ และในระบบบำบัดน้ำเสีย เท่ากับหรือมากกว่าไวรัสที่ทำให้เกิดโรค
  4. วิธีการตรวจหาง่าย ได้ค่าถูกต้อง และไม่แพง
- สาเหตุที่โคลิฟาจสามารถนำมาเพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้ คือ (Kott et al., 1974; Stetler, 1984)
1. เป็นไวรัสที่ไม่ก่อให้เกิดโรคต่อมนุษย์ (non-pathogenic)
  2. เมื่อตรวจพบ enteric viruses ก็มักจะพบโคลิฟาจด้วย
  3. โคลิฟาจมีความต้านทานต่อสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดีกว่า enteric viruses เช่น ความทนทานต่อระบบผลิตน้ำสะอาด และกระบวนการฆ่าเชื้อโรค
  4. วิธีการตรวจนับปริมาณโคลิฟาจ (Plaque assay) ทำได้ง่าย และใช้เวลาสั้นประมาณ 12-18 ชั่วโมง ในขณะที่ การตรวจสอบ enteric virus อาจใช้เวลานานถึง 3 สัปดาห์
  5. ในแหล่งน้ำโดยทั่วไปปริมาณของโคลิฟาจที่พบจะมากกว่า enteric virus
  6. ความสะดวกในการตรวจสอบ และค่าใช้จ่ายไม่สูง

### 11. ประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ

หน่วยแสดงประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ โดยกระบวนการกรองด้วยเมมเบรน นิยมใช้ในหน่วยของล็อก (Log) ทั้งนี้ เนื่องจากการแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ จะไม่เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน เช่น ประสิทธิภาพการกำจัด 99.9% และ 99.99% ซึ่งหากแสดงในรูปของล็อกจะเป็น 3 ล็อก และ 4 ล็อก ตามลำดับ ทำให้เห็นความแตกต่างชัดเจนขึ้น การเปรียบเทียบหน่วยในรูปของเปอร์เซ็นต์ และล็อกแสดงดังสมการที่ 2.1

$$\left[ \frac{(\text{PFU/ml})_{\text{in}} - (\text{PFU/ml})_{\text{out}}}{(\text{PFU/ml})_{\text{in}}} \right] \times 100 = \log(\text{PFU/ml})_{\text{in}} - \log(\text{PFU/ml})_{\text{out}} \dots \dots (2.1)$$

ตัวอย่างเช่น ความเข้มข้นของโคลิฟาจในน้ำเข้าเท่ากับ  $10^4$  พีเอฟยู/มิลลิลิตร  
ความเข้มข้นของโคลิฟาจในน้ำกรองเท่ากับ 10 พีเอฟยู/มิลลิลิตร

$$\text{ประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจในรูปของเปอร์เซ็นต์} = \frac{(10^4 - 10)}{10^4} \times 100 = 99.9\%$$

$$\text{ประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจในรูปของล็อก} = \log(10^4) - \log(10) = 3 \text{ ล็อก}$$

ซึ่งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ ในหน่วยของเปอร์เซ็นต์และล็อก แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบหน่วยในรูปของเปอร์เซ็นต์ และล็อก

ประสิทธิภาพการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพการกำจัด (ล็อก)
90	1
99	2
99.9	3
99.99	4
99.999	5
99.9999	6

## เมมเบรน (Membrane)

การใช้เมมเบรนชนิดที่ยอมให้โมเลกุลขนาดเล็กผ่านได้เท่านั้น เป็นเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพน้ำ และทำความสะอาดน้ำที่เพิ่มเติมขึ้นมาเมื่อไม่นานมานี้ จากการที่วิศวกรออกแบบได้มีความพยายามที่จะทำให้เมมเบรนเหล่านี้ รวมถึงเทคนิคในการประยุกต์ใช้พวกมันสมบูรณ์แบบมากยิ่งขึ้น ดังนั้นพวกเขาจึงได้มองไปยังธรรมชาติ เพื่อเป็นแบบอย่างของเมมเบรนซึ่งทำหน้าที่ในการแยกน้ำทั้งในเนื้อเยื่อของพืช และสัตว์ ในอีกแง่มุมหนึ่ง เมมเบรนสังเคราะห์ได้จำลองสิ่งที่เกิดขึ้นในระบบธรรมชาติต่าง ๆ เช่น เมมเบรนถูกใช้โดยราก และแกนในของต้นไม้ รวมทั้งถูกใช้โดยไต และลำไส้เล็กของสัตว์ เพื่อการเคลื่อนย้ายสารอาหารไปสู่เซลล์ และเพื่อกำจัดของเสีย

เมื่อการแยกด้วยเมมเบรนถูกใช้สำหรับการทำน้ำบริสุทธิ์ ดังนั้นน้ำที่ผ่านเมมเบรนจากผลของแรงดัน จะทิ้งสิ่งที่ไม่ต้องการไว้เป็น concentrate ชนิดของเมมเบรน วิธีการในการใช้แรงขับดัน และลักษณะสมบัติของเมมเบรน เป็นสิ่งที่ต้องบอกให้รู้ว่า สิ่งสกปรกชนิดใดจะถูกกำจัด และจะมีประสิทธิภาพการกำจัดมากน้อยเพียงใด

ในอดีตปัญหาของ membrane fouling และการกำจัด concentrate เป็นสิ่งที่ทำให้ค่าใช้จ่ายสูงเมื่อเทียบกับระบบอื่น ๆ และข้อจำกัดในการใช้ของระบบเมมเบรนในงานพิเศษ เช่น ในกรณีที่สิ่งที่ถูกกำจัดเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ แต่เมื่อไม่นานมานี้ เมมเบรนและเทคโนโลยีในการใช้เมมเบรนได้ถูกพัฒนาเพิ่มขึ้น จนทำให้การแยกโดยอาศัยเมมเบรนสามารถนำมาใช้ได้กว้างขวางขึ้น และในปัจจุบันนี้เป็นสิ่งปกติที่จะพบว่า เมมเบรนได้ถูกนำมาใช้ในระบบที่ต้องการน้ำที่สะอาดเป็นพิเศษ ในการกำจัดเกลือจากน้ำกร่อย และในการบำบัดน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาแล้ว (Kemmer, 1988)

การพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการผลิตน้ำที่มากขึ้น และการควบคุมคุณภาพน้ำต่าง ๆ ได้เริ่มปรากฏขึ้นอย่างเด่นชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งตั้งแต่ช่วงปีค.ศ.1960 กระบวนการใหม่ ๆ ในการบำบัดน้ำดี และน้ำเสียได้ถูกพัฒนาขึ้นมากเป็นจำนวนมาก กระบวนการเหล่านี้ซึ่งรวมไปถึง กระบวนการเมมเบรนซึ่งเป็นกลุ่มที่สามารถแบ่งแยกเป็น กระบวนการที่อาศัยแรงดันน้ำ (ได้แก่ reverse osmosis, RO และ ultrafiltration, UF) และ กระบวนการที่อาศัยแรงดันทางไฟฟ้า (ได้แก่ electrodialysis, ED และ transport-depletion) กระบวนการแยกโดยอาศัยเมมเบรน นี้ถูกคิดที่จะนำมาใช้ในงานบำบัดน้ำต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถแยกวัตถุที่ละลายอยู่ในอีกวัตถุหนึ่ง หรือแยกออกจากสารทำละลาย โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนรูป (Belfort, 1984)

เทคโนโลยีทางด้านเมมเบรนกำลังถูกใช้เพื่อตอบสนองต่อข้อกำหนด และกฎข้อบังคับที่สำคัญ ๆ ทั่วโลกซึ่งเข้มงวดมากขึ้น ในการทำความสะอาดน้ำดื่มสำหรับการบริโภค และใช้ในอุตสาหกรรม การที่เมมเบรนถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพิ่มมากขึ้นในด้านการทำความสะอาดน้ำ ส่งผลให้สามารถตอบสนองต่อมาตรฐานคุณภาพน้ำที่เข้มงวดมากขึ้น ลดการขาดแคลนของแหล่ง

น้ำ และมีบทบาทสำคัญในการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนั้น ค่าใช้จ่ายในระบบเมมเบรนก็ได้ลดลง เนื่องจากความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี ทำให้มีการสนับสนุนการใช้เมมเบรนเพื่อเป็นทางเลือกของการทำความสะอาดน้ำที่สามารถปฏิบัติได้ แทนวิธีการทำความสะอาดน้ำแบบธรรมดาที่ใช้กันมาเป็นเวลานาน

### 1. กระบวนการเมมเบรน (Membrane process)

กระบวนการเมมเบรน หมายถึง กระบวนการต่าง ๆ ที่อาศัยเยื่อเมมเบรน (Semipermeable Membrane) ในการแยกสารละลายเมมเบรนออกจากน้ำ หรือของเหลวอื่น ความสามารถในการแยกขึ้นกับ ขนาดช่องว่าง (Pore Size) หรือ molecular weight cutoff (MWCO) ของเมมเบรน จากตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการกรองโดยใช้เมมเบรนชนิดต่าง ๆ

กระบวนการเมมเบรนจะแตกต่างจากการกรองแบบติดผิวชั้นกรอง (Surface Filtration) และการกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง (In-Depth Filtration) ตรงที่การกรองแบบเมมเบรนจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Concentration Polarization

เทคโนโลยีเมมเบรนที่ถูกใช้เพื่อการบำบัดน้ำดื่ม มีดังนี้ (Pontius, 1996)

1. Reverse Osmosis (RO) หรือ Hyperfiltration ทำงานโดยอาศัยการไล่ความดันเข้าไปในสารละลายเข้มข้น ความดันซึ่งใส่เข้าไปต้องมากกว่าความดันออสโมซิสของสารละลาย จากผลของความดันนี้ ทำให้น้ำบริสุทธิ์ถูกบังคับให้ไหลผ่านเมมเบรนชนิดที่ยอมให้โมเลกุลขนาดเล็กผ่านได้ โดยจะทิ้งเกลือ และสิ่งปนเปื้อนเอาไว้ หลักการทำงานของ RO จะตรงกันข้ามกับกระบวนการ Osmosis โดยใช้ความดันสูงถึง 200 - 1000 psig (1380 - 6890 kPa) สารต่าง ๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 100 จะถูกกรองไว้บนแผ่นเมมเบรน การกรองแบบ RO สามารถประยุกต์ใช้ในงานการผลิตน้ำบริสุทธิ์สูง โดยใช้ควบคู่กับ Ion exchanger ใช้ในงานแยกโลหะมีค่า การทำให้น้ำตาลเข้มข้นสูงขึ้น การทำให้สีขุ่นมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น เป็นต้น แต่การใช้ประโยชน์ของเครื่องกรองแบบ RO ไม่แพร่หลายนัก เนื่องจากราคาอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายสูงมาก (สุเมธ ชาติ, 2532)

2. Electrodialysis (ED) เป็นกระบวนการกำจัดเกลือ ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อน โดยที่ไอออนจะถูกกำจัดโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าตรง เข้าไปสู่เมมเบรนซึ่งมี 2 ชนิด คือ แผ่นบวก และแผ่นลบ ซึ่งจะยอมให้เฉพาะไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเหมือนกันไหลผ่าน น้ำจะไหลผ่านเมมเบรนเพียงแค่อัฒม์ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับไอออนที่จะเคลื่อนที่ตั้งฉากกับเมมเบรน



ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบวิธีการกรองโดยใช้เมมเบรนชนิดต่าง ๆ

กระบวนการ	ขนาดรูของเมมเบรน	แรงขับเคลื่อน	สารที่สามารถติดค้าง
UF	10 อังสตรอม - 0.1 ไมครอน	ความดัน 10 psig (68 kPa) - 200 psig (1380 kPa)	สารอินทรีย์น้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 1000 ไวรัส แบคทีเรีย คอลลอยด์
RO	5 อังสตรอม - 20 อังสตรอม	ความดัน 200 psig (1380 kPa)- 1000 psig(6890 kPa)	ไอออน และสารอินทรีย์น้ำหนัก โมเลกุลมากกว่า 100
ED	< 10 อังสตรอม	ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.27-0.36 kW/lb salts	สารประกอบที่แตกตัวเป็นไอออนได้

ที่มา สุเมธ ชวเดช, 2532

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. Nanofiltration (NF) หรือ membrane softening เป็นกระบวนการซึ่งใช้ความดันต่ำมาก โดยจะยอมให้ผ่านได้เฉพาะอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 นาโนเมตรเท่านั้น มีลักษณะการทำงานของทั้ง UF และ RO รวมอยู่ในตัว โดยทั่วไป เมมเบรนแบบ NF จะกำจัดไอออนชนิดวาเลนซ์คู่ในอัตราที่สูงกว่าไอออนวาเลนซ์เดี่ยว

4. Ultrafiltration (UF) เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงขับเคลื่อน เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายที่ประกอบด้วยคอลลอยด์ และสารมวลโมเลกุลสูง โดยทั่วไป สารที่ไม่มีประจุจะถูกกันเอาไว้ และไอออนจะสามารถผ่านเมมเบรนไปได้ โดยขึ้นอยู่กับ MWCO (Molecular Weight Cutoff) ของเมมเบรน ค่า MWCO จะบอกให้รู้ว่าสารที่มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight, MW) ที่มากกว่าจะถูกกักเอาไว้ด้วยเมมเบรน การทำงานของ UF ใช้แผ่นเยื่อที่มีขนาดช่องว่าง (pore size) ประมาณ 10 อังสตรอม - 0.1 ไมครอน ใช้ความดันสูงถึง 10 - 200 psig (69 - 1380 kPa) มักนิยมใช้ในการแยกโปรตีน และใช้ในการผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยใช้ควบคู่กับ Ion Exchanger เป็นต้น (สุเมธ ชวเดช, 2532)

5. Microfiltration (MF) เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงขับเคลื่อน เพื่อแยกอนุภาคขนาดไมครอน หรือเล็กกว่าไมครอน เมมเบรนแบบ MF สามารถกักอนุภาคแขวนลอย และจุลชีพได้ แต่ยอมให้สารละลาย และน้ำที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนผ่านได้

## 2. อุลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF)

อุลตราฟิลเตรชัน เป็นกระบวนการเมมเบรนที่คล้ายคลึงกับ RO ทั้งในลักษณะการใช้งานและลักษณะทางกายภาพ สิ่งที่แตกต่างกันคือ UF สามารถแยกได้เฉพาะโมเลกุลขนาดใหญ่ ออกจากน้ำ แต่ RO สามารถแยกไอออน และโมเลกุลขนาดเล็กกว่าออกจากน้ำได้ จากขีดความสามารถที่แตกต่างกัน ทำให้ UF ต้องการแรงดันประมาณ 100 psig หรือน้อยกว่า แต่ RO ต้องการแรงดัน 200 - 1000 psig หรือสูงกว่า และยังทำให้เมมเบรนของ RO และของ UF ไม่เหมือนกันอีกด้วย โดยปกติ UF มักใช้ในการกำจัดคอลลอยด์ต่าง ๆ เช่น แบคทีเรีย ไวรัส ดินเหนียว เป็นต้น รวมทั้งสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลหนักกว่า 500 เช่น โปรตีน แป้ง กรดฮิวมิก กรดฟัลวิค เป็นต้น กลไกในการกำจัดสารต่าง ๆ ของ UF เป็นแบบกรองติดค้ำบนรู (Sieve) (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2527)

### 2.1 โพลีเมอร์ที่ใช้ผลิตเมมเบรน

เมมเบรนที่ใช้กับ UF สามารถถูกสร้างขึ้นมาจาก สารอินทรีย์โพลีเมอร์ได้หลายชนิด เช่น Cellulose acetate, Polyvinyl chloride, Polyacrylonitrile, และ Polysulfone เป็นต้น

(Applegate, 1984) คุณสมบัติของโพลีเมอร์บางชนิดที่ใช้ผลิตเมมเบรน แสดงดังตารางที่ 2.5 เมมเบรน UF มีความทนทานกว่าเมมเบรน RO ในทุก ๆ ด้าน เช่น ทนกรด หรือด่าง หรืออุณหภูมิได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังทนต่อสารเคมีได้ดีกว่าด้วย ตารางที่ 2.6 เป็นคุณสมบัติบางอย่างของเมมเบรน UF ที่ผลิตโดยบริษัทต่างๆ ผู้ผลิตสามารถสร้างเมมเบรนให้มีความสามารถในการกำจัดสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ ได้ (เรียกว่า เมมเบรนมี MWCO ตามแต่ผู้ผลิต) เช่น HFA-300 มี MWCO 70,000 หมายความว่า เมมเบรนสามารถกำจัดสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 70,000 (มันลิน ตันทุลเวศม์, 2527)

## 2.2 โมดูลชนิดต่าง ๆ ของระบบอุลตราฟิลเตรชัน

โมดูลของระบบ UF มี 4 แบบ คือ (มันลิน ตันทุลเวศม์, 2527)

2.2.1 แบบท่อ (Tubular Module)

2.2.2 แบบแผ่น (Plate and Frame Module)

2.2.3 แบบม้วน (Spiral Wound Module)

2.2.4 แบบเส้นใยกลวง (Hollow-fiber Module)

ข้อแตกต่างของทั้ง 4 แบบ สรุปดังตารางที่ 2.7

### 2.2.1 Tubular Module

วิธีนี้เป็นการม้วนแผ่นเมมเบรนให้เป็นหลอด หรือท่อขนาดเล็ก และยึดติดไว้ภายในท่ออีกอันหนึ่งที่ทำด้วยสแตนเลส หรือไฟเบอร์กลาส ดังรูปที่ 2.23 และทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองรับแผ่นเมมเบรนมิให้ฉีกขาด ในระหว่างการใช้งาน และใช้เป็นทางออกของน้ำสะอาดอีกด้วย น้ำดิบจะถูกสูบผ่านเข้าไปในท่อด้วยความดัน แรงดันของน้ำทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถซึมผ่านเมมเบรนและท่อรองรับออกไปสู่ภายนอก เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถทำความสะอาดได้ง่าย จึงนิยมใช้ในกรณีที่มีการอุดตันเกิดขึ้นเร็ว (Applegate, 1984)

### 2.2.2 Plate and Frame Module

เทคนิคนี้เป็นการจัดแผ่นเมมเบรนแบบที่ง่ายที่สุด โมดูลที่ใช้จะมีลักษณะการทำงานคล้าย Filter Press ดังรูปที่ 2.24 แผ่นเมมเบรนวางอยู่บนแผ่นรองรับซึ่งมีรูพรุน (Porous support) หรือแผ่นรองรับที่มีร่องให้น้ำไหลออกได้ เมมเบรนและแผ่นรองรับจะวางซ้อนกัน และสลับกัน น้ำถูกบังคับให้ซึมผ่านเมมเบรน และแผ่นรองรับแล้วจึงไหลออกจากโมดูล

ตารางที่ 2.5 โพลีเมอร์ที่ใช้ผลิตเมมเบรน

โพลีเมอร์ คุณสมบัติ	Cellulose acetate	Polysulfone	Aromatic polyamides	Polyacrylonitrile, poly(vinyl chloride), copolymer
MWCO	1000-50000	5000-50000	1000-50000	30000-100000
pH	3.5-7	0-14	2-12	2-12
อุณหภูมิ (°C)	35	100	80	50
ความทนทานต่อ คลอรีน	ดี	ดี	ด้อย	ปานกลาง
ความทนทานต่อ สารละลายอินทรีย์	ด้อย	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
รูปแบบของ เมมเบรน	แผ่น, ท่อ	แผ่น, ท่อ, แคปิลลารี	แผ่น, ท่อ, แคปิลลารี	แผ่น, ท่อ, แคปิลลารี

ที่มา Strathman, H. (1984)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของเมมเบรน UF บางชนิด

Membrane	Manufacturer	Water flux at 100 psi (gal/ft <sup>2</sup> .day)	Molecular Weight cutoff 80-100% Rejection
Cellulose acetate	Gulf env. system	30	600 (raffinose)
Pellicon	Millipore Corp.	10	600 (raffinose)
Diaflo UM-05	Amicon Corp.	35	250 (sucrose)
Disflo UM-2	Amicon Corp.	70	600 (raffinose)
Diaflo UM-10	Amicon Corp.	100	10000 (dextran 10)
Diaflo PM-10	Amicon Corp.	600	10000 (cytochrome c)
Diaflo PM-30	Amicon Corp.	3500	35000 (pepsin)
Diaflo XM-50	Amicon Corp.	250	70000 (bovine serum albumin)
Diaflo XM-100	Amicon Corp.	3000	150000 (gamma globulin)
HFA-100	Abcor, Inc.	25	10000 (dextran 10)
HFA-300	Abcor, Inc.	500	70000 (bovine serum albumin)

ที่มา มั่นสิน ดันทุลเวศม์, 2527

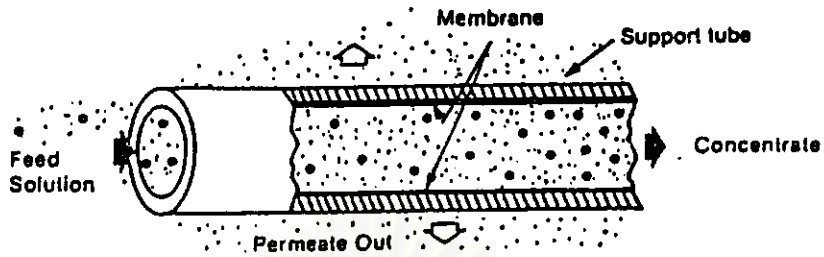
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของโมดูลชนิดต่าง ๆ ในระบบอุลตราฟิลเตรชัน

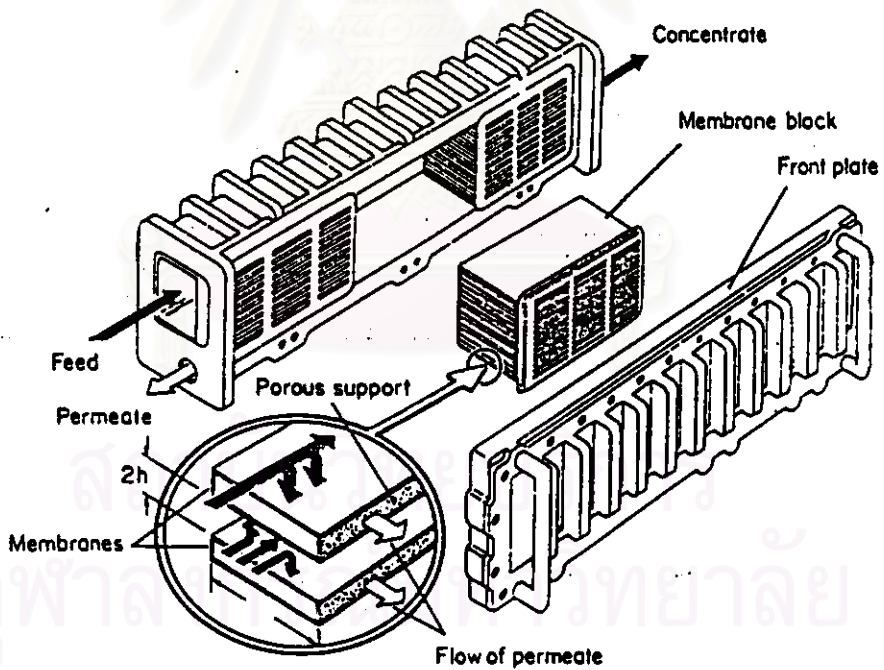
ชนิดของโมดูล	พื้นที่เมมเบรนต่อโมดูล (ตร.ม/ลบ.ม)	ค่าใช้จ่ายในการลงทุน	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน	การควบคุมอัตราการไหล	ความสะดวกในการทำ ความสะอาด
Tubular	25-50	สูง	สูง	ดี	ดี
Plate and frame	400-600	สูง	ต่ำ	ปานกลาง	ดี
Spiral Wound	800-1000	ต่ำ	ต่ำ	ดี	ดี
Hollow-fiber	600-1200	ต่ำ	ต่ำ	ดี	ปานกลาง

ที่มา Strathman, H. (1984)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.23 โมดูลของระบบอุลตราฟิลเตรชันแบบท่อ  
ที่มา Romicon, Inc. (1983)



รูปที่ 2.24 โมดูลของระบบอุลตราฟิลเตรชันแบบแผ่น  
ที่มา Rautenbach, R., and Albrecht, R. (1989)

### 2.2.3 Spiral Wound Module

โมดูลแบบนี้ประกอบด้วยเมมเบรนสองแผ่นประกบกัน โดยมีแผ่นวัสดุเนื้อพรุนสอดอยู่ตรงกลางระหว่างเมมเบรนทั้งคู่ จากนั้นม้วนแผ่นแบนทั้งสามรอบท่อเจาะรู ดังรูปที่ 2.25 ขอบของแผ่นเมมเบรนทั้งสามด้านถูกอุดไว้ด้วยกาวพิเศษ ขอบที่เหลือปล่อยให้เปิดตามปกติ และยึดติดกับท่อเจาะรู ลักษณะเช่นนี้ทำให้น้ำถูกบังคับให้ไหลไปยังท่อเจาะรูเสมอ

### 2.2.4 Hollow-fiber Module

เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงจะมีผิวที่คล้ายฟองน้ำล้อมรอบผิวชั้นใน (ซึ่งมีความหนาเพียง 0.1 ไมครอน ดังรูปที่ 2.26 (Applegate, 1984))

การใช้งานจะนำเส้นใยกลวงเหล่านี้มารวมกันเป็นมัด ๆ (bundles) บรรจุในโมดูลรูปทรงกระบอกปลายทั้งสองข้างของเส้นใยทั้งมัดถูกตรึงติดอยู่กับโมดูล ดังรูปที่ 2.27 ลักษณะการทำงานและการทำความสะอาดเมมเบรน แสดงดังรูปที่ 2.28

จากตารางที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบโมดูลชนิดต่าง ๆ ของระบบ UF พบว่าชนิด Hollow-fiber จะเสียค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเทียบกับชนิด Tubular และ Plate and Frame การทำความสะอาด และการควบคุมอัตราการไหลก็จะดีกว่าชนิด Spiral Wound ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้ UF ชนิด Hollow-fiber และตารางที่ 2.8 แสดงลักษณะสมบัติของเมมเบรนระบบต่าง ๆ

## 2.3 กลไกการทำงานที่เป็นไปได้ของเมมเบรนในการกำจัดจุลชีพ (Jacangelo, 1995)

2.3.1 การติดค้างบนผิวเมมเบรนหรือการแยกขนาด (Sieving or size exclusion)

2.3.2 การดูดติดบนผิวเมมเบรน หรือโครงสร้างภายใน (Adsorption to the membrane face or internal structure)

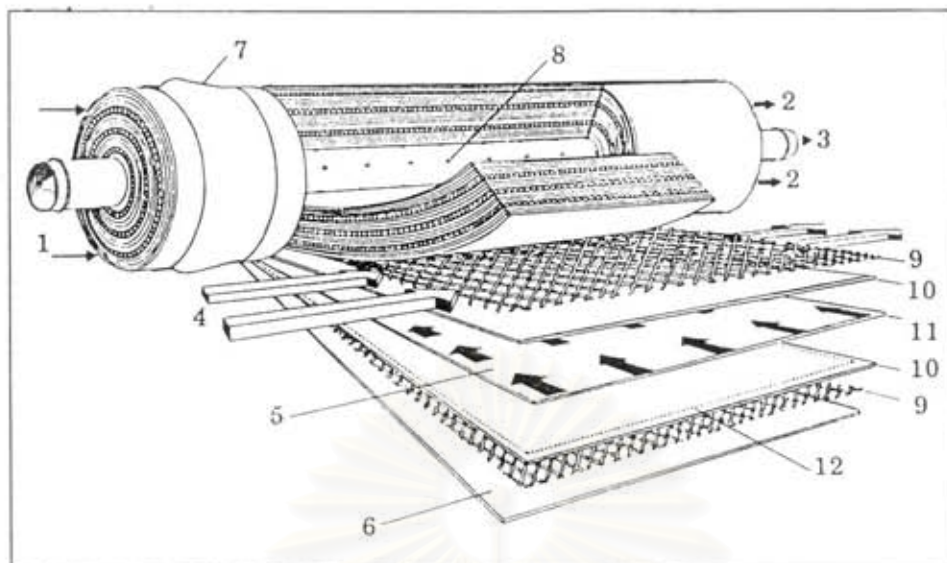
2.3.3 การเกาะติดอนุภาคซึ่งอยู่ในน้ำดิบ และสามารถถูกกำจัดโดยเมมเบรนได้ (Attachment to particles in the feed water and subsequent removal by the membrane)

2.3.4 การกำจัดโดยการเกิดชั้นเค้กขึ้นที่ผิวของเมมเบรน (Removal by the cake layer formed at the membrane surface)

2.3.5 การกำจัดโดย membrane foulants ซึ่งไม่สามารถแก้ไขให้คืนสภาพโดยอาศัยแรงดันน้ำ (Removal by non-hydraulically reversible membrane foulants)

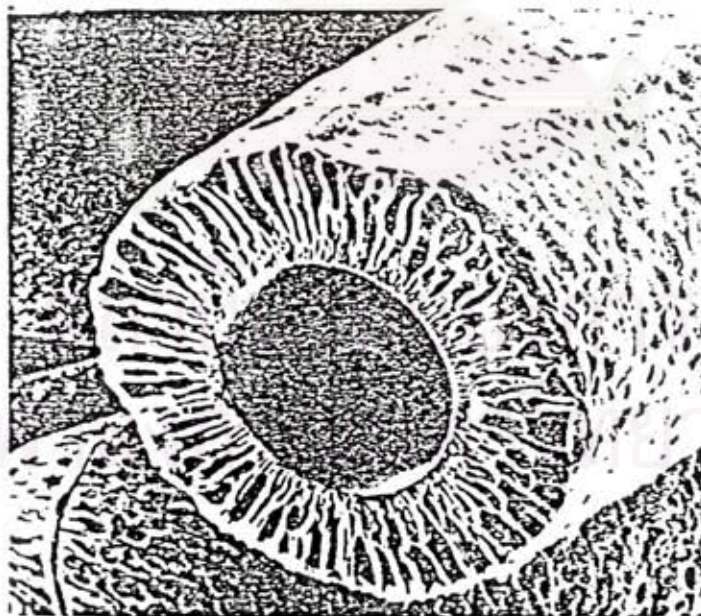
นอกจากนี้ กลไกการกำจัดยังขึ้นอยู่กับจุลชีพที่ถูกกรอง ลักษณะสมบัติของเมมเบรน (เช่น ขนาดรูพรุน ค่าประจุไฟฟ้า) และลักษณะทางเคมีของสารละลายที่จะถูกกรองด้วย



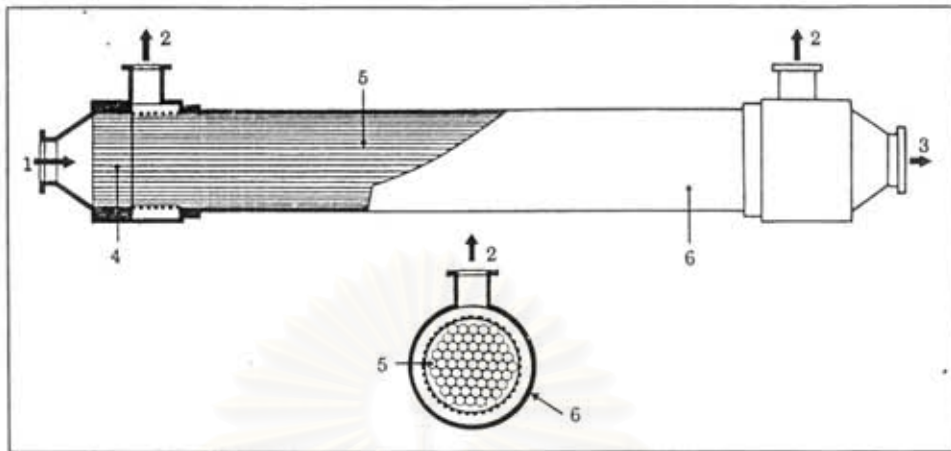


- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| 1 - Water inlet.                    | 7 - Seal between module and shell.           |
| 2 - Concentrate outlet.             | 8 - Holes collecting the permeate.           |
| 3 - Permeate outlet.                | 9 - Spacer.                                  |
| 4 - Direction of flow of raw water. | 10 - Membrane.                               |
| 5 - Direction of flow of permeate.  | 11 - Permeate collector.                     |
| 6 - Protective material.            | 12 - Sealed joint between the two membranes. |

รูปที่ 2.25 โมดูลของระบบอุลตราฟิลเตรชันแบบม้วน  
ที่มา Degremont, 1991



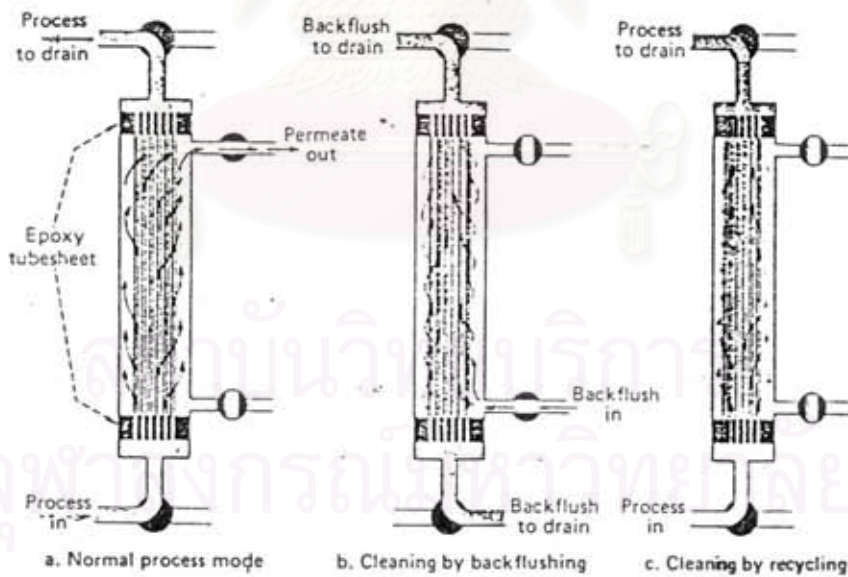
รูปที่ 2.26 ลักษณะของผิวเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง  
ที่มา Applegate, L.E., (1984)



1 - Raw water inlet.  
2 - Permeate outlet.  
3 - Concentrate outlet.

4 - Potting resin.  
5 - Hollow fibres.  
6 - Shell.

รูปที่ 2.27 โมดูลของระบบอุลตราฟิลเตรชันแบบเส้นใยกลาง  
ที่มา Degrement



รูปที่ 2.28 ลักษณะการทำงาน และการทำความสะอาดเมมเบรนชนิดเส้นใยกลาง  
ที่มา Applegate, L.E., (1984)

ตารางที่ 2.8 แสดงลักษณะสมบัติของระบบเมมเบรนต่าง ๆ

Process	Mechanism	Exclusion	Regulated Solutes		
			Pathogens	Organics	Inorganics
EDR	C	0.0001 $\mu$	None	None	All
RO	S,D	0.0001 $\mu$	C,B,V	DBPs,SOCs	All
NF	S,D	0.001 $\mu$	C,B,V	DBPs,SOCs	All
UF	S	0.001 $\mu$	C,B,V	None	None
MF	S	0.01 $\mu$	C,B	None	None

Mechanism : C = Charge, S = Sieving, D = Diffusion

Pathogens : C = cysts, B = Bacteria, V = viruses

Organics : DBPs = Disinfection By-product Precursors, SOCs = Synthetic Organics

ที่มา Taylor, J. อ้างถึงใน Lisk, I. (1995)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อ Ultrafiltration Flux

อุปสรรคที่สำคัญในการทำงานของอุลตราฟิลเตรชันเมมเบรน คือ ปัญหาการอุดตันซึ่งเกิดจากสิ่งสกปรกในน้ำที่ยังไม่ได้ผ่านการบำบัด ปัจจัยที่ลดอัตราการไหลของน้ำ (permeate flux) ผ่านเมมเบรนขึ้นอยู่กับ

### 2.4.1 Concentration Polarization (CP) หรือ gel layer

### 2.4.2 Membrane Fouling

#### 2.4.1 Concentration Polarization

การที่อนุภาคสิ่งสกปรก หรือโมเลกุลเคลื่อนที่มาสะสมใกล้ผิวเมมเบรน จนกระทั่งมีความเข้มข้นสูงกว่า ค่าเฉลี่ยของน้ำดิบหลายเท่า ลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า การเกิด Concentration Polarization (CP) ดังรูปที่ 2.29 (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2527)

flux ที่ลดลงเนื่องจากการเกิด CP สามารถแก้ไขให้มีสภาพดั้งเดิมได้ โดยใช้การล้างย้อน(backflushing) และการกระแทกเป็นช่วง ๆ (pulsing) ของน้ำ (AWWA, 1992)

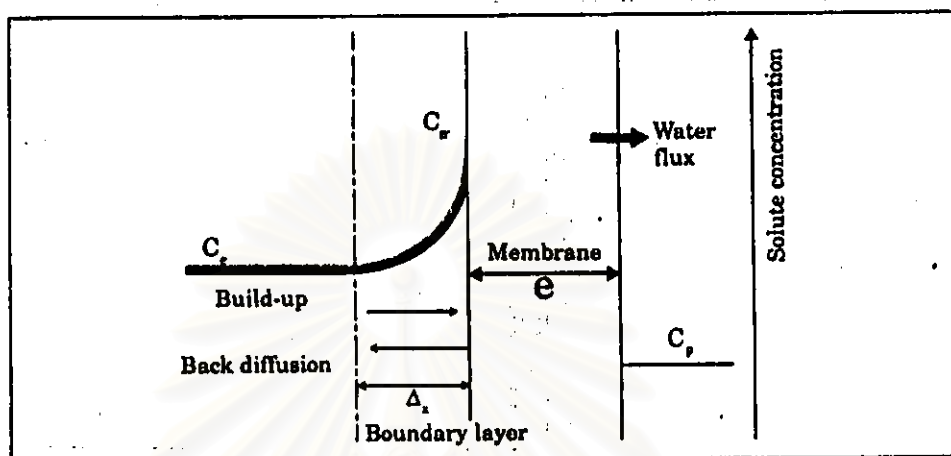
#### 2.4.2 Membrane Fouling (AWWA, 1992)

คำว่า membrane fouling จะใช้สำหรับอธิบาย การสูญเสียสภาพการกรองแบบ Irreversible ซึ่งไม่สามารถแก้ไขสภาพให้เหมือนเดิมได้โดยใช้แรงดันของน้ำ หรือสารเคมี fouling ที่เกิดบนเมมเบรนส่วนใหญ่ เป็นผลมาจากการดูดเกาะของสารอินทรีย์ในรูปพูนของเมมเบรน ทำให้ลดอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน และไม่สามารถทำให้กลับมาใช้งานได้ดีเหมือนเดิม หลังจากใช้ UF ไปได้เพียง 5 นาที ถึง 12 ชั่วโมง ลักษณะสมบัติของสารอินทรีย์ในน้ำดิบและธรรมชาติของแรงกระทำ ระหว่างสารละลายอินทรีย์กับเมมเบรนเป็นสิ่งสำคัญที่จะกำหนดประสิทธิภาพของกระบวนการเมมเบรน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ membrane fouling มีดังต่อไปนี้คือ

### 1. ลักษณะสมบัติของน้ำดิบ

ความเข้มข้น และชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำจะมีผลถึง ลักษณะสมบัติของน้ำที่จะผ่านระบบเมมเบรนโดยตรง องค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำจะแตกต่างกันในแต่ละแห่ง จากการศึกษาสารอินทรีย์ในน้ำธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับการเกิด fouling ของ เมมเบรนแบบ UF แบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ



รูปที่ 2.29 Concentration Polarization ที่เกิดขึ้นในระบบอุตราฟิเตรชัน  
ที่มา Degremont

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- polysaccharide
- polyhydroxy aromatics
- proteins
- amino sugars

โมเลกุลของแต่ละประเภทนี้จะมีผลต่อ fouling ต่างกัน แต่ละตัวจะมีคุณลักษณะเฉพาะตัวแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุล และโครงสร้างโมเลกุล ภายในโมเลกุลจะมีแรงกระทำต่อผิวเมมเบรน และต่อตัวมันเองทำให้เกิดการต้านแรงไหลของน้ำ เมื่อโมเลกุลขนาดใหญ่ต่างชนิดกันเหล่านี้ อยู่ในสารละลายเดียวกันจะก่อให้เกิด fouling มากกว่าเมื่ออยู่แยกกันตัวใดตัวหนึ่ง Divalent cation และ pH ที่ต่ำจะทำให้สารอินทรีย์มีความสามารถในการดูเกาะมากขึ้น น้ำที่กระด้าง และ pH ที่ต่ำมีผลต่อลักษณะการเกิด fouling ของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ (Dissolved Organic Carbon, DOC)

pH ที่จุด isoelectric point (จุดที่สารมีประจุไฟฟ้าเท่ากัน) ของตัวถูกละลายใด ๆ จะทำให้เกิด flux ต่ำสุด เนื่องจากที่จุดนี้ประจุของตัวถูกละลายจะลดลง ทำให้เกิดการรวมตัวใหญ่ขึ้น (agglomeration) ซึ่งจะลดอัตราการแพร่ผ่านผิวของเมมเบรนลง ดังนั้น การใช้วิธีการปรับ pH เพื่อตกตะกอนสารอินทรีย์ก็มีผลต่อการเกิด fouling จากสารอินทรีย์ในน้ำนั้นด้วย

## 2. วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน

วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน ขนาดของรู และการกระจายขนาดของรูในเมมเบรนมีผลต่อลักษณะ fouling ในระบบ UF วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ วัสดุที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เมื่อพิจารณาการไหลของน้ำที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติปนอยู่ผ่านเมมเบรนก่อนและหลังจากการทำการล้างย้อน (backwash) พบว่า เมมเบรนที่ชอบน้ำจะมีการไหลผ่านมากกว่าเมมเบรนแบบที่ไม่ชอบน้ำเมื่อมี MWCO เท่ากัน คำอธิบายอย่างหนึ่งสำหรับพฤติกรรมนี้ก็คือ เมมเบรนชนิดที่ชอบน้ำจะดูดซับสารอินทรีย์น้อยกว่าเมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถกล่าวได้ว่าการเกิด fouling จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำ และชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน

## 3. การปรับสภาพน้ำ

จุดมุ่งหมายของการปรับสภาพในขั้นต้นนี้ ก็เพื่อที่จะลดปริมาณของ irreversible fouling และเพิ่มอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านเมมเบรน ด้วยเหตุนี้สารที่ใช้ปรับสภาพเมมเบรนควรจะเป็นตัวที่ดูดซับได้ดิบผิวของเมมเบรน และยับยั้งการดูดซับของ foulant และมีผลกระทบต่ออัตราการไหลน้อยที่สุด

ในอีกแง่หนึ่งการปรับสภาพของน้ำที่จะป้อนเข้าสู่ระบบ อาจจะช่วยปรับปรุงการไหลผ่านเมมเบรน การกำจัดสารออกจากเมมเบรน หรือทั้งสองอย่าง

## 2.5 การพัฒนาอุลตราฟิลเตรชันเพื่อการกำจัดอนุภาค และจุลชีพ

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการเพิ่มความสนใจในการใช้เทคโนโลยีเมมเบรน สำหรับการกำจัดอนุภาคจากน้ำดิบที่ใช้ผลิตน้ำดื่ม ในฝรั่งเศสได้มีความพยายามอย่างจริงจังต่อเป้าหมายนี้ โดย Lyonnaise des Eaux (LDE) และ Ge'ne'rale des Eaux (CGE) ซึ่งอาศัยเงินทุนจากโครงการของ EEC เรียกว่า BRITE (Basic Research for Industrial Technology in Europe) โดยเริ่มวิจัยในพื้นที่แห่งนี้ในปีค.ศ.1986

โรงผลิตน้ำดื่มระบบอุลตราฟิลเตรชันที่ใหญ่ที่สุดในโลก ซึ่งใช้เมมเบรนระบบอุลตราฟิลเตรชันแบบ hollow-fibre ซึ่งทำจากออลิกโพลีเมอร์ เพื่อผลิตน้ำดื่มอยู่ในเมือง Douchy ประเทศฝรั่งเศสโดยมีกำลังการผลิตปกติคือ 1200 ลบ.ม./วัน โรงงานแห่งนี้ใช้น้ำดิบจากน้ำใต้ดินซึ่งซึมขึ้นมาจากผิวดิน ทำให้ได้รับผลกระทบอย่างมากจากน้ำฝนที่ไหลเข้ามา เป็นเหตุให้ความขุ่นของน้ำดิบสูงเพิ่มขึ้นเป็น 20 NTU อย่างไรก็ตาม ความขุ่นของน้ำที่กรองแล้วเหลือต่ำกว่า 0.1 NTU (Thebault & Bersillon, 1990) ความดันที่ใช้สำหรับ UF ค่อนข้างต่ำทำให้เทคโนโลยีนี้มีความน่าสนใจขึ้นในด้านของความเสี่ยงของพลังงานที่ต่ำ ตัวอย่างเช่น ความดันที่ใส่เข้าไปในเมมเบรนสำหรับการทำงานปกติที่โรงผลิตน้ำ Douchy อยู่ในช่วง 0.3 - 0.7 บาร์ โรงผลิตประเภทเดียวกัน แต่มีขนาดเล็กกว่า กำลังเดินระบบอยู่ที่ Amoncourt (240 ลบ.ม./วัน), Le Brasil (120 ลบ.ม./วัน) และ Gracay (720 ลบ.ม./วัน) นอกจากนี้ โรงผลิตน้ำ CGE ขนาด 2400 - 3600 ลบ.ม./วัน โดยใช้เซรามิคเมมเบรนในกระบวนการ Microfiltration ได้ถูกใช้งานมาตั้งแต่เดือนธันวาคม 1990

จากผลของการแก้ไขมาตรฐานน้ำดื่มที่ปลอดภัยของสหรัฐอเมริกา ในปีค.ศ.1986 ทำให้กฎข้อบังคับการทำความสะอาดน้ำผิวดิน (Surface Water Treatment Rule , SWTR) ซึ่งประกาศใช้โดย USEPA ได้บังคับให้องค์กรที่ผลิตน้ำสำหรับสาธารณูปโภค เพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค และการกรอง โดยต้องสามารถหยุดยั้ง หรือกำจัดไวรัสได้อย่างน้อยที่สุด 99.99% (4 ล็อก) และสามารถหยุดยั้ง หรือกำจัด Giardia (ปรสิตของโปรโตซัว) อย่างน้อยที่สุด 99.9% (3 ล็อก) นอกจากนั้น SWTR ยังต้องการให้ระบบซึ่งใช้การกรองแบบธรรมดา และกรองโดยตรง ต้องทำให้น้ำที่ผ่านการกรองมีความขุ่นไม่เกิน 0.5 NTU สำหรับ 95% ของตัวอย่างที่เก็บมาในแต่ละเดือน นอกจากนั้นระบบที่ใช้การกรองแบบธรรมดา และกรองโดยตรง ซึ่งบำบัดน้ำดิบที่มีระดับความขุ่น 1 NTU หรือต่ำกว่า อาจจะถูกบังคับให้ผลิตน้ำกรองให้มีระดับของความขุ่นต่ำกว่า 0.2 NTU (USEPA, 1989) และผลจากกฎข้อบังคับเหล่านี้ ทำให้มีความสนใจในด้านเทคโนโลยีการกรองอื่น ๆ เพิ่มมากยิ่งขึ้น อาทิเช่น กระบวนการ UF และ MF สำหรับการกำจัด

### อนุภาคออกจากน้ำดื่ม

เมื่อพิจารณาถึงผลลัพธ์ ซึ่งมีความเป็นไปได้จากฝรั่งเศส ทำให้เกิดการทดลองขึ้นมากมายในสหรัฐอเมริกา จากการใช้เมมเบรนระบบ UF ชนิด hollow-fibre ซึ่งทำมาจากเซลลูโลส Jacangelo et al. (1989) ได้แสดงให้เห็นว่า UF สามารถลดความขุ่นของน้ำผิวดินทั้งสองแห่งทางตอนเหนือของแคลิฟอร์เนียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยน้ำผลิตที่ได้มีความขุ่นต่ำกว่า 0.05 NTU. ถึงแม้ว่าคุณภาพของน้ำดิบจะแปรผันมากก็ตาม นอกจากนั้นความเข้มข้นของอนุภาคทั้งหมดในน้ำที่เข้าสู่ระบบซึ่งมีมากกว่า 30,000 อนุภาคต่อมล. ยังถูกกำจัดจนเหลืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.2 ไมครอนเพียง 1 อนุภาคต่อมล. หรือต่ำกว่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคซึ่งมีมากกว่า 4 ลีต ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการพิสูจน์ว่าระบบ UF สามารถกำจัด Giardia และ Cryptosporidium cyst จากน้ำผิวดินได้

มีการศึกษาในลักษณะเดียวกันอย่างต่อเนื่องในเมือง Boise รัฐ Idaho การวิจัยนี้ได้รับทุนส่วนหนึ่งจาก American Water Works Association Research Foundation. โดยได้ทำการศึกษาถึงการกำจัดอนุภาคในน้ำผิวดิน และน้ำใต้ดินด้วย ข้อมูลการทดลองล่าสุดแสดงให้เห็นว่า UF ชนิด hollow fiber มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่น อนุภาค ของแข็งแขวนลอย และจุลินทรีย์ที่ทำการเลือกไว้ได้ นอกจากนั้น ยังมีการศึกษาในลักษณะเดียวกัน โดยอาศัยน้ำใต้ดินในเมือง Philadelphia รัฐ Pennsylvania (Lutweiler et al., 1990)

นอกจากการผลิตน้ำดื่มแล้ว ระบบ UF ยังมีความเป็นไปได้ในการบำบัดของเสีย ซึ่งไม่สามารถบำบัดได้โดยอาศัยระบบธรรมดาทั่วๆ ไป มีงานวิจัยซึ่งกำลังอยู่ในระหว่างการดำเนินการอย่างต่อเนื่องในประเทศสเปน เป็นการบำบัดของเสียจำพวกน้ำมันมะกอก เป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของประเทศต่างๆ ในแถบเมดิเตอร์เรเนียน การบำบัดด้วยวิธีธรรมดา มักจะไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ หรือมีค่าใช้จ่ายที่แพงเกินไป เนื่องจากงานวิจัยนี้อยู่ภายใต้โปรแกรมของ BRITE ความพยายามในการวิจัยจึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดของเสียจำพวกน้ำมันมะกอก พร้อมทั้งสามารถนำสารเคมีที่สกัดออกมาได้ไปขาย เพื่อนำรายได้มาใช้ในการเดินระบบเมมเบรน

ศูนย์วิจัยและพัฒนา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ผลการศึกษาที่ผ่านมา

Ironside and Sourirajan (1967) ได้ทำการศึกษากำจัด E.Coli โดยใช้อุลตราฟิลเตรชันเมมเบรน ซึ่งทำจากเซลลูโลสอะซิเตท (Cellulose acetate) พบว่า อุลตราฟิลเตรชันเมมเบรนสามารถกำจัด E.Coli ได้ทั้งหมด

Sorber (1971) ทำการศึกษาโดยใช้เมมเบรนระบบ UF-RO เพื่อกำจัดโพลีโอไวรัส และโคลิฟาจชนิด T<sub>2</sub> จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดอยู่ระหว่าง 2 ล็อก - 5 ล็อก

Arika และคณะ (1977) พบว่าการใช้อุลตราฟิลเตรชันเมมเบรน กับน้ำเสียชุมชนสามารถลดของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids) จาก 236 มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ 0 มิลลิกรัม/ลิตร โดยใช้อัตราการกรองต่อหน่วยพื้นที่ (permeate flux) 25 ลิตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง

Olesen and Haagensen (1983) พบว่าการใช้อุลตราฟิลเตรชันแบบแผ่น (plate and frame) สามารถลดของแข็งแขวนลอยจากปริมาณมากกว่า 100 มิลลิกรัม/ลิตร ลงเหลือปริมาณน้อยกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตร และลดความขุ่นจาก 30-50 เอ็นทียู เหลือ 0.2-0.5 เอ็นทียู โดยใช้ความดัน 3.1 บาร์ อัตราการกรอง 5900 ลิตร/ชั่วโมง อัตราการกรองต่อพื้นที่ 100 ลิตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง

Jean-Michel Laine' และคณะ (1989) ได้ทดลองกรองน้ำผิวดินด้วย อุลตราฟิลเตรชันชนิดต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลของการกำจัดความขุ่น อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) พบว่าสามารถกำจัด TOC ได้ 40% โดยไม่ขึ้นกับขนาดช่องว่างของเมมเบรน สำหรับความขุ่นถูกกำจัดได้มากกว่า 98 %

Urase, Yamamoto and Ohgaki (1991) ศึกษาการกำจัดโคลิฟาจ Q<sub>β</sub> ออกจากน้ำเสียโดยกระบวนการกรอง 2 ชนิด คือ อุลตราฟิลเตรชันเมมเบรน และไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน พบว่าตะกอนที่เกิดบนผิวเมมเบรนมีบทบาทสำคัญในการกำจัดไวรัสออกจากระบบ

Jacangelo และคณะ (1991) ได้ทำการทดลองโดยใช้ Low-pressure hollow-fiber UF ขนาด 0.1 ไมครอน ซึ่งทำงานโดยอาศัยความดันในช่วง 10-40 psi หรือ 0.7-2.8 บาร์ เพื่อกำจัด แบคทีเรีย และไวรัสออกจากน้ำเพื่อให้ผ่านมาตรฐานของ Surface Water Treatment Rule (SWTR) โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้น้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ 4 แหล่งซึ่งประกอบด้วยแหล่งน้ำจาก Northern California 2 แหล่ง จากเมือง Boise และจากเมือง Idaho จุดชีพที่ใช้ในการ

ทดลองประกอบด้วยโคลิฟาจชนิด MS2 โคลิฟอร์มแบคทีเรีย และ *Giardia muris* จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของ UF สามารถผ่านมาตรฐานของ SWTR ได้โดยปราศจากการใช้การฆ่าเชื้อโรคทางเคมีมาช่วย ในการทดลองพบว่า น้ำกรองที่ได้ตรวจไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ไวรัส และ *Giardia* ในทุกกรณี โดยประสิทธิภาพในการกำจัด *Giardia* มากกว่าเท่ากับ 4 ล็อก ในขณะที่ลดแบคทีเรียได้ 4 ล็อก และลดไวรัสได้มากกว่า 6.5 ล็อก โดยที่คุณภาพของน้ำดิบที่แตกต่างกันของแหล่งน้ำทั้ง 4 แห่งไม่ส่งผลต่อความสามารถในการกำจัดจุลชีพของเมมเบรน

เกษมสันต์ มโนมัยพิบูลย์, ประชา ยอดวานิช และธีระพล ตีรวคิน (2535) ได้ศึกษาผลของการกรองแบบทรายเร็วในการกำจัดไวรัส โดยใช้เครื่องกรองทรายเร็วแบบ batch experiment ในการกำจัดโคลิฟาจ อัตราการกรอง (SOR) ที่ใช้มีค่า 5 8 12 และ 15 ซม./นาท และใช้ทรายกรองที่มี effective size แตกต่างกัน 3 ค่า ความเข้มข้นของโคลิฟาจในน้ำดิบมีค่าประมาณ  $10^4$  พีเอฟยู/มล. จากการทดลองพบว่า เครื่องกรองทรายแบบเร็วให้ผลในการกำจัดโคลิฟาจไม่เป็นที่น่าพอใจ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ระหว่าง 0-11% เท่านั้น

Naranjo, Gerba, Bradford and Irwin (1993) ได้ทำการศึกษาการกำจัดไวรัสโดยอาศัยระบบบำบัดน้ำเสียแบบ on-site และระบบนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยระบบนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ ถูกใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากสำนักงาน ศูนย์สรรพสินค้า และสถานที่สาธารณะ เพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในส่วนของห้องน้ำ ระบบประกอบไปด้วยระบบ anoxic ตามด้วยระบบ aerobic และระบบ UF แล้วนำมาผ่าน activated carbon และฆ่าเชื้อโรคด้วย UV น้ำเสียก่อนจะเข้าระบบฯ จะได้รับการผสมด้วยโคลิฟาจชนิด MS2 rotavirus ชนิด SA-11 และ poliovirus ชนิดที่ 1 ผลการทดลองพบว่า หลังจากผ่าน UF แล้วจะตรวจไม่พบไวรัสสัตว์เลย โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดประมาณ 6 ล็อกเป็นอย่างน้อย ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจชนิด MS-2 อยู่ที่ 3 ล็อกขึ้นไป และสามารถกำจัดได้มากกว่า 5 ล็อกหลังจากผ่านการฆ่าเชื้อโรคด้วย UV

Urase, Yamamoto and Ohgaki (1993) ได้ทดลองใช้เมมเบรน UF และ MF ชนิด dead-end และ cross flow ในการกำจัดโคลิฟาจชนิด Q $\beta$  ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.025 ไมครอน ออกจากน้ำที่ผ่านระบบ AS และ น้ำจากระบบบ่อ โดยน้ำจะถูกเตรียมให้มีความเข้มข้นของโคลิฟาจชนิด Q $\beta$  ประมาณ 10 พีเอฟยู/มล. ผลจากการทดลองพบว่า ในกรณีของน้ำจากระบบบ่อ ประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจของเมมเบรนมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจจะเพิ่มขึ้นตามความต้านทานในการกรองที่เพิ่มขึ้น ความต้านทานที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการสะสมของอนุภาคบนผิวของเมมเบรนที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนในกรณีของน้ำที่ผ่านระบบ AS ประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจของเมมเบรนอยู่ที่ 99.9 เปอร์เซ็นต์ โดยที่การกำจัดจะเปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานในการกรอง จากผลการทดลองสามารถสรุป

ได้ว่า การสะสมของตะกอนที่ผิวของเมมเบรนเป็นส่วนสำคัญในการกำจัดไวรัสของเมมเบรน

Kawamura, Nishimura and Magara (1994) ได้ทดลองใช้ UF ชนิด dead-end ในการกำจัดไวรัส ซึ่งประกอบด้วยโคลิฟาจชนิด T1 และ Q $\beta$  เมมเบรนที่ใช้ในการทดลองมีค่า MWCO แตกต่างกัน 4 ค่า ผลการทดลองพบว่า เมมเบรนที่มีค่า MWCO สูงที่สุดให้อัตราการกำจัดที่ต่ำที่สุด และอัตราการกำจัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสมโคลิฟาจกับ activated sludge และมีค่าการกำจัดสูงที่สุด เมื่อกรองโคลิฟาจหลังจากการกรอง activated sludge เพื่อให้เกิดชั้น cake และ gel ชั้นที่ผิวของเมมเบรน การเพิ่มขึ้นของอัตราการกำจัดมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานด้วย

เนาวรัตน์ ศิรินิรันดร์ (2537) ได้ทำการศึกษาหาวิธีการที่จะตรวจหาปริมาณโคลิฟาจในน้ำเพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการ จากผลการศึกษาพบว่า การตรวจหาปริมาณโคลิฟาจในน้ำที่มีความเข้มข้นของโคลิฟาจสูงสามารถนำตัวอย่างมาเจือจางด้วย ทริปติเคสชอยบรอส แล้วนำไปตรวจหาด้วยวิธีพลักแอสเสได้เลย ส่วนตัวอย่างน้ำที่มีความเข้มข้นของโคลิฟาจต่ำ ทำได้โดยการนำตัวอย่างไปกรองผ่าน เชือกกรองที่เคลือบด้วยโพลีเอทิลีนอิมิน ซึ่งบรรจุในชุดเชือกกรอง จากนั้นใช้บีฟเอกซ์แทรกท์ 8 % หรือบีฟเอกซ์แทรกท์ 8 % กับโซเดียมคลอไรด์ 1 โมล ละโคลิฟาจให้หลุดออกจากแผ่นเชือกกรอง จะได้ประสิทธิภาพในการตรวจหาโคลิฟาจของสารละลายทั้งสองเฉลี่ย 89.03% และ 87.75% ตามลำดับ

ศิริมา ปัญญาเมธิกุล (2538) ได้ทดลองใช้ hollow fiber UF เพื่อกำจัดโคลิฟาจออกจากน้ำ โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 และ 0.03 ไมครอน และเปลี่ยนอัตราการกรองน้ำต่าง ๆ กันดังนี้ คือ 0.2 ลิตร/นาที 0.4 ลิตร/นาที 0.6 ลิตร/นาที 0.8 ลิตร/นาที 1.0 ลิตร/นาที และ 1.5 ลิตร/นาที ตามลำดับ น้ำดิบที่ใช้เป็นน้ำสังเคราะห์มีทั้งหมด 3 ชนิดคือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ น้ำประปาเติมความขุ่นสังเคราะห์ และน้ำประปาเติมโคลิฟาจผสมความขุ่นสังเคราะห์ จากผลการทดลองพบว่า ขนาดช่องว่างของเมมเบรนมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ โดยการใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอนจะตรวจพบโคลิฟาจในน้ำกรอง มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 10 - 103 พีเอฟยู/มล. ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจอยู่ระหว่าง 99.99% - 99.9999% (4-6 ล็อก) ในขณะที่การกรองโดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน จะตรวจไม่พบโคลิฟาจในน้ำกรองเลย โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจอยู่ระหว่าง 99.9999% - 99.99999% (6-7 ล็อก)

Jacangelo และคณะ (1995) ได้ใช้เมมเบรนจำนวน 6 ชนิดซึ่งประกอบด้วย MF ชนิด Hollow-fiber จำนวน 2 อัน MF ชนิด Spiral wound 1 อัน UF ชนิด Hollow-fiber จำนวน 2 อัน และ UF ชนิด Tubular 1 อัน เพื่อกำจัด *Cryptosporidium parvum* ซึ่งมีขนาด 4-6 ไมครอน

*Giardia muris* ซึ่งมีขนาด 7-14 ไมครอน และ โคลิฟาจชนิด MS2 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.025 ไมครอนออกจากน้ำ โดยอาศัยน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ 3 แหล่ง คือ จากอ่างน้ำในเมือง Portland รัฐ Oregon ทะเลสาบ Elsmar ในเมือง San Jose รัฐ California และจากแม่น้ำ Siene ประเทศฝรั่งเศส จากผลการทดลองพบว่า เมมเบรนที่ใช้ในการทำลองครั้งนี้ทุกชนิด ยกเว้น MF ชนิด Spiral wound สามารถกำจัด *Giardia* และ *Cryptosporidium* ได้ทั้งหมด การที่ MF ชนิด Spiral wound ไม่สามารถกำจัดได้หมด เนื่องจากแวนที่ซีระหว่างช่องน้ำเข้า และน้ำออก มีคุณภาพต่ำ ส่วนการกำจัดไวรัสพบว่า MF สามารถกำจัดไวรัสได้ระหว่าง 0.2-1.2 ล็อก ในขณะที่ UF สามารถกำจัดไวรัสได้ระหว่าง 1.5 ถึงมากกว่า 6 ล็อก โดยการใช้ UF ชนิด hollow fibre จะตรวจไม่พบไวรัสในน้ำกรองเลย

Urase, Yamamoto and Ohgaki (1996) ได้ทำการศึกษาผลของขนาดรูพรุนของเมมเบรนในการกำจัดไวรัส โดยทำการวัดปริมาณของไวรัสที่ผ่านเมมเบรนชนิดต่าง ๆ ได้แก่ MF UF และ NF โคลิฟาจที่ใช้ในการศึกษาคครั้งนี้เป็นชนิด Q $\beta$  และ T4 จากการทดลองพบว่า โคลิฟาจชนิด Q $\beta$  ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า T4 สามารถทะลุผ่านช่องว่างของเมมเบรนได้ แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดยังจัดว่าสูงอยู่คืออยู่ในช่วง 99-99.9999% จากการวิเคราะห์โดยการวัดการทะลุผ่านของ polyethylene glycol แสดงให้เห็นว่าสาเหตุการรั่วของ Q $\beta$  ผ่านเมมเบรนเกิดจากขนาดของรูพรุนที่ใหญ่ผิดปกติกว่าธรรมดา ขนาดของรูพรุนที่ผิดปกตินี้สามารถ ประมาณได้จากปริมาณไวรัสที่ต่างชนิดกันซึ่งทะลุผ่านเมมเบรนขนาดเดียวกัน ผลจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่เราจะสามารถพัฒนาเมมเบรนที่มีความสามารถกำจัดไวรัสได้สูงในขณะที่มีความต้านทานการกรองต่ำ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย