ประสิทธิภาพของกระบวนการกรองด้วยเมมเบรน ในการกำจัดโคลิฟาจ ในน้ำดิบที่ปนเปื้อน โคลิฟาจ และอีโคไล

นาย ณัฏฐพงศ์ เลิศปีติภัทร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2540
ISBN 974-637-173-8
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17603043

COLIPHAGE REMOVAL EFFICIENCY OF MEMBRANE FILTRATION PROCESS FOR RAW WATER COTAMINATED WITH COLIPHAGE AND E.COLI.

Mr. Nuttapong Lerthpeetipath

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirments
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic year 1997

ISBN 974-637-173-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพของกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนในการกำจัดโคลิฟาจในน้ำดิบที่ปนเปื้อนโคลิฟาจและอีโคไล
ชื่อนิสิต	นายณัฏฐพงศ์ เลิศปิติภัทร
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ พรประภา
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นพ.ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิรักษ์ สุจริตตานนท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ พรประภา)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ณัฏฐพงศ์ เลิศปิติภัทร : ประสิทธิภาพของกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนในการกำจัดโคลิฟาจในน้ำดิบที่ปนเปื้อนโคลิฟาจ และอีโคไล
(COLIPHAGE REMOVAL EFFICIENCY OF MEMBRANE FILTRATION PROCESS FOR RAW WATER CONTAMINATED WITH COLIPHAGE AND E.COLI)
อ.ที่ปรึกษา : รศ.ไพพรรณ พรประภา, 173 หน้า. ISBN 974-637-173-8

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดอีโคไล และโคลิฟาจ ออกจากน้ำด้วยเมมเบรนระบบอุลตราฟิลเตรชัน ชนิดเส้นใยกลวง ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ อัตรากรอง และการล้างย้อน ขนาดช่องว่างของเมมเบรนมี 2 ขนาด คือ 0.1 และ 0.03 ไมครอน และเปลี่ยนอัตรากรองน้ำต่าง ๆ กัน ดังนี้คือ 0.5 ลิตร/นาที 1.0 ลิตร/นาที 1.5 ลิตร/นาที และ 2.0 ลิตร/นาที ตามลำดับ ตัวอย่างน้ำที่ใช้มี 3 ชนิดคือ น้ำประปาเติมอีโคไล น้ำประปาเติมโคลิฟาจ และน้ำประปาเติมอีโคไล และโคลิฟาจ

จากผลการทดลองพบว่า เมมเบรนทั้งขนาด 0.1 และ 0.03 ไมครอน สามารถกำจัดอีโคไลได้ทั้งหมดสำหรับทุกอัตรากรอง ส่วนโคลิฟาจจะตรวจพบในน้ำกรองจากเมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอนเท่านั้น โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 50 - 700 พีเอฟยู/มล. ส่วนน้ำกรองจากเมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ตรวจไม่พบโคลิฟาจสำหรับทุกอัตรากรอง โดยที่ประสิทธิภาพในการกำจัดอีโคไลของเมมเบรนทั้งสองมีค่าอยู่ระหว่าง 99.999998% - 99.9999999% (7.7 - 9 ล็อก) ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจของเมมเบรนทั้งสองขนาด ในกรณีที่ตัวอย่างน้ำมีแต่โคลิฟาจจะมีค่าอยู่ระหว่าง 99.998% - 99.9995% (4.8 - 5.3 ล็อก) สำหรับเมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน และมีค่ามากกว่า 99.99999% (7 ล็อก) สำหรับเมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ส่วนในกรณีที่ตัวอย่างน้ำมีทั้งอีโคไล และโคลิฟาจ ประสิทธิภาพในการกำจัดอีโคไลของเมมเบรนทั้งสองขนาดมีค่าอยู่ระหว่าง 99.999998% - 99.9999998% (7.7 - 8.6 ล็อก) ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัด โคลิฟาจจะมีค่าอยู่ระหว่าง 99.994% - 99.9997% (4.2 - 5.6 ล็อก) สำหรับเมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน และมีค่าอยู่ระหว่าง 99.99999% - 99.999995% (6.9 - 7.3 ล็อก) สำหรับเมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน โดยที่ประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจในทุกกรณีสามารถผ่านมาตรฐานของ SWTR ซึ่งกำหนดประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจอยู่ที่ 4 ล็อกเป็น อย่างต่ำ

สำหรับเมมเบรนที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ มีค่าความต้านทานของเมมเบรน (Rm) เท่ากับ 1.3×10^{11} m^{-1} สำหรับเมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน และมีค่าเท่ากับ 3.4×10^{11} m^{-1} สำหรับเมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน โดยมีค่าดัชนีความต้านทาน (RI) อยู่ในช่วง 0.54 ถึง 0.92 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การล้างย้อนไม่สามารถทำให้เมมเบรนคืนสภาพเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C717937 : MAJOR SANITARY ENGINEERING
KEY WORD: COLIPHAGE/ VIRUSES/ E.COLI/ ULTRAFILTRATION MEMBRANE/ HOLLOW FIBER MEMBRANE
NUTTAPONG LERTHPEETIPATH : COLIPHAGE REMOVAL EFFICIENCY OF MEMBRANE FILTRATION PROCESS FOR RAW WATER CONTAMINATED WITH COLIPHAGE AND E.COLI. THESIS ADVISOR : ASSO.PROF. PAIPHAN PHORNPRAPHA. 173 pp. ISBN 974-637-173-8.

The Objective of this experiment was to study the efficiency of coliphage removal from water by hollow-fiber ultrafiltration membrane. The effect of filtration rate and backwashing was investigated. The membrane pore size supplied in this study were 0.1 and 0.03 micron. The filtration rate were 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 litres per minute. respectively. There were 3 kinds of water samples : tap water with E.coli, tap water with coliphage and tapwater with E.coli and coliphage.

It was revealed that 0.1 and 0.03 micron membranes can remove all of E.coli in all filtration rate. Coliphage was detected in filtrated water from 0.1 micron membrane was 50 - 700 pfu/ml. and could not be detected in filtrate water from 0.03 micron membrane. The E.coli removal efficiency of both membranes was between 99.999998% - 99.9999999% (7.7 - 9 log). Whereas the coliphage removal efficiency of 0.1 micron membrane was between 99.998% - 99.9995% (4.8 - 5.3 log) and of 0.03 micron membrane was more than 99.99999% (7 log). For water sample with E.coli and coliphage, the E.coli removal efficiency of both membranes was 99.999998% - 99.9999998% (7.7 - 8.6 log). Whereas the coliphage removal efficiency of 0.1 micron membrane was 99.994 - 99.9997% (4.2 - 5.6 log) and of 0.03 micron membrane was 99.99999% - 99.999995% (6.9 - 7.3 log). The coliphage removal efficiency in any case of this research can exceed SWTR which require at least 4 log.

The resistance of membrane (Rm) in this study was 1.3 x 10^{11} m^{-1} for 0.1 micron membrane and 3.4 x 10^{11} m^{-1} for 0.03 micron membrane. The resistance index (RI) was between 0.54 - 0.92 that showed backwashing was not efficient in recovery of membrane.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ พรประภา เป็นอย่างสูงที่ให้ความกรุณาในการให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการวิจัย แง่คิดทางวิชาการตลอดจนดูแลเอาใจใส่ผู้วิจัยตลอดเวลา ซึ่งทำให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิรักษ์ สุจริตตานนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ และอาจารย์ศิริมา ปัญญาเมธีกุล ที่ได้ให้คำแนะนำ อนุมัติโครงร่างงานวิจัย ตรวจสอบและเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ให้แก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประแสง มงคลศิริ ที่ได้ให้คำปรึกษา และแนะนำความรู้ทางด้านเมมเบรน รวมทั้งหัวข้อที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์วิบูลย์ลักษณ์ วิสุทธิศักดิ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา และแนะนำความรู้ทางด้านจุลชีววิทยา รวมทั้งวิธีการวิเคราะห์ผลทางด้านจุลชีววิทยาที่ถูกต้อง ตลอดระยะเวลาที่วิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่ได้คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดมา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณกุลชิดา อารีย์สว่างกิจ ที่คอยเป็นกำลังใจตลอดมา

เนื่องจากทุนบางส่วนของงานวิจัยนี้ ได้รับความอนุเคราะห์จากบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

คุณความดีและประโยชน์ทั้งหลายอันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้บิดา มารดา ซึ่งเป็นผู้ให้ทุกอย่างกับผู้วิจัยตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญรูป ..... ฏ

บทที่

1. บทนำ

บทนำ 1
วัตถุประสงค์ 4
ขอบเขตการวิจัย 4

2. ทฤษฎี และสมมติฐาน

แบคทีเรีย 5
1. รูปร่างลักษณะของแบคทีเรีย 5
1.1 ขนาดของเซล 5
1.2 รูปร่างของเซล 6
1.3 การจัดเรียงตัวของเซล 7
1.4 โครงสร้างของเซล 8
2. เยื่อพลาสมา 12
3. ผนังเซล 12
4. Capsule, Slime layer และ Clycocalyx 13
5. ไซโตพลาสซึม 13
6. แขนขา 16
6.1 Flagella 16
6.2 Axial Filament 16
6.3 Pili และ Fimbriae 16
7. ความเป็นมาของอีโคไล 19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ไวรัส 21
1. คุณลักษณะโดยทั่วไปของไวรัส 21
1.1 นิยาม 21
1.2 ขอบเขตของการอาศัย 22
1.3 ขนาด 22
2. โครงสร้างของไวรัส 22
2.1 นิวคลีอิค แอซิด 22
2.2 Capsid และ Envelope 24
3. รูปร่างพื้นฐานของไวรัส 24
3.1 Helical Virus 25
3.2 Polyhedral Virus 25
3.3 Envelope Virus 25
3.4 Complex Virus 25
4. การเจริญเติบโตของแบคทีริโอฟาจในห้องปฏิบัติการ 28
5. ประเภทของแบคทีริโอฟาจ 28
6. การขยายพันธุ์ของไวรัส 28
7. การขยายพันธุ์ของแบคทีริโอฟาจ 32
7.1 แบคทีริโอฟาจชนิด T-even 32
7.1.1 การดูดติดของฟาจบนเซลผู้ให้อาศัย 32
7.1.2 การทะลุของเซล 33
7.1.3 การสังเคราะห์ส่วนประกอบของไวรัสขึ้นโดยทางชีวภาพ 33
7.1.4 ช่วงโตเต็มไว 36
7.1.5 การออกจากเซล 36
8. การตรวจสอบไวรัส 37
8.1 ขั้นตอนการตรวจสอบ 37
8.2 พลักแอสเส 37
9. ไวรัสที่พบในน้ำ 38

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

10. การใช้โคลิฟาจเป็นตัวบ่งชี้การปนเปื้อนของไวรัสในน้ำ 41
11. ประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ 42
เมมเบรน 44
1. กระบวนการเมมเบรน 44
2. อุลตราฟิลเตรชัน 46
2.1 โพลีเมอร์ที่ใช้ผลิตเมมเบรน 46
2.2 โมดูลชนิดต่าง ๆ ของระบบอุลตราฟิลเตรชัน 46
2.3 กลไกการทำงานที่เป็นไปได้ของเมมเบรนในการกำจัดจุลชีพ 52
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อ Ultrafiltration Flux 56
2.5 การพัฒนาอุลตร้าฟิลเตรชันเพื่อการกำจัดอนุภาค และจุลชีพ 59
ผลการศึกษาที่ผ่านมา 61
3. แผนการ และการดำเนินการวิจัย
แผนการวิจัย 65
การเตรียมการทดลอง 67
วิธีการดำเนินการวิจัย 74
ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการทดลอง 76
4. ผลการทดลอง และการวิจารณ์ผล
ลักษณะของอีโคไลที่ใช้ในการวิจัย 77
ลักษณะของโคลิฟาจที่ใช้ในการวิจัย 78
ความสัมพันธ์ระหว่างอีโคไล และโคลิฟาจที่ระยะเวลาต่าง ๆ 79
ประสิทธิภาพในการกำจัดของเมมเบรน 79
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดอีโคไลที่เติมในน้ำประปา 79
2. ประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจที่เติมในน้ำประปา 83
3. ประสิทธิภาพในการกำจัดอีโคไล และโคลิฟาจที่เติมในน้ำประปา 83
ผลของอีโคไลต่อการกำจัดโคลิฟาจของเมมเบรน 88
1. การกรองโดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน 88
2. การกรองโดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน 89

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เวลาที่ใช้ในการกรอง 89
ความต้านทานเชิงชลศาสตร์ของเมมเบรน 98
ความต้านทานของระบบเมมเบรน 100
ความต้านทานของตะกอน 105
ค่าดัชนีความต้านทาน 105
การล้างย้อน 106
5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ
สรุปผลการวิจัย 110
ข้อเสนอแนะ 111
รายการอ้างอิง 112
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก การทำความสะอาด การเตรียม และการสเตอริไลส์เครื่องแก้ว 116
ภาคผนวก ข อาหารเพาะเชื้อ และการเตรียม 119
ภาคผนวก ค การย้อมแบคทีเรียแบบแกรม 121
ภาคผนวก ง การแยกแบคทีเรียพันธุ์บริสุทธิ์ ด้วยวิธี Streak plate 124
ภาคผนวก จ ข้อมูลจากการทดลอง 125
ภาคผนวก ฉ การถดถอยสำหรับสองตัวแปรที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้ง 154
ประวัติผู้เขียน 158

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ลักษณะ และขนาดของไวรัสในแบคทีเรีย 31
ตารางที่ 2.2 โรคต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นโดย Human Enteric Viruses 39
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบหน่วยในรูปของเปอร์เซนต์ และล็อก 42
ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบวิธีการกรองโดยใช้เมมเบรนชนิดต่าง ๆ 45
ตารางที่ 2.5 โพลีเมอร์ที่ใช้ผลิตเมมเบรน 48
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของเมมเบรน UF บางชนิด 49
ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของโมดูลชนิดต่าง ๆ ในระบบอุลตราฟิลเตรชัน .....: 50
ตารางที่ 2.8 แสดงลักษณะสมบัติของระบบเมมเบรนต่าง ๆ 55
ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนชุดการทดลองตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย 66
ตารางที่ 3.2 ตารางการเก็บข้อมูล 75
ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนของอีโคไล และโคลิฟาจที่ระยะเวลาต่าง ๆ 80
ตารางที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดอีโคไลเฉลี่ย ที่อัตรากรองต่าง ๆ กันโดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 และ 0.03 ไมครอน ตัวอย่างน้ำคือ น้ำประปาเติมอีโคไล 81
ตารางที่ 4.3 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจเฉลี่ย ที่อัตรากรองต่าง ๆ กันโดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 และ 0.03 ไมครอน ตัวอย่างน้ำคือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ 81
ตารางที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดอีโคไล และโคลิฟาจเฉลี่ย ที่อัตรากรองต่าง ๆ กันโดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ตัวอย่างน้ำคือ น้ำประปาเติมอีโคไล และโคลิฟาจ 84
ตารางที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดอีโคไล และโคลิฟาจเฉลี่ย ที่อัตรากรองต่าง ๆ กันโดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ตัวอย่างน้ำคือ น้ำประปาเติมอีโคไล และโคลิฟาจ 84
ตารางที่ 4.6 ผลของการกรองน้ำประปาเพื่อหาค่า Rm 104
ตารางที่ 4.7 ตารางเปรียบเทียบค่า RI โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน และเมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ที่อัตรากรองต่าง ๆ กัน 107
ตารางที่ 4.8 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดอีโคไล และโคลิฟาจเฉลี่ยของเมมเบรนขนาด 0.1 และ 0.03 ไมครอน ที่อัตรากรองต่าง ๆ จากตัวอย่างน้ำทั้งสามชนิด 109
ตารางที่ 4.9 ตารางเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการกรองเฉลี่ยของเมมเบรนขนาด 0.1 และ 0.03 ไมครอน ที่อัตรากรองต่าง ๆ จากตัวอย่างน้ำทั้งสามชนิด .. 109

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 วิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการแยกสารออกจากของเหลว 3
รูปที่ 2.1 แบคทีเรียที่ใหญ่สุดคือ *Epulopiscium fishelsoni* โดยมีความยาวกว่า 500 ไมครอน 7
รูปที่ 2.2 รูปร่างของแบคทีเรียโดยทั่วไป 7
รูปที่ 2.3 รูปร่างของแบคทีเรียชนิดพิเศษ 9
รูปที่ 2.4 การจัดเรียงตัวของเซล 10
รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบทางโครงสร้างที่สำคัญของแบคทีเรีย 11
รูปที่ 2.6 การป้องกันเซลจาก osmotic lysis 14
รูปที่ 2.7 ผนังเซลที่ยังคงรูปร่างของเซลอยู่ 14
รูปที่ 2.8 โครงสร้างที่ล้อมรอบผนังเซล 15
รูปที่ 2.9 การจัดเรียงตัวของ flagella บนเซลแบคทีเรีย 17
รูปที่ 2.10 Axial filaments ซึ่งประกอบด้วย axial fibrils 18
รูปที่ 2.11 Pili ซึ่งกระจายล้อมรอบเซลอีโคไล 18
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ด้านขนาดของจุลชีพต่าง ๆ 23
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของไวรัส 23
รูปที่ 2.14 รูปทรงต่าง ๆ ของไวรัส 26
รูปที่ 2.15 แบคทีริโอฟาจที่เป็น complex virus 27
รูปที่ 2.16 Bacteriophage plaques 27
รูปที่ 2.17 ชื่อ รูปร่าง ลักษณะ ขนาด ของแบคทีริโอฟาจที่พบได้บ่อย 29
รูปที่ 2.18 รูปร่าง ลักษณะ ของแบคทีริโอฟาจที่เห็นจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน 30
รูปที่ 2.19 การดูดติดกับผนังเซล และการทะลุเข้าสู่เซลอีโคไลของแบคทีริโอฟาจ ชนิด T-2 34
รูปที่ 2.20 การขยายพันธุ์ของไวรัส 35
รูปที่ 2.21 One-step growth curve ของแบคทีริโอฟาจชนิด T-2 35
รูปที่ 2.22 เส้นทางการติดเชื้อไวรัสกลับสู่มนุษย์ 40
รูปที่ 2.23 โมดูลของระบบอุลตราฟิลเตรชันแบบท่อ 51
รูปที่ 2.24 โมดูลของระบบอุลตราฟิลเตรชันแบบแผ่น 51
รูปที่ 2.25 โมดูลของระบบอุลตราฟิลเตรชันแบบม้วน 53
รูปที่ 2.26 โมดูลของระบบอุลตราฟิลเตรชันแบบเส้นใยกลวง 53

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.27 โมดูลของระบบอุลตราฟิลเตรชันแบบเส้นใยกลวง 54
รูปที่ 2.28 ลักษณะการทำงาน และการทำความสะอาดเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง 54
รูปที่ 2.29 Concentration Polarization ที่เกิดขึ้นในระบบอุลตราฟิลเตรชัน 57
รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังการดำเนินการวิจัย 65
รูปที่ 3.2 ลักษณะของพลักที่เกิดขึ้นบนจานเพาะเชื้อ 70
รูปที่ 3.3 แผนภาพการไหล และอุปกรณ์การทดลอง 73
รูปที่ 4.1 ลักษณะของอีโคไลที่มองเห็นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน กำลังขยาย 10,000 เท่า 77
รูปที่ 4.2 ลักษณะของโคลิฟาจที่มองเห็นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน กำลังขยาย 150,000 เท่า โดยวิธี Negative straining 78
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอีโคไล และโคลิฟาจที่ระยะเวลาต่าง ๆ ... 80
รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดอีโคไล โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 และ 0.03 ไมครอน ที่อัตรากรองต่าง ๆ กัน (การทดลองที่ 1-7) 82
รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 และ 0.03 ไมครอน ที่อัตรากรองต่าง ๆ กัน (การทดลองที่ 8-14) 82
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดอีโคไล โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ที่อัตรากรองต่าง ๆ กัน (การทดลองที่ 15-26) 85
รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดอีโคไล โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ที่อัตรากรองต่าง ๆ กัน (การทดลองที่ 27-35) 85
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ที่อัตรากรองต่าง ๆ กัน (การทดลองที่ 15-26) 86
รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ที่อัตรากรองต่าง ๆ กัน (การทดลองที่ 27-35) 86
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโคลิฟาจของน้ำเข้า และน้ำออกที่อัตรากรองต่าง ๆ โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างน้ำคือ น้ำประปาเติมอีโคไล และโคลิฟาจ 87

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการกรองตัวอย่างน้ำจนเมมเบรนอุดตันที่ความดัน 1-2 บาร์ ที่อัตรากรองต่าง ๆ กัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน 90
รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการกรองตัวอย่างน้ำจนเมมเบรนอุดตันที่ความดัน 1-2 บาร์ ที่อัตรากรองต่าง ๆ กัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน 90
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างคือ น้ำประปาเติมอีโคไล และโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 0.5 ลิตร/นาที 91
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างคือ น้ำประปาเติมอีโคไล และโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 1.0 ลิตร/นาที 92
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างคือ น้ำประปาเติมอีโคไล และโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 1.5 ลิตร/นาที 93
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างคือ น้ำประปาเติมอีโคไล และโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 2.0 ลิตร/นาที 94
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ตัวอย่างคือ น้ำประปาเติมอีโคไล และโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 0.5 ลิตร/นาที 95
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ตัวอย่างคือ น้ำประปาเติมอีโคไล และโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 1.0 ลิตร/นาที 96
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ตัวอย่างคือ น้ำประปาเติมอีโคไล และโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 1.5 ลิตร/นาที 97
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรากรองต่อพื้นที่ และเวลากรอง 99
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน, R และเวลากรอง 99

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.22 กราฟแสดง Pressure Profile ของเมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ที่อัตรากรอง 0.5 ลิตร/นาที 101
รูปที่ 4.23 กราฟแสดง Pressure Profile ของเมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ที่อัตรากรอง 1.0 ลิตร/นาที 101
รูปที่ 4.24 กราฟแสดง Pressure Profile ของเมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ที่อัตรากรอง 1.5 ลิตร/นาที 102
รูปที่ 4.25 กราฟแสดง Pressure Profile ของเมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ที่อัตรากรอง 2.0 ลิตร/นาที 102
รูปที่ 4.26กราฟแสดง Pressure Profile ของเมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ที่อัตรากรอง 0.5 ลิตร/นาที 103
รูปที่ 4.27 กราฟแสดง Pressure Profile ของเมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ที่อัตรากรอง 1.0 ลิตร/นาที 103
รูปที่ 4.28 กราฟแสดง Pressure Profile ของเมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ที่อัตรากรอง 1.5 ลิตร/นาที 103
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรากรองต่อพื้นที่ และความดันต่อความหนืดของน้ำในการกรองน้ำประปา 104
รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบความดันที่เพิ่มขึ้นหลังจากการล้างย้อนแต่ละครั้ง ที่อัตรากรองต่าง ๆ กัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างน้ำคือ น้ำประปาเติมอีโคไล และโคลิฟาจ 108
รูปที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบความดันที่เพิ่มขึ้นหลังจากการล้างย้อนแต่ละครั้ง ที่อัตรากรองต่าง ๆ กัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ตัวอย่างน้ำคือ น้ำประปาเติมอีโคไล และโคลิฟาจ 108