

ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์
และถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

TREATMENT EFFICIENCY FOR SYNTHETIC WASTEWATER USING
SEQUENCING BATCH REACTOR AND MEMBRANE BIOREACTOR

เกรียงกมล ตุนวัฒน์กิจเจริญ
KRIANGKAMOL TUNWATKITCHAROEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2549
ISBN 974-15-2542-7

TREATMENT EFFICIENCY FOR SYNTHETIC WASTEWATER USING
SEQUENCING BATCH REACTOR AND MEMBRANE BIOREACTOR

KRIANGKAMOL TUNWATKITCHAROEN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2006
ISBN 974-15-2542-7

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถังปฏิกรณ์ เอสปีอาร์และถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน
นักศึกษา	นายเกรียงกมล ตุนวัฒนกิจเจริญ
รหัสประจำตัว	46064502
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน เปรียบเทียบกับระบบเอสปีอาร์ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ คือ อายุสลัดจ์และระยะเวลาการเติมอากาศ จากการเดินระบบเอสปีอาร์ พบว่าในสภาวะการเติมอากาศต่อการหยุดเติมอากาศที่ 7:1 และ 5:3 ชม. การบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของทีโอซี และซีโอดีรวมทั้งทีเคเอ็นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออายุสลัดจ์สูงขึ้น โดยค่าการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ ทีโอซี และซีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 95-98 และการกำจัดทีเคเอ็นเฉลี่ยร้อยละ 95-99 ที่สภาวะการเติมอากาศต่อการหยุดเติมอากาศที่ 3:5 ชม. การเพิ่มอายุสลัดจ์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพ การบำบัดสารอินทรีย์ลดลง โดยประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยร้อยละ 94, 92 และ 84 ที่อายุสลัดจ์ 5, 10 และ 30 วัน ตามลำดับ ในทางกลับกัน ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอายุสลัดจ์ โดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 90, 94 และ 96 ที่อายุสลัดจ์ 5, 10 และ 30 วัน ตามลำดับ ส่วนการเดินระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบต่อเนื่อง ใช้ระยะเวลาเติมอากาศ 5 ชม. สลับกับการหยุดเติมอากาศ 3 ชม. การเพิ่มอายุสลัดจ์ส่งผลให้การบำบัดสารอินทรีย์ และทีเคเอ็นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพการบำบัดทีโอซีและซีโอดีมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 95-97 ค่าการบำบัดทีเคเอ็นเฉลี่ยร้อยละ 97-99 ซึ่งใกล้เคียงกับระบบเอสปีอาร์ อย่างไรก็ตาม ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนสามารถลดค่าของแอมโมเนียไนโตรเจนได้ถึงร้อยละ 99 และคุณภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง การอุดตันเมมเบรน ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลงโดยเฉพาะในช่วงหยุดเติมอากาศ อายุสลัดจ์ที่มากขึ้นมีผลทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงมากขึ้น จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้แบบจำลองความต้านทานของการอุดตันพบว่าความต้านทานจากชั้นเค้ก (r_c) มีผลทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงมากกว่าความต้านทานของชั้นเจล (r_g) และความต้านทานแบบถาวร (r_d) จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR บ่งชี้ถึงองค์ประกอบของสารที่ทำให้เกิดการอุดตัน ได้แก่ โพลีแซคคาไรด์ และโปรตีนซึ่งอาจเกิดจากผนังเซลล์ของแบคทีเรีย

คำสำคัญ : ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน การอุดตันเมมเบรน ไมโครฟิลเทรชัน อายุสลัดจ์ เอสปีอาร์

Thesis Title	Treatment Efficiency for Synthetic Wastewater using Sequencing Batch Reactor and Membrane Bioreactor
Student	Mr.Kriangkamol Tunwatkitcharoen
Student ID.	46064502
Degree	Master of Science
Programme	Environmental Chemistry
Year	2006
Thesis Advisor	Dr.Chalor Jarusutthirak

ABSTRACT

This research studied the treatment of synthetic wastewater using membrane bioreactors (MBR) comparing with sequencing batch reactors (SBR). The Factors affecting treatment efficiency, sludge retention time (SRT) and intermittent aeration, were investigated. During SBR operation under the intermittent aeration (aeration:non-aeration) of 7:1 and 5:3 hrs., removal efficiencies of organic compounds and TKN exhibited ascending trends as the SRT increased. The average percentages of TOC and COD removal efficiency were 95-98, whereas that of TKN was 95-99% under the intermittent aeration of 3:5 hrs., the increasing SRT lowered the organic removal efficiency. Average percentages of organic removal were 94, 92, and 84 at the SRT of 5, 10, and 30 days, respectively. Inversely, the TKN removal efficiency was improved with increasing SRT. The MBR were operated continuously under the intermittent aeration of 5:3 hrs. The increasing SRT tended to increase removal efficiencies of organic compounds and TKN. These findings were similar to the results from the SBR. The MBR could remove suspended solids up to 99% and the effluent quality met the requirements of wastewater standard. Membrane fouling caused a reduction of permeate flux, especially during non-aeration period. Longer SRT led to higher flux decline. The results were also analyzed using membrane resistance model. IT was found that cake formation was a major mechanism of membrane fouling. FTIR results showed that membrane foulants were composed of polysaccharides and proteins, possibly occurring from bacterial cell wall.

Keywords : membrane bioreactor, membrane fouling, microfiltration, sludge retention time, SBR

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ให้กับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สุพัฒน์พงษ์ มัตราช อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้คำแนะนำ และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหของวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้มอบทุนในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวก ในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณบริษัท ชิโยตะ โคฮาน ประเทศไทยจำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แผ่นเมมเบรนใช้ในการทำการทดลองในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว รวมทั้งเพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจตลอดในการทำวิทยานิพนธ์

นายเกรียงกมล ตุนวัฒนกิจเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบเอสปีอาร์.....	4
2.1.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสปีอาร์.....	5
2.1.2 ขั้นตอนการเกิดแอกทิเวเต็ดสลัดจ์.....	6
2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบเอสปีอาร์.....	7
2.1.4 การกำจัดไนโตรเจนออกจากน้ำเสีย.....	8
2.2 กระบวนการเมมเบรน.....	10
2.2.1 ประเภทของเมมเบรน.....	10
2.2.2 รูปแบบของเมมเบรน.....	12
2.2.3 ข้อจำกัดของเมมเบรน.....	14
2.2.4 กลไกการทำงานของเมมเบรน.....	15
2.2.5 ทฤษฎีไมโครฟิลเตรชัน.....	15
2.2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของ Membrane Bioreactor.....	19
2.2.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ Membrane Fouling.....	20
2.2.8 แบบจำลองความต้านทานของการอุดตันแบบอนุกรม.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.9 การทำความสะอาดเมมเบรน.....	22
2.3 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่มีไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนแบบจมตัว.....	25
2.3.1 หลักการและองค์ประกอบในการทำงานของระบบ ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน.....	25
2.3.2 หลักการออกแบบระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน.....	26
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี.....	31
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.2.1 การติดตั้งและการทำงาน.....	32
3.2.2 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.2.3 ขั้นตอนการวิจัย.....	38
3.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ.....	39
3.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียถังปฏิกรณ์ชีวภาพ แบบเอสบีอาร์.....	40
3.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ MBR.....	41
3.3.3 การศึกษาการอุดตันของเมมเบรนด้วยแบบจำลอง ความต้านทานแบบอนุกรม.....	42
3.3.4 การศึกษาวิธีการทำความสะอาดเมมเบรน.....	43
3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	43
3.4.1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์.....	43
3.4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะเมมเบรน.....	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	45
4.1 การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกรณ์เอสบีอาร์.....	45
4.1.1 ผลของอัตราภาระสารอินทรีย์และอายุสัปดาห์ต่อประสิทธิภาพ การกำจัดสารอินทรีย์และไนโตรเจน.....	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 ผลของระยะเวลาการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศ.....	48
4.2 การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน.....	56
4.2.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน.....	56
4.2.2 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจน ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน.....	60
4.3 ศึกษาอายุสลัดจ์ที่มีผลต่อการอุดตันของเมมเบรน.....	63
4.3.1 ฟลักซ์ของน้ำกลั่นผ่านเมมเบรน.....	63
4.3.2 การลดลงของฟลักซ์.....	63
4.3.3 การวิเคราะห์การอุดตันด้วย Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR).....	66
4.4 การกลับคืนของฟลักซ์หลังการทำความสะอาดเมมเบรน.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	71
บรรณานุกรม.....	72
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ตารางแสดงข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ.....	75
ภาคผนวก ข. ตารางแสดงข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน.....	86
ภาคผนวก ค. ฟลักซ์ การอุดตันของเมมเบรนและการทำความสะอาด.....	92
ภาคผนวก ง. ตัวอย่างการคำนวณค่าต่าง ๆ.....	97
ประวัติผู้เขียน.....	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ขั้นตอนการทำงานของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเอสปีอาร์.....	34
3.2 คุณสมบัติของเมมเบรน.....	36
3.3 ส่วนประกอบและความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์.....	38
3.4 ตารางแสดงอัตราการถ่ายเทของตะกอนต่อวัน.....	40
3.5 การทดสอบผลของสภาวะการเติมอากาศและการขาดอากาศ.....	41
3.6 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์.....	43
ก.1.1 ผลของอัตราการระส่ำอินทรีย์ต่อการกำจัดที่ไอซี.....	76
ก.1.2 ผลของอัตราการระส่ำอินทรีย์ต่อการกำจัดซีไอดี.....	77
ก.1.3 ผลของอัตราการระส่ำอินทรีย์ต่อการกำจัดที่เคเอ็น.....	78
ก.2.1 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 7 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 1 ชั่วโมงต่อ ประสิทธิภาพ การกำจัดที่ไอซี.....	79
ก.2.2 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 5 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 3 ชั่วโมงต่อ ประสิทธิภาพ การกำจัดที่ไอซี.....	79
ก.2.3 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 3 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 5 ชั่วโมงต่อ ประสิทธิภาพ การกำจัดที่ไอซี.....	80
ก.2.4 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 7 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 1 ชั่วโมงต่อ ประสิทธิภาพ การกำจัดซีไอดี.....	80
ก.2.5 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 5 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 3 ชั่วโมงต่อ ประสิทธิภาพ การกำจัดซีไอดี.....	81
ก.2.6 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 3 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 5 ชั่วโมงต่อ ประสิทธิภาพ การกำจัดซีไอดี.....	81
ก.2.7 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 7 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 1 ชั่วโมงต่อ ประสิทธิภาพ การกำจัดที่เคเอ็น.....	82
ก.2.8 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 5 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 3 ชั่วโมงต่อ ประสิทธิภาพ การกำจัดซีไอดี.....	82
ก.2.9 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 3 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 5 ชั่วโมงต่อ ประสิทธิภาพ การกำจัดซีไอดี.....	83
ก.3.1 โปรไฟล์การลดลงที่ไอซี ในสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่าง ๆ.....	83

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.3.2 โปรไฟล์การลดลงซีไอดีในสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่าง ๆ.....	84
ก.3.3 โปรไฟล์การลดลงทีเคเอ็นในสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่าง ๆ.....	84
ก.3.4 โปรไฟล์การลดลงไนเตรทในสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่าง ๆ.....	85
ก.3.5 โปรไฟล์ของค่าดีไอในสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่าง ๆ.....	85
ข.1.1 ผลการกำจัดที่ไอซีของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 5 วัน.....	87
ข.1.2 ผลการกำจัดที่ไอซีของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 10 วัน.....	87
ข.1.3 ผลการกำจัดที่ไอซีของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 30 วัน.....	88
ข.1.4 ผลการกำจัดซีไอดีของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 5 วัน.....	88
ข.1.5 ผลการกำจัดซีไอดีของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 10 วัน.....	89
ข.1.6 ผลการกำจัดซีไอดีของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 30 วัน.....	89
ข.1.7 ผลการกำจัดทีเคเอ็นของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 5 วัน.....	90
ข.1.8 ผลการกำจัดทีเคเอ็นของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 10 วัน.....	90
ข.1.9 ผลการกำจัดทีเคเอ็นของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 30 วัน.....	91
ค.1.1 ฟลักซ์ของการทดสอบความแม่นยำของของเมมเบรน.....	93
ค.2.1 ค่าความต้านทานภายใน 30 นาทีของการอุดตันรูปแบบต่าง ๆ ที่อายุสลัดจ์ 5 10 และ 30 วัน.....	93
ค.2.2 ค่าความต้านทานภายใน 1 ชั่วโมงของการอุดตันรูปแบบต่าง ๆ ที่อายุสลัดจ์ 5 10 และ 30 วัน.....	94
ค.2.3 ค่าความต้านทานภายใน 2 ชั่วโมงของการอุดตันรูปแบบต่าง ๆ ที่อายุสลัดจ์ 5 10 และ 30 วัน.....	94
ค.2.4 ค่าความต้านทานภายใน 5 ชั่วโมงของการอุดตันรูปแบบต่าง ๆ ที่อายุสลัดจ์ 5 10 และ 30 วัน.....	94
ค.2.5 ค่าความต้านทานภายใน 8 ชั่วโมงของการอุดตันรูปแบบต่าง ๆ ที่อายุสลัดจ์ 5 10 และ 30 วัน.....	95
ค.2.6 ค่าความต้านทานภายใน 48 ชั่วโมงของการอุดตันรูปแบบต่าง ๆ ที่อายุสลัดจ์ 5 10 และ 30 วัน.....	95
ค.3.1 การลดลงของฟลักซ์และการทำความสะอาด.....	96

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หลักการทำงานของระบบแยกทิวเด็ดสลัดจ์.....	5
2.2 ขั้นตอนการดำเนินการของระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสปีอาร์.....	6
2.3 ชนิดของเมมเบรนและช่วงขนาดอนุภาคสารต่าง ๆ ที่สามารถกักแยกได้.....	10
2.4 รูปแบบต่าง ๆ ของเมมเบรน.....	13
2.5 ภาพแสดงปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน.....	18
2.6 ภาพแสดงปรากฏการณ์เจลโพลาไรเซชัน.....	18
2.7 ลักษณะการเกิด fouling ของแผ่นเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดต่าง ๆ เทียบกับ ขนาดตัวถูกละลาย.....	20
2.8 แผนภาพแสดงค่าความต้านทานแบบอนุกรมที่เกิดขึ้นจากการอุดตัน.....	22
2.9 ตัวอย่างการออกแบบเมมเบรนยูนิต, ท่อจ่ายอากาศ และการจัดการวาง ในถังเติมอากาศของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน.....	26
3.1 การติดตั้งระบบเอสปีอาร์ (ก) รายละเอียดของถัง SBR (ข) ก่อนเติมเชื้อจุลินทรีย์ และ (ค) หลังเติมเชื้อจุลินทรีย์.....	33
3.2 ภาพระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ค่าอายุสลัดจ์แตกต่างกัน.....	35
3.3 รายละเอียดของถัง MBR.....	36
3.4 แผนภาพแสดงการทำงานของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน.....	37
3.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	39
4.1 ผลของอัตราภาระสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบเอสปีอาร์ในการ กำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ (ก) ทีโอซี (ข) ซีไอดี.....	46
4.2 ผลของอัตราภาระสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบเอสปีอาร์ในการ กำจัดไนโตรเจนในรูปของทีเคเอ็น.....	47
4.3 ผลของสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัด สารอินทรีย์ในรูปของ (ก) ทีโอซี (ข) ซีไอดี.....	48
4.4 โปรไฟล์ของค่าดีไอในสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่าง ๆ (ก) 7:1 ชม. (ข) 5:3 ชม. และ (ค) 3:5 ชม.....	50
4.5 โปรไฟล์การลดลงของทีโอซี ในสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่าง ๆ (ก) 7:1 ชม. (ข) 5:3 ชม. และ (ค) 3:5 ชม.....	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 โปรไฟล์การลดลงของซีไอดีในสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่าง ๆ	
(ก) 7:1 ชม. (ข) 5:3 ชม. และ (ค) 3:5 ชม.....	52
4.7 ผลของสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น..	53
4.8 โปรไฟล์การลดลงของทีเคเอ็นในสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่าง ๆ	
(ก) 7:1 ชม. (ข) 5:3 ชม. และ (ค) 3:5 ชม.....	54
4.9 โปรไฟล์การลดลงของไนเตรท ในสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่าง ๆ	
(ก) 7:1 ชม. (ข) 5:3 ชม. และ (ค) 3:5 ชม.....	55
4.10 โปรไฟล์ของการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ (ก) ทีไอซี (ข) ซีไอดี ภายในถังปฏิกรณ์	
ชีวภาพก่อนผ่านเมมเบรนโดยการเติมอากาศ 5 ชม.และหยุดเติมอากาศ 3 ชม.....	57
4.11 โปรไฟล์ของการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ (ก) ทีไอซี (ข) ซีไอดี หลังผ่านถัง	
ปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน ทำการเติมอากาศ 5 ชม.และหยุดเติมอากาศ 3 ชม.....	58
4.12 ประสิทธิภาพการกำจัด (ก) ทีไอซี (ข) ซีไอดี และ (ค) ทีเคเอ็น ระหว่าง ถังปฏิกรณ์	
ชีวภาพกับถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน.....	59
4.13 การเปรียบเทียบปริมาณของแข็งแขวนลอย ในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์	
ชีวภาพและถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน.....	60
4.14 การเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกรณ์ชีวภาพ	
เมมเบรน (ก) ภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพก่อนผ่านเมมเบรน (ข) หลังผ่านเมมเบรน....	60
4.15 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด ทีเคเอ็นระหว่าง (ก) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ	
(ข) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน.....	61
4.16 การเปรียบเทียบปริมาณ ไนเตรทระหว่างในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ	
(ก) ก่อนผ่านเมมเบรน (ข) หลังผ่านเมมเบรน.....	62
4.17 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง ค่าความดันควบคุม กับอัตราการผลิตน้ำ	
แพร่ผ่านเมมเบรนที่สะอาด (อุณหภูมิ 30 °C).....	63
4.18 แสดงค่าเพอมีเอทพลั๊กซ์ที่ลดลงของอายุสัปดาห์ที่แตกต่างกัน	
ที่เวลากักเก็บ 8 ชั่วโมง (อุณหภูมิ 30 °C).....	64
4.19 ความต้านทานของการอุดตันรูปแบบต่าง ๆ เมื่อค่าของอายุสัปดาห์ที่เพิ่มมากขึ้น.....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 การอุดตันของสารบริเวณผิวเมมเบรน ทำให้ความต้านทานของเมมเบรนเพิ่มขึ้น (ก) เมมเบรนสะอาดที่ยังไม่ใช้งาน (ข) อายุสัปดาห์ 5 วัน (ค) อายุสัปดาห์ 10 วัน และ (ง) อายุสัปดาห์ 30วัน.....	66
4.21 สเปกตรัม FTIR แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารอุดตันบนเมมเบรนที่อายุสัปดาห์ (ก) อายุสัปดาห์ 5 วัน (ข) อายุสัปดาห์ 10 วัน (ค) อายุสัปดาห์ 30 วัน.....	68
4.22 ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากการทำความสะอาดด้วยขั้นตอนต่างๆ (อุณหภูมิ 30 °C)	69

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
FTIR	ฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
MF	เมมเบรนแบบไมโคร
NF	เมมเบรนแบบนาโน
RO	เมมเบรนแบบออสโมซิสผันกลับ
UF	เมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชัน
TOC	สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด
J_v	อัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
ΔP	ค่าความแตกต่างของแรงดัน
r_m	ค่าความต้านทานที่เกิดจากเมมเบรน
r_c	ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นเค้ก
r_g	ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นเจล
r_a	ค่าความต้านทานที่แบบถาวร
σ	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันออสโมติก
μ	ค่าความหนืดของน้ำ
μm	ไมโครเมตร
cm^{-1}	หนึ่งต่อเซนติเมตร
kPa	กิโลปาสคาล
LMH	ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง
$L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง
$L \cdot m^{-1} \cdot h^{-1} \cdot kPa^{-1}$	ลิตรต่อเมตรต่อชั่วโมงต่อกิโลปาสคาล
m	เมตร
m^{-1}	หนึ่งต่อเมตร
$mg \cdot L^{-1}$	มิลลิกรัมต่อลิตร
$m \cdot s^{-1}$	เมตรต่อวินาที
psi	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชนที่มีค่าสารอินทรีย์และไนโตรเจนสูง หากปล่อยออกสู่แหล่งน้ำโดยตรงย่อมก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกันและควบคุมมลพิษต่าง ๆ มิให้ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม โดยวิธีการบำบัดสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การใช้ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ (Activated Sludge, AS) ระบบถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) และระบบจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor, RBC) เป็นต้น ระบบตะกอนเร่งซึ่งเป็นระบบบำบัดที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถลดสารอินทรีย์ได้ถึงร้อยละ 90 (อมรศักดิ์ ตปนิยพันธ์. 2542) และยังใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยกว่าระบบอื่น แต่ก็มีข้อเสีย คือ ค่าก่อสร้างถังตกตะกอน ค่าใช้จ่ายในการบำบัดสารอินทรีย์ที่สูง ระบบมีความซับซ้อน เกิดตะกอนส่วนเกินจำนวนมาก

การใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน (Membrane bioreactor, MBR) ในการบำบัดน้ำเสีย เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีผสมผสานระหว่างระบบตะกอนเร่งและเมมเบรน ข้อดีของ MBR คือ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสร้างถังตกตะกอน คุณภาพน้ำที่ผลิตได้มีคุณภาพสูง ใช้พื้นที่น้อยในการติดตั้งระบบ มีสลัดจ์เกิดขึ้นน้อยกว่าระบบ AS นอกจากนี้ระบบ MBR ยังสามารถกำจัดสารประกอบต่าง ๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ๆ ได้แก่ อนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.01-10 ไมโครเมตร รวมถึงแบคทีเรีย ยีสต์ เชื้อรา และปรสิตอื่น ๆ (Mallevalle *et al.*, 1996) และสามารถกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสีย โดยปฏิกิริยาทางชีวภาพทั้งในสภาวะที่ใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ เพราะสามารถทำให้กลไกไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ภายในระบบเดียวกัน (Wang *et al.* 2004)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการลดปริมาณสารอินทรีย์ ไนโตรเจน ของแข็งแขวนลอย ในน้ำเสียสังเคราะห์ เปรียบเทียบกับการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบตะกอนเร่งแบบเอสปีอาร์ โดยทำการศึกษาค้นคว้าที่มีผลต่อการทำงานของ MBR ได้แก่ ผลของอายุสลัดจ์ ผลของสภาวะการเติมอากาศ และการขาดอากาศ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตัน และประสิทธิภาพการคัดแยกสารของเมมเบรน ได้แก่ อายุสลัดจ์ และช่วงเวลาของการกรอง รวมทั้งการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อให้เมมเบรนสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลจากการวิจัยสามารถประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียประเภทอื่น ๆ นอกจากนี้ คุณภาพน้ำที่ได้หลังการ

บำบัดด้วย MBR สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ อันจะเป็นการลดปัญหาการขาดแคลนน้ำใช้ที่กำลังเกิดขึ้นในปัจจุบันและอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย MBR โดยเปรียบเทียบกับ SBR ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนโดยระบบ SBR และ MBR
3. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเมมเบรนในระบบ MBR
4. เพื่อศึกษาวิธีการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยวิธีการทางกายภาพ และทางเคมี

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ MBR และระบบ SBR โดยศึกษาการกำจัด ซีโอดี ทีโอดี ทีเคเอ็น และของแข็งแขวนลอย
2. เมมเบรนที่ใช้ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเป็นเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน (Microfiltration Membrane, MF) ชนิดแผ่นเรียบ (plate and frame)
3. น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ เตรียมจากน้ำตาลซูโครสซึ่งใช้เป็นแหล่งคาร์บอน
4. ศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ MBR ได้แก่ ผลของอายุสัลด์จ์ และผลของสภาวะการเติมอากาศและการขาดอากาศ
5. ศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการอุดตันและประสิทธิภาพการคัดแยกสารของเมมเบรน ได้แก่ อายุสัลด์จ์ และช่วงเวลาของการกรอง
6. ศึกษาวิธีการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยวิธีทางกายภาพ และทางเคมี โดยการทำทำความสะอาดทางกายภาพใช้วิธี ได้แก่ ทำความสะอาดทางกล (mechanical cleaning) ส่วนการทำทำความสะอาดทางเคมีใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ กรดซิตริก ($C_6H_8O_7$)
7. พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ในการศึกษา คือ ซีโอดี ทีโอดี พีเอช ของแข็งแขวนลอย อุณหภูมิ แอมโมเนียไนโตรเจน ไนไตรท์ ไนเตรท และอัตราการใช้
8. ปัจจัยที่ทำการควบคุม ได้แก่ ระยะเวลาเก็บน้ำ (HRT) ที่ 8 ชั่วโมง และพีเอช ภายในถังปฏิกรณ์ในช่วง 6.5-8.5 โดยใช้สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ในการควบคุมพีเอช

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสีย
2. สามารถประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม ที่มีพื้นที่จำกัดในการติดตั้งระบบ และลดขนาดของระบบบำบัดน้ำเสีย
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนให้เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนในน้ำเสีย โดยอาศัยกลไกไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้ภายในระบบเดียวกัน
4. ทราบถึงปัญหาของการกรองด้วยเมมเบรน เนื่องจากการอุดตัน และนำไปสู่แนวทางการแก้ปัญหการอุดตันของเมมเบรน
5. สามารถนำน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ประโยชน์ได้ใหม่เพื่อลดปัญหาการขาดแคลนน้ำใช้ที่กำลังเกิดขึ้นในปัจจุบันและอนาคต

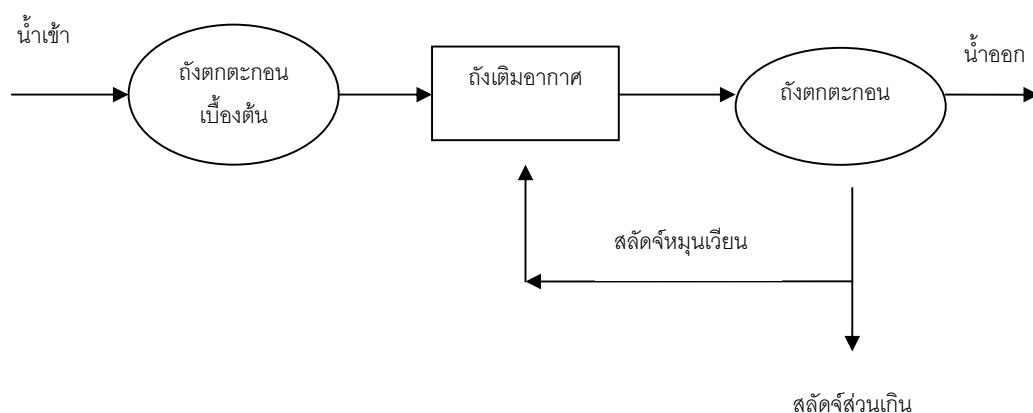
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบเอสปีอาร์

ระบบเอสปีอาร์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพประเภทหนึ่ง ซึ่งอาศัยหลักการของระบบแอคติเวเตดสลัดจ์ (Activated Sludge, AS) โดยทั่วไประบบ AS ประกอบด้วยถังปฏิกริยาซึ่งเป็นถังเติมอากาศ (aeration tank) และถังตกตะกอน โดยน้ำทิ้งจะถูกสูบมาเข้าถังเติมอากาศ เพื่อทำปฏิกริยากับแบคทีเรีย ภายในถังเติมอากาศจะมีระบบเติมอากาศเพื่อทำหน้าที่ให้ออกซิเจนแก่แบคทีเรีย และกวนเพื่อให้ตะกอนแบคทีเรียอยู่ในลักษณะแขวนลอยกระจายไปทั่วถังเติมอากาศ น้ำผสมระหว่างน้ำทิ้งกับตะกอนแบคทีเรียในถังเติมอากาศเรียกว่า Mixed - Liquor ในทางปฏิบัติมีการบอกปริมาณหรือความเข้มข้นของแบคทีเรียในถังเติมอากาศเป็นปริมาณแขวนลอยใน Mixed-Liquor (Mixed-Liquor Suspended Solids = MLSS) หรือเป็นปริมาณตะกอนแขวนลอยที่เป็นสารอินทรีย์ (Mixed-Liquor Volatile Suspended Solids = MLVSS) สำหรับอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียจะถูกเร่งให้เร็วขึ้น โดยการเพิ่มทั้งปริมาณออกซิเจนและปริมาณแบคทีเรีย ดังนั้น แบคทีเรียจะย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง และเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว ปริมาณแบคทีเรียในถังเติมอากาศจะมีมากจนจับกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ มีสีน้ำตาลเข้ม เรียกว่า แอคติเวเตดสลัดจ์ หลังจากถูกกักอยู่ในถังเติมอากาศเป็นเวลาหลายชั่วโมง (ระยะเวลาที่กักน้ำในถังเติมอากาศขึ้นอยู่กับลักษณะและปริมาณของน้ำที่ไหล เข้าโดยทั่วไปจะมีระยะเวลาเก็บกักในถังเติมอากาศประมาณ 0.5-24 ชั่วโมง) Mixed-Liquor จะไหลจากถังเติมอากาศเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อแยกตะกอนแบคทีเรียออก จะได้น้ำทิ้งที่ใสสะอาด และมีค่าบีโอดีต่ำ ส่วนตะกอนแบคทีเรียที่จมอยู่บริเวณก้นถังตกตะกอนส่วนใหญ่จะถูกสูบกลับเข้าถังเติมอากาศ เพื่อรักษาปริมาณแบคทีเรียในถังเติมอากาศให้คงที่ และตะกอนแบคทีเรียส่วนเกิน (Excess sludge) ที่เกิดขึ้นจากการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะถูกนำไปกำจัด ดังแสดงในรูปที่ 2.1

การนำตะกอนแบคทีเรียส่วนเกินไปทิ้ง เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องกระทำอย่างสม่ำเสมอเพื่อรักษาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในระบบให้มีค่าพอเหมาะ ซึ่งเป็นหลักสำคัญในการควบคุมการทำงานของระบบแอคติเวเตดสลัดจ์ให้มีอัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์ (Food to Microorganism Ratio หรือ F/M) ประมาณ 0.2-0.5 กก.BOD/กก.MLVSS.วัน (Grady *et al.* 1999) ส่งผลให้อาหารหรือมลสารที่มีอยู่ในน้ำเสียสามารถถูกกำจัดให้หมดไปหรือมีค่าเหลืออยู่น้อย ซึ่งใช้อาหารเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโต (Food limiting factor)



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Grady *et al.*, 1999)

2.1.1. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสปีอาร์ (Sequencing Batch Reactor)

ระบบบำบัดน้ำเสียเอสปีอาร์ เป็นระบบที่ใช้ถังปฏิกรณ์เพียงถังเดียว ไม่มีการใช้ถังตกตะกอน ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้แพร่หลายเป็นอย่างมากในการบำบัดน้ำเสียทั้งน้ำเสียชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม แสดงดังรูปที่ 2.2

หลักการทำงานของระบบ

- 1) ขั้นตอนการเติมน้ำเสีย (Fill) การเติมน้ำเสีย ลงในถังปฏิกรณ์พร้อมเริ่มการบำบัด
- 2) ขั้นตอนเติมอากาศ (React) ใช้ใบพัดกวน กวนน้ำเสีย พร้อมกับการเติมอากาศเพื่อให้จุลินทรีย์ทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึง ซึ่งในตอนนี้จะมีการเกิดตะกอนร่งเกิดขึ้นดังหัวข้อ 2.1.1
- 3) ขั้นตอนการตกตะกอน (Settle) หยุดการเติมอากาศและปั่นกวน เพื่อให้เกิดการตกตะกอน แยกชั้นระหว่างน้ำกับตะกอน
- 4) ขั้นตอนระบายน้ำออก (Draw) นำน้ำใสส่วนบนออกจากระบบ แล้วเริ่มกระบวนการใหม่

2.1.3. ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบเอสปีอาร์

ระบบเอสปีอาร์จะทำงานอย่างมีประสิทธิภาพได้ก็ต่อเมื่อสภาวะแวดล้อมในถังปฏิกรณ์เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย ดังนี้

1) **ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ** ต้องไม่น้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอดเวลาถ้าต่ำกว่านี้จะทำให้โปรโตซัวตาย น้ำทิ้งจะขุ่น และจุลินทรีย์ชนิดเป็นเส้น (Filamentous bacteria) จะเพิ่มจำนวนมากขึ้น ซึ่งทำให้ตะกอนเกาะกันได้ยาก ถ้าไม่มีออกซิเจนเลย Mixed-Liquor จะเน่าเหม็น

2) **อายุสลัดจ์** ระบบเอสเอสแบบธรรมดา ค่าอายุสลัดจ์ประมาณ 5 - 10 วัน การควบคุมหรือเปลี่ยนแปลงค่าอายุสลัดจ์ ทำได้โดยการนำตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกินไปทิ้ง หากนำไปทิ้งมากค่าอายุสลัดจ์ก็จะลดลงและหากนำไปทิ้งน้อยลง ค่าอายุสลัดจ์ก็จะเพิ่มมากขึ้น ถ้าลดค่าอายุสลัดจ์จะมีน้ำหนักของตะกอนจุลินทรีย์ที่ต้องนำไปทิ้งเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์มีอัตราการเจริญเติบโตสูงขึ้น และถ้าเพิ่มค่าอายุสลัดจ์ก็จะทำให้เกิดผลตรงข้าม

3) **สารอาหาร** จะต้องมีอาหารเสริมสร้างพอเพียง ที่สำคัญ ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในอัตราส่วน บีโอดี:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส 100:5:1 นอกจากนี้ยังต้องมีแร่ธาตุอื่นอีก เช่น โปแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก โดยทั่วไป แร่ธาตุเหล่านี้อยู่ในน้ำเสีย การขาดอาหารเสริมที่สำคัญเหล่านี้ จะทำให้จุลินทรีย์ที่สร้างฟล็อกเติบโตได้ไม่ดีจนทำให้จุลินทรีย์ชนิดที่เป็นเส้นใย เจริญเติบโตได้มากกว่า ซึ่งจะทำให้ตะกอนร่งตกตะกอนได้ยากและเกิดเป็นชั้นอัดขึ้นมาสูงในถังเดิมอากาศ และอาจไหลล้นออกมากับน้ำทิ้งจนระบบไม่สามารถทำงานต่อไปได้อีก นอกจากนี้การที่จุลินทรีย์หลายชนิด เจริญเติบโตไม่ดีจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานต่าง ๆ ของระบบต่ำลงด้วย

4) **ค่าพีเอช** จะต้องอยู่ในช่วง 6.5-9.0 ถ้าพีเอชต่ำกว่า 6.5 ว่าจะเจริญเติบโตแข่งขันกับแบคทีเรีย และถ้าพีเอชลดลงถึง 4.5 ว่าจะมีมากกว่าแบคทีเรีย ถ้าพีเอชสูงกว่า 9 อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์จะลดลง ทำให้ความต้องการออกซิเจนทางชีวภาพลดลงอย่างช้า ๆ

5) **อุณหภูมิ** ต้องควบคุมไม่ให้เกิน 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากอัตราการลดลงของบีโอดีจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่จะลดลงถ้าอุณหภูมิสูงเกิน 37 องศาเซลเซียส

6) **การกวน** ภายในถังเดิมอากาศจะต้องมีการกวนอย่างทั่วถึงเพื่อให้จุลินทรีย์ได้สัมผัสกับน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบจับตัวกันเป็นฟล็อกที่ดี และป้องกันมิให้ตะกอนจุลินทรีย์ตกตะกอน

7) **ระยะเวลาในการบำบัด** ระบบต้องใช้เวลาที่มากพอที่จุลินทรีย์จะใช้ในการย่อยสลายมลสารต่าง ๆ หากระยะเวลาสั้นเกินไปสารที่ย่อยสลายได้ยากจะยังคงเหลืออยู่ ทำให้มีบีโอดีในน้ำเสียมีค่าสูง

2.1.4 การกำจัดไนโตรเจนออกจากน้ำเสีย (Nitrogen Removal)

ไนโตรเจนเป็นสารอาหารที่มีความจำเป็นในการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต โดยปกติน้ำเสียชุมชนจะมีความเข้มข้นไนโตรเจน 30 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปอินทรีย์และแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งมากเกินความต้องการของระบบบำบัดทางชีวภาพ ทำให้สารเหล่านี้ยังคงเหลืออยู่ในน้ำทิ้ง จุลินทรีย์จะสามารถย่อยสลายสารเหล่านี้ต่อทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง ส่งผลให้สัตว์น้ำขาดออกซิเจน นอกจากนี้ยังเป็นธาตุอาหารของพืชน้ำทำให้พืชน้ำเติบโตอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้แหล่งน้ำเน่าเสียในที่สุด

กระบวนการกำจัดไนโตรเจน

1) **วิธีทางกายภาพ** โดยการเป่าไล่ด้วยอากาศ (Air Stripping) จะกำจัดได้เฉพาะแอมโมเนียไนโตรเจน วิธีการกรองกำจัดเฉพาะอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปอนุภาคเท่านั้น ส่วนรีเวอร์สออสโมซิสกำจัดไนโตรเจนได้ทุกรูป แต่ประสิทธิภาพขึ้นกับชนิดของเมมเบรนที่ใช้

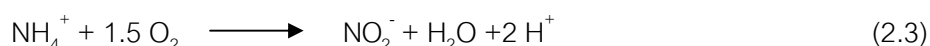
2) **วิธีทางเคมี** ได้แก่ การเติมคลอรีนจะเพื่อออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นก๊าซไนโตรเจน วิธีโคแอกกูเลชันและการดูดซับด้วยถ่านสามารถกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจน การแลกเปลี่ยนประจุจะกำจัดไนโตรเจนได้ทุกรูปขึ้นอยู่กับชนิดของเรซิน

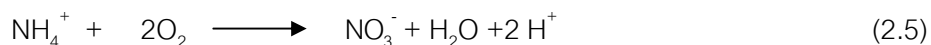
3) **วิธีทางชีวภาพ** เป็นวิธีการกำจัดไนโตรเจนที่ประหยัดและนิยมใช้มากที่สุด โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงรูปต่าง ๆ ในวัฏจักรของไนโตรเจน ตามกระบวนการ ดังนี้

- แบคทีเรียที่มีอยู่ทั่วไปในท่อบรรวม และระบบบำบัดน้ำเสีย จะใช้เอนไซม์เปลี่ยนอินทรีย์ไนโตรเจนไปเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งเกิดได้รวดเร็ว และสมบูรณ์ (Ammonification)

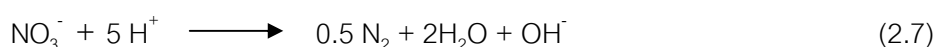
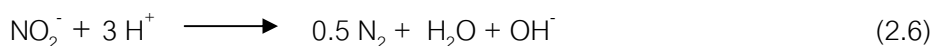
- จุลชีพใช้แอมโมเนียไนโตรเจนเพียงเล็กน้อยในอัตราส่วน บีโอดี : ไนโตรเจน เท่ากับ 100:5 เป็นสารอาหารในปฏิกิริยาชีวเคมีกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน และสร้างเซลล์ใหม่ (Assimilation)

ในสภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic Condition) อย่างเพียงพอ แอมโมเนียไนโตรเจนจะถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนรูปไปเป็นไนไตรต์ (NO_2^-) และไนเตรต (NO_3^-) ในกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) โดยแบคทีเรียออโตโทรฟ (Autotroph) คือ ไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (Nitrifying bacteria) 2 ชนิด ได้แก่ ไนโตรโซโมนาส (Nitrosomonas) ไนโตรแบคเตอร์ (Nitrobacterbacteria) ตามลำดับ การออกซิไดซ์แอมโมเนียไนโตรเจนเป็นไนเตรตไนโตรเจนต้องใช้ออกซิเจน 4.6 กิโลกรัม/ NH_4^+ 1 กิโลกรัม นอกจากนี้ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะมี H^+ เกิดขึ้น ทำให้พีเอชมีค่าลดลงทำให้ต้องมีการปรับพีเอช โดยการเติมด่างเพื่อรักษาค่าพีเอชภายในถึงปฏิกรณ์ไนตริฟิเคชันแสดงดังสมการ 2.3-2.5





ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Anaerobic condition) และมีแหล่งอาหารคาร์บอนเพียงพอ จุลินทรีย์พวกเฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph) จะดึงออกซิเจนจากไนเตรตมาใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนและแบ่งเซลล์ แล้วปลดปล่อยไนโตรเจนออกจากน้ำเสียในรูปก๊าซไนโตรเจน เรียกกระบวนการนี้ว่าดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) การรีดิวซ์ $\text{NO}_2\text{-N}$ และ $\text{NO}_3\text{-N}$ ให้เป็นก๊าซไนโตรเจน จะต้องใช้ H^+ และเกิด OH^- ทำให้ค่าพีเอชสูงขึ้น ปฏิริยาดีไนตริฟิเคชันแสดงดังสมการ 2.6 – 2.7



ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิริยาไนตริฟิเคชัน-ดีไนตริฟิเคชัน

1) ปฏิริยาไนตริฟิเคชัน

ก. อายุสลัดจ์ เนื่องจากอัตราการเจริญเติบโตของไนตริฟายเออร์จะช้ากว่าแบคทีเรียที่ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบเอเอส ดังนั้น อายุสลัดจ์ที่เหมาะสม คือ 3-5 วัน

ข. ค่าพีเอช มีผลต่อการเจริญเติบโตของไนตริฟายเออร์เป็นอย่างมาก ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไนโตรโซโมแนส และไนโตรแบคเตอร์ คือ 8.0-8.5 และ 7.0-8.0 ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าพีเอชยังมีผลต่อปริมาณแอมโมเนีย และปริมาณไนไตรต์ซึ่งมีความเป็นพิษต่อไนตริฟายเออร์ และความเป็นด่าง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะสมโดยค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อระบบ คือ ในช่วงที่เป็นกลาง

ค. อุณหภูมิ มีผลต่อการเจริญเติบโตของไนตริฟายเออร์มากกว่าแบคทีเรียที่ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ อัตราเร็วในการเกิดปฏิริยาจะสูงขึ้นเมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น

ง. สารพิษ สารประกอบอินทรีย์ และอนินทรีย์หลายชนิดมีความเป็นพิษ และขัดขวางการเจริญเติบโตของไนตริฟายเออร์ เช่น แอมโมเนียอิสระ กรดไนตริกอิสระ

จ. ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved oxygen) ที่เหมาะสม คือ 2-3 มิลลิกรัมต่อลิตร

2) ปฏิริยาดีไนตริฟิเคชัน

ก. สภาพแอนโรบิกที่เหมาะสม ควรมีค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล (ORP) ประมาณ -200 ถึง -300 มิลลิโวลต์

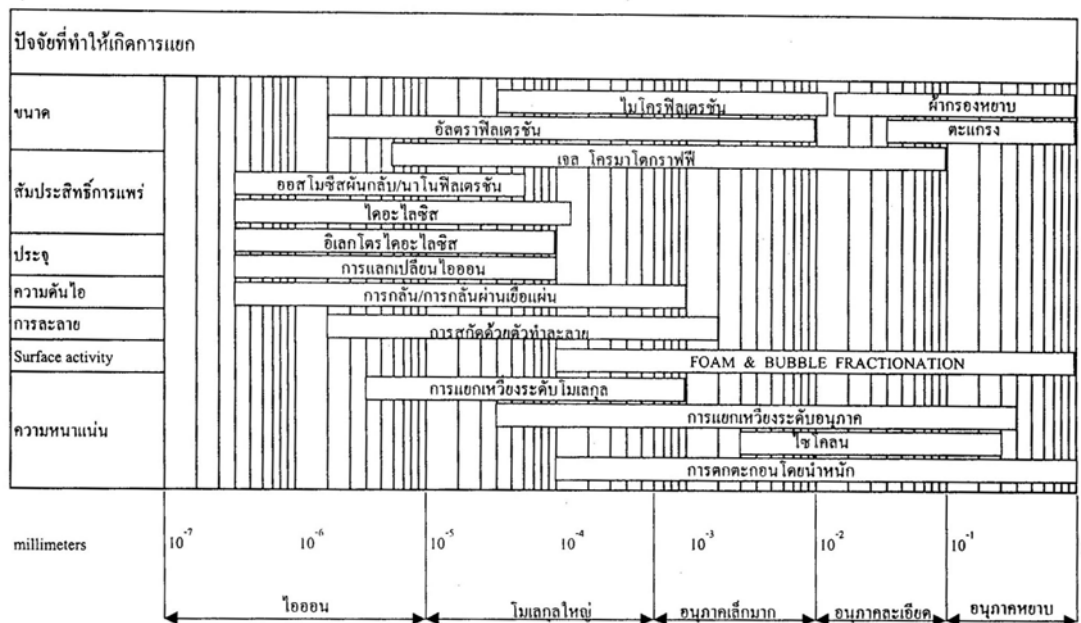
ข. ปริมาณสารอินทรีย์เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอน อาจมาจากภายนอกเซลล์ของจุลินทรีย์ ได้แก่ ปิไอดีที่มีอยู่ในน้ำเสีย หรือสารเคมีที่เติมลงไป เช่น เมทานอล กรดอะซิติก ในกรณีที่ไม่มีแหล่งคาร์บอน ภายนอกเซลล์

2.2 กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process)

กระบวนการเมมเบรน หมายถึง การนำเมมเบรนบางที่สังเคราะห์ขึ้นจากวัสดุอินทรีย์ หรืออนินทรีย์ เช่น เซลล์ลูโลสอะซิเตตและโพลีเอไมด์ มาใช้ในการแยกสารละลายออกจากของเหลว หรือก๊าซ โดยใช้แรงขับเคลื่อนในการเคลื่อนของไหลให้ซึมผ่านเยื่อเมมเบรน และกักแยกสารต่าง ๆ ไว้ในรูปของสารละลายเข้มข้น โดยไม่ยอมให้ผ่านไปได้

2.2.1 ประเภทของเมมเบรน

ความสามารถของเมมเบรนในการกักแยกสารต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับชนิดของเมมเบรน โดยจำแนกได้ตามขนาดรูช่องว่าง (Pore size) หรือการคัดเลือกตามน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight Cutoff) ของเมมเบรน ขนาดแรงขับเคลื่อน และน้ำหนักโมเลกุลของสารที่เมมเบรนสามารถแยกออกได้ แสดงไว้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ชนิดของเมมเบรนและช่วงขนาดอนุภาคสารต่าง ๆ ที่สามารถกักแยกได้ (รัตนจิระรัตน์. 2541)

ประเภทของเมมเบรนในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1) รีเวอร์สออสโมซิส (RO) บางครั้งเรียก ไฮเพอร์ฟิลเทรชัน ทำงานโดยแรงขับเคลื่อนที่มีค่าสูง หรือมากกว่า 300-1,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดันออสโมซิสของสารละลายที่จะทำการแยกการเคลื่อนของไหลให้ซึมผ่านเยื่อเมมเบรน สามารถแยกความเค็มของน้ำทะเล เกลือแร่ กรดต่าง สารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 200 สารอินทรีย์เกือบทุกชนิด รวมถึงแบคทีเรียและไวรัส มักใช้ในงานที่ต้องผลิตน้ำให้มีความบริสุทธิ์สูงร่วมกับกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

2) นาโนฟิลเทรชัน (NF) หรือการกำจัดความกระด้างโดยเมมเบรน มีสมบัติเช่นเดียวกับอาร์โอ ยกเว้น ไอออนวาเลนซ์เดียวกับสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กมากจะผ่านไปได้ และไอออนวาเลนซ์คู่กับอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 1 นาโนเมตร จะถูกแยกออก ปัจจุบันถูกประยุกต์ใช้ในงานที่มีอัตราไหลสูง และมีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากมีกำลังการผลิตที่สูง และใช้ความดันต่ำกว่าอาร์โอ

3) อิเล็กโตรไดอะไลซิส (ED) ทำงานด้วยแรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้า โดยการสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าบวกและลบให้กับแผ่นเมมเบรนสองแผ่น ซึ่งแต่ละแผ่นจะปล่อยให้อิออนที่มีประจุเหมือนกันผ่านไปได้เท่านั้น โดยน้ำจะไหลผ่านเมมเบรนในแนวสัมผัสแต่ไอออนจะเคลื่อนที่ในทิศตั้งฉากกับเมมเบรน ซึ่งไม่สามารถแยกสารอินทรีย์ แต่จะแยกสารประกอบที่แตกตัวเป็นไอออนได้เท่านั้น

4) อัลตราฟิลเทรชัน (UF) ทำงานโดยใช้แรงขับเคลื่อนที่มีค่า 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือต่ำกว่าในการเคลื่อนของไหลให้ซึมผ่านเมมเบรน โดยมีความสามารถแยกสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 500 และสารที่ไม่มีประจุ ส่วนสารที่แตกตัวเป็นไอออนจะสามารถซึมผ่านไปได้ นิยมใช้ในงาน เช่น การทำน้ำผลไม้เข้มข้น การแยกโปรตีน ฯลฯ

5) ไมโครฟิลเทรชัน (MF) ทำงานโดยใช้แรงขับเคลื่อนที่ต่ำ และมีอัตราการผลิตน้ำมากกว่าเมมเบรนชนิดอื่น ๆ ที่ความดันเดียวกัน โดยสามารถกำจัดสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ๆ ได้แก่ อนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.01-10 ไมโครเมตร รวมถึงแบคทีเรีย ยีสต์ เชื้อรา และปรสิตอื่น ๆ แต่ไม่สามารถกักแยกไอออน หรือสารละลายได้

ไมโครฟิลเทรชันเป็นเมมเบรนลำดับสุดท้าย ที่มีสถานะการทำงานอยู่ระหว่างอัลตราฟิลเทรชัน และการกรองหยาดอื่น ๆ เริ่มใช้งานในแบบการกรองตามแนวขวางกับงานประปา โดยทำหน้าที่แทนถังกรองเร็ว และพัฒนาต่อมาในงานบำบัดน้ำเสียขั้นที่สาม ซึ่งได้รับความนิยมเช่นเดียวกับ อัลตราฟิลเตรชัน จนกระทั่งทำหน้าที่แทนถังตกตะกอนที่สองของกระบวนการตะกอนเร่ง (Activated Sludge Process) ซึ่งมีทั้งแบบติดตั้งภายนอก และจมอยู่ภายในถังเดิมอากาศ ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

2.2.2 รูปแบบของเมมเบรน

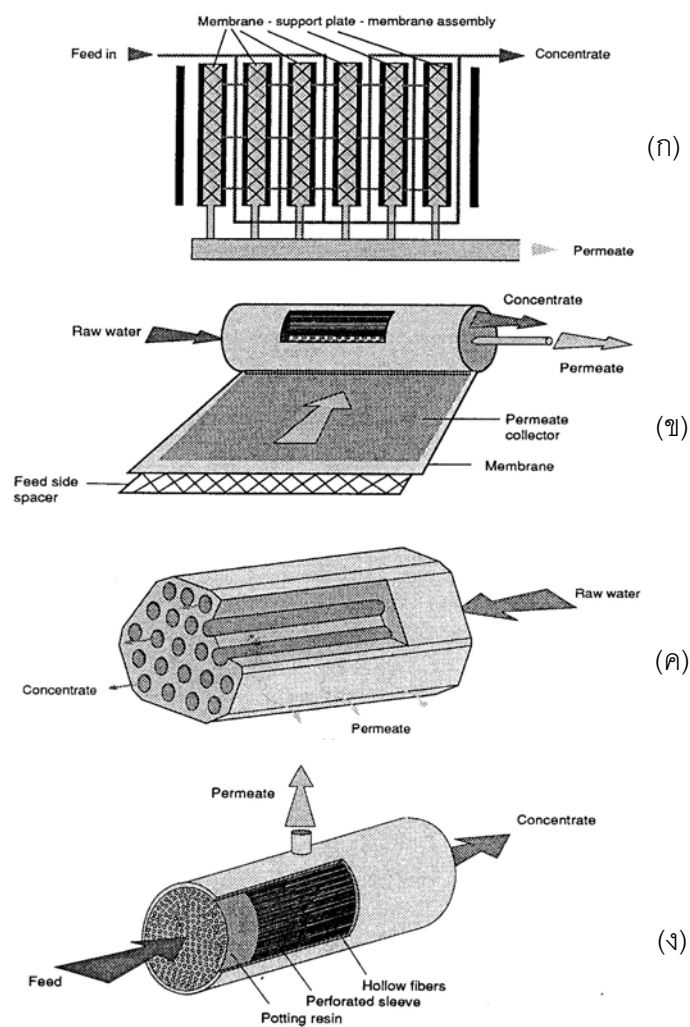
การพัฒนาารูปแบบของเมมเบรน ได้ออกแบบตามวัตถุประสงค์ และการใช้งาน โดยส่วนใหญ่จะเป็นรูปแบบแผ่น (Sheet form) และรูปทรงกระบอก (Cylindrical form) ในปัจจุบันมีการสร้างเมมเบรน แบ่งตามรูปแบบได้ 4 แบบ คือ

ก. เมมเบรนแบบหลอด (Tubular form) ใช้เมมเบรนแบบหลอดมีผนังเป็นรูปท่อนมีความทนทานต่อความดันสูง และน้ำบริสุทธิ์จะซึมผ่านออกมาตามผนังรูปท่อนของหลอดเมมเบรน หลอดเมมเบรนจะมีที่ยึดถาวรเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ระหว่างการใช้งาน สามารถถอดเปลี่ยนเมมเบรนหลอดใหม่ได้ สามารถใช้กับระบบที่มีความดันไม่คงที่ หรือระบบที่มีช่วงค่าความดันกว้าง (Fane. 1987)

ข. เมมเบรนแบบแผ่นซ้อนกัน (Plate and frame module) ใช้เมมเบรนรูปวงกลมวางซ้อนกัน และสลัดด้วยเฟรมเป็นชั้น ๆ โดยยึดสลักกลางตรงกลาง เหมาะสำหรับระบบที่สารละลายมีความเข้มข้นต่ำ และระบบที่มีการไหลแบบราบไปตามผิวสัมผัส (Laminar flow) เพราะช่องระบายน้ำมีลักษณะแคบ ๆ เป็นชั้น ๆ ในการบำรุงรักษาสามารถเปลี่ยนเฉพาะแผ่นเมมเบรน ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายน้อย (Fane. 1987)

ค. เมมเบรนแบบม้วนรูปก้นหอย (Spiral wound module) รูปแบบนี้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง จะใช้เมมเบรนแบบแผ่นวางสลับกับแผ่นรองที่มีความพรุน คลุมทับผิวหน้าด้วยตาข่าย (Porous netting) ทั้งหมดจะถูกม้วนเข้ากับท่อรับน้ำ แล้วบรรจุไว้ในกระบอก การไหลเวียนของสารละลาย จะไหลผ่านไปตามแนวกระบอกภายใต้ความดันสูง ในขณะที่น้ำบริสุทธิ์จะแพร่ผ่านเมมเบรนเข้าสู่ท่อรับน้ำที่อยู่ใจกลางกระบอก (Kooattatep.1979) เมมเบรนรูปแบบนี้จะมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรที่สูง นิยมใช้กับระบบที่มีการไหลแบบราบไปตามผิวสัมผัส สามารถใช้งานได้ดีกับระบบที่มีสถานะเป็นของไหล และราบไปตามผิวสัมผัส (Fane. 1987)

ง. เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber module) ใช้เมมเบรนที่มีลักษณะเป็นเส้นใยกลวงจำนวนมากเป็นล้านเส้นใยนำมารวมกัน แต่ละเส้นใยมีลักษณะคล้ายกับเส้นผม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 100-200 ไมโครเมตร บรรจุลงในกระบอกปิดผนึกที่มีช่องเปิดสำหรับให้สารละลายผ่านเข้าไปในกระบอก และไหลเวียนออกทางท่อสารละลายเข้มข้น น้ำบริสุทธิ์จะไหลซึมผ่านเส้นใยเมมเบรนออกทางท่อรับน้ำ เมมเบรนชนิดนี้สามารถบรรจุให้มีพื้นที่ผิวเมมเบรนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรได้สูงมาก นิยมใช้กับระบบที่มีการไหลแบบราบเรียบ สามารถใช้งานได้ดีกับระบบรีเวอร์สออสโมซิส และกระบวนการแยกก๊าซ การใช้เมมเบรนชนิดนี้ต้องการระบบกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ในเบื้องต้น (Fane. 1987) ในรูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบต่าง ๆ ของเมมเบรน



รูปที่ 2.4 รูปแบบต่างๆ ของเมมเบรน (Mallevalle *et al.* 1996)

- ก) เมมเบรนแบบแผ่นซ้อนกัน
- ข) เมมเบรนแบบม้วนรูปกันหอย
- ค) เมมเบรนแบบหลอด
- ง) เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง

2.2.3 ข้อจำกัดของเมมเบรน

ข้อจำกัดสำหรับกระบวนการแยกอนุภาคโดยใช้เมมเบรนประกอบด้วย

ก. ความเข้มข้นของประจุไอออนของอนุภาค เป็นข้อจำกัดหนึ่งที่จะต้องพิจารณาโดยเฉพาะกับระบบปฏิบัติการที่มีสถานะเป็นของไหล เพราะเมื่อน้ำบริสุทธิ์ได้ถูกแยกออกโดยแพร่ผ่านเมมเบรนไปแล้ว ประจุไอออนของอนุภาคต่าง ๆ ที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนออกไปจะตกตะกอนอยู่บริเวณชั้นผิว ทำให้อัตราการผลิตน้ำบริสุทธิ์ลดลงตามความเข้มข้นของประจุไอออนของอนุภาคต่าง ๆ ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นระบบปฏิบัติการจึงต้องการระบบกำจัดอนุภาคเข้มข้นนี้โดยตรง คือ หยุดการเดินระบบบำบัด และทำความสะอาดเมมเบรนล้างสิ่งอุดตันต่าง ๆ

ข. ความสกปรกของเมมเบรน เกิดจากการตกตะกอนของอนุภาคต่าง ๆ บริเวณผิวหน้า เมมเบรนที่ไม่สามารถทำความสะอาดออกได้ทั้งหมด ทำให้ประสิทธิภาพของเมมเบรนลดลง ต้องทำความสะอาดบ่อยขึ้น และอาจจะต้องเปลี่ยนเมมเบรนใหม่แทนเมมเบรนเดิมเร็วขึ้น ถ้าในตะกอนของอนุภาคมีสารประกอบปนเปื้อนที่มีผลต่อลักษณะของเมมเบรนโดยตรง

ค. รูปแบบและการออกแบบ การออกแบบกระบวนการใช้เมมเบรนที่ดี นอกจากจะต้องพิจารณาถึงลักษณะสมบัติของวัสดุที่จะนำมาผลิตเป็นเมมเบรนแล้ว จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากการศึกษาทดลอง โดยใช้แบบจำลองสภาพตามการใช้งานจริงประกอบ ซึ่งจะช่วยให้ระบบปฏิบัติการที่มีประสิทธิภาพ และเกิดประโยชน์สูงสุด

ง. เสถียรภาพของเมมเบรน ลักษณะสมบัติของสารประกอบโพลีเมอร์มีปัจจัยหลายอย่างที่เป็นข้อจำกัด และมีผลต่อเสถียรภาพของเมมเบรน เช่น ค่าพีเอช สำหรับเมมเบรนชนิดเซลลูโลส ช่วงค่าพีเอชที่ใช้งานได้ดี คือ 4.0 – 8.0 และสำหรับเมมเบรนที่เป็นวัสดุโพลีเมอร์ชนิดโพลีซัลโฟน ช่วงค่าพีเอชที่ใช้งานได้ดี คือ 2.0 – 12.0 อุณหภูมิก็เป็นข้อจำกัดปัจจัยหนึ่ง และมีผลต่อเสถียรภาพของเมมเบรน โดยทั่วไป อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้งานได้ คือ 60 องศาเซลเซียสและข้อจำกัดที่สำคัญอีกประการ คือ เมมเบรนมีความต้านทานต่อคลอรีนน้อย

จ. ความไม่สมบูรณ์ของการแยกอนุภาค แม้จะเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่า น้ำแพร่ผ่านเมมเบรนจะค่อนข้างมีความบริสุทธิ์สูง แต่ยังไม่มีการบวนการใช้เมมเบรนใดที่สามารถกำจัดสารประกอบและอนุภาคแขวนลอยในน้ำได้ทั้งหมด เช่น สามารถกำจัดเกลือได้ร้อยละ 70 ถึง ร้อยละ 99.9 สารแขวนลอยอื่น ๆ อาจกำจัดได้มากกว่าร้อยละ 99.9 ในทางกลับกันฟีนอลสามารถผ่านเมมเบรนที่ทำจากเซลลูลอสอะซิเตทได้ทั้งหมด สารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีในน้ำบ่อสามารถผ่านเมมเบรนได้ทุกชนิด ถ้าจะกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้เมมเบรนจะต้องออกซิไดส์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้เป็นซัลเฟอร์ ซึ่งเมมเบรนสามารถกำจัดออกได้แต่ปริมาณซัลเฟอร์จำนวนมากจะทำให้เมมเบรนอุดตันเร็วเกิดความเสียหาย ทำให้

เมมเบรนมีอายุการใช้งานที่สั้นลง ดังนั้น การกำจัดสารประกอบแขวนลอยในน้ำป้อนโดยใช้เมมเบรนควรให้ซัลเฟอร์ผ่านเมมเบรนออกไปในรูปสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ แล้วใช้กระบวนการอื่นกำจัดสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นขั้นตอนต่อไป เช่น ใช้กระบวนการทางเคมี หรือการออกซิไดส์ เป็นต้น และสิ่งมีชีวิตระดับจุลชีววิทยา เช่น แบคทีเรีย ไวรัส เมมเบรนสามารถกำจัดออกได้ร้อยละ 99.7-99.99 อย่างไรก็ตาม เมมเบรนไม่สามารถกำจัดสารปนเปื้อนหรืออนุภาคได้ทั้งหมด (Bhumkratana, 1987)

2.2.4 กลไกการทำงานของเมมเบรน

2.4.4.1 กลไกในการกำจัดเกลือ มีอยู่ในเมมเบรนชนิดรีเวอร์สออสโมซิส และนาโนฟิลเตรชัน อาศัยแรงผลัก “ไดอิเล็กทริกอินเทอร์แรคชัน” (Dielectric Interaction) ที่ผิวเมมเบรนกับไอออนของเกลือ ไอออนที่มีวาเลนซ์สูงจะถูกผลักได้ไกลกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำ จนเกิดชั้นน้ำบริสุทธิ์บาง ๆ ที่ผิวหน้าของเมมเบรน และซึมผ่านชั้นเมมเบรนออกไปที่ละโมเลกุล

2.4.4.2 กลไกในการกำจัดสารอินทรีย์ และอนุภาคแขวนลอยต่าง ๆ เป็นสมบัติซึ่งมีอยู่ในเมมเบรนทุกชนิด แต่เป็นกลไกอย่างเดี่ยวของไมโครฟิลเตรชัน และอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน ได้แก่

- การกรองติดค้าง (Sieve) ซึ่งสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าขนาดรูช่องว่างของเมมเบรน และมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงกำหนดของแต่ละชนิดเมมเบรนนั้น ๆ จะไม่สามารถลอดผ่านรูช่องว่างของเมมเบรนไปได้

- การดูดติดผิว (Adsorption) วัสดุชนิดไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) มีสมบัติในการดูดติดสารอินทรีย์สูง เช่น โปรตีน แบคทีเรีย อนุภาคแขวนลอย และยอมให้น้ำไหลผ่านได้น้อยกว่าชนิดไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) ซึ่งช่วยในการกำจัดสารอินทรีย์ แต่เกิดความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนจากค่าฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว จึงมักนิยมใช้เมมเบรนชนิดไฮโดรฟิลิก ในงานบำบัดน้ำเสียมากกว่า

2.2.5 ทฤษฎีไมโครฟิลเตรชัน

1) อัตราการกรองผ่านเมมเบรน (Permeate Flux)

กลไกการกักกันอนุภาค หรือคอลลอยด์ ในไมโครฟิลเตรชันเป็นการคัดขนาด โดยความต้านทานต่อการไหลเกิดจากตัวเมมเบรนเอง และชั้นเค้ก สามารถคำนวณค่าฟลักซ์ได้จาก Darcy's law ดังสมการ 2.8

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(r_t)} = \frac{\Delta P}{\mu(r_m + r_c + r_g + r_a)} \quad (2.8)$$

เมื่อ J = เพอมิเทชันฟลักซ์ (ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)

ΔP = ผลต่างความดันที่ผิวเมมเบรนด้านสารละลายป้อนกับเพอมิเทท (บาร์)

μ = ความหนืดของสารละลาย (กิโกรัมต่อเมตร-วินาที)

r_t = ความต้านทานรวม (เมตร⁻¹)

ในกรณีที่ไม่มีตัวถูกละลาย เพอมิเอชันฟลักซ์ของน้ำที่ผ่านรูพรุนจะแสดงในรูปความต้านทานเดียวกับสมการ 2.8 โดยที่ $r_t = r_m$

เมื่อ r_m = ความต้านทานของเมมเบรน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเมมเบรน ความหนาแน่นของรูพรุน และความหนาของเมมเบรน

ความต้านทานรวม (r_t) ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันเป็นผลมาจากปัจจัยใหญ่ ๆ 3 ปัจจัย คือ

- 1) ความต้านทานของเมมเบรน
- 2) ความต้านทาน เนื่องจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (r_{cp}) และความต้านทานเนื่องจากการเกิดเจลโพลาไรเซชัน (r_g)
- 3) ความต้านทาน เนื่องจากการเกิดการอุดตัน (fouling, r_f) ได้แก่ ความต้านทาน เนื่องจากการอุดตัน (r_a) และความต้านทาน เนื่องจากการอุดตันรูพรุนของตัวถูกละลาย (r_{pp}) ดังสมการ 2.9 และ 2.10

$$r_t = r_m + (r_{cp} + r_g) + (r_a + r_{pp}) \quad (2.9)$$

$$r_t = r_m + r_p + r_f \quad (2.10)$$

ในระบบการกรองไมโครฟิลเตรชัน จะใช้ความดันเป็นแรงขับ (driving force) ซึ่งจะแสดงในรูปของผลต่างของความดันที่ผิวเมมเบรนด้านสารละลายป้อนกับเพอมิเอท (transmembrane pressure) ดังสมการ 2.11

$$\Delta P_{TM} = \frac{P_i + P_o}{2} - P_f \quad (2.11)$$

P_{TM} = ผลต่างความดันที่ผิวเมมเบรนด้านสารละลายป้อนกับเพอมิเอท (บาร์)

P_i = ความดันขาเข้าของสารละลายป้อน (บาร์)

P_o = ความดันขาออกของสารละลายป้อน (บาร์)

P_f = ความดันด้านสารละลายเพอมิเอท (บาร์)

โดยทั่วไป เทอมของความดันด้านสารละลายเพอมิเอทจะกำหนดให้เท่ากับศูนย์ ($P_f = 0$) ดังนั้น ผลต่างความดันที่ผิวเมมเบรนด้านสารละลายป้อนกับเพอมิเอท จะลดรูปเป็นดังสมการ 2.12

$$\Delta P_{TM} = (P_i - P_o)/2 = (\Delta P/2) \quad (2.12)$$

เมื่อ ΔP_{TM} = ผลต่างของความดันขาเข้าและขาออกของสารละลายป้อน (บาร์)

2) ค่าการกักกัน (Rejection)

ความสามารถในการกักสารของเมมเบรนจะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์รีเจคชัน ซึ่งหมายถึงเปอร์เซ็นต์ของตัวถูกละลายที่ถูกเมมเบรนกักไว้ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์รีเจคชัน (Rejection coefficient, σ) ดังสมการ 2.13 - 2.14

$$\sigma = 1 - (C_p/C_b) \quad (2.13)$$

$$R = \sigma * 100 \quad (2.14)$$

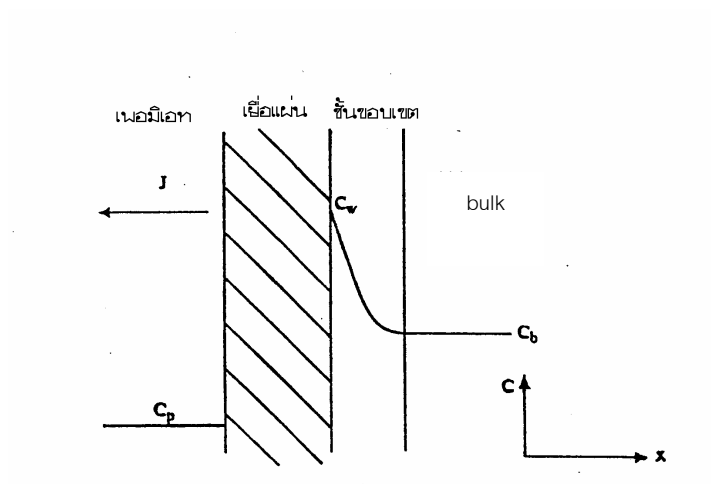
เมื่อ R = ค่ารีเจคชัน

C_p = ความเข้มข้นในการละลายในเฟอมีเอท (กรัมต่อลิตร)

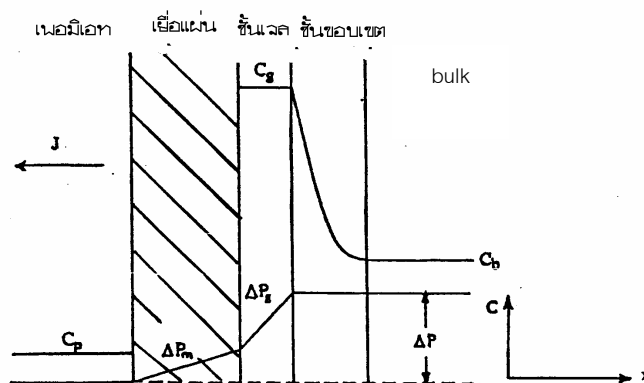
C_b = ความเข้มข้นในการละลายด้านสารป้อน (กรัมต่อลิตร)

3) คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันและเจลโพลาไรเซชัน

ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันจะเกิดขึ้นเมื่อตัวทำละลาย และตัวถูกละลายที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรนถูกกรองออกจากกระบอกอย่างต่อเนื่อง ตัวถูกละลาย และสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนไม่สามารถผ่านเมมเบรนออกไปได้ จะถูกกักสะสมอยู่บริเวณผิวเมมเบรน ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเมมเบรน (C_w) สูงกว่าความเข้มข้นบริเวณที่อยู่ห่างเมมเบรน (C_b) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเมมเบรนจะเกิดการแพร่กลับ (back diffusion) ไปยังระบบ (bulk) เนื่องจากผลต่างของความเข้มข้น เมื่อทำการกรองต่อไปจนกระทั่งความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเมมเบรนมีค่าสูงถึงขีดจำกัดการละลาย (C_g) ของสารนั้น ตัวถูกละลายจะเกิดลักษณะคล้ายเจลที่บริเวณใกล้ผิวเมมเบรน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เจลโพลาไรเซชัน (Howe *et al.* 2002) ดังแสดงในรูป 2.6 ชั้นเจลจะเกิดขึ้นบริเวณผิวเมมเบรนมีลักษณะคล้ายเมมเบรนอีกแผ่นต่ออนุกรมกับเมมเบรนเดิมทำให้ความต้านทานการกรองของเมมเบรนสูงขึ้น ค่าเฟอมีเอชันฟลักซ์ของสารละลายจึงมีค่าลดลง และจะทำให้ความสามารถในการกักสารเปลี่ยนไป



รูป 2.5 ปรัชการณคณนเซนเตรชันโพลาริเซชัน (Mallevalle et al. 1996)



รูป 2.6 ปรัชการณเจลโพลาริเซชัน (Mallevalle et al. 1996)

2.2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของ Membrane bioreactor

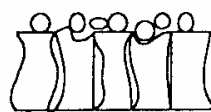
2.2.6.1 การสะสมความเข้มข้นสูง (Concentration Polarization) คือ ปรากฏการณ์ที่เกิดการสะสมของสารอินทรีย์หรืออนุภาคต่าง ๆ ใกล้ผิวหน้าเมมเบรน จนความเข้มข้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยของสารนั้นในน้ำหลายเท่าทำให้ฟลักซ์ลดลง แก้ไขโดยแรงดันน้ำล้างย้อน การถอดล้างด้วยสารเคมี หรือใช้กระแสไหล สร้างแรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรนมากพอที่ช่วยให้ฟลักซ์คงตัวยาวนานขึ้น เป็นต้น

2.2.6.2 อุณหภูมิ พีเอช และสารออกซิไดส์ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส ฟลักซ์จะเพิ่มขึ้น 3-5% ดังสมการ 2.15 แต่เมมเบรนอินทรีย์ มักสลายตัวโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งจะเกิดซ้ำที่สุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส พีเอช 3 - 7 ทนทานต่อสารออกซิไดซ์คลอรีนได้ดี ขณะที่เมมเบรนอินทรีย์ไม่ทนต่อสารออกซิไดซ์มากนัก แต่ทนทานต่อพีเอชในช่วงที่กว้างกว่า คือ 2 - 11 และอุณหภูมิทำงานที่ขีดจำกัดสูงกว่าคือ 45 องศาเซลเซียส

$$\frac{J_T}{J_{25}} = 1.03^{(T-25)} \quad (2.15)$$

2.2.6.3 ความดัน การเพิ่มแรงดันมากขึ้นจะทำให้ฟลักซ์ของเมมเบรน และคุณภาพน้ำที่ผลิตได้ดีขึ้น แต่ถ้าแรงดันเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัด (critical pressure) จะทำให้โครงสร้าง และอนุภาคสารต่าง ๆ ที่สะสมบริเวณผิวหน้าเมมเบรน อัดตัวกันแน่น จนทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง และอาจทำลายโครงสร้างภายในของเมมเบรน จนไม่อาจคืนสภาพการกรองน้ำได้ดังเดิมอีก (Yamamoto *et al.* 1989)

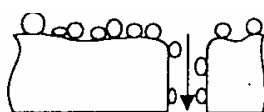
2.2.6.4 การอุดตันเมมเบรน (Membrane Fouling) เป็นผลมาจากการเกาะสะสมของสารอินทรีย์ และอนุภาคสิ่งสกปรกต่าง ๆ ในรูช่องว่างของเมมเบรนทำให้อัตราการซึมผ่านลดลง ความดันใช้งานเพิ่มขึ้น และไม่สามารถคืนสภาพให้กลับเหมือนใหม่ได้ โดยการใช้แรงดันน้ำ หรือสารเคมี (รูปที่ 2.7)



ก. เมมเบรนมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าตัวถูกละลาย



ข. เมมเบรนมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูก



ค. เมมเบรนมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูก

รูปที่ 2.7 ลักษณะการเกิด fouling ของแผ่นเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดต่าง ๆ เทียบกับขนาดตัวถูกละลาย (รัตน จิระรัตนานนท์. 2541)

2.2.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอุดตันเมมเบรน

1) **ลักษณะของน้ำดิบ** ความเข้มข้น และชนิดของสารอินทรีย์ แต่ละประเภทมีผลต่อการเกิดการอุดตันต่างกันไปตามขนาดโมเลกุล และโครงสร้างโมเลกุล ภายในโมเลกุลจะมีแรงกระทำระหว่างผิวเมมเบรนกับตัวมันเอง เมื่อสารอินทรีย์หลายชนิดรวมอยู่ในสารละลายเดียวกันจะก่อให้เกิดการอุดตันมากกว่าที่อยู่เป็นชนิดเดียว ๆ

2) **วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน** วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรนสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ชนิดไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) มีสมบัติในการดูดติดสารอินทรีย์สูง เช่น โพรตีน แบคทีเรีย อนุภาคแขวนลอย และยอมให้น้ำไหลผ่านได้น้อยกว่าชนิดที่ 2 คือ ไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) ซึ่งเป็นวัสดุชอบน้ำ จึงมักนิยมใช้เมมเบรนชนิดไฮโดรฟิลิก ในงานบำบัดน้ำเสียมากกว่า

3) **การปรับสภาพน้ำเบื้องต้น** ได้แก่ การกำจัดอนุภาคแขวนลอยขนาดใหญ่ สารอินทรีย์ การปรับพีเอช อุณหภูมิ และการกำจัดน้ำมัน ไขมัน เป็นต้น จะสามารถเพิ่มอัตราการซึมผ่านเมมเบรนและบรรเทาปัญหาความสกปรก ให้ระบบมีรอบระยะเวลาการทำงานที่ยาวนานขึ้น

4) **การอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์ (Biofouling)** ถ้าปล่อยให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้บนเมมเบรน ปัญหาด้านต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ มีดังนี้

- จะทำให้เมมเบรนถูกทำลาย ทั้งนี้เพราะเมมเบรนเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์สามารถใช้เป็นอาหารได้

- อุดตันเมมเบรน

- จุลินทรีย์อาจรั่วผ่านเมมเบรนและหลุดออกไปพร้อมกับน้ำสะอาดที่ผลิตได้

2.2.8 แบบจำลองความต้านทานของการอุดตันแบบอนุกรม (Resistance-in-series Model)

จากสมการของ Darcy's Law ที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ 2.8 ในส่วนของค่าความต้านทานของเมมเบรนนั้น เมื่อมีการใช้งานจนเกิดการอุดตันที่ผิวของเมมเบรน ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจะไม่ได้มีเฉพาะความต้านทานของเมมเบรนเท่านั้น แต่จะมีความต้านทานอันเกิดจากการอุดตันเพิ่มขึ้นไปด้วย ซึ่งค่าความต้านทานที่จะเปลี่ยนเป็นค่าความต้านทานรวมที่เกิดขึ้นจากการอุดตันบริเวณผิวเมมเบรน จากการศึกษาของ Cho *et al.* (1999) พบว่าอัตราการไหลที่ลดลงและการดูดซับบนผิวเมมเบรนซึ่งค่าความต้านทานรวมที่เกิดขึ้นนั้นมีลำดับขั้นตอนการเกิดขึ้นดังนี้

1. ใช้น้ำปราศจากไอออนในระบบจนมีอัตราการไหลของน้ำสะอาดที่คงตัว
2. เปลี่ยนมาใช้น้ำตัวอย่างที่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติและทำการวัดอัตราการไหลของน้ำสะอาดที่ผลิตได้จนครบเวลา
3. หลังจากหาค่าอัตราการไหลของน้ำที่ผลิตได้ลดลงคงที่อันเนื่องมาจากการอุดตันที่เกิดขึ้น จึงใช้น้ำกลั่นเข้าไปไล่จะทำให้ส่วนของชั้นสารละลายที่มีความเข้มข้นที่สูงออกมา
4. ทำการล้างด้วยน้ำกลั่นเป็นรอบที่สองซึ่งจะใช้อัตราการไหลที่สูงกว่าในการทดลองจะเป็นผลทำให้ชั้นของเจลที่เกิดขึ้นหลุดออกมาด้วย
5. ทำการล้างด้วยสารละลายเบส (NaOH) ที่ความเข้มข้น 0.001 โมลต่อลิตร ซึ่งที่สารละลายล้างออกมาได้จะเป็นส่วนของสารที่เกิดการดูดซับที่บริเวณผิวของเมมเบรน ซึ่งสามารถที่จะหลุดออกมาได้

จากขั้นตอนที่กล่าวมาจะทำให้ทราบว่าเกิดค่าความต้านทานประเภทใดขึ้นมาบ้าง ดังต่อไปนี้

1. ค่าความต้านทานที่เกิดจากตัวเมมเบรนเอง (r_m) เกิดขึ้นจากเมมเบรนแต่ละตัวนั้นมีขนาดรูพรุนที่ใช้ในการคัดแยกสารที่แตกต่างกัน ซึ่งขนาดของรูพรุนที่ได้กล่าวถึงจะเป็นตัวที่ทำให้เกิดความต้านทานขึ้นมา

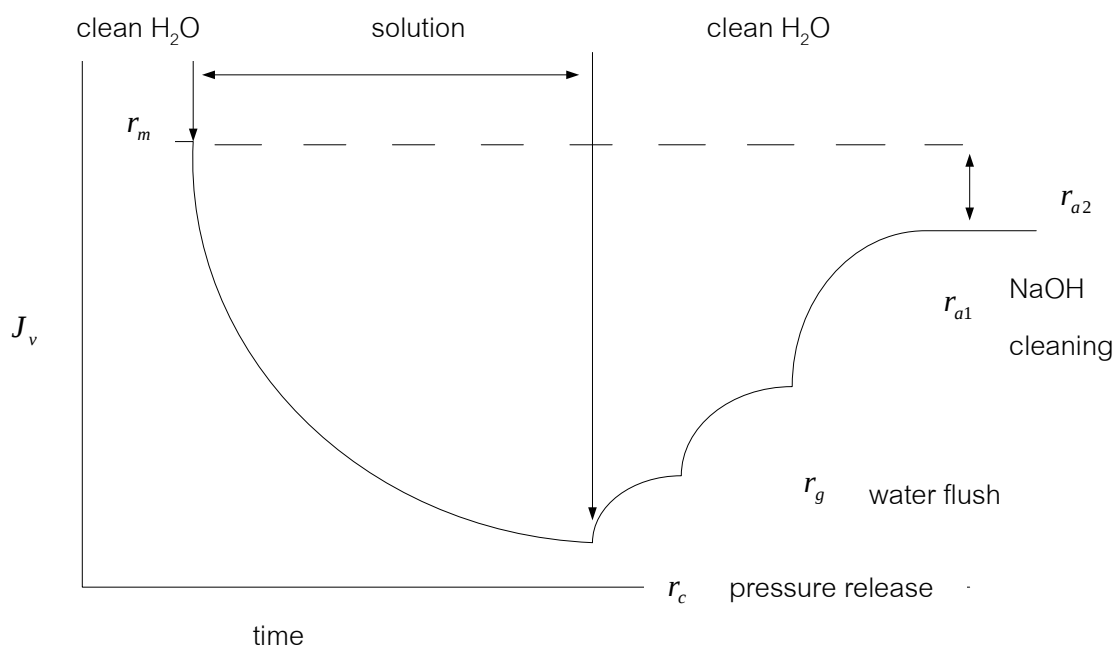
2. ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของ Concentration Polarization (r_c) เกิดขึ้นจากตัวอย่างสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ เมื่อทำการทดลองความเข้มข้นที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรนจะมีความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติออกจากน้ำ

3. ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของเจล (r_g) เกิดขึ้นจากเมื่อบริเวณผิวหน้าเมมเบรนมีความเข้มข้นที่สูงขึ้น จนมีค่าเกินขีดจำกัดของการละลายของสารที่มีอยู่ในน้ำ จะมีลักษณะคล้ายเจลเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรน

4. ค่าความต้านทานที่เกิดจากการดูดซับอย่างอ่อน (r_{a1}) เกิดจากการดูดซับที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของเมมเบรนซึ่งการดูดซับนี้สามารถที่จะล้างออกได้โดยใช้สารเคมี

5. ค่าความต้านทานที่เกิดจากการดูดซับอย่างถาวร (r_{a2}) เกิดจากการดูดซับอย่างถาวร ซึ่งจะติดแน่นอยู่กับเมมเบรนดังนั้นจึงไม่สามารถทำความสะอาดด้วยสารเคมีได้

จากขั้นตอนดังกล่าวมาเมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงค่าความต้านทานแบบอนุกรมที่เกิดขึ้นจากการอุดตัน (Cho *et al.* 1999)

2.2.9 การทำความสะอาดเมมเบรน

การนำเมมเบรนไปใช้งานในการแยกสารละลายที่เป็นของเหลว ถึงแม้จะมีการบำบัดสารละลาย มีการออกแบบโมดูล ตลอดจนเลือกสภาวะดำเนินการที่ลดการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ก็ยังพบว่าการเกิด fouling จึงมีความจำเป็นต้องทำความสะอาดเยื่อแผ่นด้วยวิธีที่เหมาะสมเป็นระยะ ๆ เพื่อให้เมมเบรนมีสภาพใกล้เคียงเมมเบรนใหม่มากที่สุด และเพื่อยืดอายุการใช้งาน ฟาวลิงเกิดจากองค์ประกอบในสารละลายที่ไปสะสมอยู่บริเวณผิวหน้าเมมเบรนและในรูพรุน และอาจเกิดจากจุลินทรีย์ที่ปนอยู่กับสารละลาย การเกิดฟาวลิงมีความไม่ผันกลับสูงจึงไม่สามารถกำจัดฟาวลิงด้วยการล้างน้ำ

ธรรมชาติ การเลือกวิธีการล้าง และทำความสะอาดเมมเบรนจึงต้องพิจารณาชนิดของสารอุดตัน วัสดุที่ผลิตเป็นเมมเบรน และรูปแบบของโมดูล ตลอดจนค่าใช้จ่าย ความยากง่าย และระยะเวลาในการล้างประกอบด้วย

วิธีทำความสะอาด แบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่ วิธีกายภาพ และวิธีเคมี

2.2.8.1 วิธีทางกายภาพ หมายถึง การทำความสะอาดที่ใช้การเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานเป็นหลัก เช่น การเพิ่มอัตราการไหล ซึ่งจะเพิ่มแรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรน แต่ก็ลดการสะสมและการอุดตันได้ระดับหนึ่งเท่านั้น วิธีที่อ้างถึงกันอยู่เสมอ คือ การดูดซับที่สะสมออกจากผิวหน้าเมมเบรนด้วยฟองน้ำ (sponge balls) ใช้เมมเบรนแบบท่อโดยการใส่ก้อนฟองน้ำที่มีขนาดพอ ๆ กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเมมเบรนเข้าไปในน้ำ หรือสารทำความสะอาดที่ไหลผ่านเมมเบรนเพื่อให้ก้อนฟองน้ำดูดซับที่สะสมที่ผิวหน้าเมมเบรน แต่ไม่สามารถกำจัดการสะสมภายในรูพรุนได้ออก ปัจจุบันวิธีดังกล่าวนี้ไม่มีการใช้งานแล้ว

วิธีกายภาพที่แพร่หลายและได้ผลเป็นที่น่าพอใจ คือ การล้างแบบย้อนกลับ (back washing) ซึ่งทำได้โดยการป้อนสารละลายภายใต้ความดันเข้าทางด้านเพอมิเอท (ตรงข้ามกับการดำเนินงานปกติที่เพอมิเอทเป็นทางออก) ซึ่งจะทำให้สารละลายดันสารอุดตันหลุดออกจากเมมเบรน การล้างแบบย้อนกลับอาจทำระหว่างการกรอง เช่น กรอง 30 นาที แล้วป้อนสารละลายล้างย้อนกลับ 2-3 นาที เป็นต้น หรืออาจทำเมื่อเสร็จสิ้นการกรอง คือ ล้างย้อนกลับด้วยน้ำ หรือสารทำความสะอาด ตัวอย่างเช่น ในการทำงานปกติถ้าใช้เมมเบรนเส้นใยกลวงเป็นการป้อนสารละลายด้านในเส้นใย แต่ในการล้างย้อนกลับเป็นการป้อนสารทำความสะอาดด้านนอกเส้นใย ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ อุปกรณ์จะต้องมีการออกแบบเฉพาะให้มีการล้างย้อนกลับได้ นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีการพ่นอากาศที่ความดันสูงเข้าทางช่องเพอมิเอทแทนการใช้สารละลาย อย่างไรก็ตาม การที่จะนำสารอุดตันที่หลุดออกจากเมมเบรนให้ออกมานอกระบบต้องตามด้วยการล้างน้ำเพื่อให้เป็นตัวพาสารอุดตัน

วิธีกายภาพที่ได้ผลดีที่สุดที่มีการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนมากกว่าการอุดตันในรูพรุน หลังจากการล้างย้อนกลับฟลักซ์อาจมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับที่น่าพอใจ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอุดตัน แต่ในระยะยาวอาจพบว่าฟลักซ์ยังคงลดลงอยู่ ดังนั้น การล้างด้วยวิธีเคมีจึงมีความจำเป็น ทั้งยังเป็นที่ยอมรับใช้ และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ

2.2.8.2 วิธีทางเคมี หมายถึง การทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมี สารเคมีอาจช่วยให้มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพโดยสารเคมีอาจทำให้สารอุดตันพองตัว หดตัว ละลาย เกิดการหลุดออก (desorption) หรือสารเคมีที่ใช้อาจทำปฏิกิริยาเคมีกับสารอุดตัน เช่น การเกิดไฮโดรไลซิส

การย่อยสลายพันธะเปปไทด์ของโปรตีน และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เป็นต้น สารเคมีที่ใช้ควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. ละลายสารอุดตันหรือทำให้สารอุดตันเกาะตัวกันน้อยลงด้วยกลไกทางกายภาพหรือทางเคมี
2. รักษาสภาพการกระจายตัวของสารอุดตัน ไม่ให้กลับไปสะสมอีก
3. ไม่เป็นสารที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันเสียเอง

สารเคมีที่ใช้ทำความสะอาด แบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้

- 1) **กรด (Acid)** ใช้ได้ทั้งกรดอินทรีย์ และอนินทรีย์ เช่น กรดเกลือ (hydrochloric acid) กรดซัลฟูริก (sulfuric acid) กรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) กรดออกซาลิก (oxalic acid) และ กรดซิตริก (citric acid) เป็นต้น ใช้ได้ดีในการละลายตะกอนที่เป็นโลหะออกไซด์ เกลือคาร์บอเนต ซึ่งเป็นสารอุดตันที่พบในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ และนาโนฟิลเตรชัน แต่ใช้ไม่ได้ผลกับสารอุดตันที่เป็นซิลิกา ซิลิเกต คอลลอยด์ และจุลินทรีย์
- 2) **ด่าง (Base)** ที่ใช้กันแพร่หลาย คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต และฟอสเฟต ใช้ได้ดีกับกับสารอุดตันที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน เพคติน เซลล์ลูโลส ดังนั้น จึงนิยมใช้ล้างเมมเบรนที่ใช้งานอุตสาหกรรมอาหาร และน้ำผลไม้
- 3) **เอนไซม์ (Enzyme)** ใช้สำหรับทำความสะอาดสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน โดยทำให้เกิดการแตกตัว ทำลายพันธะเป็นโมเลกุลที่เล็กลง โดยต้องเลือกเอนไซม์ที่เหมาะสม เช่น ถ้าสารอุดตันเป็นโปรตีนควรใช้เอนไซม์โปรติเอส (protease) ถ้าเป็นแป้งควรใช้อะไมเลส (amylase) หรือควรใช้ไลเปส (lipase) ถ้าสารอุดตันเป็นไขมัน บางทีอาจต้องใช้หลายตัวผสมกัน หรือหาสูตรที่เหมาะสม เอนไซม์จัดเป็นสารทำความสะอาดที่อ่อนโยนไม่เป็นอันตรายต่อเมมเบรน แต่มีราคาแพง
- 4) **สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)** เป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่ประกอบด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำและส่วนชอบน้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่เมื่ออยู่ในน้ำจะแสดงประจุบวก หรือประจุลบ หรือเป็นกลาง ขึ้นอยู่กับชนิดของสารลดแรงตึงผิว สารลดแรงตึงผิวสามารถเข้าถึงส่วนต่าง ๆ ของเมมเบรนได้ดี (เกิดการเปียกหรือ wetting) จึงสัมผัสกับสารอุดตันได้ดี ล้างออกได้ง่าย แต่ควรเลือกอย่างระมัดระวัง เพราะสารลดแรงตึงผิวอาจถูกดูดซับได้โดยเมมเบรนบางชนิด จึงอาจกลายเป็นสารอุดตันเสียเอง ตัวอย่างเช่น สารลดแรงตึงผิวที่เป็นสารลดฟอง (antifoam) ที่ใช้ในกระบวนการหมัก
- 5) **สารฆ่าเชื้อ (Disinfectant)** การฆ่าเชื้อ หมายถึง การทำลายหรือกำจัดจุลินทรีย์ที่เป็นพิษ ซึ่งอาจเจือปนอยู่ในสารละลาย หรือติดค้างอยู่ในระบบท่อ การใช้กระบวนการเมมเบรนในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม จึงอาจมีความจำเป็นที่ต้องทำความสะอาดด้วยสารฆ่าเชื้อทุกวัน

สารฆ่าเชื้อส่วนมากเป็นตัวออกซิแดนท์ (oxidant) เช่น คลอรีน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารพวกไฮโปคลอไรท์ (hypochlorite) เป็นสารที่ออกฤทธิ์แรงจึงควรใช้ด้วยความระมัดระวัง เพราะอาจมีผลเสียต่อเยื่อแผ่นและส่วนอื่น ๆ ของหน่วยอุปกรณ์ นอกจากจะใช้ทำความสะอาดแล้วยังนิยมใช้เป็นสารเก็บรักษาเมมเบรนสำหรับเมมเบรนเซรามิกสามารถฆ่าเชื้อได้ด้วยไอน้ำ

2.3 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่มีไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนแบบจมตัว (Submerged type MF-Membrane Bioreactor, SMF-MBR)

ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน จุลชีพเจริญแบบแขวนลอย พัฒนามาจากระบบเอเอส มีส่วนประกอบหลัก คือ ถังเติมอากาศ ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน ระบบเติมอากาศ และระบบสูบน้ำออก

2.3.1 หลักการและองค์ประกอบในการทำงานของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

2.3.1.1 การกำจัดสารอินทรีย์ และปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ระบบ MBR มีกลไกเช่นเดียวกับระบบเอเอส แบบยัดการเติมอากาศ ซึ่งมีค่าอายุสลัดจ์ยาวนาน (F/M ratio ต่ำ) จุลชีพในถังเติมอากาศมีจำนวนมาก และทำงานอยู่ในช่วงภาวะเอ็นโดจีนัส ระบบจึงมีปริมาณสลัดจ์ส่วนเกินที่น้อยถึงอาจไม่มีเลย และค่าอายุสลัดจ์ที่ยาวนานพอจะช่วยให้จุลชีพที่เติบโตได้ช้าอย่างไนตริไฟอิงค์แบคทีเรียเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ (อริยะ เตกษณานนท์, 2543)

2.3.1.2 การกักแยกตะกอน ใช้เมมเบรนติดตั้งจมอยู่ในถังปฏิกรณ์ ทำหน้าที่แทนถังตกตะกอนที่สอง ซึ่งจะมีประสิทธิภาพ และความแน่นอนสูง ในการกักแยกตะกอนชีวภาพ สารอินทรีย์ น้ำหนักโมเลกุลสูง ของแข็งแขวนลอย และจุลชีพก่อโรค ให้คงอยู่ในถังปฏิกรณ์ จึงสามารถลดการเกิดสลัดจ์ลอยตัว และฟล็อกปลายแหลม ที่เป็นปัญหาในถังตกตะกอนระบบเอเอส โดยไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบ

2.3.1.3 ความสัมพันธ์ของการเติมอากาศ ระบบ MBR และทำความสะอาดเมมเบรน

ระบบ MBR เป็นระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่มีการกรองแนวขวาง โดยอาศัยความดันป้อนของอากาศ จากการเติมอากาศทำให้เกิดการผสมและสร้างแรงเฉือนเพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของเมมเบรนอย่างต่อเนื่อง เพื่อป้องกันการสะสมของอนุภาคจนเกิดการอุดตัน และอัดแน่นในรูช่องว่างของเมมเบรน เนื่องจากระหว่างช่วงปั๊มป้อนของอากาศกระแสปั๊มป้อนจะมีประสิทธิภาพในการขจัดอนุภาคสะสมให้กระจายตัวออกไปได้ดี ผิวหน้าของเมมเบรนจะสะอาดขึ้น และสามารถถอด

แผ่นเมมเบรนนำไปทำความสะอาดด้วยสารเคมีหรือน้ำประปา เมื่อปั๊มสูบน้ำทำงานจนความดันถึง “ความดันสูญเสียทางดิวทิวิตี” (อริยะ เตกษณานนท์, 2543)

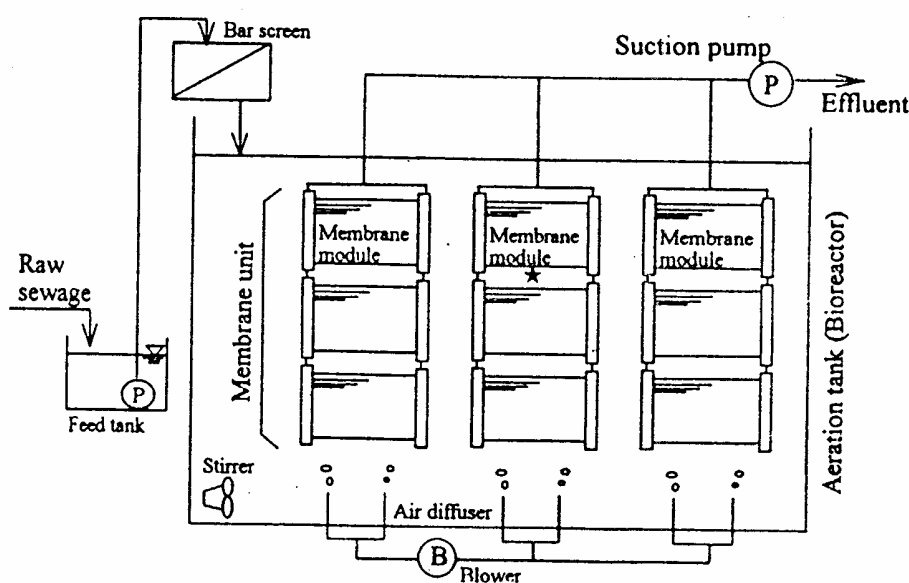
2.3.2 หลักการออกแบบระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

ข้อมูลที่ใช้ในการควบคุมระบบ ซึ่งอาจใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเปรียบเทียบระหว่างระบบ MBR และ AS ซึ่งต้องมีการคำนวณค่าต่าง ๆ ดังนี้

2.3.2.1 ปริมาตรถังเติมอากาศ (ลูกบาศก์เมตร) คำนวณจากค่าภาระบรรทุกทุกสารอินทรีย์ (F/M) และ การกำหนดขนาดของถัง ต้องพิจารณาร่วมกับการจัดเรียงแผ่นเมมเบรนภายในเมมเบรนยูนิต

2.3.2.2 พื้นที่ผิวของแผ่นเมมเบรน (ตารางเมตร) คำนวณได้จากค่าฟลักซ์ (ลูกบาศก์เมตร ต่อตารางเมตรต่อวัน) และคำนวณจำนวนโมดูลที่ต้องใช้จากค่า “พื้นที่ผิวของไมโครฟิลเตรชันต่อหนึ่งแผ่นเมมเบรน” เพื่อใช้ในการออกแบบเมมเบรนยูนิต

2.3.2.3 เมมเบรนยูนิต การประกอบขึ้นรูปในทางปฏิบัติขึ้นอยู่กับรูปแบบโมดูลที่ใช้ ตัวอย่างการออกแบบโมดูลยูนิต ท่อจ่ายอากาศ และการจัดวางในถังเติมอากาศ แสดงดังรูปที่ 2.9 เมมเบรนยูนิตควรมีช่องว่างสำหรับให้ฟองอากาศเกิดกระแสปั่นป่วนผ่านบริเวณผิวหน้าเมมเบรน



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการออกแบบเมมเบรนยูนิต,ท่อจ่ายอากาศ และการจัดการวางในถังเติมอากาศของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน (Tatsuki *et al.*, 1997)

2.3.2.4 ความต้องการออกซิเจนของระบบ (กิโกรัมต่อวัน) คำนวณจากค่าออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์ไนโตรเจนให้เป็นไนเตรต (NBOD) ร่วมกับค่าออกซิเจนที่ต้องใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์คาร์บอนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CBOD) หรือจากการสร้างกระแสปั่นป่วนเพื่อทำความสะอาดเมมเบรน ซึ่งอาจขึ้นกับสภาพการติดตั้ง และการออกแบบเมมเบรนยูนิต โดยเลือกค่าที่มากกว่าในการออกแบบระบบเติมอากาศต่อไป

2.3.2.5 ปริมาณสลัดจ์ส่วนเกิน (กิโกรัมต่อวัน) ใช้สมการทางจลนศาสตร์ที่แสดงค่าความเข้มข้นสลัดจ์ในการคำนวณ ซึ่งแสดงถึงปริมาณสลัดจ์ส่วนเกินที่ลดลง เมื่อสลัดจ์จุลชีพมีความเข้มข้นสูง และในบางสภาวะที่สารอินทรีย์มีค่าต่ำ ความเข้มข้นสลัดจ์จุลชีพลดลงกว่าที่ออกแบบก็อาจดำเนินระบบได้โดยไม่มีการทิ้งสลัดจ์

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bouhabila *et al.* (2001) ศึกษาลักษณะการอุดตันในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน ใช้อัตราภาระบรรทุก 5.7 กิโกรัม ซีโอดี ต่อ ลูกบาศก์เมตร วัน โดยแบ่งอายุสลัดจ์เป็น 10, 20, 30 วัน กำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 95-97.5 พบว่าลักษณะการอุดตันของเมมเบรนภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนไม่ได้เกิดจากสารแขวนลอย (suspended solids) เพียงอย่างเดียว ยังเกิดจาก สารคอลลอยด์ (colloids) และตัวถูกละลาย (solutes) โดยได้ทำการทดลองแยกส่วนที่ใสและสลัดจ์ออกจากกัน ผลที่ได้ส่วนที่ใสจะมีค่าความต้านทานที่สูงกว่า ส่วนที่เป็นสลัดจ์ โดยที่สารแขวนลอย สารคอลลอยด์ และตัวถูกละลายทำให้เกิดการอุดตันร้อยละ 24, 50 และ 26 ตามลำดับ และที่ค่าอายุสลัดจ์ เพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ค่าความต้านทานในการอุดตันของเมมเบรนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่พอเดินระบบที่ยาวนานขึ้น ค่าอายุสลัดจ์ 30 วันกับมีค่าความต้านทานลดลงซึ่งเกิดจากระบบอยู่ในสภาวะคงตัว ทำให้เกิดการย่อยสลายกันเองภายในระบบ

Chaize and Huyard (1991) ได้ทำการศึกษาระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน โดยเลือกเวลาเก็บ 8 ชั่วโมง และอายุสลัดจ์ 100 วัน น้ำเสียชุมชนมีค่าซีโอดี 250-550 มิลลิกรัมต่อลิตร ทีเคเอ็น 65-150 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าสลัดจ์จุลชีพคงตัวใน 25 วัน ที่ 8,000-10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปฏิกริยาไนตริฟิเคชันเกิดได้ดีใน 14 วัน น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าซีโอดี ทีเคเอ็น และไนเตรต น้อยกว่า 30, 10 และ 40 - 130 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลชีพเท่ากับ 0.06 - 0.1 กิโกรัมซีโอดีต่อกิโกรัมมวลสารต่อวัน

Cheryan and Rajagopalan (1998) พบว่าการศึกษาการใช้เมมเบรนในการบำบัดน้ำมันโดยเปรียบเทียบกับบำบัดแบบเดิมที่ใช้สารเคมี พบว่า ไมโครฟิลเทรชัน และอัลตราฟิลเทรชัน ได้นำที่ผ่านการบำบัดกลับคืนมาร้อยละ 90 ของปริมาตรเริ่มต้น จากการศึกษาน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเคมี ที่มีค่าไขมัน และน้ำมัน 3,530 พีพีเอ็ม หลังการบำบัดโดยเมมเบรนจะเหลืออยู่ 35 พีพีเอ็ม ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอย จาก 1,640 พีพีเอ็ม เหลือ 63 พีพีเอ็ม ซีไอดี 21,200 พีพีเอ็ม เหลือ 1,333 พีพีเอ็ม ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบประมาณ 3 ดอลลาร์ต่อลูกบาศก์เมตร

Chiemchaisri *et al.* (1993) ทำการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมีค่าซีไอดี 150-500 มิลลิกรัมต่อลิตรและไนโตรเจนทั้งหมด 30-50 มิลลิกรัมต่อลิตร การเติมอากาศแบบต่อเนื่อง และเป็นช่วง ไม่มีผลต่อการกำจัดซีไอดี ระบบมีประสิทธิภาพมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี 85-97 % ค่าซีไอดี และไนโตรเจนทั้งหมดที่ออกจากระบบ 20.8, 15.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปฏิกริยาไนตริฟิเคชันเกิดสมบูรณ์ใน 35 วัน และถูกจำกัดที่ค่าดีไอ < 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนการเติมอากาศเป็นช่วงค่าดีไอ 4-5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนมากกว่าที่ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ 90 และ 80 % ตามลำดับ โดยค่าเฉลี่ยของไนโตรเจนที่ผ่านการบำบัด 4.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Gao *et al.* (2004) ได้ใช้ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนในการบำบัดแอมโมเนียในสารอินทรีย์สังเคราะห์ โดยไม่มีการถ่ายตะกอนสลัดจ์ออก โดยศึกษาเป็นเวลา 210 วัน ที่เวลากักเก็บ 24 ชั่วโมง โดยแปรค่าความเข้มข้นของ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ในน้ำเข้าระหว่าง 180 -1300 มิลลิกรัมต่อลิตร MLSS อยู่ในช่วง 3,000-5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของกลุ่มจุลินทรีย์ของ ammonia oxidizers และ nitrite oxidizers ใน MLSS มีการเพิ่มขึ้นจาก 0.9×10^8 หนึ่งต่อมิลลิลิตร ถึง 1.6×10^9 หนึ่งต่อมิลลิลิตร และ 1.0×10^8 ถึง 9×10^8 หนึ่งต่อมิลลิลิตร ระบบสามารถกำจัด $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ได้ร้อยละ 99

Jarusutthirak *et al.* (2002) พบว่าสารพวกโพลีแซคคาไรด์ และโปรตีน ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของโครงสร้างโมเลกุลของสารคอลลอยด์ เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการอุดตัน

Kargi and Eker (2004) พบว่าผลของอายุสลัดจ์ของระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ สลัดจ์ที่มีอายุระหว่าง 5-30 วัน ทำการควบคุมระยะเวลาการกักเก็บน้ำ (HRT) ที่ 25 ชั่วโมง ที่ค่าอายุสลัดจ์ 5, 15 และ 30 วัน ซีไอดีจะถูกกำจัดประมาณร้อยละ 58, 78 และ 90 ตามลำดับ ค่าที่เหมาะสมในการเดินระบบอยู่ที่อายุสลัดจ์ 25 วันมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีมากกว่าร้อยละ 90

Lee *et al.* (2003) พบว่าผลของอายุสลัดจ์ที่ 20, 40 และ 60 วัน ในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน โดยใช้เมมเบรนประเภท ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน ได้มีการเปรียบเทียบน้ำตะกอนที่ทำการตกตะกอนแล้ว นำส่วนใสในถังปฏิกรณ์ชีวภาพมาวิเคราะห์ และส่วนที่ผ่านเมมเบรน พบว่าระบบสามารถกำจัดซีไอดีในถังปฏิกรณ์ชีวภาพได้ร้อยละ 85, 87.2 และ 88 ตามลำดับ และส่วนที่ผ่านเมมเบรนสามารถกำจัดซีไอดี

ได้ร้อยละการกำจัด 96.2, 97 และ 97.5 สำหรับไนโตรเจน ระบบสามารถกำจัดไนโตรเจนในปฏิกิริยาชีวภาพได้ร้อยละ 91.4 93.4 และ 93.5 ตามลำดับ ส่วนที่ผ่านเมมเบรนสามารถกำจัดร้อยละ 95.7 96.6 และ 97.1

Ueda and Hata (1999) ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบถังปฏิกิริยาชีวภาพเมมเบรนแบบมีออกซิเจน และไม่มีออกซิเจนพบว่า สามารถเดินระบบต่อเนื่องได้ถึง 371 วัน โดยไม่มีการทำความสะอาดเมมเบรน และถังปฏิกิริยาชีวภาพเมมเบรนสามารถรองรับการไหลของน้ำที่เข้าสู่ระบบที่เพิ่มมากขึ้นเป็น 3 เท่า ในเวลาอันสั้น ประสิทธิภาพในการกำจัด บีโอดี ร้อยละ 99 ทีโอดี ร้อยละ 93, ปริมาณของแข็งแขวนลอยร้อยละ 100 ไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 79 ฟอสฟอรัสทั้งหมดร้อยละ 74 และโคลิฟอร์ม 6-log units โดยใช้พลังงานเฉลี่ย 2.4 กิโลวัตต์

Visvanathan *et al.* (1997) ได้นำเอาระบบถังปฏิกิริยาชีวภาพเมมเบรนไปใช้คู่กับระบบ ตะกอนเร่ง โดยการใส่ลงในถังเดิมอากาศทำให้ระบบทำงานได้ดีขึ้น ระบบถังปฏิกิริยาชีวภาพเมมเบรนจะทำให้เวลาในการกักเก็บแบคทีเรียยาวนานขึ้น ทำให้อายุแบคทีเรียมากขึ้น ทำให้สามารถกำจัด ซีโอดี และทีเคเอ็น ได้มากกว่าร้อยละ 90

Wang *et al.* (2004) ศึกษาถังปฏิกิริยาชีวภาพในการกำจัดไนโตรเจน และคาร์บอนจากน้ำเสียของกระบวนการผลิตอาหาร ในสภาวะที่มีออกซิเจน และไม่มีออกซิเจน ระบบสามารถกำจัดค่า ซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) และ ไนโตรเจนทั้งหมด ได้มากกว่าร้อยละ 94, 91 และ 74 ตามลำดับ โดยที่แบ่งประสิทธิภาพการกำจัดเป็นถังที่ไม่มีอากาศสามารถกำจัด ซีโอดี ได้ร้อยละ 40 - 63 ถังที่มีการเติมอากาศที่มีแผ่นเมมเบรนติดตั้ง สามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 29-46 และสามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ร้อยละ 31-43 และ 47-64 ตามลำดับ การเพิ่มระยะเวลาการกักเก็บตะกอนทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนมากขึ้น เนื่องจากปริมาณไนเตรฟายอิงแบคทีเรียมากขึ้น

Wen *et al.* (2003) ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบถังปฏิกิริยาชีวภาพเมมเบรน (MBR) แบบเส้นใยกลวง (hollow fiber membrane) ในการบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาล พบว่าสามารถกำจัดค่าซีโอดี, แอมโมเนียไนโตรเจน และค่าความขุ่นได้ร้อยละ 80, 93 และ 83 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังการบำบัดพบว่า ซีโอดี มีค่าต่ำกว่า 25 มิลลิกรัมต่อลิตร, แอมโมเนียไนโตรเจนต่ำกว่า 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และความขุ่นน้อยกว่า 3 NTU ไม่พบสี และกลิ่น นอกจากนี้ ยังกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้ถึงร้อยละ 98 ในการทดลองมีการเพิ่มความดันอย่างช้า ๆ ตลอด 6 เดือน พบว่าระบบสามารถดำเนินการได้โดยไม่ต้องทำความสะอาดตัวกรอง

Yang *et al.* (2004) ได้นำเอาระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่ใช้พลังงานต่ำไปใช้ทดลองคู่กับระบบตะกอนเร่ง โดยการใส่ลงในถังเดิมอากาศ ในการบำบัดน้ำเสียจากห้องน้ำ โดยสามารถนำน้ำที่ได้จากการผ่านระบบไปใช้ประโยชน์ต่อไป ผลที่ได้หลังการบำบัดจะได้ค่าซีโอดีน้อยกว่า 47 มิลลิกรัมต่อลิตร BOD₅ น้อยกว่า 8.5 มิลลิกรัมต่อลิตร แอมโมเนียไนโตรเจน น้อยกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความขุ่นน้อยกว่า 1 NTU โดยคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัด ซีโอดี 93% บีโอดี 98.5% แอมโมเนียไนโตรเจน 92% สี 91% ความขุ่นมากกว่า 99% อัตราภาระสลัดจ์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.1-0.15 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน อัตราภาระอินทรีย์เชิงปริมาณ 1-1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และเวลาที่ใช้ในการกักเก็บ 7-8 ชั่วโมง ซึ่งจะมีผลต่อการกำจัดซีโอดีได้ดี นอกจากนี้ ยังประเมินการใช้พลังงานของระบบ พบว่าระบบนี้ใช้พลังงานประมาณ 0.4-0.74 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

- 1) ถังพักจ่ายน้ำเสีย ขนาด 60 ลิตร 1 ถัง
- 2) ถังเก็บน้ำที่บำบัดแล้ว ขนาด 60 ลิตร 1 ถัง
- 3) ปั๊มรีดส่าย (Peristaltic pump) 1 เครื่อง
- 4) เครื่องเติมอากาศ 1 เครื่อง พร้อมชุดหัวจ่ายอากาศ 3 ชุด
- 5) อุปกรณ์ตั้งเวลาอัตโนมัติควบคุมโดย 3 เครื่อง
- 6) สวิตช์อัตโนมัติควบคุมโดยระดับน้ำ (Level switch) 3 ชุด
- 7) มาตรวัดความดัน (Pressure gauge)
- 8) เครื่องแก้ว (Glassware)

3.1.2 เครื่องมือ

- 1) เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO meter) บริษัท Jenway รุ่น 9200 ประเทศอังกฤษ
- 2) เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter) บริษัท Denver Instrument รุ่น 215 ประเทศอังกฤษ
- 3) เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer) บริษัท Jenway รุ่น 6405 ประเทศอังกฤษ
- 4) เครื่องไอออนโครมาโทกราฟี (Ion Chromatograph) บริษัท Metrohm รุ่น DX 600 ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 5) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Single pan balance) บริษัท Denver Instrument Company รุ่น TC-254 ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 6) เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) บริษัท Perkin Elmer Ltd. รุ่น Spectrum GX ประเทศอังกฤษ
- 7) เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปี (Scanning Electron Microscopy) รุ่น 1450VP บริษัท Leo ประเทศเยอรมัน
- 8) เครื่องวิเคราะห์สารอินทรีย์คาร์บอน (Total Organic Carbon Analyzer) รุ่น TOC-V_{CSH} บริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น

3.1.3 สารเคมี

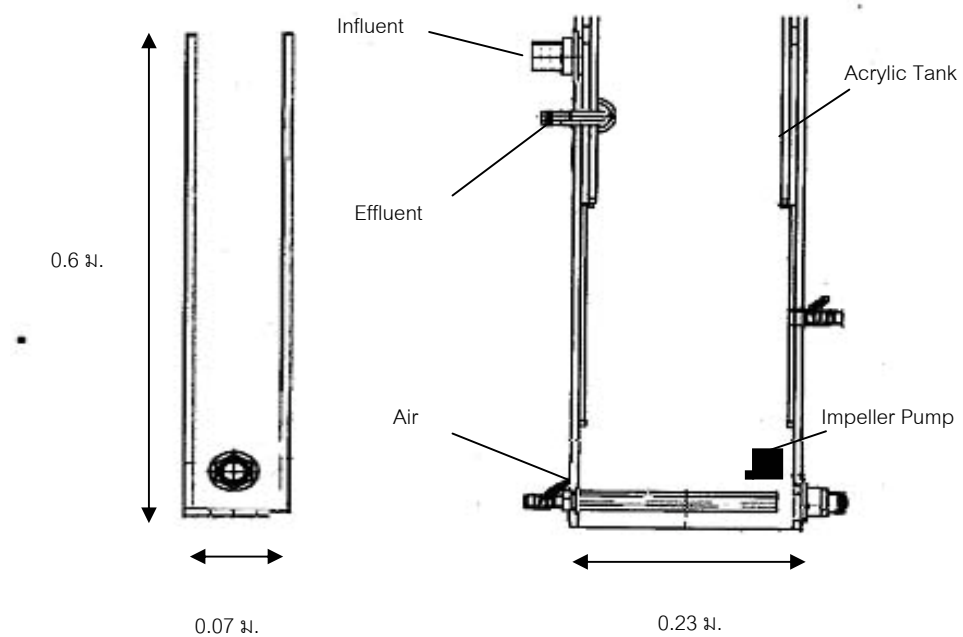
- 1) น้ำตาลซูโครส ($C_{12}H_{22}O_{11}$)
- 2) แอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific
- 3) โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 4) แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lab Scan
- 5) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 6) แมงกานีสคลอไรด์ ($MnCl_2 \cdot 4H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 7) เฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lab Scan
- 8) โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 9) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 10) ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท BHD Laboratory Supplies
- 11) ปรอทซัลเฟต ($HgSO_4$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 12) เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท BHD Laboratory Supplies

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

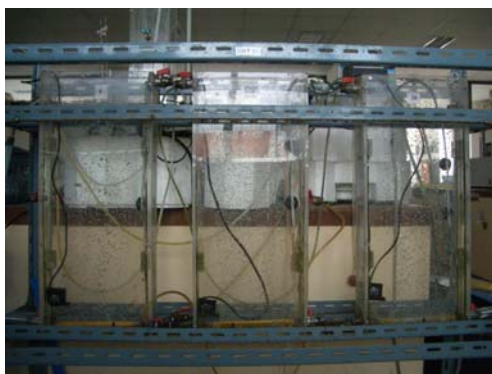
3.2.1 การติดตั้งและการทำงาน

1) การติดตั้งระบบเอสปีอาร์

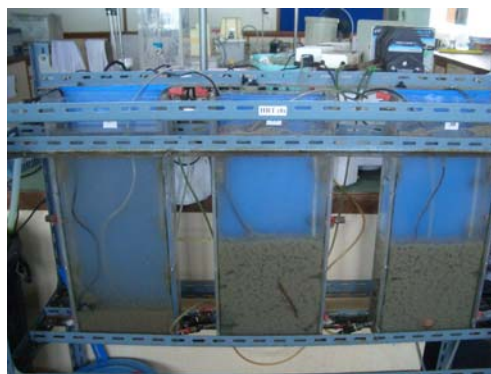
ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนทำจากแผ่นอะคริลิกขนาดกว้าง 0.07 เมตร ยาว 0.23 เมตร สูง 0.6 เมตร ความจุน้ำเท่ากับ 9 ลิตร ภายในถังประกอบด้วยระบบเติมอากาศและระบบปั่นกววน (ดังรูปที่ 3.1) น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบจะเข้าทางด้านบนโดยใช้ปั๊มสูบลูกจากถังจ่ายน้ำเสียและถูกสูบออกผ่านเมมเบรนด้วยปั๊มแบบรีดสายทางด้านบน



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.1 การติดตั้งระบบเอสบีอาร์ (ก) รายละเอียดของถัง SBR (ข) ก่อนเติมเชื้อจุลินทรีย์ และ (ค) หลังเติมเชื้อจุลินทรีย์

2) ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเอสปีอาร์

ในขั้นตอนการทำงานแบบครั้งเป็นการทดสอบประสิทธิภาพบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ยังมีได้ทำการใส่แผ่นเมมเบรนเข้าไปในระบบ ระบบการทำงานแบบครั้งมีลักษณะการทำงานในรูปแบบถึงปฏิกรณ์สลับเป็นกะ (Sequencing Batch Reactor) โดยถึงปฏิกรณ์ชีวภาพจะทำงานเป็นทั้งเติมอากาศ และถึงตกตะกอน แบ่งการทำงานออกเป็น 3 รอบต่อวัน รอบละ 8 ชั่วโมง แต่ละรอบการทำงานประกอบด้วย การป้อนน้ำเสียเข้าระบบ การเติมอากาศ การตกตะกอน และการสูบน้ำใส่ออกจากระบบ โดยขั้นตอนการทำงานแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเอสปีอาร์

ระยะเวลา (นาที)	การดำเนินการ	ปริมาณน้ำ (ลิตร)
18	ป้อนน้ำเข้าระบบ (Feed)	4.5
420	เติมอากาศ บั่นกวน (Aeration + Mixing)	9.0
45	ตกตะกอน (Settle)	9.0
15	สูบน้ำออกจากระบบผ่าน (Draw)	4.5

1) การเริ่มต้นเดินระบบโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Activated Sludge (AS) จากโรงงานซึ่งมีการดำเนินระบบบำบัดน้ำเสียประเภทนี้อยู่ โดยนำตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้มาผสมกับน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อปรับค่าความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ (MLSS) ให้อยู่ในระดับความเข้มข้นประมาณ 2,000-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในถังให้มีปริมาณในแต่ละถังเท่ากับ 9 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2

2) จ่ายน้ำเสียสังเคราะห์ (กล่าวในหัวข้อ 3.2.2) เข้าถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนถังละ 4.5 ลิตร รวมกับน้ำตะกอนจุลินทรีย์ที่เหลืออยู่ในถัง 4.5 ลิตร โดยกำหนดให้ค่า MLSS เท่ากับ 2,000-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปั๊มที่มีอัตราการสูบ 15 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งใช้เวลาในการสูบน้ำเข้าประมาณ 15 นาทีการทำงานของปั๊มถูกควบคุมโดยตัวตั้งเวลาอัตโนมัติ

3) ระบบเติมอากาศทำการให้อากาศกับจุลินทรีย์ และมีการบั่นกวนกันด้วยเครื่องสูบน้ำใบพัด เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศกับจุลินทรีย์ตกตะกอน ระบบเติมอากาศและบั่นกวนถูกควบคุมโดยตัวตั้งเวลาอัตโนมัติ

4) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดระบบหยุดการเติมอากาศและบั่นกวน ปล่อยให้เกิดการตกตะกอน จุลินทรีย์เป็นเวลา 45 นาที หลังจากนั้นเครื่องสูบน้ำจะดูดน้ำส่วนที่ใส่ออกจากระบบโดยผ่านเมมเบรน โดยสูบน้ำออกเป็นปริมาตร 50% ของปริมาตรรวม

5) เก็บตัวอย่างขณะเดินระบบเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) รวมทั้งเก็บตัวอย่างน้ำก่อนเข้า และออกจากระบบเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ



รูปที่ 3.2 ภาพระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ค่าอายุสัปดาห์แตกต่างกัน

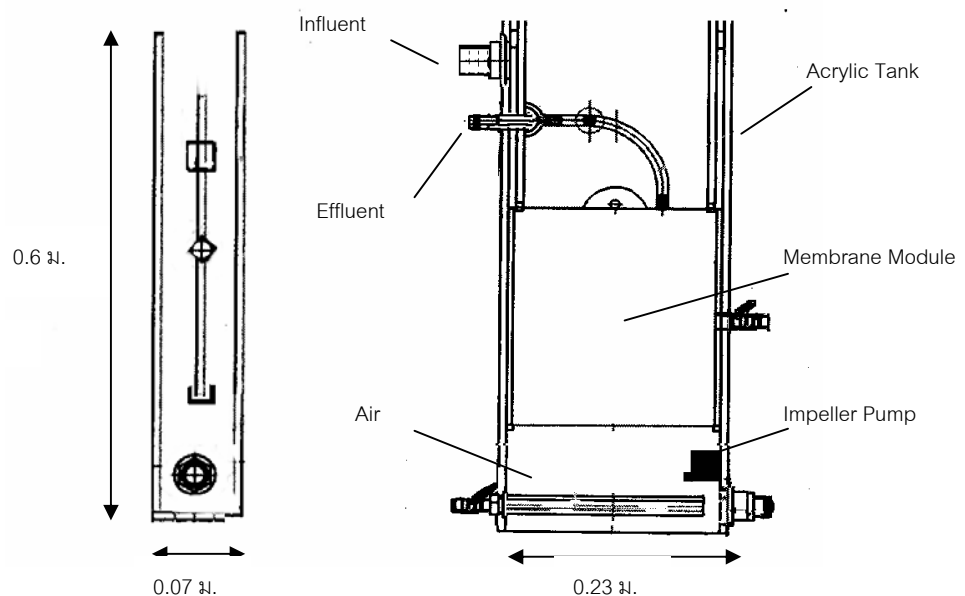
3) การติดตั้งถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

- 1) นำแผ่นเมมเบรนติดตั้งตรงแท่นสำหรับใส่เมมเบรนจำนวน 3 ถัง (ดังรูปที่ 3.3)
- 2) เมมเบรนที่ใช้เป็นเมมเบรนประเภท ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน (Microfiltration Membrane; MF) ของ บจก.คูโบต้า ประเทศไทย ญี่ปุ่น คุณสมบัติของเมมเบรน ที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเมมเบรน

ข้อมูลแผ่นเมมเบรน	รายละเอียด
รูปแบบของเมมเบรน	Flat Microfiltration Membrane
วัสดุ	Hydrophilic Polypropylene
ขนาดรูกรอง	0.4 ไมโครเมตร
ขนาดของโมดูล	22.6 x 31.6 x 0.6 เซนติเมตร
พื้นที่ผิวเมมเบรน (ต่อด้าน)	0.1 ตารางเมตร
อัตราการไหล	4-5 ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง
การทำความสะอาด	6-12 เดือน

ที่มา : บจก.คูโบต้า ประเทศไทย ญี่ปุ่น (2548)



รูปที่ 3.3 รายละเอียดของถัง MBR

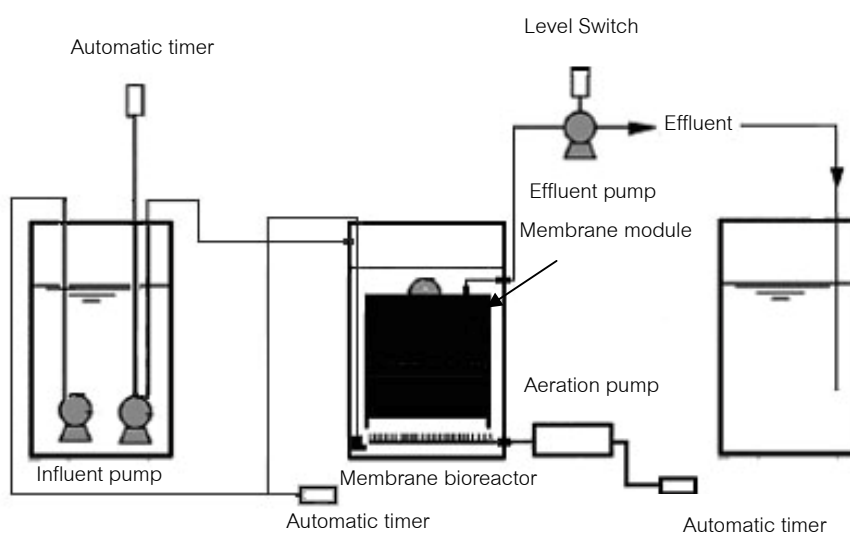
4) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

ในการการทำงานของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน (MBR) ใช้ลักษณะการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous mode) โดยการใส่แผ่นเมมเบรนในตำแหน่งที่เตรียมไว้ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ขั้นตอนในการเดินระบบมีดังนี้

1) จ่ายน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนด้วยอัตราการไหล 1.125 ลิตรต่อชั่วโมง เพื่อควบคุมระยะเวลาในการกักเก็บ (HRT) ให้มีค่าเท่ากับ 8 ชั่วโมง ในขณะที่สูบน้ำเข้าระบบเติมอากาศทำการให้อากาศกับจุลินทรีย์ และมีการปั่นกววนเพื่อป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์ตกตะกอน ระบบเติมอากาศและปั่นกววนถูกควบคุมโดยตัวตั้งเวลาอัตโนมัติ

2) เมื่อน้ำไหลเข้าระบบจนถึงปริมาตร 9 ลิตร Level switch ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมระดับน้ำภายในถังเริ่มทำงานทำให้เครื่องสูบน้ำสุญญากาศดูดน้ำออกจากระบบโดยผ่านเมมเบรน จนถึงปริมาตร 7.5 ลิตร Level switch จะหยุดการทำงานของเครื่องสูบน้ำ ในขณะที่สูบน้ำออกถูกควบคุมโดย Level switch (ดังแสดงในรูปที่ 3.4)

3) ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบรวมทั้งตัวอย่างน้ำที่อยู่ในระบบเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state)



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงการทำงานของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

ในการเดินระบบ MBR ปัจจัยที่ทำการควบคุม ได้แก่

- 1) ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (HRT) ควบคุมเท่ากับ 8 ชั่วโมง (Yang et al.2004)
- 2) อัตราการไหลของน้ำเสียที่ทำการบำบัดเท่ากับ 27 ลิตร/วัน
- 3) ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นอาหารของจุลินทรีย์ในอัตราส่วน ซีโอดี:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส เท่ากับ 150:5:1
- 4) อุณหภูมิของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ (แปรตามอุณหภูมิห้อง)
- 5) ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ มากกว่า 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร (ช่วงเติมอากาศ)
- 6) พิเฆนน้ำภายในถังปฏิกรณ์ควบคุมในช่วง 6.5-8.5 โดยใช้สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ในการควบคุมพีเอช

3.2.2 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

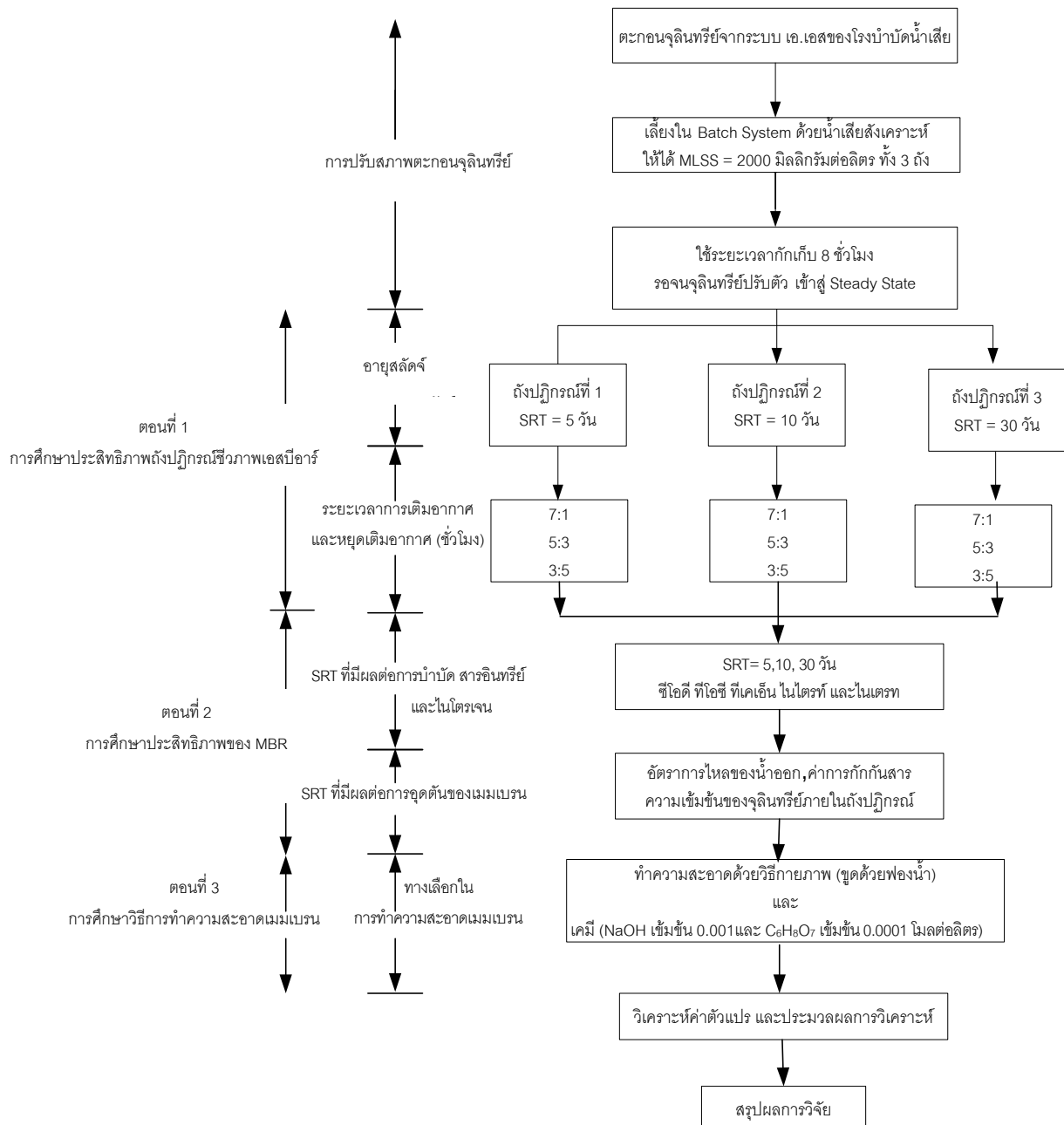
คุณสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.3 โดยในน้ำเสียสังเคราะห์ จะมีค่าอัตราสารอินทรีย์ 0.9 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน ค่าไนโตรเจนทั้งหมด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยกำหนดอัตราส่วนสารอาหารที่จุลินทรีย์ต้องการเท่ากับ คาร์บอน : ไนโตรเจน เท่ากับ 5.6:1 (ชาญศักดิ์ คชานุบาล, 2542)

ตารางที่ 3.3 ส่วนประกอบและความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์

สารประกอบ	สูตรเคมี	มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Organics and nutrients			
Sucrose	$C_{12}H_{22}O_{11}$	342.0	266
Ammonium sulfate	$(NH_4)_2SO_4$	132.1	54.25
Potassium phosphate	KH_2PO_4	136.1	20.85
Trace nutrients			
Calcium chloride	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	147.0	0.368
Magnesium sulfate	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	246.5	5.07
Manganese chloride	$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	197.9	0.275
Zinc sulfate	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	287.5	0.44
Ferric chloride anhydrous	$FeCl_3$	162.2	1.45

3.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ

ขั้นตอนในการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ตอน คือ 1) การทดสอบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบครั้ง ทำการเดินระบบแบบเอสปีอาร์ 2) การทดสอบการทำงานของถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง 3) การศึกษาอายุสลัดจ์ที่มีผลต่อการอุดตัน และ 4) การศึกษาวิธีการทำความสะอาดเมมเบรน (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการวิจัย

3.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเอสปีอาร์

3.3.1.1 ศึกษาของอัตราภาระสารอินทรีย์และอายุสลัดจ์ต่อการกำจัด

สารอินทรีย์และไนโตรเจน

- 1) ใช้ระยะเวลาพักน้ำ (HRT) รอบละ 8 ชั่วโมง วันละ 3 รอบ
- 2) ค่าอายุสลัดจ์ (SRT) การทดลองจะใช้อายุสลัดจ์ 3 ค่า คือ 5, 10 และ 30 วันตามลำดับ ควบคุมโดยปรับอัตราการถ่ายทิ้งของสลัดจ์ แสดงดังตารางที่ 3.4 (ดูรายละเอียดในการคำนวณในภาคผนวก ง.1)

ตารางที่ 3.4 อัตราการถ่ายทิ้งของสลัดจ์ต่อวัน

อายุสลัดจ์ (วัน)	อัตราการถ่ายทิ้งของสลัดจ์ (ลิตรต่อวัน)
5	1.8
10	0.9
30	0.3

- 3) ทำการเดินระบบ ดังตารางที่ 3.2 โดยใช้อัตราภาระสารอินทรีย์ 1.5 กิโลกรัม ซีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตร วัน
- 4) ทำการเปลี่ยนอัตราภาระสารอินทรีย์จาก 1.5 เป็น 3 และ 6 กิโลกรัมซีโอดีต่อ ลูกบาศก์เมตร-วัน
- 5) ควบคุมสภาวะการทำงานของระบบ โดยการวิเคราะห์ค่า pH, DO, MLSS และอุณหภูมิ
- 6) ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ โดยการเก็บน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบมาทำการ วิเคราะห์หาค่าซีโอดี ทีโอซี ทีเคเอ็น ไนโตรเจน และไนเตรต ตามที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 3.6

3.3.1.2 ศึกษาระยะเวลาที่เติมอากาศและหยุดเติมอากาศ

- 1) ใช้ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (HRT) รอบละ 8 ชั่วโมง วันละ 3 รอบ
- 2) ค่าอายุสลัดจ์ (SRT) ควบคุมที่อายุสลัดจ์ 3 ค่า คือ 5, 10 และ 30 วัน ตามลำดับ
- 3) แบ่งการทดลองสภาวะเติมอากาศและหยุดเติมอากาศได้ 3 สภาวะ
 - สภาวะแรก เติมอากาศ 7 ชั่วโมง และหยุดเติมอากาศ 1 ชั่วโมง
 - สภาวะที่สอง เติมอากาศ 5 ชั่วโมง และหยุดเติมอากาศ 3 ชั่วโมง
 - สภาวะที่สาม เติมอากาศ 3 ชั่วโมง และหยุดเติมอากาศ 5 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม ในขณะที่หยุดเติมอากาศยังคงมีการปั่นกวเพื่อป้องกันมิให้สลัดจ์ตกตะกอน ดังตารางที่ 3.5

- 4) ควบคุมสภาวะการทำงานของระบบ โดยการวิเคราะห์ค่า pH DO MLSS และอุณหภูมิ
- 5) ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ โดยการเก็บน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบมาทำการวิเคราะห์หาค่าซีโอดี ทีโอซี ทีเคเอ็น ไนโตรเจน ไนโตรเจน ตามที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 การทดสอบผลของสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศ

3.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ MBR

3.3.2.1 ศึกษาอายุสลัดจ์ที่มีผลต่อการบำบัดสารอินทรีย์และไนโตรเจน

- 1) เติกระบบแบบต่อเนื่อง
- 2) ค่าอายุสลัดจ์ (SRT) ควบคุมที่อายุสลัดจ์ 3 ค่า คือ 5, 10 และ 30 วัน ตามลำดับ
- 3) เติกระบบด้วยการทำงานแบบเติมอากาศเป็นช่วง ๆ มีรอบเวลาการเติมอากาศที่ได้จากการทดลอง ข้อที่ 3.3.1.2
- 4) ควบคุมสภาวะการทำงานของระบบ โดยการวิเคราะห์ค่า pH, DO, MLSS และอุณหภูมิ
- 5) ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ โดยการเก็บน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบมาทำการวิเคราะห์หาค่าซีโอดี ทีโอซี ทีเคเอ็น ไนโตรเจน ไนโตรเจน ตามที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 3.6

3.3.2.2 ศึกษาอายุสลัดจ์ที่มีผลต่อการดูดซับของเมมเบรน

- 1) เติกระบบแบบต่อเนื่อง
- 2) ค่าอายุสลัดจ์ (SRT) การทดลองจะใช้อายุสลัดจ์ 3 ค่า คือ 5, 10 และ 30 วันตามลำดับ
- 3) เติกระบบด้วยการทำงานแบบเติมอากาศเป็นช่วง ๆ มีรอบเวลาการเติมอากาศที่ได้จากการทดลอง ข้อที่ 3.3.1.2
- 4) ทำการวิเคราะห์หาฟลักซ์ของน้ำออกโดยการวัดปริมาตรน้ำที่ออกจากระบบต่อเวลาต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ต่อความดัน

สภาวะที่
เติมอากาศ:ขาดอากาศ
(ชม.)

1

7:1

2

5:3

3.3.3 การศึกษาการอุดตันของเมมเบรนด้วยแบบจำลองความต้านทานแบบอนุกรม

อัตราการไหลของน้ำเพอร์มีเอทที่ผลิตได้มีการลดลง มีสาเหตุมาจากการอุดตันที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน ซึ่งการอุดตันที่เกิดขึ้นจะทำให้ค่าความต้านรวมของเมมเบรนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นนี้มีหลายสาเหตุด้วยกัน คือ เกิดจาก เจลโพลาริเซชัน และชั้นเค้ก (r_c), การดูดซับที่สามารถทำความสะอาดด้วยสารละลายต่างได้ (r_g) และการดูดซับอย่างถาวร (r_a) โดยความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถอธิบายได้ตามกฎของ Darcy และแบบจำลองความต้านทานแบบอนุกรม ดังสมการที่ 2.8 (ดูรายละเอียดในการคำนวณในภาคผนวก ง.2)

ในการทดลองเพื่อหาความต้านทานแบบอนุกรมมีทั้งทางกายภาพและเคมี ซึ่งมีขั้นตอนปฏิบัติดังนี้

1. ทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารละลายกรดและสารละลายเบส แล้วทำการเดินระบบด้วยน้ำปราศจากไอออน บันทึกความดัน และอัตราการไหลเริ่มต้น เพื่อใช้หาความต้านทานของเมมเบรน (r_m)
2. นำแผ่นเมมเบรนติดตั้งในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเดินระบบบันทึกค่าความดันและอัตราการไหล ค่าอัตราการไหลที่ลดลงในช่วงเวลาสิ้นสุดการทดลองที่เกิดจากความต้านทานประเภทต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ค่าความดันและอัตราการไหลที่บันทึกได้จะนำไปใช้ในการหาความต้านทานที่เกิดจากการอุดตันบนเมมเบรน ($r_m + r_c + r_g + r_{a1} + r_{a2}$)
3. นำแผ่นเมมเบรนออกจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพ นำมาล้าง (rinse) ด้วยน้ำสะอาด 15 นาที และวัดอัตราการไหล ค่าความต้านทานของเมมเบรนที่หายไปจากการดำเนินการขั้นตอนนี้ ได้ความต้านทานที่เกิดจากปรากฏการณ์ เจลโพลาริเซชัน และเค้ก (r_c)
4. ชูดชั้นที่สะสมออกจากผิวหน้าเมมเบรนด้วยฟองน้ำ ตามด้วยน้ำสะอาด วัดอัตราการไหลของน้ำ เพอร์มีเอท ความต้านทานที่หายไปจากการดำเนินการขั้นนี้ ได้ความต้านทานที่เกิดจากชั้นเจล (r_g)
5. นำไปแช่สารละลาย NaOH เป็นเวลา 30 นาที ตามด้วยน้ำสะอาด วัดอัตราการไหลของน้ำเพอร์มีเอท ความต้านทานที่ได้จะเป็นความต้านทานที่เกิดจากการดูดซับอย่างอ่อน (r_{a1})
6. นำไปแช่สารละลาย $C_6H_8O_7$ เป็นเวลา 30 นาที ตามด้วยน้ำสะอาด วัดอัตราการไหลของน้ำเพอร์มีเอท ความต้านทานที่ยังเหลืออยู่ที่ไม่สามารถทำความสะอาดได้ด้วยสารเคมีคือ ความต้านทานที่ยังคงติดค้างบนเมมเบรน (r_{a2})

จากขั้นตอนดังกล่าว ทำให้สามารถทราบค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากสาเหตุต่าง ๆ และถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์การอุดตันบริเวณผิวหน้าเมมเบรน

3.3.4 การศึกษาวิธีการทำความสะอาดเมมเบรน

การทำความสะอาดเมมเบรนได้ทำการศึกษาทั้งทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำแผ่นเมมเบรนออกจากระบบ
- 2) ล้างทิ้ง (rinse) ด้วยน้ำสะอาด 15 นาที ทดสอบค่าฟลักซ์ของน้ำ
- 3) ทำความสะอาดโดยวิธีทางกายภาพโดยชุดชั้นที่สะสมออกจากผิวหน้าเมมเบรนด้วยฟองน้ำ
- 4) ล้างทิ้ง (rinse) ด้วยน้ำสะอาด 15 นาที ทดสอบค่าฟลักซ์ของน้ำ
- 5) การทำความสะอาดทางเคมีโดยนำไปแช่สารละลาย NaOH เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด ทดสอบค่าฟลักซ์ของน้ำ จากนั้นนำไปแช่สารละลาย $C_6H_8O_7$ เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด ทดสอบค่าฟลักซ์ของน้ำ

3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.4.1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

น้ำเสียส่งเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดแล้ว ถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

ลำดับ	พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
1	อัตราการไหล	Flow Meter
2	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	pH Meter
3	ค่าซีโอดี (COD)	Closed Reflux, Titrimetric Method
4	ค่าสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC)	Total Organic Carbon Analyzer (TOC)
5	ปริมาณของแข็งแขวนลอย	Gravimetric Method
6	ออกซิเจนละลายน้ำ	DO Meter
7	อุณหภูมิ	Thermometer
8	เจลดาร์ลไนโตรเจน (TKN)	Kjeldahl Digestion
9	แอมโมเนียไนโตรเจน	Ion Chromatography (IC)
10	ไนไตรต์	Ion Chromatography (IC)
11	ไนเตรต	Ion Chromatography (IC)

ที่มา : (APHA, AWWA and WEF. 1995)

3.4.2 การวิเคราะห์การดูดตันเมมเบรน

การวิเคราะห์การดูดตันของเมมเบรน เพื่อหาสารดูดตันที่ติดค้างบนเมมเบรนของแผ่นเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน ทั้งที่ไม่ได้ผ่านการทดลองและผ่านการทดลองแล้วถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) เพื่อให้ทราบถึงสารที่ดูดตันอยู่บริเวณผิวหน้าเมมเบรน แต่การทดลองต้องทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง จึงไม่สามารถตัดแผ่นเมมเบรนมาทำการวิเคราะห์ได้ จึงมีการทดสอบโดยใช้กระดาษกรองที่มีขนาดรูใกล้เคียงกับแผ่นเมมเบรนเพื่อหาสารดูดตันที่ติดค้างบนเมมเบรนได้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ โดยแบ่งขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยออกเป็น 4 ตอน คือ 1) การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเอสปีอาร์ 2) การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน 3) การศึกษาการอุดตันของเมมเบรน และ 4) การศึกษาวิธีการทำความสะอาดเมมเบรน ซึ่งผลการวิจัยเป็นดังนี้คือ

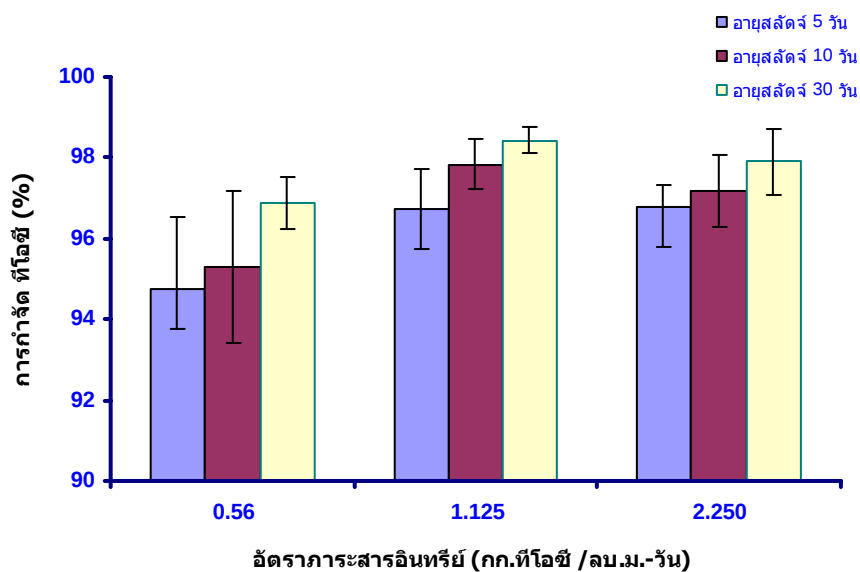
4.1 การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์

การทดสอบถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ทำการเดินระบบแบบเอสปีอาร์โดยทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และไนโตรเจน ตัวแปรอิสระในการทดลอง ได้แก่ค่าอายุสลัดจ์ (SRT) และสภาวะการเติมอากาศ (Aeration) และหยุดเติมอากาศ (Non-aeration) ซึ่งผลการทดลองสรุปผลได้ดังนี้

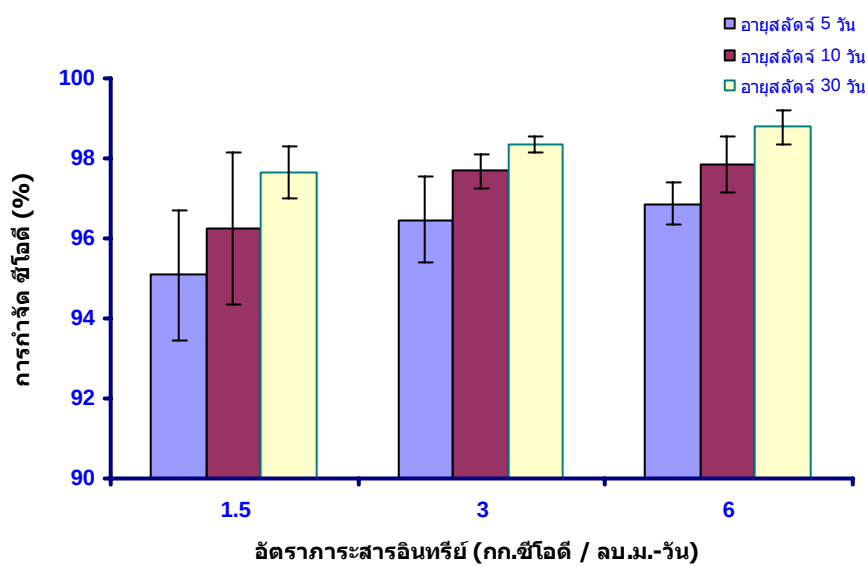
4.1.1 ผลของอัตราภาระสารอินทรีย์และอายุสลัดจ์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และไนโตรเจน

ผลของอัตราภาระสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และไนโตรเจน โดยการเดินระบบแบบเอสปีอาร์ที่ค่าอายุสลัดจ์ต่างกัน คือ 5, 10 และ 30 วัน ทำการเพิ่มค่าอัตราภาระสารอินทรีย์จาก 0.56 ถึง 2.25 กิโลกรัม ทีโอซี ต่อ ลูกบาศก์เมตร-วัน หรือ 1.5 ถึง 6 กิโลกรัม ทีโอซี ต่อ ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าที่อายุสลัดจ์คงที่การเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์จาก 1.5 ถึง 3 กิโลกรัม ทีโอซี ต่อ ลูกบาศก์เมตร-วัน ส่งผลให้ค่าการกำจัด ทีโอซี และซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์จนถึง 6 กิโลกรัม ทีโอซี ต่อ ลูกบาศก์เมตร-วัน การกำจัดจะเริ่มคงที่ โดยค่าการกำจัดสารอินทรีย์ทั้งในรูปของทีโอซี และซีโอดีอยู่ระหว่างร้อยละ 96-98 ดังรูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตาราง ก.1.1 และ ก.1.2 ในภาคผนวก ก)

เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากันพบว่าอายุสลัดจ์ มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์โดยอายุสลัดจ์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการกำจัดสารอินทรีย์มีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้ เพราะค่าอายุสลัดจ์ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสะสมของเซลล์จุลินทรีย์ในระบบจึงมีการใช้สารอินทรีย์ในระบบมากส่งผลให้ระบบมีการกำจัดทีโอซี และซีโอดีมากตามไปด้วยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kargi and Eker (2004)



(ก)



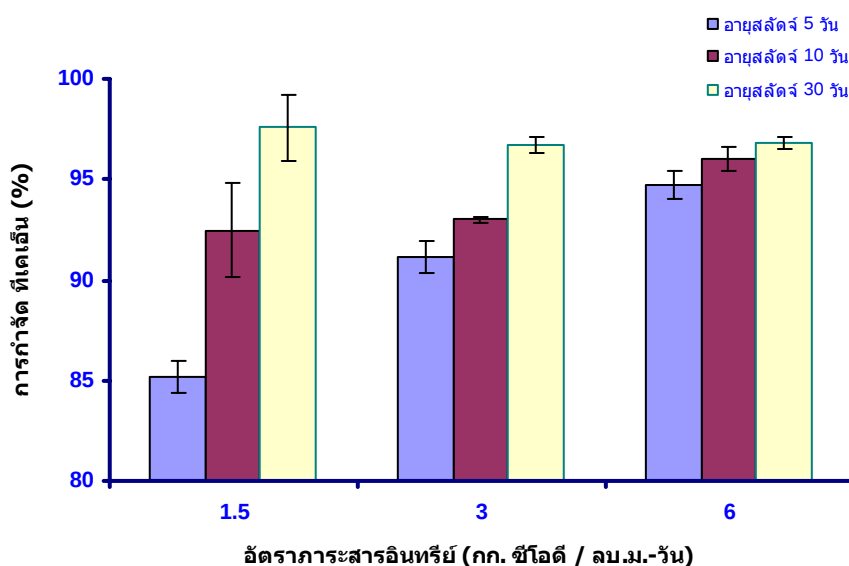
(ข)

รูปที่ 4.1 ผลของอัตราสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบเอสปีอาร์ในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ (ก) ทีไอซี (ข) ซีไอดี

รูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตาราง ก.1.3 ในภาคผนวก ก) แสดงร้อยละการกำจัดที่เคเอ็นที่ อัตราภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ โดยพบว่า การกำจัดที่เคเอ็นที่อัตราภาระสารอินทรีย์ต่ำ 1.5 กิโลกรัม ซีโอดี ต่อ ลูกบาศก์เมตร-วัน อายุสลัดจ์มีผลต่อการกำจัดที่เคเอ็นโดยที่อายุสลัดจ์ต่ำการกำจัดที่เคเอ็น มีค่าน้อยกว่าอายุสลัดจ์สูง

ที่อายุสลัดจ์ 5 วัน อัตราภาระสารอินทรีย์มีผลต่อการกำจัดที่เคเอ็น อัตราภาระสารอินทรีย์ น้อยทำให้การกำจัดน้อยลง เพราะอาจจะมีเชื้อพวกออโตโทรฟ (Autotroph) น้อย อัตราภาระ สารอินทรีย์มากทำให้กำจัดที่เคเอ็นได้มาก โดยที่เคเอ็นจะถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนรูปไปเป็นไนไตรต์ (NO_2^-) และไนเตรต (NO_3^-) ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Moussa *et al.* 2005) แต่ที่อายุสลัดจ์ 10 และ 30 วัน อัตราภาระไม่มีผลต่อการกำจัดที่เคเอ็น

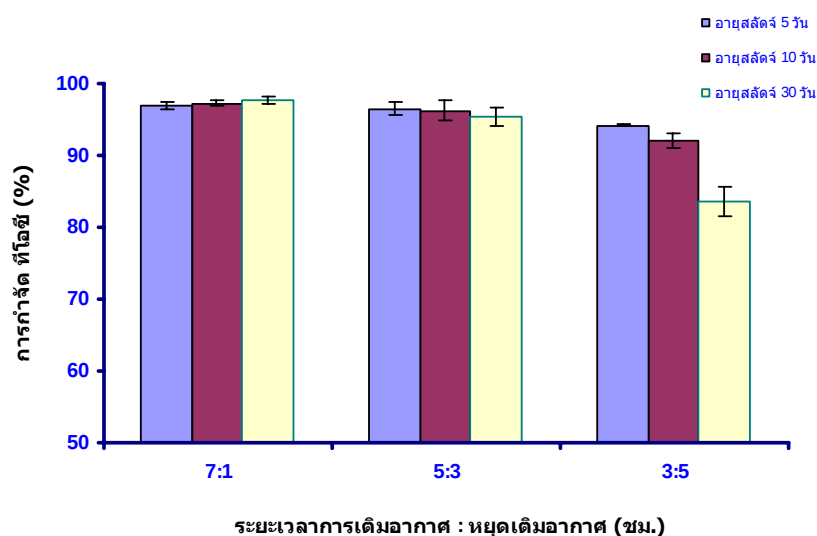
อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากันอายุสลัดจ์น้อยการกำจัดที่เคเอ็นก็จะน้อยตาม เพราะที่อายุ สลัดจ์มากอาจมีการสะสมตัวของพวกออโตโทรฟ



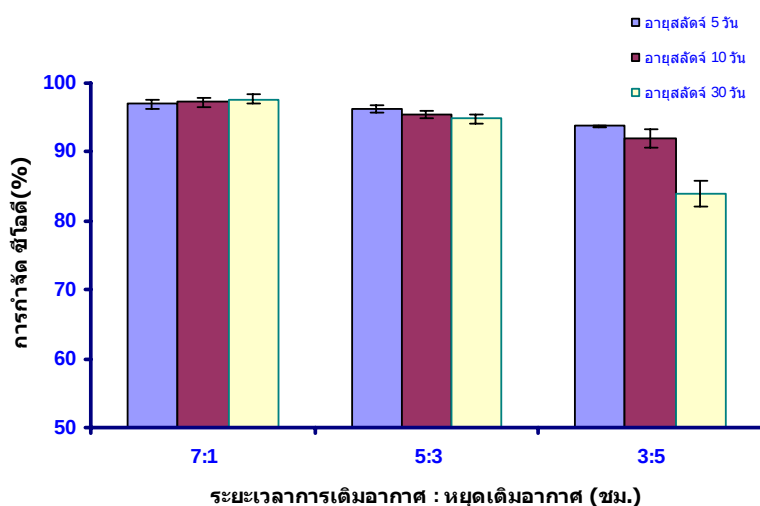
รูปที่ 4.2 ผลของอัตราภาระสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบเอสปีอาร์ในการ กำจัดไนโตรเจนในรูปของทีเคเอ็น

4.1.2 ผลของระยะเวลาการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศ

ในการศึกษาผลของระยะเวลาการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเอสปีอาร์ ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 สภาวะของการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศในรอบ 8 ชั่วโมง ได้แก่ สภาวะแรก เติมอากาศ 7 ชั่วโมง และหยุดเติมอากาศ 1 ชั่วโมง (7:1) สภาวะที่สอง เติมอากาศ 5 ชั่วโมง และหยุดเติมอากาศ 3 ชั่วโมง (5:3) และสภาวะที่สาม เติมอากาศ 3 ชั่วโมง และหยุดเติมอากาศ 5 ชั่วโมง (3:5) ผลของการทดลองสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของทีโอซี ซีโอดี และการกำจัดทีเคเอ็น ได้ดังรูป 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ (ดูรายละเอียดในตาราง ก.2.1-ก.2.6 ในภาคผนวก ก)



(ก)



(ข)

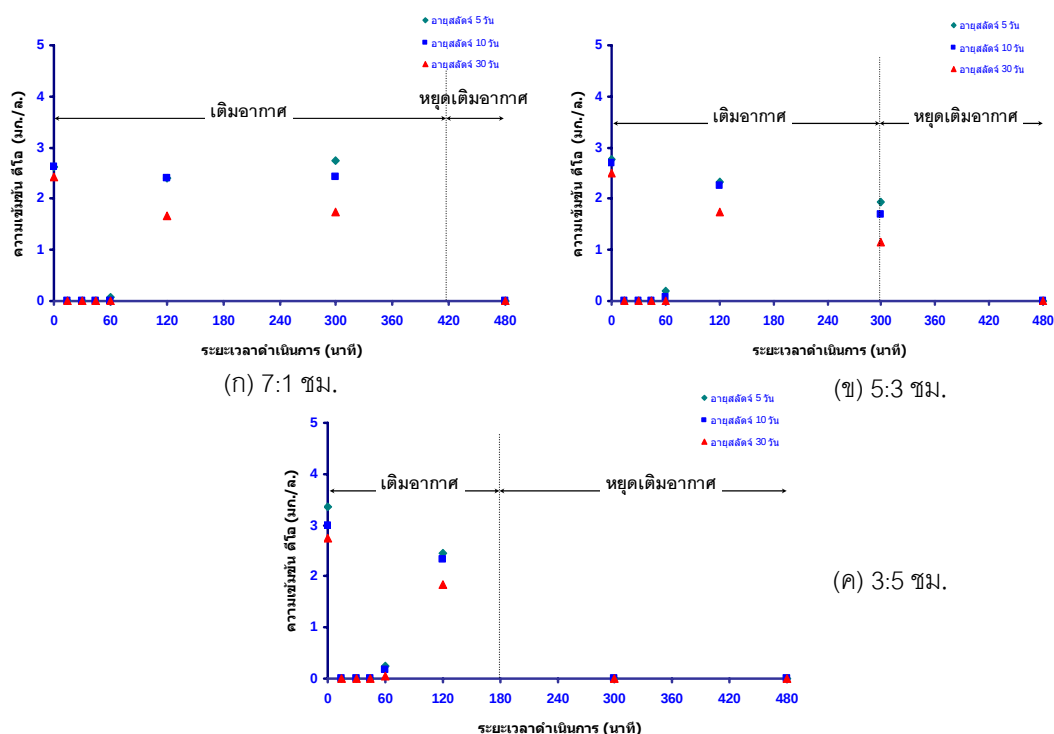
รูปที่ 4.3 ผลของสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ (ก) ทีโอซี และ (ข) ซีโอดี

จากรูปที่ 4.3 พบว่าการเติมอากาศต่อหยุดเติมอากาศที่ 7:1 และ 5:3 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์สูงกว่าที่ 3:5 โดยที่สภาวะ 7:1 ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของทีโอซี (รูปที่ 4.3 ก) และซีไอดี (รูปที่ 4.3 ข) ใกล้เคียงกันโดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 97, 97 และ 98 ที่อายุสัปดาห์ 5, 10 และ 30 วัน ตามลำดับ

ในขณะที่สภาวะ 5:3 ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าทีโอซี และซีไอดีเฉลี่ยร้อยละ 96, 96 และ 95 ที่อายุสัปดาห์ 5, 10 และ 30 วัน ตามลำดับ

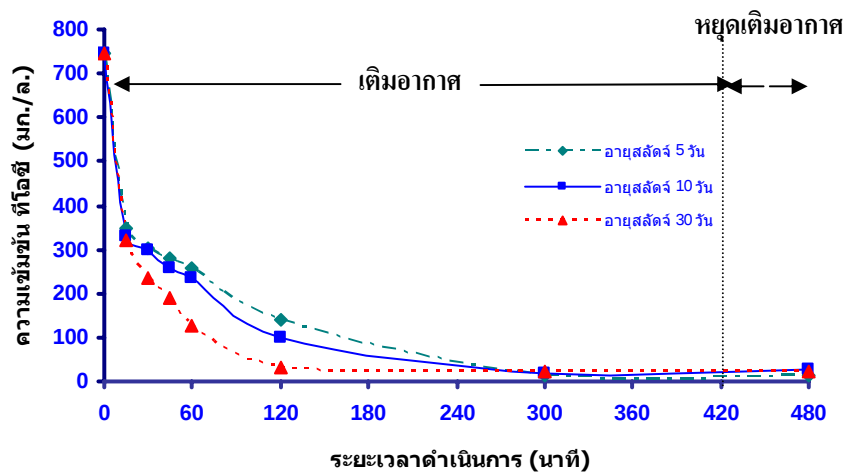
และที่สภาวะ 3:5 ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าทีโอซี และซีไอดีเฉลี่ยร้อยละ 94, 92 และ 84 ที่อายุสัปดาห์ 5, 10 และ 30 วัน ตามลำดับ

จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่า ในสภาวะการเติมอากาศต่อการหยุดเติมอากาศที่ 7:1 และ 5:3 ชม. การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปทีโอซีและซีไอดีมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่ออายุสัปดาห์สูงขึ้น แต่ที่สภาวะการเติมอากาศต่อการหยุดเติมอากาศที่ 3:5 ชม. การเพิ่มอายุสัปดาห์ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ลดลง เพราะในช่วงที่มีการเติมอากาศจุลินทรีย์มีการนำออกซิเจนไปใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ สร้างเซลล์ และใช้ย่อยสลายจุลินทรีย์ตัวอื่นที่ตายแล้ว ดังนั้นในช่วงที่หยุดเติมอากาศเกิดการตายของจุลินทรีย์ที่ใช้ ออกซิเจนตาย ทำให้ออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการย่อยสลายจุลินทรีย์ที่ตายแล้ว จึงทำให้ที่สภาวะหยุดเติมอากาศ ประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซี และซีไอดีมีค่าลดลง รูปที่ 4.4 แสดงปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่เวลาต่างๆในรอบการทำงาน 8 ชั่วโมง

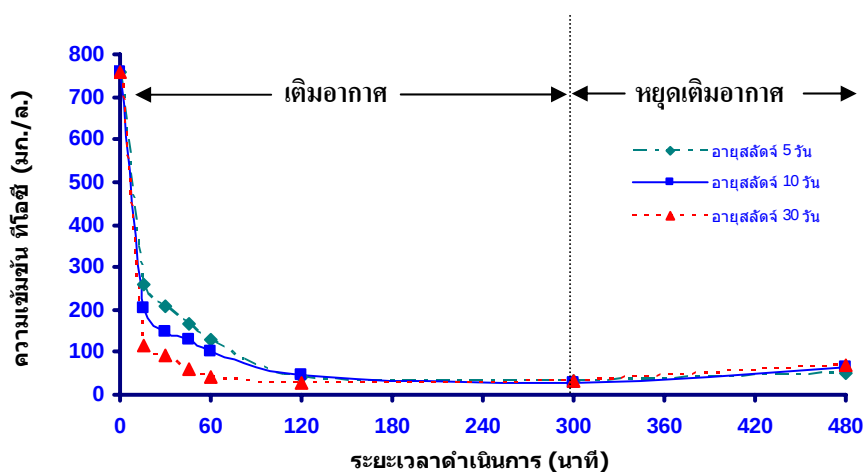


รูปที่ 4.4 โปรไฟล์ของดีไอในสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่าง ๆ

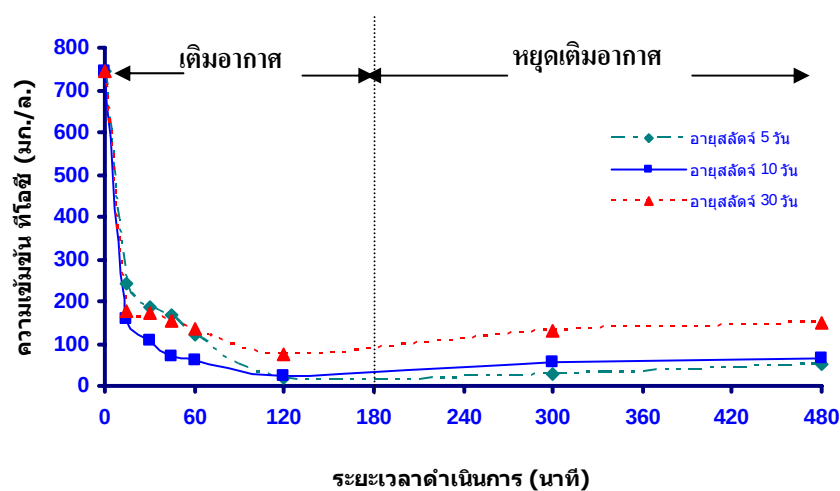
(ก) 7:1 ชม. (ข) 5:3 ชม. และ (ค) 3:5 ชม.



(ก) 7:1 ชม.



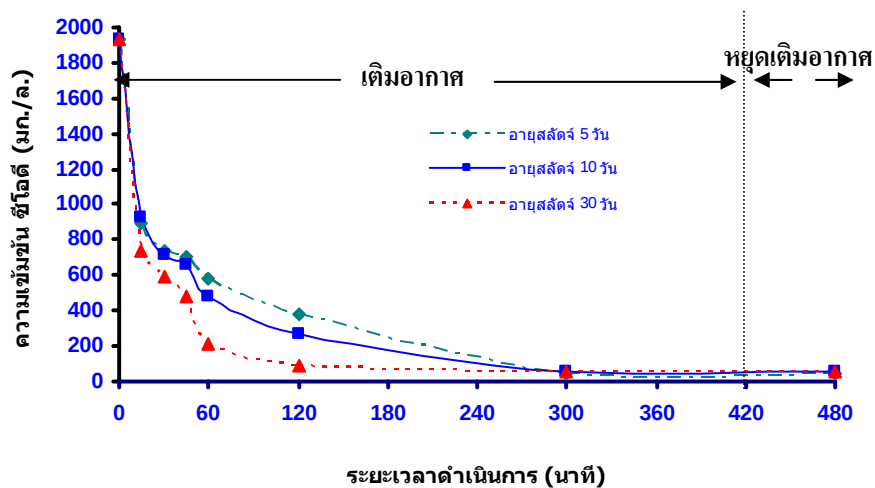
(ข) 5:3 ชม.



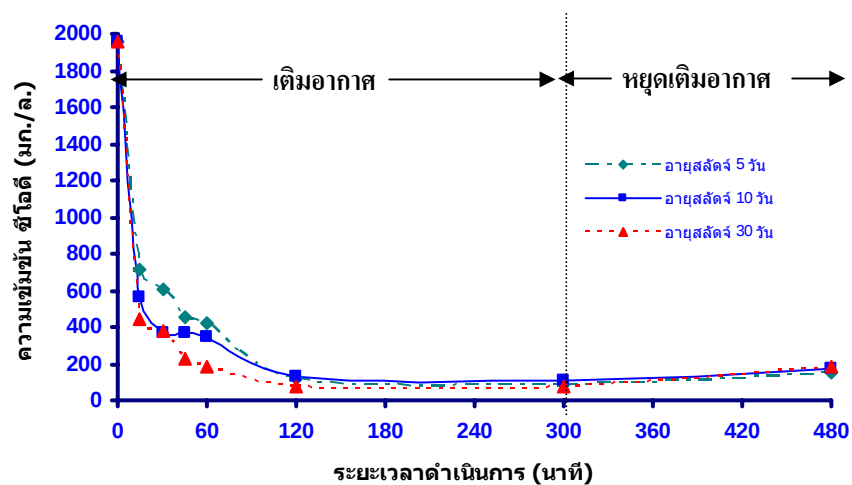
(ค) 3:5 ชม.

รูปที่ 4.5 โปรไฟล์การลดลงซีไอซี ในสภาวะการเต็มอากาศและหยุดเต็มอากาศต่าง ๆ

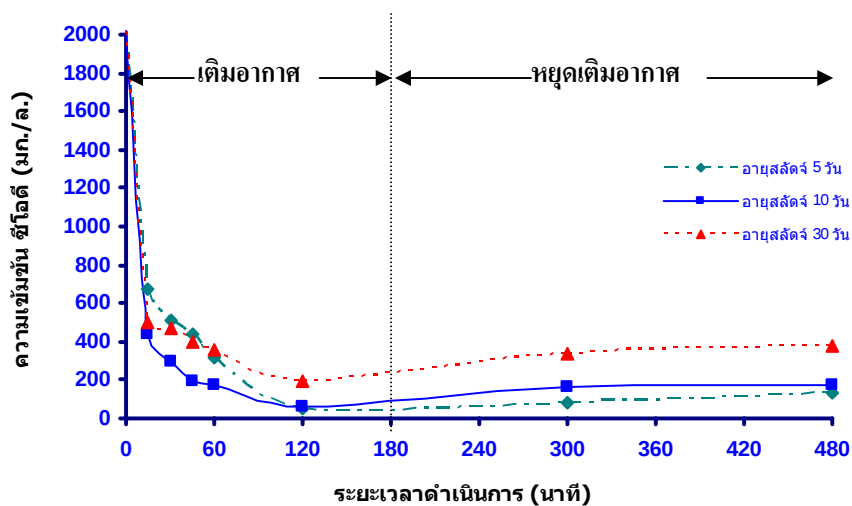
(ก) 7:1 ชม. (ข) 5:3 ชม. และ (ค) 3:5 ชม.



(ก) 7:1 ชม.



(ข) 5:3 ชม.



(ค) 3:5 ชม.

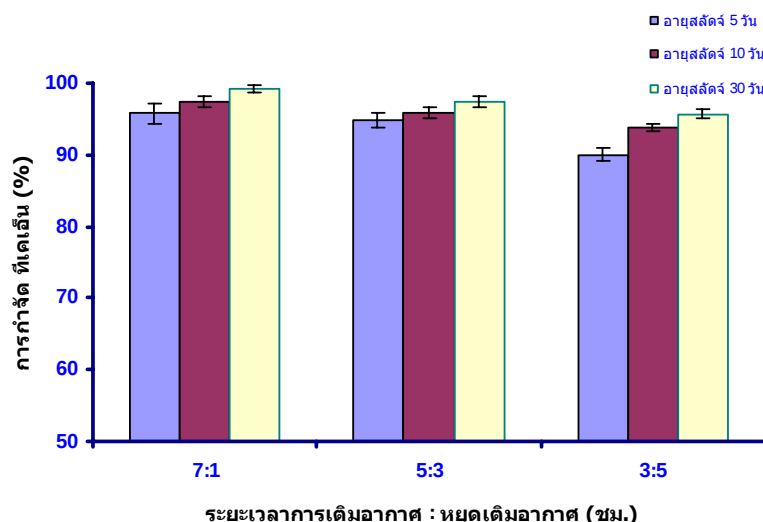
รูปที่ 4.6 โปรไฟล์การลดลงของซีโอดีในสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่าง ๆ

(ก) 7:1 ชม. (ข) 5:3 ชม. และ (ค) 3:5 ชม.

การศึกษาโปรไฟล์การลดลงของสารอินทรีย์ ในรูปของทีโอซี ในระบบเอสบีอาร์ ที่สภาวะการเติมอากาศต่อหยุดเติมอากาศต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตาราง ก.3.1 ในภาคผนวก ก) พบว่า ในช่วงเริ่มต้นของรอบการเติมอากาศค่าทีโอซีลดลงอย่างรวดเร็ว เกิดจากผลของการเจือจางของน้ำที่เหลืออยู่ในถัง 4.5 ลิตร จากนั้นการลดลงเกิดจากการใช้สารอินทรีย์ของจุลินทรีย์มากขึ้นตามค่าอายุสัลดจ์ โดยที่อายุสัลดจ์สูงปริมาณจุลินทรีย์ในระบบมากค่าทีโอซีลดลงมากกว่าที่อายุสัลดจ์ต่ำ ซึ่งมีค่า MLSS ต่ำกว่า ที่สภาวะ 7:1 (ก) และ 5:3 (ข) ชม. การลดลงของ ทีโอซี มีค่ามากในช่วงการเติมอากาศที่ยาวนานขึ้น โดยจะสังเกตเห็นจากนาฬิกาที่ 180 - 300 อย่างไรก็ตาม ในระบบยังมีค่าทีโอซีหลงเหลืออยู่ เนื่องจากการสลายตัวของเซลล์ปล่อยสารอินทรีย์ที่เรียกว่า สารชีวภัณฑ์ละลายน้ำได้ (Soluble Microbial Products, SMP) ออกสู่ระบบ (Grady *et al.* 1999) การที่ค่าทีโอซีคงที่ในช่วงนี้อาจเกิดขึ้นจากอัตราการใช้สารอินทรีย์มีค่าใกล้เคียงกับอัตราการผลิตสารอินทรีย์จากการปล่อย SMP ของระบบ ในทางกลับกันที่สภาวะ 3:5 ชม. ค่าทีโอซีลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะที่อายุสัลดจ์ 10 วัน และ 30 วัน จากนั้นเมื่อหยุดเติมอากาศที่นาฬิกา 180 ค่าทีโอซี มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเกิดสาร SMP จากการที่เซลล์แตกหรือตายมีค่ามากกว่าอัตราการใช้สารอินทรีย์

ส่วนโปรไฟล์การลดลงของซีโอดี ที่สภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศ 7:1 5:3 และ 3:5 ชม. ดังรูปที่ 4.6 (ดูรายละเอียดในตาราง ก.3.2 ในภาคผนวก ก) มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับการลดลงของทีโอซี นั่นคือการเติมอากาศที่ยาวนานจะทำให้มีระยะเวลาเพียงพอในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มากขึ้น และที่ระยะเวลาหยุดเติมอากาศนานขึ้นจะทำให้สารอินทรีย์น้ำที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดของสาร SMP ประเภท BAP (Biomass Associated Products) ที่เกิดจากการย่อยสลาย การขับถ่ายของเสีย ซึ่งเกิดขึ้นเป็นอัตราส่วนกับความเข้มข้นของจุลินทรีย์ (Grady *et al.*, 1999) อายุสัลดจ์มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ และปริมาณสารอินทรีย์ที่ออกไปกับน้ำทิ้งในช่วงที่มีการเติมอากาศ ที่อายุสัลดจ์สูงระบบอาจมีแอมโมเนียไนโตรเจนที่เรียกว่าแอมโมเนียไนโตรเจนในปริมาณมากทำให้ปริมาณจุลินทรีย์เพียงพอต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ ทั้งจากน้ำเสียและจาก SMP ทำให้สารอินทรีย์หลุดออกจากระบบมีปริมาณน้อย

ผลของสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่อการบำบัดที่เคเคเอ็น โดยระบบ SBR แสดงในรูปที่ 4.7 (ดูรายละเอียดในตาราง ก.2.7-ก.2.9 ในภาคผนวก ก)

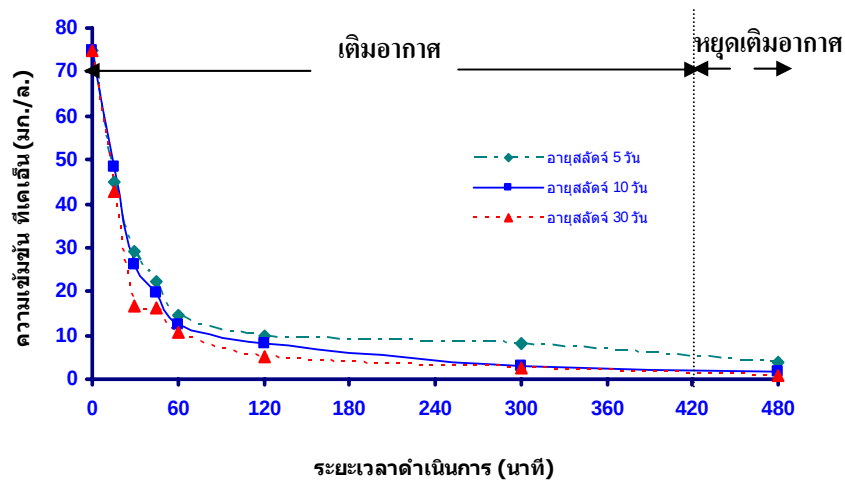


รูปที่ 4.7 ผลของสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น

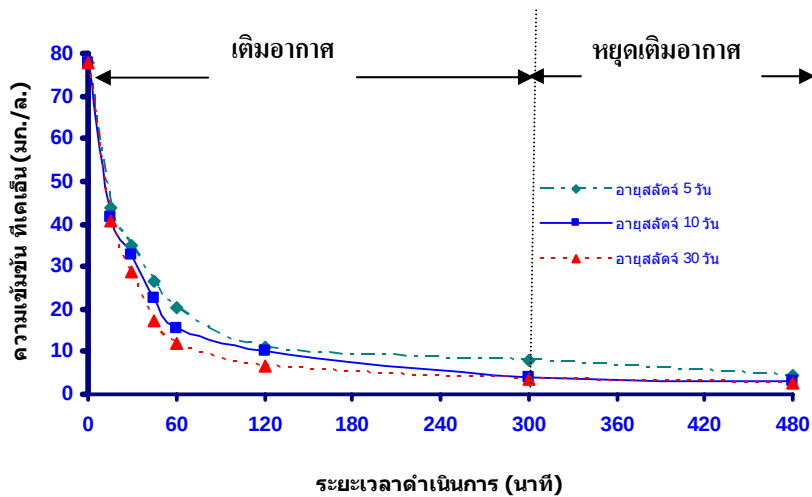
จากรูปพบว่าที่สภาวะ 7:1 ชม.ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าที่เคเอ็นเฉลี่ยร้อยละ 96, 97 และ 99 ที่อายุสัปดาห์ 5, 10 และ 30 วัน ตามลำดับ ที่สภาวะ 5:3 ชม.ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าที่เคเอ็นเฉลี่ยร้อยละ 95, 96 และ 97 ที่อายุสัปดาห์ 5 10 และ 30 วัน ตามลำดับ และที่สภาวะ 3:5 ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าที่เคเอ็นเฉลี่ยร้อยละ 90, 94 และ 96 ที่อายุสัปดาห์ 5, 10 และ 30 วัน ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า ที่อายุสัปดาห์เท่ากันการเติมอากาศที่ยาวนานสามารถกำจัดที่เคเอ็นได้มากกว่าการเติมอากาศน้อยกว่า เนื่องจากสภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic) อย่างเพียงพอ ที่เคเอ็นสามารถถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนรูปไปเป็นไนไตรต์ (NO_2) และไนเตรต (NO_3) ตามลำดับ ของกระบวนการไนตริฟิเคชัน ดังนั้น ร้อยละของการกำจัดที่เคเอ็นมีค่าลดลง เมื่อระบบมีการเติมอากาศน้อยลง อายุสัปดาห์มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น โดยที่อายุสัปดาห์มากส่งผลให้การกำจัดที่เคเอ็นมากตามไปด้วย เพราะการที่อายุสัปดาห์สูงอาจเป็นการสะสมของไนตริฟายอิงแบคทีเรียในระบบมากกว่าที่อายุสัปดาห์ต่ำ การกำจัดที่เคเอ็นโดยไนตริฟายอิงแบคทีเรียจึงเกิดได้มากกว่า ในสภาวะที่อายุสัปดาห์ต่ำ สอดคล้องกับ Lee et al. (2003)

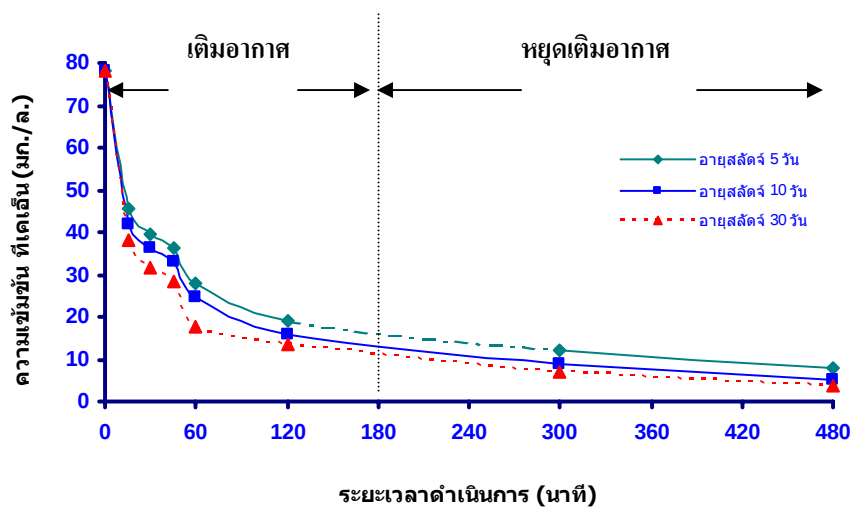
รูปที่ 4.8 (ดูรายละเอียดในตาราง ก.3.3 ในภาคผนวก ก) แสดงโปรไฟล์การลดลงของที่เคเอ็นที่สภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศที่ 7:1 (ก), 5:3 (ข) และ 3:5 (ค) ชม. ในช่วงแรกของโปรไฟล์ค่าที่เคเอ็นลดลงอย่างรวดเร็วเพราะถูกเจือจางในช่วงการเติมน้ำเสีย จากนั้นการลดลงอาจเกิดจากการเปลี่ยนรูปไปเป็นไนเตรตโดยไนตริฟายอิงแบคทีเรียในช่วงที่มีการเติมอากาศ จากการเติมอากาศทั้ง 3 สภาวะพบว่ายังมีการเติมอากาศยาวนานขึ้นค่าที่เคเอ็นมีค่าลดลงมาก แต่ช่วงที่มีการเติมอากาศเพียง 3 ชั่วโมง (3:5) พบว่ายังมีค่าที่เคเอ็นหลงเหลืออยู่ในระบบมากกว่าที่สภาวะอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบว่าอายุสัปดาห์สูงสามารถกำจัดที่เคเอ็นได้ดีกว่าอายุสัปดาห์ต่ำ



(ก) 7:1 ซม.



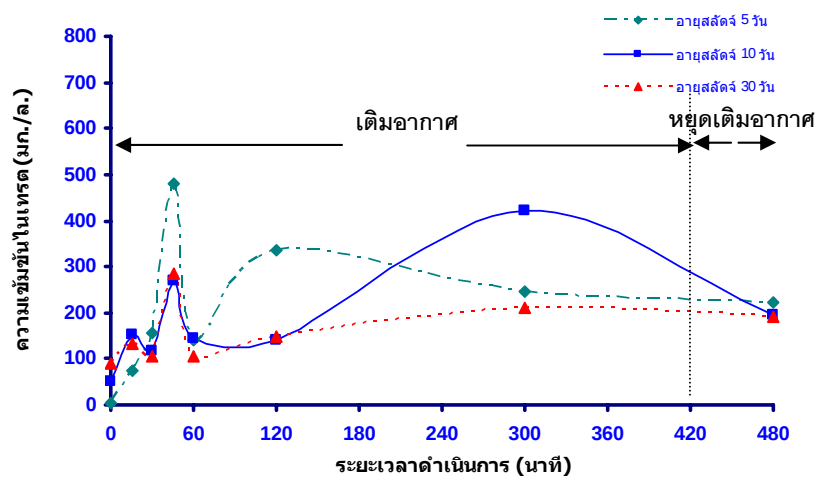
(ข) 5:3 ซม.



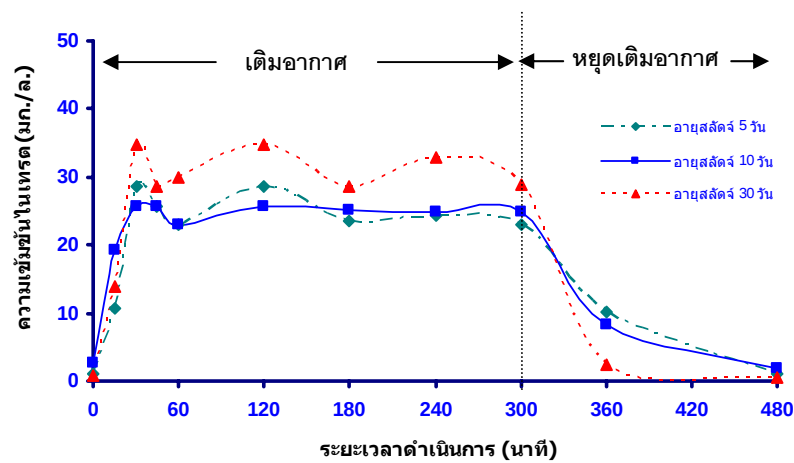
(ค) 3:5 ซม.

รูปที่ 4.8 โปรไฟล์การลดลงของก๊าดที่เคเอ็น ในสภาวะการเต็มอากาศและหยุดเต็มอากาศต่าง ๆ

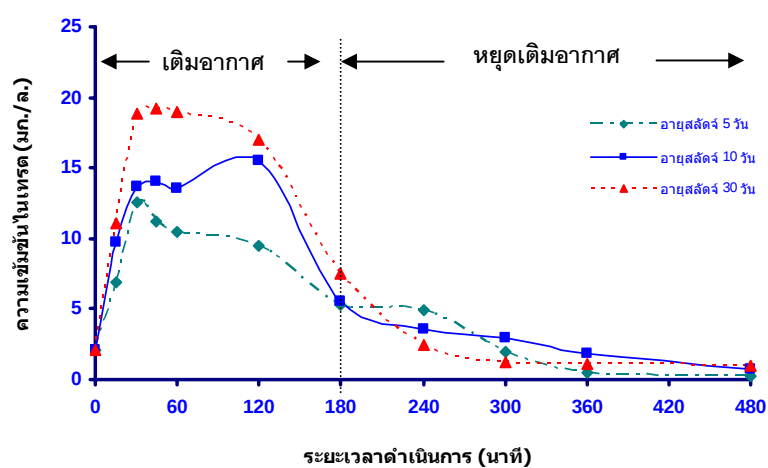
(ก) 7:1 ซม. (ข) 5:3 ซม. และ (ค) 3:5 ซม.



(ก) 7:1 ชม.



(ข) 5:3 ชม.



(ค) 3:5 ชม.

รูปที่ 4.9 โปรไฟล์การลดลงของกัมมันตภาพรังสีในเฟสในสภาวะการเต็มอากาศและหยุดเต็มอากาศต่าง ๆ

(ก) 7:1 ชม. (ข) 5:3 ชม. และ (ค) 3:5 ชม.

จากรูปที่ 4.9 (ดูรายละเอียดในตาราง ก.3.4 ในภาคผนวก ก) แสดงโปรไฟล์ของปริมาณไนเตรด ที่มีอยู่ในระบบเอสปีอาร์ในระหว่างการบำบัดที่เคเอ็น พบว่า ในช่วงที่มีการเติมอากาศปริมาณของไนเตรดมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากที่เคเอ็นถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนรูปไปเป็นไนไตรท์ และไนเตรด ตามลำดับของกระบวนการไนตริฟิเคชัน การเติมอากาศที่ยาวนานทำให้เกิดไนเตรดจำนวนมาก จากสภาวะที่ 7:1 ชม.(ก) การหยุดเติมอากาศเพียง 1 ชม. อาจไม่ทำให้เกิดสภาวะ (Anoxic) อย่างสมบูรณ์ทำให้ไนเตรดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไนตริฟิเคชันไม่ถูกใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอนปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน จึงยังคงเหลืออยู่ในระบบจำนวนมาก ในทางตรงข้ามที่สภาวะ 5:3 (ข) และ 3:5 (ค) ชม. การหยุดเติมอากาศ 3 และ 5 ชม. มีผลทำให้ไนเตรดมีค่าลงมากกว่าที่สภาวะ 7:1 ชม. เพราะในสภาวะหยุดเติมอากาศที่นานอาจทำให้ระบบเกิดสภาวะ Anoxic ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเปลี่ยนไนเตรดไปเป็นก๊าซไนโตรเจน

ผลของการทดสอบประสิทธิภาพของเอสปีอาร์ พบว่าสภาวะการเติมอากาศต่อหยุดเติมอากาศที่ 5:3 ชม. เป็นสภาวะที่เหมาะสมและให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดที่โอซี ซีไอดี ที่เคเอ็น และไนเตรด จึงเลือกใช้การเติมอากาศต่อหยุดเติมอากาศที่ 5:3 ชม. สำหรับการเดินระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนในการทดลองขั้นต่อไป

4.2 การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

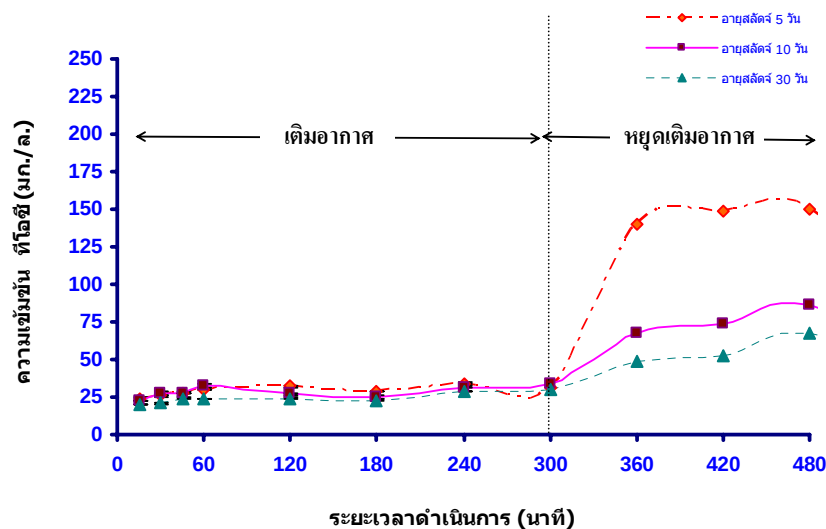
การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน ใช้ลักษณะการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous mode) โดยเติมอากาศ 5 ชั่วโมง สลับกับการหยุดเติมอากาศ 3 ชั่วโมง ควบคุมระยะเวลาเก็บกักน้ำ (HRT) ที่ 8 ชั่วโมง ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และไนโตรเจน ผลของอายุสัปดาห์ที่มีผลต่อการอุดตันของเมมเบรน และวิธีในการทำความสะอาดเมมเบรน ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

4.2.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

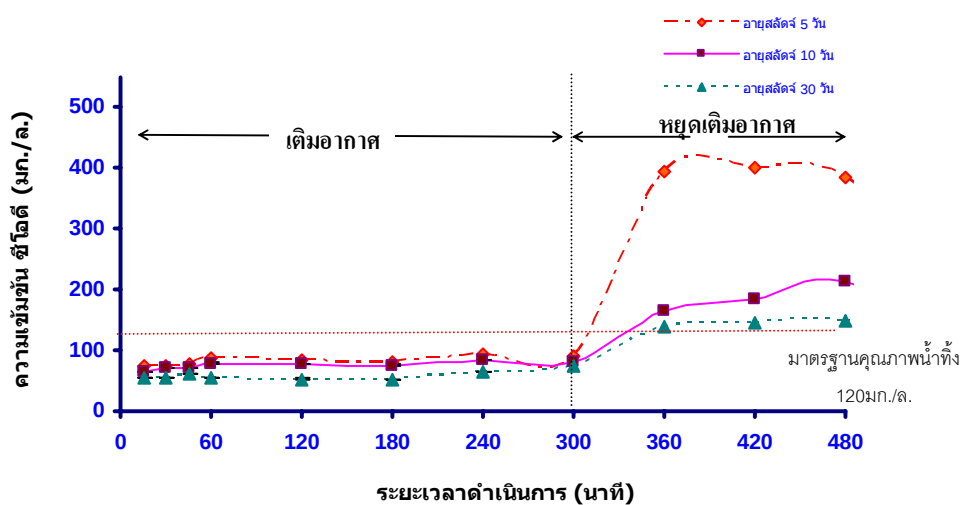
เมื่อเดินระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนเป็นระยะเวลาหนึ่งจนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว แล้วจึงเริ่มทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบเปรียบเทียบกับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

จากการศึกษาผลการกำจัดสารอินทรีย์ โดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนในช่วงรอบของการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศ 8 ชม. ที่อัตราส่วนการเติมอากาศต่อหยุดเติมอากาศ 5:3 พบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดในส่วนของถังปฏิกรณ์ชีวภาพก่อนผ่านเมมเบรนมีความเข้มข้นที่โอซีเฉลี่ยอยู่ที่ 61, 41 และ 33 มก./ล. และความเข้มข้นซีไอดีเฉลี่ยอยู่ที่ 167, 106 และ 82 มก./ล. ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ดูรายละเอียด ตาราง 1.1-1.6 ภาคผนวก ข) ช่วงที่มีการเติมอากาศระบบสามารถกำจัดที่โอซีและซีไอดีได้ดี ทั้งนี้ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในอายุสัปดาห์แต่ละค่า แต่ช่วง

ที่มีการหยุดเติมอากาศ ปริมาณทีไอซีและซีไอดีมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ซีไอดีไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน น้ำทิ้ง 120 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจเนื่องมาจากจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเกิดการสลายตัว ปล่อย สารอินทรีย์ออกสู่ระบบ ค่าทีไอซี และซีไอดีลดลงตามค่าอายุสัปดาห์ที่เพิ่มมากขึ้น โดยที่ค่าอายุสัปดาห์ 30 วัน มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำกว่าที่อายุสัปดาห์ 5 และ 10 วัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้ สารอินทรีย์ในช่วง Anoxic ของดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย สอดคล้องกับ Lee *et al.* (2003)



(ก) ทีไอซีภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพก่อนผ่านเมมเบรน



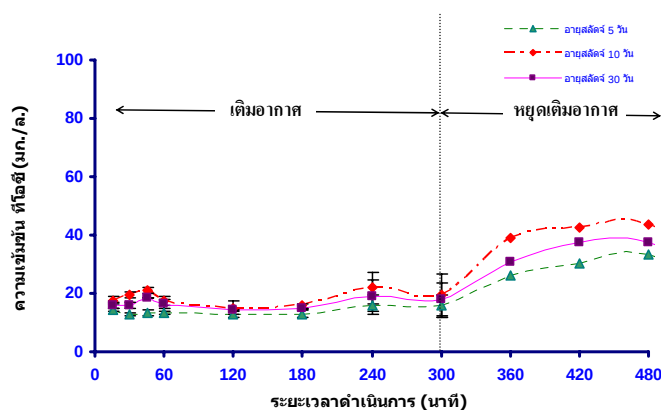
(ข) ซีไอดีภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพก่อนผ่านเมมเบรน

รูปที่ 4.10 โปรไฟล์ของการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ (ก) ทีไอซี (ข) ซีไอดี ภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพก่อนผ่านเมมเบรนโดยทำการเติมอากาศ 5 ชม. และหยุดเติมอากาศ 3 ชม.

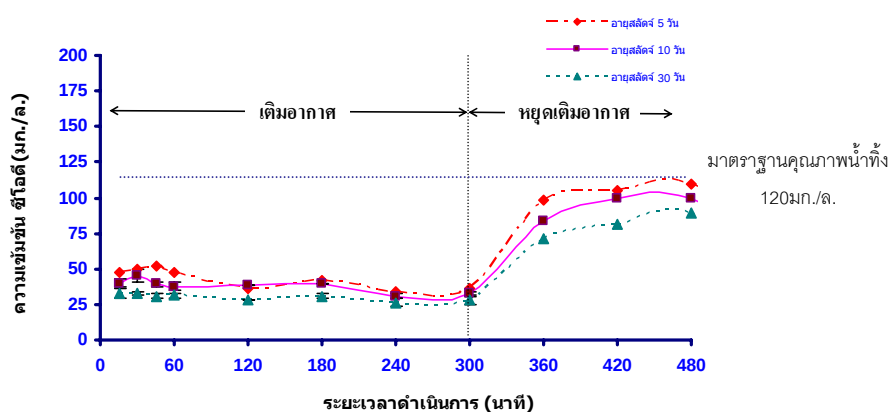
เมื่อผ่านเมมเบรนของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน เมื่อเก็บตัวอย่างในช่วงเติมอากาศ น้ำทิ้งมีความเข้มข้นทีไอซีอยู่ในช่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 25, 22 และ 18 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้น ซีไอดีเฉลี่ย 60, 51 และ 42 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามค่าอายุสัปดาห์ 5, 10 และ 30 วัน ตามลำดับ ดัง

แสดงในรูปที่ 4.11 (ดูรายละเอียดในตาราง ข.1.1-ข.1.6 ในภาคผนวก ข) และเมื่อเก็บตัวอย่างในช่วงหยุดเติมอากาศพบว่าน้ำทิ้งมีค่าที่ไอซีและซีไอลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ไอซี และซีไอดีก่อนผ่านเมมเบรนและค่าซีไอดีผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทุกช่วงเวลา แสดงให้เห็นว่าค่าการกำจัดสารอินทรีย์โดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเพียงอย่างเดียว

แม้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจะเพิ่มร้อยละของการกำจัดสารอินทรีย์เพียงเล็กน้อยดังแสดงในรูป 4.12 แต่พบว่าถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ดีตามกลไกการคัดแยกขนาดดังรูปที่ 4.13 และลักษณะทางกายภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน ยังมีคุณภาพดีกว่าการใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเพียงอย่างเดียวจะเห็นได้จากรูป 4.14 การใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนนอกจากจะมีประสิทธิภาพในการกำจัด สารอินทรีย์ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งแล้วยังอาจสามารถนำน้ำกลับไปใช้ประโยชน์ใหม่ (Recycle) ได้อีกด้วย

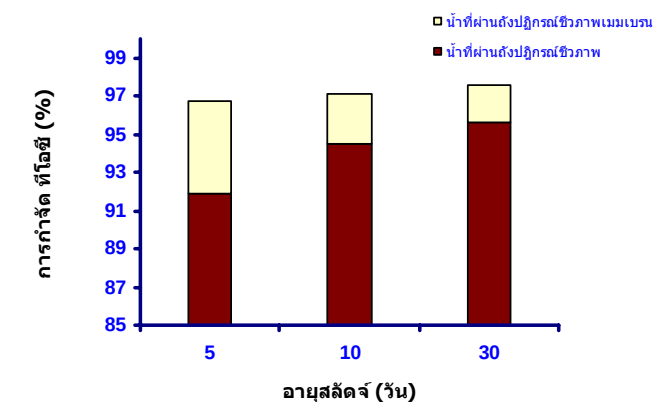


(ก) ทีไอซีหลังผ่านถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

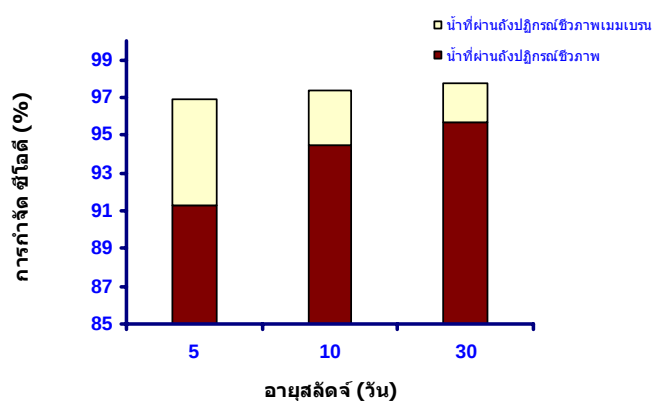


(ข) ซีไอดีหลังผ่านถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

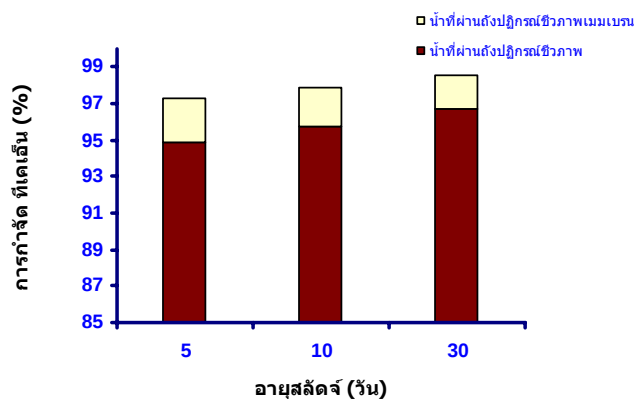
รูปที่ 4.11 โปรไฟล์ของการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ (ก) ทีไอซี (ข) ซีไอดีหลังผ่านถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน ทำการเติมอากาศ 5 ชม.และหยุดเติมอากาศ 3 ชม.



(ก) ทีโอซี

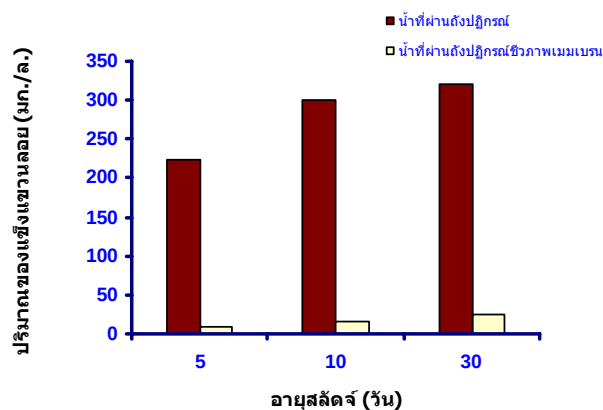


(ข) ซีไอดี

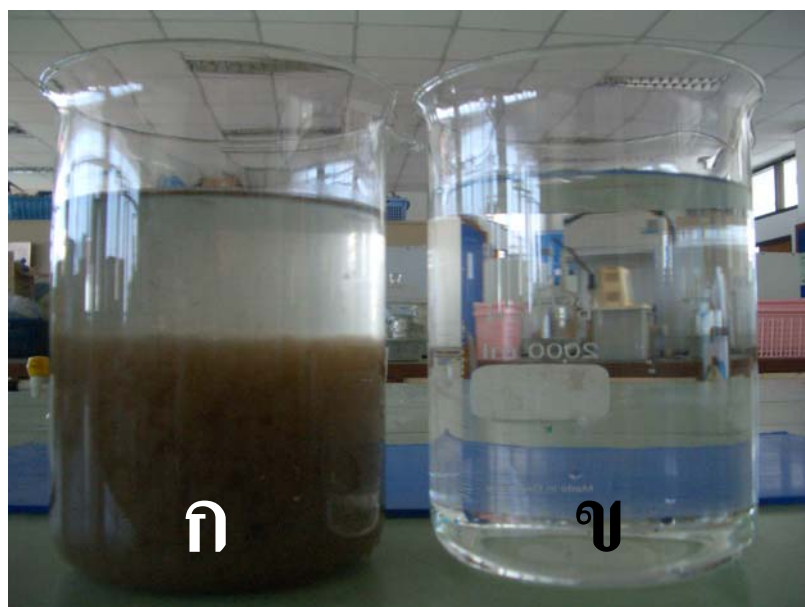


(ค) ทีเคเอ็น

รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัด (ก) ทีโอซี, (ข) ซีไอดี และ (ค) ทีเคเอ็น ระหว่าง
ถังปฏิกรณชีวภาพกับถังปฏิกรณชีวภาพเมมเบรน



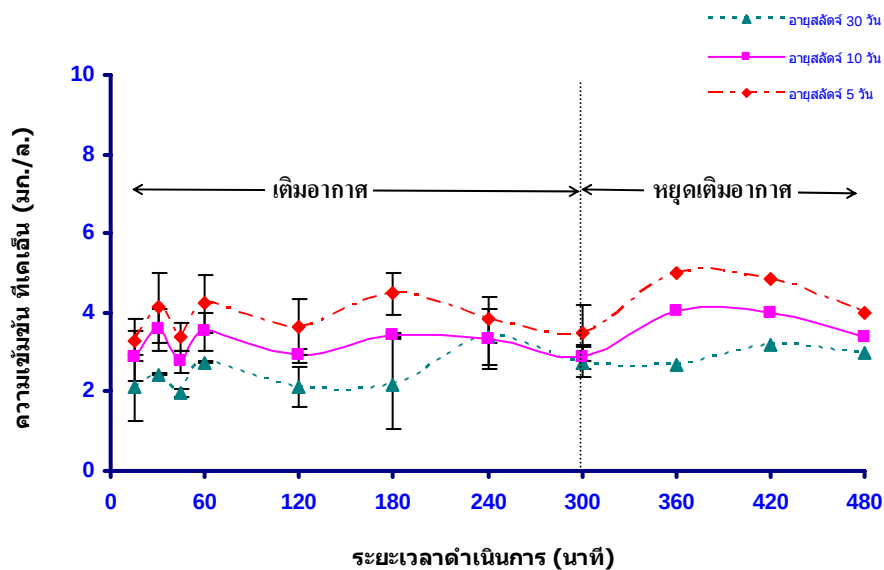
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบปริมาณของแข็งแขวนลอย ในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพ และถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน



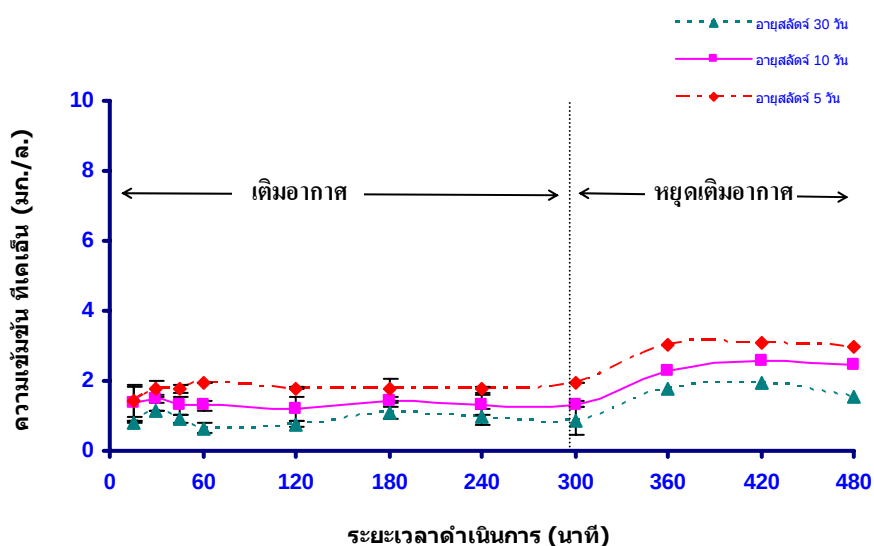
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบลักษณะทางการภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพ เมมเบรน (ก) ภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพก่อนผ่านเมมเบรน (ข) หลังผ่านเมมเบรน

4.2.2 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจน ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

ผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน โดยเปรียบเทียบค่าที่เคเอ็นก่อนและหลังผ่านเมมเบรน ผลของค่าที่เคเอ็นน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพมีความเข้มข้นที่เคเอ็นเฉลี่ย 4.27, 3.34 และ 2.59 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนเฉลี่ย 2.11, 1.64 และ 1.13 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามค่าอายุสัปดาห์ 5, 10 และ 30 วัน ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.15 (ดูรายละเอียดในตาราง ข.1.7-ข.1.9 ในภาคผนวก ข)



(ก) ที่เคเอ็นก่อนผ่านถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

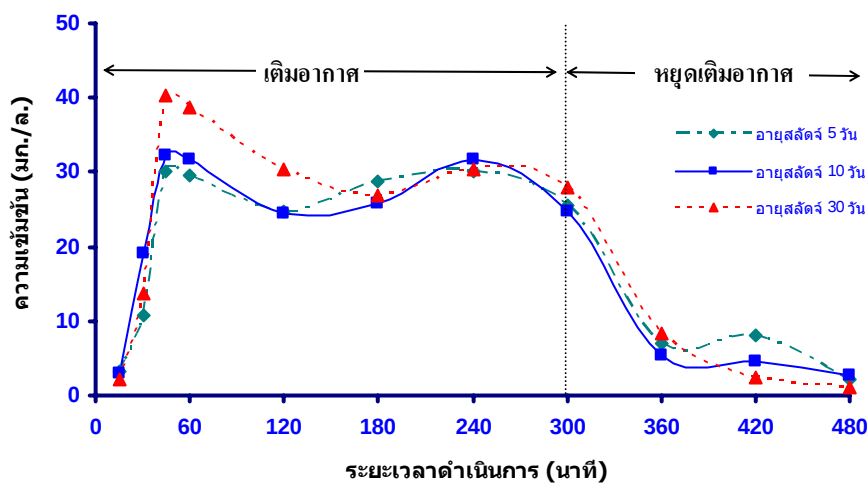


(ข) ที่เคเอ็นหลังผ่านถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

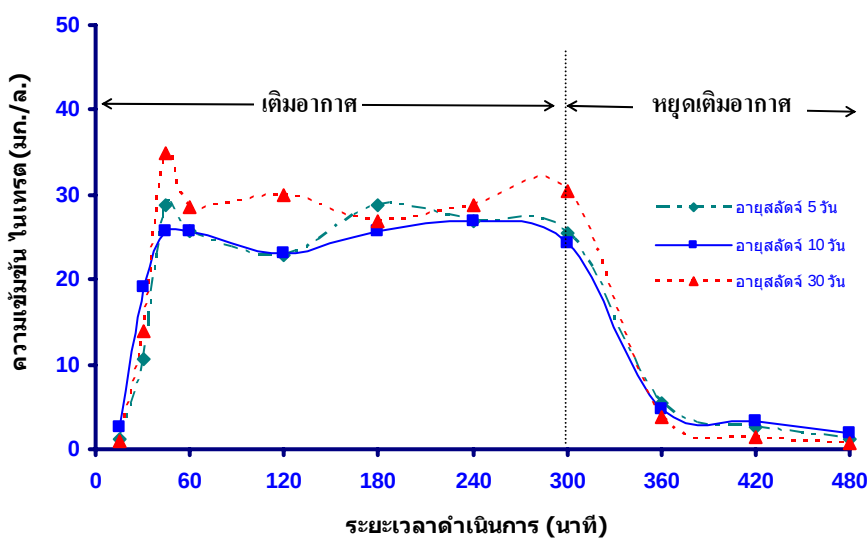
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด ที่เคเอ็นระหว่าง (ก) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ (ข) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

การศึกษาการกำจัดในรูปของการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศที่ 5:3 ดังรูปพบว่า ในช่วงเติมอากาศค่าไนเตรดมีค่าสูงซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนของค่าที่เคเอ็น แต่เมื่อหยุดเติมอากาศไนเตรดจะมีปริมาณลดลงที่ผ่านการบำบัดโดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพมีความเข้มข้นไนเตรดอยู่ที่ 2.07, 2.56 และ 0.98 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนอยู่ที่ 1.07, 1.79 และ 0.65 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามค่าอายุสัปดาห์ 5, 10 และ 30 วัน ดังรูปที่ 4.16

ผลของการกำจัดไนโตรเจนในรูปของทีเคเอ็นและไนเตรต โดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพและถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนไม่มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้เมมเบรน ไม่สามารถกักกันไนเตรตหรือทีเคเอ็นได้เนื่องจากโมเลกุลมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรนมาก



(ก) ไนเตรตก่อนผ่านถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน



(ข) ไนเตรตหลังผ่านถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

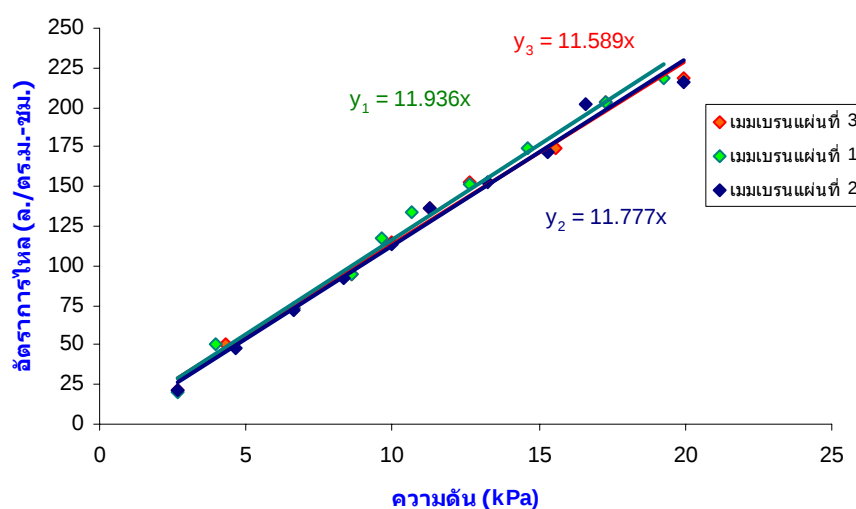
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบปริมาณ ไนเตรตระหว่างในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (ก) ก่อนผ่านเมมเบรน
(ข) หลังผ่านเมมเบรน

4.3 ผลของอายุสัณฐานต่อการอุดตันของเมมเบรน

4.3.1 พลั๊กซ์ของน้ำกลั่นผ่านเมมเบรน

ก่อนเดินระบบถึงปฏิกิริยาชีวภาพเมมเบรนได้มีการทดสอบค่าเพอมีเอทพลั๊กซ์ของน้ำกลั่นผ่านเมมเบรน เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการผลิตน้ำที่แพร่ผ่านเมมเบรนก่อนการใช้งานทุกครั้ง เนื่องจากว่าเมมเบรนที่นำมาใช้งานแต่ละแผ่นมีสภาพการซึมผ่านน้ำต่างกัน จากการทดสอบค่าเพอมีเอทพลั๊กซ์ของน้ำกลั่นผ่านเมมเบรนทั้ง 3 แผ่น ผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.17

(ดูรายละเอียดในตาราง 1.1 ภาคผนวก ค.)

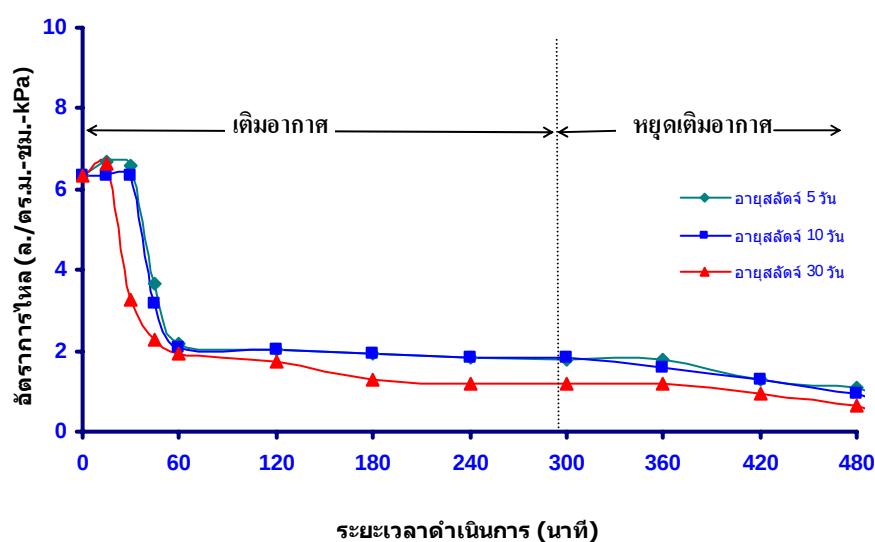


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง ค่าความดันควบคุม กับอัตราการผลิตน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนที่สะอาด (อุณหภูมิ 30 °C)

จากรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอมีเอทพลั๊กซ์น้ำกลั่น และความดันสำหรับเมมเบรนทั้งสามแผ่น จะเห็นได้ว่า ผลการทดลองของเมมเบรนทุกแผ่นให้ค่าพลั๊กซ์ของน้ำกลั่นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดัน คือ เพอมีเอทพลั๊กซ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ตามกฎของ Darcy เพราะการเพิ่มความดันจะเป็นการเพิ่มแรงดันให้ตัวทำละลายผ่านเมมเบรนได้มากขึ้น เมื่อคำนวณความต้านทานการไหลที่เกิดจากเมมเบรนสะอาดทั้ง 3 แผ่นมีค่าโดยเฉลี่ย 5.93×10^{-11} หนึ่งต่อเมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vigneswaran et al. (1991)

4.3.2 การลดลงของฟลักซ์

ที่ค่าอายุสัลดจ์ ที่ 5, 10 และ 30 วัน ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอย (MLSS) ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนทั้ง 3 ถัง มีค่า 1,666, 2,712 และ 3,484 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งทำการเดินระบบที่ระยะเวลาพักเก็บ 8 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.18 (ดูรายละเอียดในตาราง ค 2.1-2.5 ภาคผนวก ค) พบว่าฟลักซ์ ของค่าอายุสัลดจ์ ที่ 5, 10 และ 30 วัน ในช่วงที่เติมอากาศมีค่าลดลง 6.33–1.79, 6.33–1.83 และ 6.33–1.20 $L/M^2 \cdot hr \cdot kPa$ ตามลำดับ ในช่วงเวลาหนึ่งชั่วโมงแรกของการเดินระบบค่าฟลักซ์มีการลดลงอย่างรวดเร็ว อาจเป็นเพราะช่วงแรกที่มีการเติมอากาศจุลินทรีย์ใช้ออกซิเจนในเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ในการสร้างเซลล์ทำให้ออกซิเจนไม่เพียงพอและอาจเกิดจากการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ พอเข้าสู่ช่วงหยุดเติมอากาศ ค่าฟลักซ์มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง 1.79-1.11 , 1.83-0.94 และ 1.20-0.66 $L/M^2 \cdot hr \cdot kPa$ จากผลการทดลองฟลักซ์มีค่าลงตามค่าอายุสัลดจ์ที่เพิ่มมากขึ้น Bouhabila *et al.* (2001)

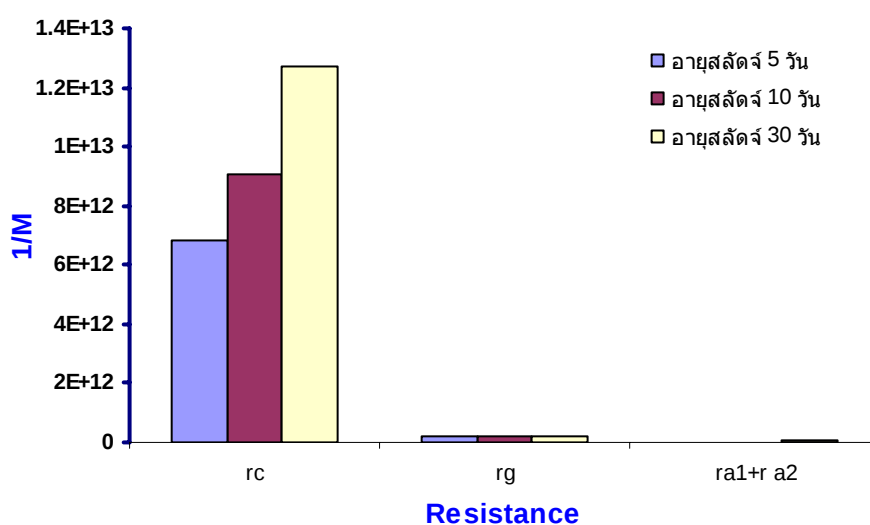


รูปที่ 4.18 ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่ลดลงของอายุสัลดจ์ที่แตกต่างกันที่เวลากักเก็บ 8 ชั่วโมง (อุณหภูมิ 30 °C)

ช่วงหยุดเติมอากาศ 3 ชั่วโมง ความต้านทานมีค่าสูงขึ้นอาจเกิดจากไม่มีฟองอากาศที่จะทำให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าเมมเบรน และการขาดอากาศของจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศ ทำให้จุลินทรีย์ตายทำให้เกิดแตกออกของพวกผนังเซลล์ และองค์ประกอบต่าง ๆ ของเซลล์จุลินทรีย์ ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Kang *et al.* (2003)

ผลจากคำนวณหาความต้านทานด้วยแบบจำลองความต้านทานของการอุดตันแบบอนุกรม ดังรูป 4.19 (ดูรายละเอียดในตาราง ค.3.1 ในภาคผนวก ค) ซึ่งแสดงผลการอุดตันแบบ

ต่างๆ ที่เกิดขึ้นโดยสารที่สะสมอยู่บริเวณผิวหนังนมเบรนที่อายุสัปดาห์ที่แตกต่างกัน 5, 10 และ 30 วัน 7.05×10^{12} , 9.24×10^{12} และ 12.98×10^{12} หนึ่งต่อเมตร ตามลำดับ ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ความต้านทานรวม(r_t) มีค่าสูงขึ้นเมื่ออายุสัปดาห์มีค่าเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับความสัมพันธ์ต่อการลดลงของเพอร์มิเอฟลักซ์ ซึ่งเกิดจากตัวถูกละลาย และสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนไม่สามารถผ่านเมมเบรน ออกไปได้ จะถูกกักสะสมอยู่บริเวณผิวเมมเบรนทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเมมเบรนมีค่าสูงขึ้นคล้ายชั้นเค้ก (r_c) เป็นความต้านทานที่ก่อให้เกิดการอุดตันมากสุดในความต้านทานรวม ซึ่งเกิดจากการสะสมตัวในรูพรุนหรือเคลือบติดแน่นผิวหนังนมเบรนในลักษณะของการเกิดเจล (r_g) และความต้านทานที่เกิดจากชั้นเค้กมีค่าสูงขึ้นเมื่ออายุสัปดาห์มีค่าเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับความสัมพันธ์ต่อการลดลงของเพอร์มิเอฟลักซ์ เนื่องจากเกิดการสะสมตัวของสารอินทรีย์ซึ่งมีความสำคัญและอิทธิพลต่อการเกิดการอุดตัน ดังรูปที่ 4.20 Bouhabila *et al.* (2001)(ดูรายละเอียดในตาราง ค.2.6 ในภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.19 ความต้านทานของการอุดตันรูปแบบต่าง ๆ เมื่อค่าของอายุสัปดาห์ที่เพิ่มมากขึ้น



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.20 การดูดตันของสารบริเวณผิวเมมเบรน ทำให้ความต้านทานของเมมเบรนเพิ่มขึ้น

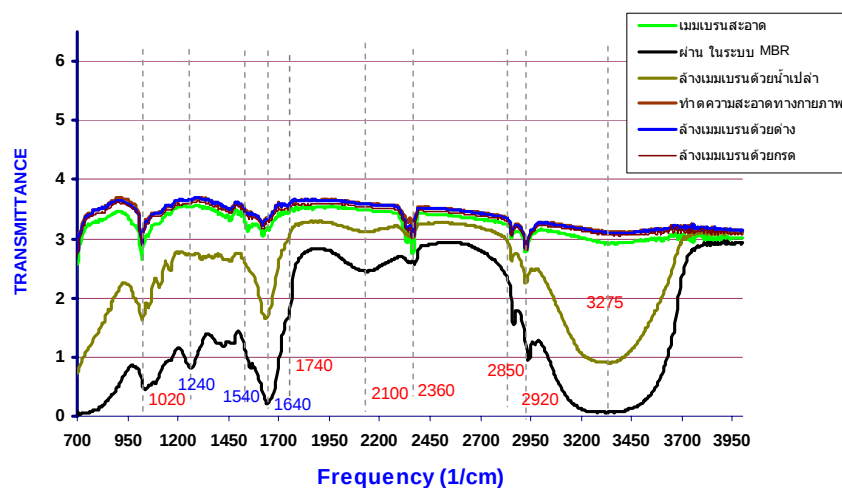
(ก) เมมเบรนสะอาดที่ยังไม่ใช้งาน (ข) อายุสไลด์จ 5 วัน (ค) อายุสไลด์จ 10 วัน
และ (ง) อายุสไลด์จ 30 วัน

4.3.3 การวิเคราะห์การดูดตันด้วย Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

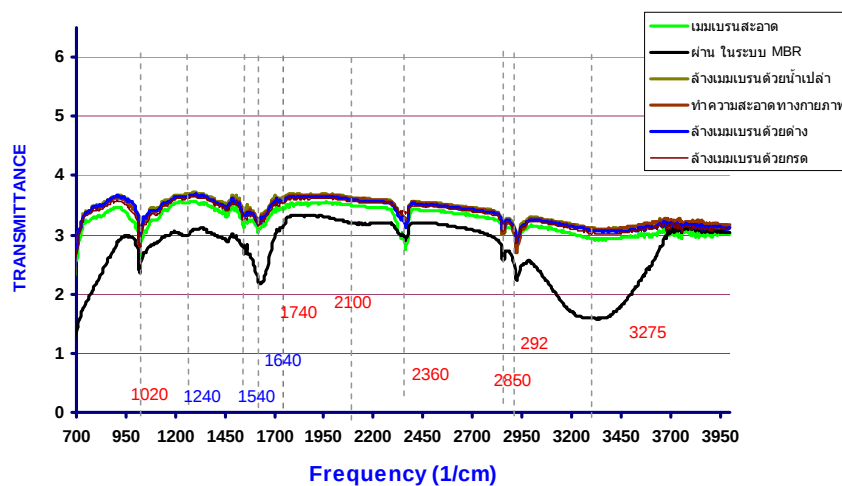
การทดสอบเมมเบรนด้วย FTIR ใช้ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันประกอบต่าง ๆ ของสารซึ่งมาจากสิ่งมีชีวิต มีคาร์บอน ไฮโดรเจนและสารอนุพันธ์ของ H-C เป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้องกับการดูดตันบริเวณผิวหน้าเมมเบรน รูปที่ 4.21 แสดงสเปกตรัมของอินฟราเรดซึ่งเปรียบเทียบระหว่างเมมเบรนสะอาดที่ยังไม่ใช้งานกับเมมเบรนที่มีสารดูดตันอยู่บริเวณผิวหน้าเมมเบรนที่อายุสไลด์จ 5, 10 และ 30 วัน ตามลำดับ สเปกตรัม FTIR แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารที่ทำให้เกิดการดูดตันบนเมมเบรน โดยพบพันธะ C – O ที่ความถี่ 1020 หนึ่งต่อเซนติเมตร โพลีแซคคาไรด์ (Cho *et al.* 1998) พันธะ N – H stretching ที่ความถี่ 3,100-3,500 หนึ่งต่อเซนติเมตร และพันธะ N – H bending ที่ความถี่ 1,540 และ 1,640 หนึ่งต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นสารประกอบพวกอะไมด์ จากค่าพีคที่ 1,020 1,540, 1,640 และ 3,275 หนึ่งต่อเซนติเมตรจากผล FTIR สามารถประเมินได้ว่าสารที่

ก่อให้เกิดการอุดตันบนผิวหน้าเมมเบรน เป็นสารพวกโพลีแซคคาไรด์ และโปรตีน ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของโครงสร้างโมเลกุลที่พบในผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ สารดังกล่าวอาจเกิดจากการเกาะตัวของจุลินทรีย์บนผิวเมมเบรนหรือเกิดจากการสลายตัวของเซลล์ ซึ่งได้แก่ SMP ที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน (Jarusutthirak *et al.* 2002) สารดังกล่าวเมื่อสะสมบนผิวหน้าเมมเบรน อาจทำให้เกิดชั้นเค้ก (r_c) และเจล (r_g) ทำให้ค่าของฟลักสูงขึ้นโดยมีความสัมพันธ์กับการลดลงของอัตราการไหลของน้ำเพอร์มิเอทฟลักซ์ ที่ผลิตได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jarusutthirak *et al.* (2002)

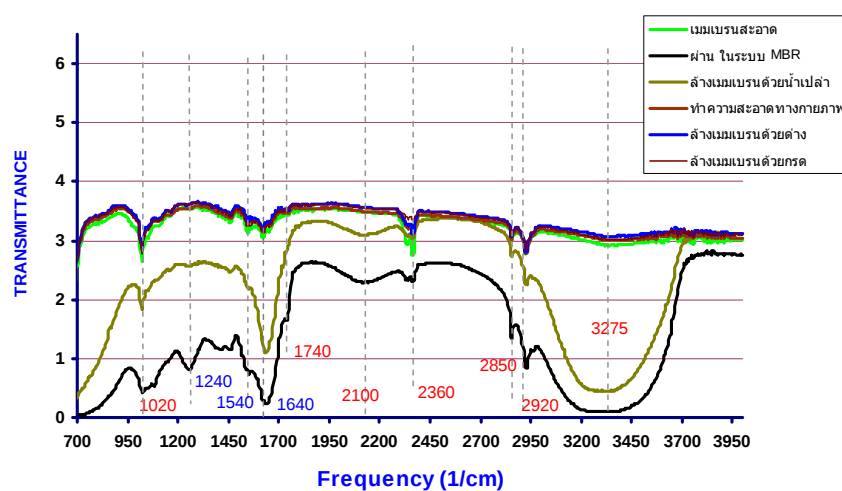
เมื่อนำเมมเบรนที่มีการอุดตันทำความสะอาด แสดงสเปกตรัมของอินฟราเรดของเมมเบรนที่ผ่านการทำความสะอาด จะพบพันธะ C – O Stretching ในหมู่คาร์บอกซิลิกที่ 1,240 หนึ่งต่อเซนติเมตร เมื่อมีการทำความสะอาดด้วยน้ำ พบว่าพีกที่ช่วงความถี่ 1,240 หนึ่งต่อเซนติเมตรหายไป แสดงถึงความสามารถในการละลายน้ำของสารที่มีหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว แต่ยังพบพีกที่ช่วงความถี่ 1,020, 1,540, 1,640 และ 3,275 หนึ่งต่อเซนติเมตร เมื่อทำความสะอาดทางกายภาพหมู่ฟังก์ชันของไฮโดรโฟบิกที่ไม่สามารถละลายน้ำสารที่ติดค้างบนผิวเมมเบรนได้หายไป ทำให้เมมเบรนมีสเปกตรัมสภาพใกล้เคียงกับสเปกตรัมของเมมเบรนที่สะอาด และเมื่อล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)



(ก) อายุสัปดาห์ 5 วัน



(ข) อายุสัปดาห์ 10 วัน



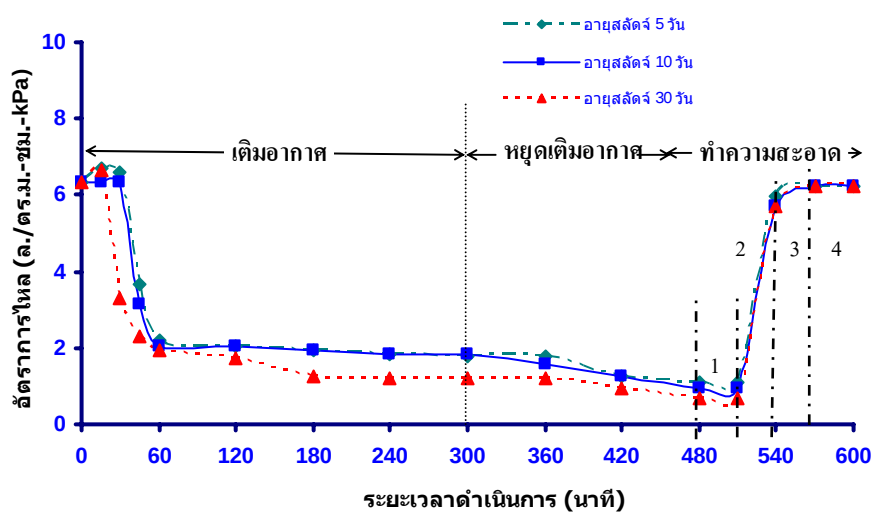
(ค) อายุสัปดาห์ 30 วัน

รูปที่ 4.21 สเปกตรัม FTIR แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารอุดตันบนเมมเบรนที่อายุสัปดาห์

(ก) อายุสัปดาห์ 5 วัน (ข) อายุสัปดาห์ 10 วัน และ (ค) อายุสัปดาห์ 30 วัน

4.4 การกลับคืนของฟลักซ์หลังการทำความสะอาดเมมเบรน

การทำความสะอาดเมมเบรนสามารถเพิ่มฟลักซ์ของสารละลายได้ดังรูป 4.22 (ดูรายละเอียดในตาราง ค.3.1 ในภาคผนวก ค) พบว่าการทำความสะอาดแผ่นเมมเบรนสามารถเพิ่มค่าฟลักซ์กลับคืนได้ถึงร้อยละ 98 ผลที่ได้ใกล้เคียงกันในทุก ๆ ค่าของอายุสไลด์จ์ การทำความสะอาดด้วยวิธีทางกล โดยการปาดผิวหน้าเมมเบรนเป็นวิธีการทำความสะอาดที่ดีที่สุด สามารถให้ค่าฟลักซ์กลับคืนได้ถึงร้อยละ 80 เมื่อเปรียบเทียบกับ การล้างด้วยน้ำ หรือการใช้สารเคมี กรด และด่าง สอดคล้องกับ Yeom *et al.* (1999)



รูปที่ 4.22 ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากการทำความสะอาดด้วยขั้นตอนต่าง ๆ

(อุณหภูมิ 30 °C)

1. การล้างเมมเบรนด้วยน้ำเปล่า
2. การล้างเมมเบรนทางกล
3. การล้างเมมเบรนด้วยด่าง
4. การล้างเมมเบรนด้วยกรด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

- ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเอสปีอาร์ การเพิ่มอัตราภาวะสารอินทรีย์พบว่าที่อายุสลัดจ์คงที่ อัตราภาวะสารอินทรีย์น้อยส่งผลให้ค่าการกำจัด ทีโอซี และซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มอัตราภาวะสารอินทรีย์ถึง 6 กก.ซีโอดี ต่อ ลบ.ม.-วัน การกำจัดจะเริ่มคงที่โดยค่าการกำจัดสารอินทรีย์ทั้งในรูปของทีโอซี และซีโอดีอยู่ระหว่างร้อยละ 96-98 ที่อัตราภาวะสารอินทรีย์เท่ากันพบว่าอายุสลัดจ์ มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์โดยอายุสลัดจ์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการกำจัดสารอินทรีย์มีแนวโน้มสูง

- การกำจัดทีเคเอ็นของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเอสปีอาร์ที่อัตราภาวะสารอินทรีย์น้อยอายุสลัดจ์เพียง 5 วัน อัตราภาวะสารอินทรีย์น้อยทำให้การกำจัดน้อยลง อัตราภาวะสารอินทรีย์มากทำให้กำจัดทีเคเอ็นได้มาก แต่ที่อายุสลัดจ์ 10 และ 30 วัน อัตราภาวะไม่มีผลต่อการกำจัดทีเคเอ็น การกำจัดอยู่ระหว่างร้อยละ 90-97 อัตราภาวะสารอินทรีย์เท่ากันอายุสลัดจ์น้อยการกำจัดทีเคเอ็นก็จะน้อยตาม ส่วนอัตราภาวะสารอินทรีย์มากทำให้กำจัดทีเคเอ็นได้มากตาม

- การเติมอากาศเป็นเวลานานและการเพิ่มอายุสลัดจ์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และทีเคเอ็นดีขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้เกิดปริมาณไนเตรทในระบบมากขึ้นด้วย การเพิ่มระยะเวลาการหยุดเติมอากาศช่วยลดไนเตรทในระบบ โดยอัตราส่วนการเติมอากาศต่อการหยุดเติมอากาศที่เหมาะสม คือ เติมอากาศ 5 ชั่วโมงต่อการหยุดเติมอากาศ 3 ชั่วโมง

- ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ดีกว่าระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเพียงอย่างเดียว โดยคุณภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งทั้งสิ้น และถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ถึงร้อยละ 99 อย่างไรก็ตาม พบว่าการกำจัดไนโตรเจนในรูปของทีเคเอ็นและไนเตรท โดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ทั้งสองแบบไม่มีความแตกต่างกัน โดยที่อายุสลัดจ์ 10 วัน เหมาะสมที่ใช้ในการเดินระบบ

- ค่าฟลักซ์ที่ลดลงเกิดจาก การสะสมตัว และการอุดตันของสลัดจ์บนผิวหน้าเมมเบรน โดยเฉพาะช่วงที่หยุดเติมอากาศและค่าอายุสลัดจ์ที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้การลดลงของฟลักซ์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

- ผลการวิเคราะห์การอุดตันของเมมเบรนด้วยเครื่อง FTIR พบว่าสารก่อให้เกิดการอุดตันบนผิวหน้าเมมเบรน เป็นสารพวกโพลีแซคคาไรด์ และโปรตีน ซึ่งอาจเกิดจากผนังเซลล์ของแบคทีเรีย

- ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองความต้านทานของการอุดต้นแบบอนุกรม พบว่า ความต้านทานที่เกิดจากชั้นของเค็ก (r_c) มีผลทำให้เพอร์มิเอทฟลักซ์ลดลงมากกว่าความต้านทานของชั้นเจล (r_g) และความต้านทานแบบถาวร (r_a)
- การล้างเมมเบรนด้วยวิธีทางกลสามารถทำฟลักซ์กลับคืนสภาพได้ร้อยละ 80

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาประสิทธิภาพของระบบเมื่อใช้น้ำเสียจริงแทนน้ำเสียสังเคราะห์
2. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้อธิบายกลไกการอุดต้น
3. การศึกษาวิธีการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศของระบบในรูปแบบต่างๆ เช่น โดยเริ่มการเติมอากาศก่อนตามด้วยการหยุดเติมอากาศแล้วเติมอากาศซ้ำอีกครั้ง
4. การศึกษาถึงคุณลักษณะของเมมเบรนที่จะใช้ เพื่อใช้อธิบายกลไกของการอุดต้นได้ดีขึ้น เช่น วัสดุที่ใช้ในการผลิต ขนาดรูพรุนของเมมเบรน และชนิดของประจุที่ผิวหน้าเมมเบรน
5. การศึกษาวิธีการทำความสะอาดโดยใช้สารลดแรงตึงผิว
6. การศึกษาต้นทุนค่าใช้จ่ายและพลังงานในการบำบัดน้ำเสียด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

บรรณานุกรม

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : มิตรนราการพิมพ์.
- คูโบต้า บจก. 2548. Submerged Membrane Bioreactor using Kubota Membranes.
[Online].Available : http://www.enviroquip.com/membrane/eim_about.htm
- ชาญศักดิ์ คุชานูบาล. 2542. การศึกษาประสิทธิภาพของระบบเอสบีอาร์ในการบำบัด
สารอินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากโรงงานปลาหนึ่ง. วิทยานิพนธ์
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาสุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม. บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยมหิดล
- รัตนา จิระรัตนานนท์. 2541. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ไทยแล้ง.
- อมรศักดิ์ ตปนิยพันธ์. 2542. การศึกษาผลของระยะเวลาการเติมอากาศในการกำจัดเหล็กของ
ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม. บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อริยะ เตกษณานนท์. 2543. การนำกลับน้ำเสียจากอาคารสูงมาใช้ใหม่โดยใช้ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพ
ที่มีไมโครฟิลเทรชันเมมเบรนแบบจมตัว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- APHA, AWWA and WEF. 1995. Standard Method for the Examination of Water and
Wastewater. 19th Edition. USA : American Public Health Association.
- Bhumkratana, S. 1987. "Reverse Osmosis Fundamental and Theories", **Proceeding of the
Fourth Asean (Training) Workshop on Membrane Technology**, UKM, BANGI, Malaysia,
April 15-25.
- Bouhabila, E.H. Aim, R.B. and Buisson, H. 2001. Fouling Characterisation in Membrane
Bioreactors. **Separation and Purification Technology**. 22 : 123–132.
- Chaize, S. and Huyard, A. 1991. Membrane Bioreactor on Domestic Wastewater Treatment
Sludge Production and Modeling Approach. **Water Science and Technology**. 23 :
1591-1600.
- Cheryan, M. and Rajagopalan, H. 1998. Membrane Processing of Oily Stream. Wastewater
Treatment and Waste Reduction. **Journal of Membrane Science**. 151 : 13-28.

- Chiemchaisri, C., Yamamoto, K. and Vigneswaran, S. 1993. Household Membrane Bioreactor in Domestic Wastewater Treatment. **Water Science and Technology**. 27: 171–178.
- Cho, J., Amy, G., Pellegrino, J. and Yoon, Y. 1998. "Characterization of Clean and Natural Organic Matter (NOM) Fouled NF and UF Membranes, and the Foulants Characterization." **Desalination**. 118 : 101– 108.
- Cho, J., Amy, G. and Pellegrino, J. 1999. "Membrane Filtration of Natural Organic Matter : Initial Comparison of Rejection and Flux Decline Characteristics with Ultrafiltration and Nanofiltration Membrane." **Water Research**. 33(11) : 2517-2526.
- Fane, A.G. 1987. "An Introduction to Membrane Process." **Proceeding of the Fourth Asean (Training) Workshop on Membrane Technology**, UKM, BANGI, Malaysia, April 15-25.
- Gao, M., Yang, M., Li, H., Wang, Y. and Pan, F. 2004. Nitrification and Sludge Characteristics in a Submerged Membrane Bioreactor on Synthetic Inorganic Wastewater. **Desalination**. 170 : 177–185.
- Grady, C.P., Lesliem, Daigger, Glen T. and Henry, C. Lim. 1999. **Biological Wastewater Treatment**. 2nd edition, New York : Marceldekker Inc.
- Howe, K.J., Ishida, K.P. and Clark, M.M. 2002. Use of ATR/FTIR Spectrometry to Study Fouling of Microfiltration Membranes by Natural Waters. **Desalination**. 147 : 251-255.
- Jarusutthirak, C. Amy, G. and Croue, J.P. 2002. "Fouling Characteristics of Wastewater Effluent Organic Matter (EfOM) Isolates on NF and UF Membranes." **Desalination**. 145 : 247-255.
- Kang, I.J., Lee, C.H. and Kim, K.J. "Characteristics of Microfiltration Membranes in a Membrane Coupled Sequencing Batch Reactor System." **Water Research**. 37 : 1192-1197.
- Kargi, F. and Eker, S. 2004. "Effect of Sludge Age on Performance of an Activated Sludge unit Treating 2,4 Dichlorophenol-Containing Synthetic Wastewater." **Enzyme and Microbial Technology**. 38 : 60-64
- Koottatep, S. 1979. **Removal of Humic Substances from Natural Waters by Reverse Osmosis**. Division of Hydraulic & Sanitary Engineering, Department of Civil Engineering, The Norwegian Institute of Technology.
- Lee, W., Kang, S. and Shin, H. 2003. Sludge Characteristics and their Contribution to Microfiltration in Submerged Membrane Bioreactors. **Journal of Membrane Science**. 216 : 217-227.

- Mallevalle, J., Perter, E. and Mark, R. 1996. **Water Treatment Membrane Processes**. McGraw-Hill. 2.18.
- Tatsuki, U., Kenji, H., Yasuto, K. and Osamu, S. 1997. Effects of Aeration on Suction Pressure In a Submerged Membrane Bioreactor. **Water Research**. 31 : 3.
- Moussaa, M.S., Hooijmansa, C.M., Lubberdinga, H.J., Gijzena, H.J., van Loosdrecht, M.C.M. 2005. "Modelling Nitrification, Heterotrophic Growth and Predation in Activated Sludge." **Water Research**. 39 : 5080-5098.
- Ueda, T. and Hata, K. 1998. Domestic Wastewater Treatment by a Submerged Membrane Bioreactor with Gravitational Filtration. **Water Research**. 33 : 2888–2892.
- Vigneswaran, S., Vigneswaran, B. and Ben, A.R. 1991. Application of Microfiltration for Water and Wastewater Treatment, **Environmental Sanitation Reviews, ENSIC**, Thailand. 31.
- Visvanathan, C., Yang, B.S., Muttamara, S. and Maythanukhraw, R. 1997. Application of Air Backflushing Technique in Membrane Bioreactor. **Water Science and Technology**. 36 : 259-266.
- Wang, Y., Huang, X. and Qian, Y. 2004. Nitrogen and Carbon Removals from Food Processing Wastewater by an Anoxic/Aerobic Membrane Bioreactor. **Process Biochemistry**. 35 : 335–340.
- Wen, X., Ding, H., Huang, X. and Liu, R. 2003. Treatment of Hospital Wastewater using a Submerged Membrane Bioreactor. **Process Biochemistry**. 39 : 1427–1431.
- Yamamoto, K., Hiasa, M., Mahmood, T. and Matsuo, T. 1989. Direct Solid-Liquid Separation using Hollow Fiber Membrane in an Activated Sludge Aeration Tank. **Water Science and Technology**. 21 : 43-54.
- Yang, W., Fan, Y. and Xu, H. 2004. Treatment of Wastewater from Toilets for Reclamation and Reuse using a Low Energy Consumption Membrane Bioreactor. **Process Biochemistry**. 95 : 86-94.
- Yeom, K.H., Nah, Y.M. and Ahn, K.H. 1999. Treatment of Household Wastewater using an Intermittently Aerated Membrane Bioreactor. **Desalination**. 124 : 193-204

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพ
การบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

**ก.1 ผลของอัตราภาระสารอินทรีย์และอายุสัปดาห์ต่อประสิทธิภาพการกำจัด
สารอินทรีย์และไนโตรเจน**

ตารางที่ ก.1.1 ผลของอัตราภาระสารอินทรีย์ต่อการกำจัดที่โอซี

วันที่	ความเข้มข้นที่โอซี				ประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซี		
	น้ำเข้า	อายุสัปดาห์	อายุสัปดาห์	อายุสัปดาห์	อายุสัปดาห์	อายุสัปดาห์	อายุสัปดาห์
	(มก./ล.)	5 วัน (มก./ล.)	10 วัน (มก./ล.)	30 วัน (มก./ล.)	5 วัน (ร้อยละ)	10 วัน (ร้อยละ)	30 วัน (ร้อยละ)
1	198.7	11.3	10.65	5.76	94.31	94.64	97.1
3	195.4	16.04	14.64	5.71	91.79	92.51	97.08
5	192.6	7.68	7.44	5.84	96.01	96.14	96.97
8	189.3	8.17	8.03	7.98	95.68	95.76	95.78
10	196.3	8.07	4.84	5.01	95.89	97.53	97.45
$\bar{X}$	194.46	10.25	9.12	6.06	94.74	95.32	96.88
SD	3.62	3.55	3.71	1.12	1.78	1.88	0.64
26	436.1	13.34	8.107	5.81	96.94	98.14	98.67
29	389.5	14.47	11.52	6.21	96.28	97.04	98.41
31	398.16	14.42	11.23	7.86	96.38	97.18	98.03
33	416.42	8.07	4.84	5.01	98.06	98.84	98.8
36	402.5	9.35	8.28	8.3	97.68	97.94	97.94
38	409.32	20.27	9.68	5.8	95.05	97.64	98.58
40	421	13.34	8.107	5.81	96.83	98.07	98.62
$\bar{X}$	410.43	13.32	8.82	6.4	96.75	97.84	98.43
SD	15.6	3.96	2.27	1.21	0.99	0.61	0.33
54	753.9	20.62	13.88	8.51	97.26	98.16	98.87
56	748.82	20.84	17.05	11.28	97.22	97.72	98.49
58	755.6	28.52	18.23	10.87	96.23	97.59	98.56
61	750.4	22.96	22.91	18.89	96.94	96.95	97.48
63	748.9	23.8	15.14	10.23	96.82	97.98	98.63
65	786.6	36.64	32.54	26.39	95.34	95.86	96.65
68	758.1	32.81	27.36	24.03	95.67	96.39	96.83
70	835.2	22.12	21.41	19.9	97.35	97.44	97.62
72	818.6	26.35	24.02	16.13	96.78	97.07	98.03
$\bar{X}$	803.97	27.09	24.26	20.02	96.6	96.96	97.49
SD	40.58	5.38	2.98	3.95	0.85	0.53	0.61

ตารางที่ ก.1.2 ผลของอัตราภาวะสารอินทรีย์ต่อการกำจัดซีโอดี

วันที่	ความเข้มข้นซีโอดี				ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี		
	น้ำเข้า	อายุสัปดาห์ 5 วัน	อายุสัปดาห์ 10 วัน	อายุสัปดาห์ 30 วัน	อายุสัปดาห์ 5 วัน	อายุสัปดาห์ 10 วัน	อายุสัปดาห์ 30 วัน
	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)
2	422	29	25	11	93.19	94.13	97.35
4	496	19	11	8	96.13	97.74	98.39
9	491	20	15	14	95.92	96.94	97.17
$\bar{X}$	469.68	22.65	17.00	11.03	95.08	96.27	97.63
SD	41.03	5.30	7.02	2.95	1.64	1.90	0.66
23	1046	34	21	16	96.75	97.99	98.47
28	973	36	28	16	96.30	97.12	98.36
30	1086	25	21	21	97.70	98.07	98.07
35	1065	52	26	16	95.12	97.56	98.50
$\bar{X}$	1042.60	36.75	24.00	17.25	96.47	97.69	98.35
SD	49.14	11.24	3.56	2.50	1.07	0.44	0.20
49	1952	56	38	20	97.13	98.05	98.98
54	1984	48	32	16	97.58	98.39	99.19
56	1983	74	25	18	96.27	98.74	99.09
60	1714	64	39	26	96.29	97.71	98.48
62	2040	67	65	23	96.72	96.80	98.88
66	2220	62	59	42	97.21	97.35	98.09
$\bar{X}$	1982.02	61.76	47.05	27.35	96.62	97.65	98.63
SD	162.93	8.97	18.42	10.59	0.44	0.82	0.44

ตารางที่ ก.1.3 ผลของอัตราภาวะสารอินทรีย์ต่อการกำจัดที่เคเอ็น

วันที่	ความเข้มข้นที่เคเอ็น				ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น		
	น้ำเข้า (มก./ล.)	อายุสัปดาห์ 5 วัน (มก./ล.)	อายุสัปดาห์ 10 วัน (มก./ล.)	อายุสัปดาห์ 30 วัน (มก./ล.)	อายุสัปดาห์ 5 วัน (ร้อยละ)	อายุสัปดาห์ 10 วัน (ร้อยละ)	อายุสัปดาห์ 30 วัน (ร้อยละ)
1	19.25	3.92	2.04	1.48	79.64	89.40	92.31
5	18.68	3.88	2.87	1.14	79.23	84.64	93.90
8	18.97	3.64	2.36	1.76	80.81	87.56	90.72
$\bar{X}$	18.97	3.81	2.42	1.46	79.89	87.20	92.31
SD	0.29	0.15	0.42	0.31	0.82	2.40	1.59
22	39.81	3.2	2.8	1.24	91.96	92.97	96.89
25	39.77	3.82	2.84	1.49	90.39	92.86	96.25
29	38.72	3.46	2.64	1.16	91.06	93.18	97.00
$\bar{X}$	39.43	3.49	2.76	1.30	91.14	93.00	96.71
SD	0.62	0.31	0.11	0.17	0.79	0.16	0.40
43	77.32	3.64	2.8	2.34	95.29	96.38	96.97
47	78.74	3.76	2.64	2.4	95.22	96.65	96.95
50	76.18	4.64	3.32	2.76	93.91	95.64	96.38
54	77.93	4.36	3.64	2.32	94.41	95.33	97.02
$\bar{X}$	77.62	4.25	3.20	2.49	94.51	95.87	96.78
SD	1.31	0.45	0.51	0.23	0.66	0.69	0.35

ก.2 ผลของระยะเวลาการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศ

ตารางที่ ก.2.1 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 7 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 1 ชั่วโมงต่อประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซี

วันที่	ความเข้มข้นทีโอซี				ประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซี		
	น้ำเข้า	อายุสัปดาห์ 5 วัน	อายุสัปดาห์ 10 วัน	อายุสัปดาห์ 30 วัน	อายุสัปดาห์ 5 วัน	อายุสัปดาห์ 10 วัน	อายุสัปดาห์ 30 วัน
	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)
1	841.1	24.51	19.96	18.84	97.09	97.63	97.76
3	824.6	19.196	18.37	14.92	97.67	97.77	98.19
5	806.4	25.37	22.25	18.25	96.85	97.24	97.74
8	790.34	28.72	25.8	24.24	96.37	96.74	96.93
10	782.99	20.12	18.12	12.53	97.43	97.69	98.40
12	815.94	28.14	23.9	18.83	96.55	97.07	97.69
15	798.82	25.08	25.25	21.36	96.86	96.84	97.33
17	781.84	24.79	20.27	19.94	96.83	97.41	97.45
$\bar{X}$	805.25	24.49	21.74	18.61	96.96	97.30	97.69
SD	20.98	3.37	3.01	3.62	0.43	0.39	0.47

ตารางที่ ก.2.2 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 5 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 3 ชั่วโมงต่อประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซี

วันที่	ความเข้มข้นทีโอซี				ประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซี		
	น้ำเข้า	อายุสัปดาห์ 5 วัน	อายุสัปดาห์ 10 วัน	อายุสัปดาห์ 30 วัน	อายุสัปดาห์ 5 วัน	อายุสัปดาห์ 10 วัน	อายุสัปดาห์ 30 วัน
	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)
1	767.30	28.35	28.4	34.41	96.31	96.30	95.52
3	746.00	34.09	34.07	36.38	95.43	95.43	95.12
5	751.00	23.09	29.92	31.83	96.93	96.02	95.76
8	750.30	23.89	25.28	30.97	96.82	96.63	95.87
10	764.25	38.02	55.93	59.95	95.03	92.68	92.16
12	780.94	26.1	34.3	45.95	96.66	95.61	94.12
15	748.23	24.1	32.3	35.95	96.78	95.68	95.20
$\bar{X}$	758.29	28.23	34.31	39.35	96.28	95.48	94.82
SD	12.90	5.73	10.06	10.32	0.75	1.30	1.31

ตารางที่ ก.2.3 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 3 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 5 ชั่วโมงต่อประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซี

วันที่	ความเข้มข้นทีโอซี				ประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซี		
	น้ำเข้า	อายุสัปดาห์	อายุสัปดาห์	อายุสัปดาห์	อายุสัปดาห์	อายุสัปดาห์	อายุสัปดาห์
	(มก./ล.)	5 วัน (มก./ล.)	10 วัน (มก./ล.)	30 วัน (มก./ล.)	5 วัน (ร้อยละ)	10 วัน (ร้อยละ)	30 วัน (ร้อยละ)
1	769.40	46.53	66.85	141.44	93.95	91.31	81.62
3	786.60	48.21	76.37	157.2	93.87	90.29	80.02
5	778.10	48.87	55.32	132.93	93.72	92.89	82.92
8	825.20	52.77	54.5	140.7	93.61	93.40	82.95
10	812.10	52.3	65.95	105.84	93.56	91.88	86.97
12	824.60	47.26	59.37	120.91	94.27	92.80	85.34
15	806.40	50.64	71.96	138.1	93.72	91.08	82.87
17	790.34	49.13	74.28	138.45	93.78	90.60	82.48
19	782.99	51.27	68.79	131.27	93.45	91.21	83.23
$\bar{X}$	797.30	49.66	65.93	134.09	93.77	91.72	83.15
SD	20.43	2.20	7.99	14.35	0.24	1.09	2.00

ตารางที่ ก.2.4 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 7 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 1 ชั่วโมงต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

วันที่	ความเข้มข้นซีโอดี				ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี		
	น้ำเข้า	อายุสัปดาห์	อายุสัปดาห์	อายุสัปดาห์	อายุสัปดาห์	อายุสัปดาห์	อายุสัปดาห์
	(มก./ล.)	5 วัน (มก./ล.)	10 วัน (มก./ล.)	30 วัน (มก./ล.)	5 วัน (ร้อยละ)	10 วัน (ร้อยละ)	30 วัน (ร้อยละ)
2	2170.56	65	55	51	96.99	97.44	97.67
4	2137.92	42	33	31	98.02	98.47	98.55
9	2072.6	77	73	64	96.30	96.46	96.93
11	2056.3	54	49	31	97.38	97.62	98.49
16	2137.9	77	65	47	96.41	96.95	97.79
18	2121.6	69	67	57	96.77	96.85	97.31
23	2023.7	67	65	54	96.69	96.77	97.34
$\bar{X}$	2102.95	64.35	58.29	47.79	96.94	97.22	97.72
SD	52.82	12.39	13.87	12.56	0.60	0.68	0.61

ตารางที่ ก.2.5 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 5 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 3 ชั่วโมงต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

วันที่	ความเข้มข้นซีโอดี				ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี		
	น้ำเข้า (มก./ล.)	อายุสัปดาห์ 5 วัน (มก./ล.)	อายุสัปดาห์ 10 วัน (มก./ล.)	อายุสัปดาห์ 30 วัน (มก./ล.)	อายุสัปดาห์ 5 วัน (ร้อยละ)	อายุสัปดาห์ 10 วัน (ร้อยละ)	อายุสัปดาห์ 30 วัน (ร้อยละ)
2	2040	70	75	85	96.57	96.32	95.84
4	1958	84	84	91	95.71	95.71	95.33
9	1975	55	78	82	97.21	96.05	95.87
11	1958	58	62	75	97.04	96.83	96.17
16	1991	71	71	101	96.43	96.43	94.92
18	2024	88	88	118	95.65	95.65	94.19
23	1942	58	65	88	97.01	96.65	95.46
$\bar{X}$	1984.05	69.14	74.71	91.39	96.52	96.24	95.40
SD	36.32	13.09	9.52	14.10	0.63	0.45	0.67

ตารางที่ ก.2.6 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 3 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 5 ชั่วโมงต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

วันที่	ความเข้มข้นซีโอดี				ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี		
	น้ำเข้า (มก./ล.)	อายุสัปดาห์ 5 วัน (มก./ล.)	อายุสัปดาห์ 10 วัน (มก./ล.)	อายุสัปดาห์ 30 วัน (มก./ล.)	อายุสัปดาห์ 5 วัน (ร้อยละ)	อายุสัปดาห์ 10 วัน (ร้อยละ)	อายุสัปดาห์ 30 วัน (ร้อยละ)
2	2024	116	170	367	94.27	91.61	81.85
4	2073	114	202	372	94.49	90.24	82.05
9	2105	119	139	344	94.34	93.41	83.64
11	2138	122	127	364	94.27	94.05	82.98
16	2171	129	165	274	94.06	92.41	87.37
18	2073	122	183	359	94.09	91.18	82.68
23	2154	127	184	339	94.09	91.44	84.24
$\bar{X}$	2105.28	121.47	167.16	345.75	94.23	92.05	83.54
SD	52.46	5.48	26.43	33.73	0.16	1.33	1.88

ตารางที่ ก.2.7 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 7 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 1 ชั่วโมงต่อประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น

วันที่	ความเข้มข้นที่เคเอ็น				ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น		
	น้ำเข้า	อายุสัปดาห์ 5 วัน	อายุสัปดาห์ 10 วัน	อายุสัปดาห์ 30 วัน	อายุสัปดาห์ 5 วัน	อายุสัปดาห์ 10 วัน	อายุสัปดาห์ 30 วัน
	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)
1	77.00	3.62	2.04	0.48	95.30	97.35	99.38
5	76.00	2.12	1.56	0.36	97.21	97.95	99.53
8	77.00	3.22	2.21	0.61	95.82	97.13	99.21
12	75.00	4.96	2.57	1.24	93.39	96.57	98.35
15	76.00	3.22	1.08	0.33	95.76	98.58	99.57
19	75.00	2.09	2.22	0.87	97.21	97.04	98.84
$\bar{X}$	76.00	3.21	1.95	0.65	95.78	97.44	99.14
SD	0.89	1.07	0.54	0.35	1.42	0.72	0.47

ตารางที่ ก.2.8 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 5 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 3 ชั่วโมงต่อประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น

วันที่	ความเข้มข้นที่เคเอ็น				ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น		
	น้ำเข้า	อายุสัปดาห์ 5 วัน	อายุสัปดาห์ 10 วัน	อายุสัปดาห์ 30 วัน	อายุสัปดาห์ 5 วัน	อายุสัปดาห์ 10 วัน	อายุสัปดาห์ 30 วัน
	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)
1	77.25	4.86	3.98	2.59	93.71	94.85	96.65
5	76.14	3.79	3.27	2.87	95.02	95.71	96.23
8	75.19	4.95	3.38	1.41	93.42	95.50	98.12
12	76.49	4.04	2.81	1.84	94.72	96.33	97.59
15	77.42	3.13	2.58	1.89	95.96	96.67	97.56
19	77.13	2.91	2.54	1.61	96.23	96.71	97.91
$\bar{X}$	76.60	3.95	3.09	2.04	94.84	95.96	97.34
SD	0.85	0.85	0.56	0.57	1.14	0.74	0.74

ตารางที่ ก.2.9 ผลของสภาวะการเติมอากาศ 3 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 5 ชั่วโมงต่อประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น

วันที่	ความเข้มข้นที่เคเอ็น				ประสิทธิภาพการกำจัดที่เคเอ็น		
	น้ำเข้า	อายุสลัดจ์ 5 วัน	อายุสลัดจ์ 10 วัน	อายุสลัดจ์ 30 วัน	อายุสลัดจ์ 5 วัน	อายุสลัดจ์ 10 วัน	อายุสลัดจ์ 30 วัน
	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)
1	75.96	7.92	5.04	3.48	89.57	93.36	95.42
5	77.25	7.87	5.21	3.42	89.81	93.26	95.57
8	77.19	8.16	4.64	3.92	89.43	93.99	94.92
12	75.20	7.69	4.16	3.36	89.77	94.47	95.53
15	76.46	6.12	4.14	2.37	92.00	94.59	96.90
19	77.32	7.93	5.23	3.24	89.74	93.24	95.81
$\bar{X}$	76.56	7.62	4.74	3.30	90.05	93.82	95.69
SD	0.86	0.75	0.50	0.51	0.96	0.62	0.66

ก.3 ผลของโปรไฟล์การกำจัดสารอินทรีย์และไนโตรเจน

ตารางที่ ก.3.1 โปรไฟล์การลดลงที่ไอซี ในสภาวะการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศต่าง ๆ

เวลา	ความเข้มข้นที่ไอซี								
	อายุสลัดจ์ 5 วัน			อายุสลัดจ์ 10 วัน			อายุสลัดจ์ 30 วัน		
	เติมอากาศ:หยุดเติมอากาศ			เติมอากาศ:หยุดเติมอากาศ			เติมอากาศ:หยุดเติมอากาศ		
	7:1	5:3	3:5	7:1	5:3	3:5	7:1	5:3	3:5
0	748	760	744	748	760	744	748	760	744
15	350	257	244	331	204	158	322	117	177
30	301	207	185	296	150	108	235	92	172
45	280	166	167	259	131	70	190	61	152
60	259	131	120	236	100	62	125	41	134
120	142	43	19	101	46	22	32	28	74
300	16	31	30	19	30	58	23	34	129
480	16	52	50	26	62	65	21	68	149

ตารางที่ ก.3.2 โปรไฟล์การลดลงซีไอดีในสภาวะการเต็มอากาศและหยุดเต็มอากาศต่าง ๆ

เวลา	ความเข้มข้นซีไอดี								
	อายุสัปดาห์ 5 วัน			อายุสัปดาห์ 10 วัน			อายุสัปดาห์ 30 วัน		
	เต็มอากาศ:หยุดเต็มอากาศ			เต็มอากาศ:หยุดเต็มอากาศ			เต็มอากาศ:หยุดเต็มอากาศ		
	7:1	5:3	3:5	7:1	5:3	3:5	7:1	5:3	3:5
0	1934	1958	2016	1934	1958	2016	1934	1958	2016
15	897	714	669	922	563	441	738	445	498
30	736	608	506	714	363	294	593	375	465
45	700	457	441	661	363	196	486	224	400
60	585	420	318	485	347	171	217	188	359
120	376	121	54	269	135	57	94	80	189
300	41	92	80	51	111	164	61	75	334
480	41	151	128	55	172	173	56	182	375

ตารางที่ ก.3.3 โปรไฟล์การลดลงที่เคเอ็นในสภาวะการเต็มอากาศและหยุดเต็มอากาศต่าง ๆ

เวลา	ความเข้มข้นที่เคเอ็น								
	อายุสัปดาห์ 5 วัน			อายุสัปดาห์ 10 วัน			อายุสัปดาห์ 30 วัน		
	เต็มอากาศ:หยุดเต็มอากาศ			เต็มอากาศ:หยุดเต็มอากาศ			เต็มอากาศ:หยุดเต็มอากาศ		
	7:1	5:3	3:5	7:1	5:3	3:5	7:1	5:3	3:5
0	75	78	78	75	78	78	75	78	78
15	45	44	46	49	41	42	43	41	38
30	29	35	40	26	33	37	17	29	32
45	22	27	36	20	22	33	16	17	28
60	14	20	28	13	16	25	11	12	18
120	10	11	19	8	10	16	5	7	13
300	8	8	12	3	4	9	2	4	7
480	4	4	8	2	3	5	1	3	4

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพ
การบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

ข.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนระหว่าง ถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

ตารางที่ ข.1.1 ผลการกำจัดที่โอซีของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 5 วัน

อายุตะกอน (วัน)	เวลา (นาทีก)	ค่า TOC (มก./ล.)					
		ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ			ผ่านเมมเบรน		
		ที่โอซีเข้า (มก./ล.)	ที่โอซีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด	ที่โอซีเข้า (มก./ล.)	ที่โอซีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด
5	15	756.24	23.59	96.88	756.24	17.64	97.67
	30		25.97	96.57		19.39	97.44
	45		27.70	96.34		20.98	97.23
	60		29.81	96.06		17.61	97.67
	120		31.90	95.78		15.06	98.01
	180		28.58	96.22		15.69	97.93
	240		34.20	95.48		21.90	97.10
	300		30.81	95.93		19.63	97.40
	360		139.57	81.54		82.08	89.15
	420		149.16	80.28		90.46	88.04
	480		149.90	80.18		88.85	88.25
	ค่าเฉลี่ย		61.01	91.93		37.21	95.08

ตารางที่ ข.1.2 ผลการกำจัดที่โอซีของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 10 วัน

อายุตะกอน (วัน)	เวลา (นาทีก)	ค่า TOC (มก./ล.)					
		ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ			ผ่านเมมเบรน		
		ที่โอซีเข้า (มก./ล.)	ที่โอซีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด	ที่โอซีเข้า (มก./ล.)	ที่โอซีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด
10	15	756.24	22.64	97.01	756.24	15.82	97.91
	30		27.47	96.37		15.93	97.89
	45		27.62	96.35		18.37	97.57
	60		32.04	95.76		16.50	97.82
	120		27.01	96.43		14.12	98.13
	180		24.83	96.72		14.82	98.04
	240		31.64	95.82		19.19	97.46
	300		33.56	95.56		17.74	97.65
	360		67.20	91.11		34.98	95.37
	420		73.70	90.26		50.26	93.35
	480		85.97	88.63		63.06	91.66
	ค่าเฉลี่ย		41.24	94.55		25.52	96.62

ตารางที่ ข.1.3 ผลการกำจัดที่โอซีของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 30 วัน

อายุตะกอน (วัน)	เวลา (นาท)	ค่า TOC (มก./ล.)					
		ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ			ผ่านเมมเบรน		
		ที่โอซีเข้า (มก./ล.)	ที่โอซีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด	ที่โอซีเข้า (มก./ล.)	ที่โอซีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด
30	15	756.24	20.18	97.33	756.24	14.36	98.10
	30		20.66	97.27		12.82	98.30
	45		23.87	96.84		13.52	98.21
	60		24.05	96.82		13.38	98.23
	120		23.96	96.83		13.01	98.28
	180		22.99	96.96		13.02	98.28
	240		28.49	96.23		16.05	97.88
	300		30.42	95.98		15.83	97.91
	360		48.36	93.61		29.99	96.03
	420		52.91	93.00		42.30	94.41
	480		67.86	91.03		38.61	94.89
	ค่าเฉลี่ย		33.07	95.63		20.26	97.32

ตารางที่ ข.1.4 ผลการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 5 วัน

อายุตะกอน (วัน)	เวลา (นาท)	ค่า COD (มก./ล.)					
		ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ			ผ่านเมมเบรน		
		ที่โอซีเข้า (มก./ล.)	ที่โอซีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด	ที่โอซีเข้า (มก./ล.)	ที่โอซีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด
5	15	1928	74	96.16	1928	48	97.51
	30		74	96.16		50.00	97.41
	45		77	96.01		52	97.30
	60		88	95.44		48	97.51
	120		83	95.70		36	98.13
	180		82	95.75		42	97.82
	240		93	95.18		34	98.24
	300		89	95.38		36	98.13
	360		395	79.51		194	89.94
	420		400	79.25		240	87.55
	480		385	80.03		256	86.72
	ค่าเฉลี่ย		167.27	91.32		94.18	95.12

ตารางที่ ข.1.5 ผลการกำจัดชีโอดีของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 10 วัน

อายุตะกอน (วัน)	เวลา (นาท)	ค่า COD (มก./ล.)					
		ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ			ผ่านเมมเบรน		
		ทีโอดีเข้า (มก./ล.)	ทีโอดีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด	ทีโอดีเข้า (มก./ล.)	ทีโอดีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด
10	15	1928	64	96.68	1928	42	97.82
	30		71	96.32		42	97.82
	45		71	96.32		38	98.03
	60		79	95.90		40	97.93
	120		77	96.01		38	98.03
	180		76	96.06		40	97.93
	240		85	95.59		30	98.44
	300		82	95.75		34	98.24
	360		164	91.49		98	94.92
	420		185	90.40		130	93.26
	480		213.5	88.93		154	92.01
	ค่าเฉลี่ย		106.14	94.50		62.36	96.77

ตารางที่ ข.1.6 ผลการกำจัดชีโอดีของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 30 วัน

อายุตะกอน (วัน)	เวลา (นาท)	ค่า COD (มก./ล.)					
		ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ			ผ่านเมมเบรน		
		ทีโอดีเข้า (มก./ล.)	ทีโอดีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด	ทีโอดีเข้า (มก./ล.)	ทีโอดีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด
30	15	1928	55	97.15	1928	35	98.18
	30		56	97.10		32	98.34
	45		61	96.84		30	98.44
	60		56	97.10		34.00	98.24
	120		53	97.25		28.00	98.55
	180		52	97.30		30	98.44
	240		64	96.68		24	98.76
	300		75	96.11		26	98.65
	360		139	92.79		90	95.33
	420		145	92.48		102	94.71
	480		149	92.27		114	94.09
	ค่าเฉลี่ย		82.27	95.73		49.55	97.43

ตารางที่ ข.1.7 ผลการกำจัดที่เคเอ็นของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 5 วัน

อายุตะกอน (วัน)	เวลา (นาท)	ค่า TKN (มก./ล.)					
		ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ			ผ่านเมมเบรน		
		ที่ไอซีเข้า (มก./ล.)	ที่ไอซีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด	ที่ไอซีเข้า (มก./ล.)	ที่ไอซีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด
5	15	77.98	3.30	95.77	77.98	1.44	98.16
	30		4.12	94.72		1.80	97.69
	45		3.38	95.67		1.76	97.74
	60		4.22	94.59		1.95	97.50
	120		3.62	95.36		1.80	97.70
	180		4.48	94.26		1.75	97.76
	240		3.82	95.10		1.75	97.76
	300		3.49	95.53		1.96	97.49
	360		4.98	93.61		3.01	96.14
	420		4.85	93.79		3.07	96.06
	480		3.97	94.91		2.95	96.22
	ค่าเฉลี่ย		4.02	94.85		2.11	97.29

ตารางที่ ข.1.8 ผลการกำจัดที่เคเอ็นของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 10 วัน

อายุตะกอน (วัน)	เวลา (นาท)	ค่า TKN (มก./ล.)					
		ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ			ผ่านเมมเบรน		
		ที่ไอซีเข้า (มก./ล.)	ที่ไอซีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด	ที่ไอซีเข้า (มก./ล.)	ที่ไอซีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด
10	15	77.98	2.90	96.28	77.98	1.35	98.27
	30		3.59	95.40		1.46	98.13
	45		2.78	96.44		1.29	98.35
	60		3.52	95.49		1.30	98.33
	120		2.91	96.27		1.22	98.44
	180		3.42	95.62		1.45	98.14
	240		3.33	95.74		1.33	98.29
	300		2.89	96.30		1.33	98.29
	360		4.04	94.82		2.30	97.05
	420		4.02	94.85		2.58	96.69
	480		3.36	95.69		2.48	96.82
	ค่าเฉลี่ย		3.34	95.72		1.64	97.89

ตารางที่ ข.1.9 ผลการกำจัดที่เคเอ็นของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับ MBR ที่อายุ สลัดจ์ 30 วัน

อายุตะกอน (วัน)	เวลา (นาท)	ค่า TKN (มก./ล.)					
		ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ			ผ่านเมมเบรน		
		ที่ไอซีเข้า (มก./ล.)	ที่ไอซีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด	ที่ไอซีเข้า (มก./ล.)	ที่ไอซีออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด
30	15	77.98	2.10	97.31	77.98	0.82	98.95
	30		2.44	96.88		1.12	98.56
	45		1.96	97.49		0.91	98.83
	60		2.75	96.47		0.65	99.17
	120		2.12	97.28		0.77	99.01
	180		2.20	97.19		1.10	98.59
	240		3.39	95.65		0.96	98.78
	300		2.75	96.48		0.84	98.92
	360		2.69	96.56		1.78	97.72
	420		3.17	95.94		1.97	97.48
	480		2.97	96.19		1.53	98.04
	ค่าเฉลี่ย		2.59	96.68		1.13	98.55

ภาคผนวก ค

พลักซ์ การอุดตันของเมมเบรน และการทำความสะอาด

ค.1 การทดสอบคุณภาพแผ่นเมมเบรน

ตารางที่ ค.1.1 ฟลักซ์ของการทดสอบความแม่นยำของของเมมเบรน

แผ่น 1		แผ่น 2		แผ่น 3	
ความดัน (กิโลปาสคาล)	ฟลักซ์ (ล./ตร.ม.-ชม.)	ความดัน (กิโลปาสคาล)	ฟลักซ์ (ล./ตร.ม.-ชม.)	ความดัน (กิโลปาสคาล)	ฟลักซ์ (ล./ตร.ม.-ชม.)
2.66	19.74	2.66	21.00	2.66	21.00
3.98	50.41	4.65	48.31	4.32	50.41
6.64	73.51	6.64	71.41	6.64	73.51
8.63	94.52	8.30	92.42	8.63	94.52
9.63	117.62	9.96	113.42	9.96	115.52
10.62	134.42	11.29	136.52	11.29	136.52
12.62	151.23	13.28	153.33	12.62	153.33
14.61	174.33	15.27	172.23	15.60	174.33
17.26	203.74	16.60	201.64	17.26	203.74
19.26	218.44	19.92	216.34	19.92	218.44

ค.2 ผลของอายุสไลด์ต่อการอุดตันของเมมเบรน

ตารางที่ ค. 2.1 ค่าความต้านทานภายใน 30 นาทีของการอุดตันรูปแบบต่าง ๆ ที่อายุ
สไลด์ 5, 10 และ 30 วัน

ความต้านทานที่เกิดขึ้น	อายุสไลด์		
	5 วัน	10 วัน	30 วัน
Rm	6.47E+11	6.47E+11	6.47E+11
Rf	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Rc	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Rg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
R _{a1}	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
R _{a2}	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Rt	6.47E+11	6.47E+11	6.47E+11

ตารางที่ ค.2.2 ค่าความต้านทานภายใน 1 ชั่วโมงของการอุดต้นรูปแบบต่าง ๆ ที่อายุ

สลัดจ์ 5, 10 และ 30 วัน

ความต้านทานที่เกิดขึ้น	อายุสลัดจ์		
	5 วัน	10 วัน	30 วัน
Rm	6.47E+11	6.47E+11	6.47E+11
Rf	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Rc	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Rg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
R _{a1}	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
R _{a2}	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Rt	6.47E+11	6.47E+11	6.47E+11

ตารางที่ ค.2.3 ค่าความต้านทานภายใน 2 ชั่วโมงของการอุดต้นรูปแบบต่าง ๆ ที่อายุ

สลัดจ์ 5, 10 และ 30 วัน

ความต้านทานที่เกิดขึ้น	อายุสลัดจ์		
	5 วัน	10 วัน	30 วัน
Rm	6.47E+11	6.47E+11	6.47E+11
Rf	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Rc	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Rg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
R _{a1}	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
R _{a2}	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Rt	6.47E+11	6.47E+11	6.47E+11

ตารางที่ ค.2.4 ค่าความต้านทานภายใน 5 ชั่วโมงของการอุดต้นรูปแบบต่าง ๆ ที่อายุ

สลัดจ์ 5, 10 และ 30 วัน

ความต้านทานที่เกิดขึ้น	อายุสลัดจ์		
	5 วัน	10 วัน	30 วัน
Rm	6.47E+11	6.47E+11	6.47E+11
Rf	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Rc	1.50E+10	1.80E+11	3.70E+11
Rg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
R _{a1}	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
R _{a2}	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Rt	6.62E+11	8.27E+11	1.02E+12

ตารางที่ ค.2.5 ค่าความต้านทานภายใน 8 ชั่วโมงของการอุดต้นรูปแบบต่าง ๆ ที่อายุ

สลัดจ์ 5, 10 และ 30 วัน

ความต้านทานที่เกิดขึ้น	อายุสลัดจ์		
	5 วัน	10 วัน	30 วัน
Rm	6.46753E+11	6.46753E+11	6.46753E+11
Rf	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Rc	2.02E+11	1.805E+11	4.478E+11
Rg	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
R _{a1}	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
R _{a2}	-1.461E+09	0.000E+00	0.000E+00
Rt	8.46939E+11	8.272E+11	1.095E+12

ตารางที่ ค.2.6 ค่าความต้านทานภายใน 48 ชั่วโมงของการอุดต้นรูปแบบต่าง ๆ ที่อายุ

สลัดจ์ 5, 10 และ 30 วัน

ความต้านทานที่เกิดขึ้น	อายุสลัดจ์		
	5 วัน	10 วัน	30 วัน
Rm	6.05471E+11	6.05E+11	5.69E+11
Rf	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Rc	6.85E+12	9.04E+12	1.27E+13
Rg	1.91E+11	1.77E+11	1.95E+11
R _{a1}	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
R _{a2}	1.18E+10	2.55E+10	6.32E+10
Rt	7.66E+12	9.85E+12	1.36E+13

ค.3 การลดลงของฟลักซ์และการกลับคืนของฟลักซ์หลังการทำความสะอาด

ตารางที่ ค.3.1 การลดลงของฟลักซ์และการทำความสะอาด

ระยะเวลาดำเนินการ (นาที)	อัตราการใช้ (ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมงต่ออีกปีสากล)		
	อายุสัปดาห์ 5 วัน	อายุสัปดาห์ 10 วัน	อายุสัปดาห์ 30 วัน
0	6.33	6.33	6.33
15	6.71	6.33	6.64
30	6.58	6.33	3.29
45	3.66	3.16	2.30
60	2.19	2.07	1.94
120	2.02	2.02	1.75
180	1.94	1.94	1.28
240	1.83	1.86	1.20
300	1.79	1.83	1.20
360	1.79	1.57	1.20
420	1.27	1.27	0.92
480	1.11	0.94	0.66
ล้างเมมเบรนด้วยน้ำเปล่า	1.11	0.94	0.66
ล้างเมมเบรนทางกล	5.98	5.73	5.73
ล้างเมมเบรนด้วยด่าง	6.24	6.24	6.24
ล้างเมมเบรนด้วยกรด	6.24	6.24	6.24

ภาคผนวก ง
ตัวอย่างการคำนวณค่าต่าง ๆ

ง.1 ตัวอย่างการคำนวณการควบคุมอายุสลัดจ์

ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ (HRT) ควบคุม = 24 ชม.

$$\text{อายุสลัดจ์ ควบคุมโดย } SRT = \frac{VX}{F_w X_w} \quad (\text{เกรียงศักดิ์, 2539})$$

โดยที่ V = ปริมาตรของน้ำในถัง

X = ค่า MLSS ของตะกอน

F_w = อัตราการถ่ายทิ้งของตะกอน

X_w = MLSS ของตะกอนที่สูบทิ้ง (ตกตะกอนแล้ว)

การถ่ายตะกอนทำในช่วงเวลาที่มีการปั่นกววน ทำให้ค่า MLSS ของน้ำตะกอนในถังมีค่า

เท่ากับ MLSS ของตะกอนที่สูบทิ้ง $X = X_w$

$$\text{ดังนั้น } SRT = \frac{V}{F_w}$$

ง.2 ตัวอย่างการคำนวณความต้านทานของการอุดตันแบบอนุกรม

ค่าที่ใช้ในการคำนวณ

$$J_v = 21 \text{ LMH}$$

$$\Delta P = 2.656 \text{ kPa}$$

$$\mu = 8 \times 10^{-7} \text{ kPa.s}$$

1. สำหรับเมมเบรนสะอาด

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu r_m}$$

$$r_m = \frac{46.5 \text{ kPa}}{21 \left(\frac{L}{m^2 \cdot h} \right) \times \left(\frac{1 m^3}{1000 L} \right) \times \left(\frac{1 h}{60 \times 60 s} \right) \times (8 \times 10^{-7} \text{ kPa.s})}$$

$$r_m = 5.69 \times 10^{11} m^{-1}$$

2. เมมเบรนที่มีการอุดตัน

ล้างเมมเบรนด้วยน้ำเปล่าจะได้ r_g

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu r_t} = \frac{\Delta P}{\mu(r_m + r_c + r_g + r_{a1} + r_{a2})} \quad \text{สมการที่ 1 หา } r_g$$

ล้างเมมเบรนทางกลจะได้ r_c

$$r_t = r_m + r_c + r_g + r_{a1} + r_{a2}$$

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu r_t} = \frac{\Delta P}{\mu(r_m + r_c + r_{a1} + r_{a2})} \quad \text{สมการที่ 2 หา } r_c$$

ล้างเมมเบรนด้วยต่างจะได้ r_{a1}

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu r_t} = \frac{\Delta P}{\mu(r_m + r_{a1} + r_{a2})} \quad \text{สมการที่ 3 หา } r_{a1}$$

ล้างเมมเบรนด้วยกรดจะได้ r_{a2}

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu r_t} = \frac{\Delta P}{\mu(r_m + r_{a2})} \quad \text{สมการที่ 4 หา } r_{a2}$$

แทนค่า $r_m, \Delta P, \mu$ และ J ในสมการที่ 4 จะหาค่า r_{a2}

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายเกรียงกมล ตุนวัฒนกิจเจริญ
วัน เดือน ปีเกิด	19 พฤษภาคม พ.ศ. 2522
ประวัติการศึกษา	2545 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา จ.ชลบุรี 2549 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กทม.