

ผลของช่วงเวลาการเติม-หยุดเติมอากาศต่อการบำบัดน้ำเสียจากอาคารสูง  
โดยถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียนเพื่อใช้สำหรับงานภูมิทัศน์



นางสาวจิรินทร์นิน กองวงศ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF ON/OFF AERATION TIME ON TREATMENT OF WASTEWATER  
FROM HIGH-RISE BUILDING BY OXIDATION-DITCH MEMBRANE BIOREACTOR  
(OD-MBR) FOR GARDENING

Miss Jiranthanin Kongwong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science  
(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของช่วงเวลากาการเติม-หยุดเติมอากาศต่อการบำบัดน้ำ  
เสียจากอาคารสูงโดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบ  
คลองวนเวียนเพื่อใช้สำหรับงานภูมิทัศน์  
โดย นางสาวจิรันธินี กองวงศ์  
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุเนตร ชุตินธรานนท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ชุตินธรานนท์ สิริพิพัฒน์กุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. ชลาทิพย์ รัตสุข)

จรรย์นิน กองวงศ์ : ผลของช่วงเวลาการเติม-หยุดเติมอากาศต่อการบำบัดน้ำเสียจากอาคารสูง โดยถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียนเพื่อใช้สำหรับงานภูมิทัศน์ (EFFECT OF ON/OFF AERATION TIME ON TREATMENT OF WASTEWATER FROM HIGH-RISE BUILDING BY OXIDATION-DITCH MEMBRANE BIOREACTOR (OD-MBR) FOR GARDENING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล, 125 หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนการเติม-หยุดเติมอากาศที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส จากอาคารสูง โดยใช้ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน เพื่อนำกลับมาใช้สำหรับงานภูมิทัศน์ การศึกษานี้มีการกำหนดอัตราส่วนช่วงเวลาการเติม-หยุดเติมอากาศที่แตกต่างกัน 6 สัดส่วน คือ เติมอากาศตลอดเวลา 60/60 40/80 30/90 80/40 และ 90/30 นาที แบ่งการศึกษาเป็น 4 หัวข้อหลัก ได้แก่ การศึกษาการอุดตันของเมมเบรน ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดและการประเมินต้นทุนค่าการใช้พลังงานของระบบถึงปฏิกรณ์

จากการศึกษาการอุดตันของเมมเบรน โดยเทคนิค SEM และ FT-IR พบว่า สาเหตุหลักของการอุดตันของระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ ซึ่งทำให้ระยะการกักน้ำเพิ่มขึ้น คือ จุลินทรีย์ที่ทำหน้าในการกำจัดมลสารในน้ำเสียที่มีลักษณะกระจายตัวเป็นตะกอนขนาดเล็กกว่า 57 ไมโครเมตร และสารประกอบ extracellular polymeric substances (EPS) ที่มีโปรตีนและโพลีแซคคาไรด์เป็นองค์ประกอบ ประสิทธิภาพการบำบัดของถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนในสภาวะการเดินระบบแบบเติม-หยุดเติมอากาศ สามารถบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน (ซีโอดี) เท่ากับร้อยละ 88.7 การบำบัดไนโตรเจน (ทีเคเอ็น) เท่ากับร้อยละ 81.8 และการบำบัดฟอสฟอรัส (ฟอสเฟต) เท่ากับร้อยละ 37.2 คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดมีแนวโน้มที่จะนำกลับไปใช้สำหรับงานภูมิทัศน์ได้ และการประเมินต้นทุนค่าการใช้พลังงาน พบว่าการเดินระบบแบบการเติม-หยุดเติมอากาศ ทำให้ประหยัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า และมีประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการเติมอากาศแบบต่อเนื่อง โดยอัตราส่วนการเติม-หยุดเติมอากาศของการทดลองที่ 4 (30/90 นาที) เหมาะสมต่อการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส รวมถึงต้นทุนการเดินระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5587114120 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS: OXIDATION-DITCH MEMBRANE BIOREACTOR (OD-MBR) / INTERMITTENT AERATION / HIGH-RISE BUILDING

JIRANTHANIN KONGWONG: EFFECT OF ON/OFF AERATION TIME ON TREATMENT OF WASTEWATER FROM HIGH-RISE BUILDING BY OXIDATION-DITCH MEMBRANE BIOREACTOR (OD-MBR) FOR GARDENING. ADVISOR: ASSOC. PROF. CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D., 125 pp.

In this research, the treatment of wastewater from high-rise building was done to upgrade the treated water quality for gardening. This study was focused on the effect of intermittent aeration time (on/off aeration) on the remove performance for organic carbon, nitrogen and phosphorus by Oxidation-Ditch Membrane Bioreactor (OD-MBR). The intermittent aeration time of OD-MBR in this experiment was varied to : continuous aeration, 60/60, 40/80 30/90, 80/40 and 90/30 minutes. This research can be divided into 4 parts. They were membrane fouling, organic carbon (COD), nitrogen (TKN) and phosphorus ( $PO_4^{3-}$ ) removal efficiencies, the effluent quality and the cost evaluation of the system operation.

The result shows that the main cause of clogging into pore and fouling on membrane surface of the membrane on OD-MBR system is related to the sludge floc which was pin floc, having size smaller than 57  $\mu m$  and extracellular polymeric substances (EPS), consisting of proteins and polysaccharides that can be determined by SEM and FT-IR techniques. The highest COD, TKN and  $PO_4^{3-}$  removal efficiencies could be achieved at 88.7%, 81.8% and 37.2% respectively. Moreover, from the treatment cost evaluation for the intermittent aeration mode (on/off aeration) it indicates that the intermittent aeration could consume less energy than the continuous aeration system. Therefore, it can be summarized that the intermittent aeration of 30/90 minute was the most efficiency to remove organic carbon, nitrogen and phosphorus, as well as energy saving in operating the OD-MBR system.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature .....

Academic Year: 2015

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและความช่วยเหลือรวมทั้งการสนับสนุนด้านต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้อย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ อาจารย์ ดร.ชุตินันท์ สิริพิพัฒน์กุล และ ดร.ชลาทิพย์ รัตสุข ที่กรุณามาเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำ ปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขข้อผิดพลาดของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรรศนีย์ พฤกษาสีสิทธิ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ปิยะธีระธิดิวรรกุล ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เรื่องสถานที่ทำการวิเคราะห์

ขอขอบคุณ ทูสนับสนุนวิทยานิพนธ์จากหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ทูอุดหนุนการวิจัยจากองค์ความร่วมมือระหว่างประเทศของญี่ปุ่น (JICA) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เรื่องสถานที่ สารเคมี และเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณจันทร์เลขา ภูทองคำ นักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการ และ คุณเกศกนก สุดปราง เจ้าหน้าที่ธุรการประจำหลักสูตร ที่คอยให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ ทำให้การดำเนินการวิจัยเป็นไปอย่างสะดวกและรวดเร็ว

ขอขอบคุณ คุณพรรณเลขา หมั่นเพ็ชร และคุณบุษรินทร์ ดานะ เพื่อนๆ พี่ๆ หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และกำลังใจจนทำให้สามารถดำเนินการวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้อย่างสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอขอบคุณครอบครัว ที่คอยอบรมสั่งสอน สนับสนุน ปรองดองด้านต่างๆ และเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้า ทำให้สามารถทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดียิ่ง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	3
1.4 กรอบแนวคิด.....	4
1.5 ขอบเขตงานวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 น้ำเสียอาคาร.....	6
2.1.1 แหล่งกำเนิดและลักษณะน้ำเสียอาคาร.....	7
2.1.2 การบำบัดน้ำเสียจากอาคาร.....	7
2.2 การบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน (Oxidation-Ditch).....	9
2.2.1 หลักการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน.....	9
2.2.2 ส่วนประกอบของระบบ.....	11
2.2.2.1 ถังเติมอากาศแบบคลองวนเวียน (Aeration Tank).....	11
2.2.2.2 ถังตกตะกอน (Sedimentation Tank).....	11

2.2.3 จุลินทรีย์ในระบบ.....	12
2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงาน.....	13
2.2.4.1 อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์.....	13
2.2.4.2 ความต้องการออกซิเจน.....	13
2.2.4.3 ธาตุอาหาร.....	13
2.2.4.4 ระยะเวลาการบำบัด.....	14
2.2.4.5 พีเอช.....	14
2.2.4.6 สารพิษ.....	14
2.2.4.7 อุณหภูมิ.....	15
2.2.4.8 การกวนผสม.....	15
2.2.4.9 อัตราการไหลของน้ำเสีย.....	15
2.3 การบำบัดธาตุอาหารด้วยวิธีทางชีวภาพ.....	16
2.3.1 การบำบัดไนโตรเจนทางชีวภาพ.....	17
2.3.1.1 ปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification).....	17
2.3.1.2 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification).....	18
2.3.1.3 ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification).....	18
2.3.1.4 ปฏิกิริยาเอสเอ็นดี (Simultaneous Nitrification and Denitrification)....	19
2.3.2 การบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ.....	20
2.4 การเติมอากาศในระบบบำบัดน้ำเสีย.....	21
2.4.1 กระบวนการเติมอากาศ.....	21
2.4.2 ทฤษฎีของการเติมอากาศ.....	22
2.4.3 การถ่ายเทก๊าซออกซิเจน.....	23
2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทออกซิเจน.....	26



2.4.4.1	ขนาดของฟองอากาศ.....	26
2.4.4.2	อัตราการให้อากาศ.....	26
2.4.4.3	ระดับความลึกของน้ำ.....	26
2.4.4.4	รูปทรงของถังเติมอากาศ.....	26
2.4.4.5	การจัดวางหัวฟุ้งกระจายอากาศ.....	27
2.4.4.6	ความหนาแน่นของหัวฟุ้ง.....	27
2.4.4.7	ผลกระทบจากการอุดตันของหัวฟุ้ง.....	27
2.5	กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process).....	28
2.5.1	หลักเกณฑ์การจำแนกกระบวนการเมมเบรน.....	30
2.5.1.1	ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration Membrane : MF).....	31
2.5.1.2	อัลตราไมโครฟิลเตรชัน (Ultrafiltration Membrane : UF).....	31
2.5.1.3	นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration Membrane : NF).....	31
2.5.1.4	รีเวอร์ออสโมซิส (Reverse Osmosismembrane : RO).....	32
2.5.2	โมดูลชนิดต่างๆ ในกระบวนการเมมเบรน.....	33
2.5.2.1	โมดูลแบบแผ่นและแบบกรอบ (Plate and Frame Module).....	33
2.5.2.2	โมดูลแบบท่อ (Tubular Module).....	34
2.5.2.3	โมดูลแบบม้วน (Spiral Wound Module).....	34
2.5.2.4	โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module).....	35
2.5.3	ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration Membrane : MF).....	36
2.5.3.1	คุณลักษณะของไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน.....	36
2.5.3.2	ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน.....	37
2.5.3.3	ปัญหาการอุดตันของเมมเบรน.....	38
2.5.4	การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเมมเบรน.....	38

2.6 การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ .....	39
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	43
3.1 พื้นที่วิจัย.....	43
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย .....	43
3.2.1 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ .....	43
3.2.2 เครื่องสูบน้ำ.....	47
3.2.3 ระบบเครื่องเติมอากาศ (Aerator).....	48
3.2.4 อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของระบบ.....	49
3.2.5 น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัย .....	50
3.2.6. การทำงานของถังปฏิกรณ์.....	50
3.3 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย.....	52
3.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย .....	53
3.4.1 ศึกษาการอุดตันของเมมเบรน (Membrane Fouling).....	53
3.4.2 ศึกษาผลของช่วงเวลาการเติม-หยุดเติมอากาศ ต่อประสิทธิภาพการบำบัด สารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส.....	54
3.4.3 คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน.....	57
3.4.4. การประเมินต้นทุนการใช้พลังงานในการเดินระบบ .....	57
3.4.4.1 อัตราการใช้ไฟฟ้า.....	57
3.4.4.2 ปริมาณน้ำเสียที่บำบัดได้ .....	57
3.4.4.3 การคำนวณค่าบำบัดน้ำเสีย .....	58
บทที่ 4 ผล และวิจารณ์ผลการทดลอง.....	59
4.1 ผลการอุดตันของเมมเบรน .....	59

4.1.1	ลักษณะพื้นผิวหน้าเมมเบรนและสัณฐานวิทยา .....	59
4.1.2	ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคของตะกอนจุลินทรีย์ .....	64
4.1.3	องค์ประกอบโมเลกุลสารที่ก่อให้เกิดการอุดตันของเมมเบรน .....	65
4.2	ผลของช่วงเวลากการเติม-หยุดเติมอากาศ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส .....	67
4.2.1	สภาวะการเดินระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน .....	67
4.2.1.1	พีเอช (pH).....	68
4.2.1.2	ออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen; DO).....	69
4.2.1.3	อุณหภูมิ (Temperature).....	71
4.2.1.4	เอ็มแอลเอสเอส (Mix Liquor Suspended Solids, MLSS) .....	72
4.2.2	การบำบัดน้ำเสียของระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน .....	73
4.2.2.1	ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน .....	74
4.2.2.2	ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจน .....	77
4.2.2.3	ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส .....	83
4.3	ผลคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน สำหรับการนำไปใช้ในงานภูมิทัศน์.....	86
4.4	ผลการประเมินต้นทุนการใช้พลังงานในการเดินระบบ.....	88
บทที่ 5	บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....	93
5.1	บทสรุป .....	93
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	96
	รายการอ้างอิง.....	97
	ภาคผนวก ก มาตรฐานน้ำทิ้งที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ ชีวภาพเมมเบรน.....	106
	ภาคผนวก ข ข้อมูลการอุดตันของเมมเบรน.....	109

ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ.....	114
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	125



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 การจำแนกชนิดของเมมเบรน.....	30
ตารางที่ 2 การนำน้ำกลับมาใช้สำหรับกิจกรรมต่างๆ.....	39
ตารางที่ 3 สัดส่วนระยะเวลาการเติม-หยุดเติมอากาศ.....	54
ตารางที่ 4 พารามิเตอร์และวิธีการตรวจวิเคราะห์.....	55
ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน.....	76
ตารางที่ 6 การบำบัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน....	79
ตารางที่ 7 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน.....	85
ตารางที่ 8 คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน.....	87
ตารางที่ 9 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเดินระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน...	89
ตารางที่ 10 ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดและอัตราค่าบริการการใช้น้ำประปา.....	89
ตารางที่ 11 ผลการเปรียบเทียบอัตราค่าใช้จ่ายพลังงานต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ที่เคเอ็น และฟอสฟอรัส.....	92

## สารบัญรูป

รูปที่ 1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน.....	10
รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของก๊าซบริเวณชั้นผิวของเหลว.....	24
รูปที่ 3 รูปแบบการจัดวางหัวฟุ้งกระจายอากาศ.....	27
รูปที่ 4 หลักการทำงานของกระบวนการเมมเบรน.....	29
รูปที่ 5 ทิศทางการเคลื่อนที่ของสารในกระบวนการเมมเบรน.....	29
รูปที่ 6 แสดงการจำแนกชนิดและอนุภาคการกรองของเมมเบรน.....	32
รูปที่ 7 โครงสร้างและโมดูลเมมเบรนแบบแผ่น.....	33
รูปที่ 8 โมดูลแบบท่อ (Tubular Module).....	34
รูปที่ 9 โมดูลแบบม้วน (Spiral Wound Module).....	35
รูปที่ 10 โมดูลแบบใยกลวง (Hollow fiber Module).....	35
รูปที่ 11 ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน.....	44
รูปที่ 12 แบบจำลองถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน.....	45
รูปที่ 13 ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน (Microfiltration Membrane ; MF).....	46
รูปที่ 14 ปั่นน้ำแบบอัตโนมัติ.....	47
รูปที่ 15 เครื่องเติมอากาศ.....	48
รูปที่ 16 หัวฟุ้งกระจายอากาศ (Tube Diffuser).....	48
รูปที่ 17 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างน้ำเสียสำหรับการวิเคราะห์.....	56
รูปที่ 18 ไบโอฟิล์มที่ปกคลุมบริเวณผิวหน้าเมมเบรน.....	60
รูปที่ 19 ลักษณะรูปทรงจุลินทรีย์.....	61
รูปที่ 20 การหลุดตันจากตะกอนจุลินทรีย์ภายในรูพรุนของเมมเบรน.....	62
รูปที่ 21 ก,ข ลักษณะตะกอนจุลินทรีย์ ค,ง จุลชีพที่พบในส่วนเติมอากาศ ของถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ เมมเบรนแบบคลองวนเวียน จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์.....	63

รูปที่ 22 ขนาดอนุภาคของตะกอนแขวนลอยในส่วนเดิมอากาศของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน .....	65
รูปที่ 23 กราฟอินฟราเรดสเปกตรัมของโครงสร้างโมเลกุลของสารที่ก่อให้เกิดการอุดตันของเมมเบรน ..	66
รูปที่ 24 ค่าพีเอชของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน .....	69
รูปที่ 25 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน .....	71
รูปที่ 26 อุณหภูมิของถังปฏิกรณ์ชีวภาพในขณะที่เดินระบบการทดลอง.....	72
รูปที่ 27 ปริมาณเอ็มแอลเอสเอสในส่วนเดิมอากาศของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน ...	73
รูปที่ 28 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน (ซีไอดี) .....	74
รูปที่ 29 ร้อยละการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน .....	76
รูปที่ 30 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น .....	78
รูปที่ 31 ร้อยละการบำบัดไนโตรเจน (ทีเคเอ็น).....	79
รูปที่ 32 ปริมาณและประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพ .....	80
รูปที่ 33 ประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็นและแอมโมเนีย.....	81
รูปที่ 34 ปริมาณไนโตรทและไนเตรทของน้ำออกจากระบบบำบัดถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน แบบคลองวนเวียน .....	82
รูปที่ 35 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส .....	84
รูปที่ 36 ร้อยละการบำบัดฟอสฟอรัส .....	85

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเสียอาคารเกิดจากการใช้น้ำของผู้อยู่อาศัยหรือทำกิจกรรมภายในอาคารนั้นๆ ซึ่งน้ำที่ผ่านการใช้แล้วจะมีคุณลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทำให้ไม่สามารถนำกลับไปใช้ในกิจกรรมเดิมได้ จนกว่าจะผ่านกระบวนการบำบัดหรือนำไปใช้ในกิจกรรมอื่นๆ โดยองค์ประกอบของน้ำเสียจากอาคาร มักจะปนเปื้อนจากสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ ไขมัน สารซักฟอก ธาตุอาหาร และจุลินทรีย์ เมื่อปล่อยลงสู่ท่อระบายน้ำสาธารณะหรือแหล่งน้ำโดยไม่ผ่านการบำบัดเพื่อกำจัดสารที่ปนเปื้อนมา กับน้ำทิ้ง ก็จะเป็นเหตุให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ ซึ่งเมื่อได้รับการบำบัดอย่างถูกวิธีจะทำให้ปริมาณ ความเข้มข้นของมลสารลดลง จนกระทั่งมีคุณลักษณะที่เหมาะสมต่อการระบายน้ำทิ้งหรือสามารถ นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ ต่อไป

การบำบัดน้ำเสียจากอาคารโดยระบบคลองวนเวียน (Oxidation-Ditch) เป็นรูปแบบหนึ่งของระบบบำบัดน้ำแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ หรือ เอเอส (Activated Sludge) ที่นำมาประยุกต์ใช้ สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากอาคาร ซึ่งเหมาะสำหรับการนำมาปรับใช้กับน้ำเสียที่มีปริมาณธาตุอาหาร ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูง เนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารได้ดี อย่างไรก็ตาม ระบบเอเอสยังคงพบปัญหาเรื่องตะกอนไม่จมตัว ที่มีสาเหตุจากแบคทีเรียเส้นใย (Bulking Sludge) ทำให้มีการนำเทคโนโลยีการกรองมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการบำบัดน้ำเสียเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวและ ทดแทนขั้นตอนการตกตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีคุณสมบัติในการคัดกรองจุลินทรีย์ ขนาดเล็ก เช่น แบคทีเรียและเชื้อโรคต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำได้ รวมถึงกักเก็บจุลินทรีย์ที่จำเป็นต่อ การกำจัดมลสารในน้ำเสียให้อยู่ภายในระบบไม่สูญหายไปกับน้ำที่ผ่านการบำบัด อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการใช้กระบวนการเมมเบรนนั้นจะมีข้อดีในเรื่องประสิทธิภาพการกรอง แต่เมื่อพิจารณาต้นทุน ค่าเมมเบรนยังคงมีราคาค่อนข้างสูงจึงทำให้นิยมประยุกต์ใช้เมมเบรนสำหรับการบำบัดน้ำเสียสำหรับ การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่



การเติมอากาศ (Aeration) เป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน พบว่าประมาณร้อยละ 60-80 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการเดินระบบเป็นค่าใช้จ่ายการเติมอากาศ (Guo, Fu et al., 2013) โดยการควบคุมการทำงานของระบบการเติมอากาศที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายของจุลินทรีย์รวมถึงช่วยให้ประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบได้ ประเด็นสำคัญของการบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนร่วมกับกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนส่วนหนึ่งคือ การเติมอากาศแบบเป็นช่วงๆ นอกจากช่วยควบคุมปริมาณออกซิเจนแล้วยังมีส่วนช่วยสนับสนุนสภาวะกลไกการทำงานภายในเซลล์จุลินทรีย์ รวมถึงป้องกันการอุดตันของเมมเบรนที่สามารถทำได้โดยติดตั้งระบบเติมฟองอากาศ (Diffuser systems) ไว้ที่บริเวณด้านล่างของเมมเบรน โดยอาศัยความปั่นป่วนจากฟองอากาศช่วยการกำจัดสิ่งอุดตันบนพื้นที่ผิวหน้าของเมมเบรนได้อีกด้วย

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาอัตราส่วนของช่วงเวลาการเติม-หยุดเติมอากาศที่เหมาะสมต่อการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน ธาตุอาหารไนโตรเจน และฟอสฟอรัส จากน้ำเสียของอาคาร โดยใช้ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน (Oxidation-Ditch Membrane Bioreactor, (OD-MBR)) เพื่อใช้เป็นแนวทางการศึกษาคุณภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัดและความเป็นไปได้ในการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ รวมถึงการประเมินต้นทุนค่าพลังงานในการเดินระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการตัดสินใจเลือกใช้ถึงปฏิกรณ์เมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียจากอาคารหรือเป็นเกณฑ์พิจารณาเรื่องการเดินทางที่มีความเหมาะสมเชิงพาณิชย์ในอนาคตต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาช่วงเวลาการเติม-หยุดเติมอากาศที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน ธาตุอาหารไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของน้ำเสียจากอาคาร

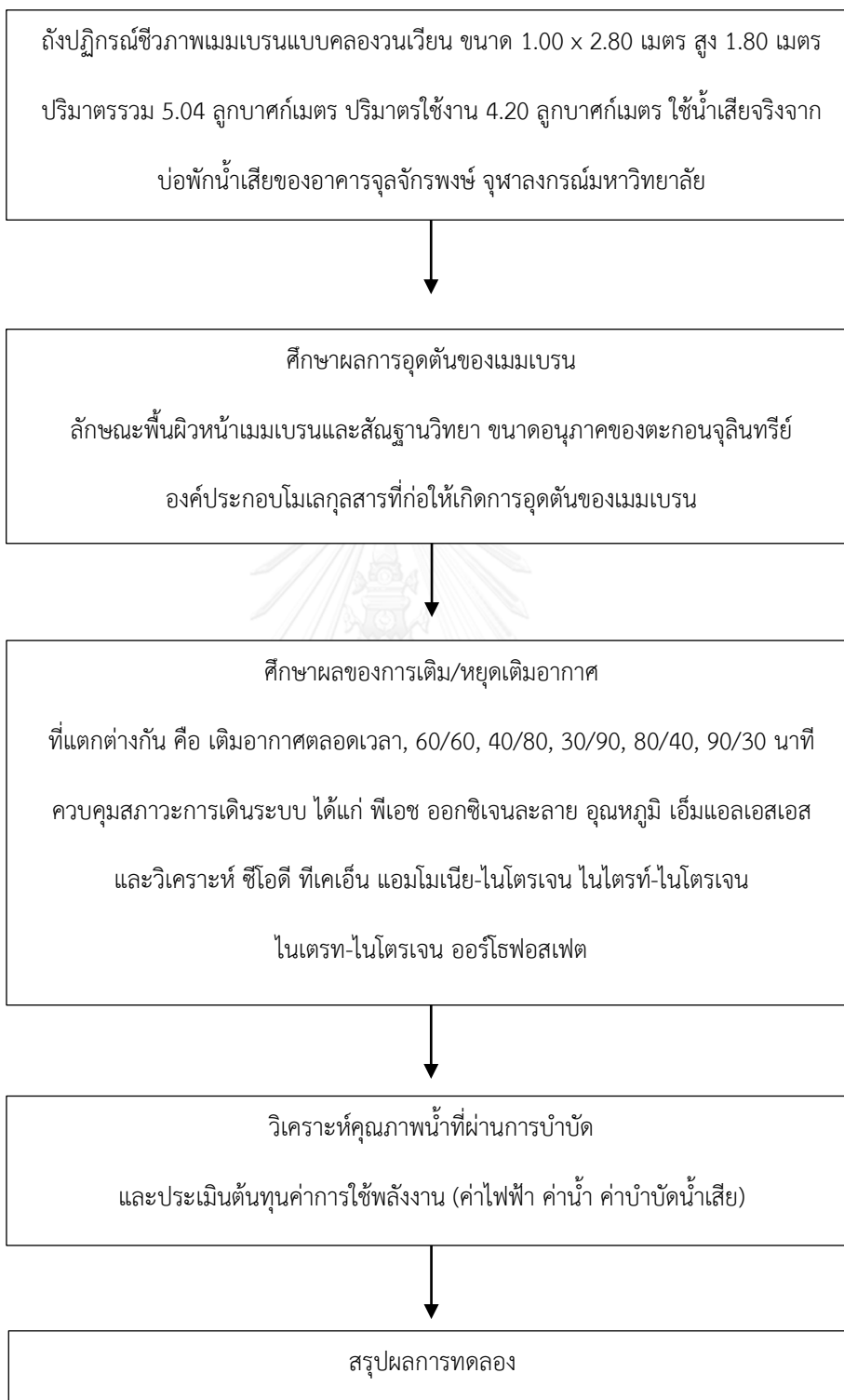
1.2.2 ศึกษาคุณภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการเมมเบรนในการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่สำหรับงานภูมิทัศน์

1.2.3 ศึกษาช่วงเวลาการเติม-หยุดเติมอากาศ ที่เหมาะสมเพื่อลดต้นทุนค่าพลังงานในการเดินระบบ

## 1.3 สมมติฐานการวิจัย

การเติม-หยุดเติมอากาศในระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสที่มาจากน้ำทิ้งของอาคารได้ โดยการกำหนดช่วงเวลาการเติม-หยุดเติมอากาศที่เหมาะสมจะส่งผลให้เกิดสถานะแอน็อกซิก (Anoxic) ปฏิกริยาไนตริฟิเคชัน-ดีไนตริฟิเคชันและปฏิกริยากำจัดฟอสฟอรัส ในส่วนเติมอากาศของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน จึงทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์นี้มีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่สำหรับงานภูมิทัศน์ได้

#### 1.4 กรอบแนวความคิด



## 1.5 ขอบเขตงานวิจัย

1.5.1 การวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดลองโดยระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียนที่ติดตั้ง ณ บริเวณโรงอาหารของอาคารจุลจักรพงษ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และใช้น้ำเสียจริงจากบ่อกักน้ำของอาคาร ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มาจากห้องน้ำและอ่างล้างมือ เตินระบบที่สภาวะแวดล้อมจริง และวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย ณ ห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ชั้น 17 อาคารมหามกุฏ คณะวิทยาศาสตร์

1.5.2 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้สำหรับการวิจัยระดับการทดลอง (Pilot-Scale) มีปริมาตรรวมของถังเท่ากับ 5.04 ลูกบาศก์เมตร ปริมาตรใช้งาน 4.20 ลูกบาศก์เมตร

1.5.3 ไม่มีการเวียนตะกอนกลับมายังส่วนไร้อากาศ

1.5.4 ทิ้งตะกอนส่วนเกินทุกวัน

1.5.5 ศึกษาการอุดตันของเมมเบรน

1.5.6 ศึกษาสัดส่วนที่แตกต่างกันของรอบการเติม-หยุดเติมอากาศ ได้แก่ เติมอากาศตลอดเวลา, 60/60, 40/80, 30/90, 80/40, 90/30 นาที

1.5.7 วิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้ง ประเมินต้นทุนค่าใช้พลังงานไฟฟ้าและปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดได้

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เพื่อทราบช่วงเวลาการเติมอากาศที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอนธาตุอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัสของน้ำเสียจากอาคาร

1.6.2 ทราบคุณภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัดและความเหมาะสมในการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่สำหรับงานภูมิทัศน์

1.6.3 สามารถลดต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียได้

## บทที่ 2

### วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 น้ำเสียอาคาร

สาเหตุทำให้เกิดน้ำเสีย ส่วนใหญ่มาจากการชำระล้างทำความสะอาดสิ่งต่างๆ การประกอบอาหาร ห้องน้ำ ชักโครก อ่างล้างมือ เป็นต้น โดยค่านิยมความของคำว่า “อาคาร” สามารถสรุปความหมายโดยย่อตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 หมายถึง ตึก บ้าน เรือน โรง ร้าน แพ คลังสินค้า สำนักงาน และสิ่งที่สร้างขึ้นอย่างอื่นเพื่อใช้เป็นที่ชุมนุมประชาชน พักอาศัย หรือเพื่อกิจกรรมอื่นๆ เป็นต้น และได้ให้นิยามความหมายของ คำว่า “อาคารสูง” หมายถึง อาคารที่บุคคลอาจเข้าอยู่หรือเข้าใช้สอยได้ที่มีความสูงตั้งแต่ 23 เมตรขึ้นไป การวัดความสูงของอาคารให้วัดจากระดับพื้นดินที่ก่อสร้างถึงพื้นดาดฟ้า สำหรับอาคารทรงจั่วหรือปั้นหยาให้วัดจากระดับพื้นดินที่ก่อสร้างถึงยอดผนังของชั้นสูงสุด (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2522)

การใช้น้ำเพื่ออุปโภค และบริโภค จากอาคารเหล่านี้จะกลายเป็นน้ำเสีย ซึ่งมีคุณลักษณะที่ไม่พึงประสงค์และมีการปนเปื้อนของสารซักฟอกหรือสารที่ทำให้เกิดฟอง น้ำยาทำความสะอาด สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และธาตุอาหาร เป็นต้น จากนั้นจะถูกปล่อยทิ้งลงสู่ที่ระบายน้ำของเมืองต่อไปและก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำตามมา

### 2.1.1 แหล่งกำเนิดและลักษณะน้ำเสียอาคาร

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ประชากรในชนบทจำนวนมากอพยพเข้ามาประกอบอาชีพตามเมืองใหญ่ที่เป็นศูนย์กลางของภูมิภาคหรือเมืองหลวงของประเทศ ดังนั้น เมื่อประชากรมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นและภายใต้เงื่อนไขของพื้นที่ที่มีอย่างจำกัด จึงเป็นการกระตุ้นให้เกิดการสร้างที่พักอาศัยแบบอาคารสูง รวมถึงพื้นที่พักผ่อนใจและนันทนาการอื่นๆ แหล่งที่มาของน้ำเสียจากอาคารเหล่านี้ ได้แก่ ห้องอาหาร ห้องจัดเลี้ยงสังสรรค์ บริเวณซักล้างทำความสะอาด ห้องน้ำ และห้องสุขา

ลักษณะของน้ำเสียอาคาร โดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายกับน้ำเสียชุมชน มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ ที่มีส่วนประกอบของโปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เป็นต้น และสารอนินทรีย์ สารซักฟอก ธาตุอาหาร จุลินทรีย์ โดยสามารถจำแนกได้ 3 ลักษณะ ดังนี้ คือ ลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ (Physical Characteristics) ลักษณะน้ำเสียทางเคมี (Chemical Characteristics of Wastewater) และลักษณะน้ำเสียทางชีวภาพ (Biological Characteristics of Wastewater) ซึ่งทั้ง 3 ลักษณะนี้สามารถใช้เป็นเกณฑ์พื้นฐานในการเลือกวิธีการบำบัดน้ำเสียได้อีกด้วย

### 2.1.2 การบำบัดน้ำเสียจากอาคาร

การบำบัดน้ำเสีย เป็นกระบวนการปรับปรุงน้ำเสียให้มีคุณภาพดีขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2548b) โดยขั้นตอนการบำบัดเริ่มต้นจากการคัดแยกเอาสิ่งเจือปนออกจากน้ำเสีย ได้แก่ ของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ น้ำมัน ไขมัน และตะกอนออกจากน้ำเสียด้วยวิธีการทางกายภาพ (Physical Treatment) จากนั้นกำจัดสารละลาย ตะกอนขนาดเล็ก โลหะหนัก สารประกอบอินทรีย์ละลายน้ำ โดยอาศัยหลักการทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปนซึ่งเป็นการบำบัดด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical Treatment) และใช้จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสในน้ำเสียด้วยวิธีการทางชีวภาพ (Biological Treatment)

อย่างไรก็ตาม การบำบัดน้ำเสียจากอาคารสามารถลดขั้นตอนวิธีการบำบัดทางเคมีได้ โดยเริ่มจากกระบวนการบำบัดทางกายภาพก่อนและเข้าสู่กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ เนื่องจากน้ำเสียจากอาคารส่วนใหญ่มีสิ่งเจือปนเป็นสารอินทรีย์และมีสารเคมีหรือโลหะหนักที่มีความเป็นพิษน้อย เมื่อเทียบกับน้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ เช่น การเกษตรกรรม โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น หรือถ้าหากมีการบำบัดทางเคมี โดยทั่วไปนิยมใช้เพื่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง และฆ่าเชื้อโรคจากน้ำที่ผ่านการบำบัดก่อนนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ ต่อไป โดยน้ำเสียจากอาคารสามารถแยกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. น้ำซักล้าง (Grey water) เป็นน้ำเสียที่ผ่านการใช้จากอ่างล้างมือ ฝักบัวอาบน้ำ เครื่องซักผ้า และน้ำจากห้องครัว เป็นต้น
2. น้ำจากชักโครก (Black water) เป็นน้ำเสียที่ประกอบด้วยอุจจาระ ปัสสาวะ

ปัจจุบัน น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเป็นไปตามแนวทางของเทคโนโลยีสะอาด โดยคำนึงถึงประโยชน์สูงสุดของทรัพยากรน้ำ ความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ และสุขลักษณะของผู้ใช้ ดังนั้นในการคัดเลือกระบบบำบัดที่เหมาะสมต้องทราบแหล่งที่มา คุณสมบัติของน้ำเสีย สิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย ระดับของคุณภาพของน้ำเสียที่ต้องการบำบัด วัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ ต้นทุนการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ ราคาต้นทุนที่ดินและสภาพทั่วไปของพื้นที่นั้นๆ โดยระบบบำบัดทางชีวภาพที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอาคาร คือ ระบบเอเอส (Activated Sludge) เนื่องจากลักษณะน้ำเสียจากอาคารมีความคล้ายคลึงกับน้ำเสียที่มาจากชุมชน ซึ่งมีส่วนประกอบเป็นสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และธาตุอาหาร เป็นต้น

## 2.2 การบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน (Oxidation-Ditch)

คลองวนเวียนเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบเอเอส ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนการไหลของน้ำในระบบเพื่อเพิ่มระยะเวลาให้ตะกอนจุลินทรีย์อยู่ในระบบได้นานขึ้น (U.S. Environmental Protection Agency, 2000) โดยส่วนใหญ่นิยมนำมาปรับใช้สำหรับการบำบัดไนโตรเจนในน้ำเสีย การเดินระบบแบบคลองวนเวียนนี้จำเป็นต้องควบคุมปัจจัยทางกายภาพ และสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ปริมาณการเติมอากาศ อุณหภูมิ พีเอช เพื่อให้เหมาะสมต่อการเพิ่มจำนวนและทำงานของจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบคลองวนเวียนมีข้อดี คือ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์เดียวกันได้ ดังนั้นน้ำที่ออกจากระบบจะมีปริมาณธาตุอาหารคงเหลือค่อนข้างต่ำ (สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์, 2551) ระบบนี้ต้องมีการควบคุมปริมาณจุลินทรีย์ในระบบ คือ ค่าเอ็มแอลเอสเอส ให้เหมาะสมเพื่อให้การบำบัดน้ำมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยกลไกการทำงานของจุลินทรีย์สามารถแสดงในสมการปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ดังนี้ (พัฒน์พงษ์ ดิชะรา, 2552)

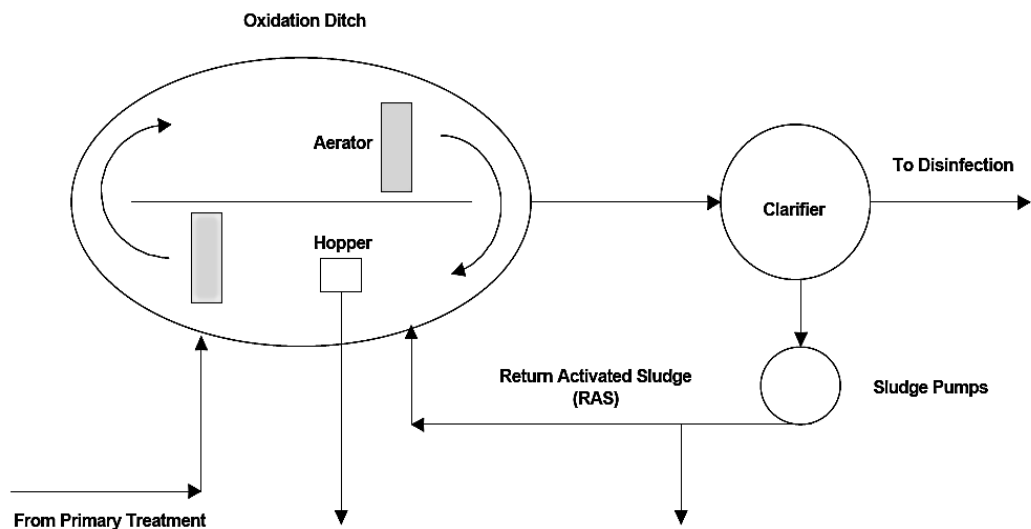


### 2.2.1 หลักการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน

การบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน หลักการทำงานของระบบมีความคล้ายคลึงกับระบบบำบัดน้ำแบบเอเอสแบบกระบวนการเติมอากาศยืดเวลา น้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์จะไหลเวียนไปตามแนวรูปแบบของถังเติมอากาศ (Plug Flow) มีลักษณะเป็นวงกลมหรือวงรีที่มีระดับน้ำสูง 1.2 - 1.5 เมตร แรงผลักดันมาจากเครื่องเติมอากาศที่ติดตั้งในทิศทางแนวนอน เมื่อน้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ไหลผ่านเครื่องเติมอากาศความเข้มข้นของออกซิเจนจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นและค่อย ๆ ลดลงตามระยะทางของการไหลจนออกซิเจนมีค่าเป็นศูนย์ จนในที่สุดเกิดเป็นสภาวะแอนน็อกซิก (Anoxic) ซึ่งเป็นสภาวะที่ออกซิเจนจำกัดหรือมีอยู่น้อยมาก ซึ่งทำให้ระบบนี้จำเป็นต้องมีการควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายเท่ากับ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าหากมากเกินไป



อาจจะไม่ทำให้เกิดสถานะแอนน็อกซิก การกวนผสมและอัตราการไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์มีความเร็วประมาณ 0.25-0.35 เมตรต่อวินาที ซึ่งเพียงพอสำหรับให้ตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ในน้ำได้ตลอดเวลา โดยมีระยะเวลาที่กักน้ำเสียประมาณ 24 ชั่วโมงหรือมากกว่า แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน

ที่มา: U.S. Environmental Protection Agency (2000)

## 2.2.2 ส่วนประกอบของระบบ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ ได้แก่

### 2.2.2.1. ถังเติมอากาศแบบคลองวนเวียน (Aeration Tank)

เป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุด เนื่องจากเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบใช้อากาศ ออกซิเจนในถังเติมอากาศทำให้เกิดปฏิกิริยาชีวเคมี จุลินทรีย์ที่มีบทบาทในการย่อยสลายจะย่อยสารอินทรีย์ในน้ำเสีย (Heterotrophic Microorganisms) ทำให้น้ำเสียที่ออกไปมีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงถึงร้อยละ 90-95 จำนวนเครื่องเติมอากาศและปริมาณอากาศที่เติมเข้าสู่ถังเติมอากาศขึ้นอยู่กับขนาดของถังเติมอากาศ อัตราการระบรทุก และมวลจุลินทรีย์

### 2.2.2.2. ถังตกตะกอน (Sedimentation Tank)

หน้าที่ของถังตกตะกอน คือ แยกมวลชีวภาพหรือตะกอนจุลินทรีย์ (สลัดจ์) ออกจากน้ำเสียที่ถูกย่อยสลายแล้วจากถังเติมอากาศ และรวมตะกอนจุลินทรีย์ให้มีความเข้มข้นสูงก่อนสูบเวียนกลับเข้าสู่ถังเติมอากาศอีกครั้ง แต่ในกระบวนการนี้มักพบปัญหาตะกอนไม่จมตัว (Bulking Sludge) และการเกิดตะกอนลอย (Rising Sludge) ความเร็วและกระแสนวนวนของน้ำที่ไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนของถังตกตะกอนลดลง การออกแบบระบบถังตกตะกอนของคลองวนเวียน อัตราน้ำล้นของระบบควรมีอัตราการไหลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 8-16 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อวัน อัตราการระของแข็งควรมีอัตราการไหลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1-5 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง

### 2.2.3 จุลินทรีย์ในระบบ

จุลินทรีย์ที่มีความสำคัญในระบบคลองวนเวียนเป็นจุลินทรีย์ที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกันกับจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส ได้แก่ แบคทีเรีย เชื้อรา โปรโตซัว และโรติเฟอร์ โดยชนิดและสายพันธุ์ของจุลินทรีย์ส่วนหนึ่งถูกกำหนดโดยประเภทของสารอาหารที่เข้าสู่ระบบ อีกส่วนหนึ่งเกิดจากสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิต การเจริญเติบโต เมทาบอลิซึมและปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์

ระบบบำบัดน้ำทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนไม่ต้องการให้ราเกิดขึ้น เนื่องจาก ความเป็นสาเหตุทำให้ตะกอนลอยและไม่จมตัว ปริมาณมวลจุลินทรีย์สัมพันธ์กับอาหารที่เข้าสู่ระบบ สัดส่วนอาหารต่อมวลจุลินทรีย์ (F/M ratio) ที่เหมาะสมจะให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพน้ำทิ้งที่ดี จุลินทรีย์ที่พบในระบบคลองวนเวียนเป็นกลุ่มที่มีลักษณะแขวนลอย (Suspension) กระจายทั่วไปในถังเติมอากาศและถังตกตะกอน ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. จุลินทรีย์ที่สร้างฟล็อก (Floc Forming Organism) เป็นจุลินทรีย์ที่สามารถจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน กระบวนการสร้างฟล็อกนี้เรียกว่า ไบโอฟล็อกคูเลชัน (Bio-flocculation)
2. จุลินทรีย์แซฟโพรไฟท์ (Saprophytes) เป็นจุลินทรีย์ที่มีหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ โดยสามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิดคือ
  - แซฟโพรไฟท์แบบปฐมภูมิ (Primary) ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอาหารโมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็กลง
  - แซฟโพรไฟท์แบบทุติยภูมิ (Secondary) ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ต่อจากแซฟโพรไฟท์แบบปฐมภูมิจนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ
3. จุลินทรีย์ทำลาย (Predator) คือ โปรโตซัว ทำหน้าที่กินแบคทีเรียส่วนเกินในระบบเป็นอาหาร เป็นการควบคุมปริมาณแบคทีเรียในระบบและช่วยให้น้ำทิ้งที่ปล่อยออกมาจากระบบมีความใสมากขึ้น
4. จุลินทรีย์ก่อกวน (Nuisance Organism) ทำหน้าที่ก่อกวนการทำงานของระบบ ได้แก่ แบคทีเรียเส้นใย (Filamentous Organism) และเชื้อรา ส่งผลกระทบต่อการตกตะกอนทำให้ตะกอนไม่จมตัว (เทียนนลิน ร่มสกุล, 2555)

## 2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงาน

### 2.2.4.1 อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ที่เป็นอาหารของมวลจุลินทรีย์ต้องมีปริมาณที่พอเหมาะกับความจุลินทรีย์ในระบบ ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะบริเวณถังเติมอากาศเพื่อหาอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (Food to Microorganism Ratio : F/M) การควบคุมสารอินทรีย์สามารถทำได้โดยการรักษาอัตราส่วนของน้ำหนักบีโอดีที่เข้าระบบต่อน้ำหนักของตะกอนจุลินทรีย์ หากการระบรทุกสารอินทรีย์มีปริมาณมากจะส่งผลกระทบต่อระบบทำให้ การผลิตมวลชีวภาพมีค่าสูงขึ้น จุลินทรีย์จะเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว และมีการเจริญเติบโตแบบกระจายกระจายทำให้การรวมกลุ่มเป็นฟล็อก (Floc) ได้น้อยลง ที่เป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนลดต่ำลง

### 2.2.4.2 ความต้องการออกซิเจน

ออกซิเจนเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับกลุ่มจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน ดังนั้น ภายในถังเติมอากาศ ควรควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำให้มีค่าเท่ากับ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร สารอินทรีย์จะถูกกำจัดในระบบส่วนหนึ่งและถูกออกซิไดซ์โดยจุลินทรีย์ในกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานให้แก่เซลล์ อีกส่วนหนึ่งได้ผลิตก๊าซเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) การละลายของออกซิเจนในน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้อัตราเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ในระบบเพิ่มขึ้น การใช้ออกซิเจนก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

### 2.2.4.3 ธาตุอาหาร

จุลินทรีย์ใช้ในโตรเจน ฟอสฟอรัส และเหล็ก เป็นธาตุอาหารหลักสำหรับการสังเคราะห์เซลล์ใหม่ สารประกอบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมไนโตรเจน ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ) สารประกอบฟอสฟอรัสในรูปออร์โธฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) เป็นรูปที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ทันที หากธาตุอาหารเหล่านี้มีปริมาณน้อยหรือขาดจะมีผลกระทบต่อกรสร้างฟล็อก (วีรานูช หลาง, 2551) นอกจากนี้แล้วเมื่ออายุตะกอนเพิ่มขึ้นความต้องการธาตุอาหารของจุลินทรีย์ในระบบก็น้อยลงตามไปด้วย

#### 2.2.4.4 ระยะเวลาการบำบัด

ระบบบำบัดที่มีระยะเวลาการบำบัดที่เหมาะสมจะช่วยให้จุลินทรีย์ในระบบย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระยะเวลาการบำบัดมีความสัมพันธ์กับอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ที่ต่างกัน หากระยะเวลาการบำบัดสั้นเกินไปจะทำให้น้ำทิ้งมีค่าบีโอดีคงเหลือมาก หรือถ้าหากระยะเวลาการบำบัดนานเกินไปก็อาจจะทำให้จุลินทรีย์ตาย เนื่องจากมีปริมาณสารอาหารไม่เพียงพอ และทำให้สิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ

#### 2.2.4.5 พีเอช

พีเอชในน้ำเป็นค่าที่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้รวดเร็วและประเมินคุณภาพน้ำคร่าวๆ โดยไม่ต้องนำน้ำตัวอย่างเข้าห้องปฏิบัติการ เมื่อพีเอชในน้ำเปลี่ยนจะทำให้การทำงานของเอนไซม์ของเซลล์จุลินทรีย์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย พีเอชที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์สำหรับการเจริญเติบโตและย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียอยู่ในช่วง 6.5-8.5 ถ้าในปฏิกิริยามีพีเอชต่ำจะมีผลทำให้เชื้อรา (Fungi) เจริญเติบโตได้ดีกว่าแบคทีเรียและเกิดปัญหาตะกอนเบาไม่จมตัว ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสลดต่ำลง ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยเติมสารเคมีที่มีสภาพเป็นด่างลงไปจนถึงปฏิกิริยาเพื่อปรับสภาพความเป็นกรดของน้ำให้กลายเป็นกลางหรือด่างอ่อน เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) และแคลเซียม ออกไซด์ (CaO) เป็นต้น

#### 2.2.4.6 สารพิษ

สารพิษที่เจือปนอยู่ในน้ำทิ้งส่วนมากมีแหล่งกำเนิดมาจากโรงงานอุตสาหกรรม มีทั้งที่เป็นพิษและไม่เป็นพิษ ขึ้นอยู่กับปริมาณที่เข้าสู่ระบบ เช่น โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) และสังกะสี (Zn) เป็นต้น หรือแม้แต่ไนโตรเจน (N) ที่เป็นประโยชน์ต่อจุลินทรีย์ สำหรับการสร้างเซลล์ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ พบว่าปริมาณมากเกินกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบและขัดขวางปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์ จนทำให้ระบบล้มเหลวในที่สุด

#### 2.2.4.7 อุณหภูมิ

เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาชีวเคมีภายในเซลล์จุลินทรีย์ โดยจำแนกชนิดของจุลินทรีย์ตามช่วงอุณหภูมิที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโต สามารถแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

- 1) ไสโครไฟล์ (Psychrophile) ช่วง 5 - 20 องศาเซลเซียส
- 2) มีโซไฟล์ (Mesophile) ช่วง 8-45 องศาเซลเซียส
- 3) เทอร์โมไฟล์ (Thermophile) ช่วง 40-70 องศาเซลเซียส
- 4) ไฮเปอร์เธอโมไฟล์ (Hyperthermophile) คือช่วง 65-110 องศาเซลเซียส

#### 2.2.4.8 การกวนผสม

การออกแบบระบบบำบัด วัตถุประสงค์ของการกวนผสม คือ เพื่อให้จุลินทรีย์และสารอาหารในน้ำเสียสัมผัสได้อย่างทั่วถึงเป็นเนื้อเดียวกัน ป้องกันการตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์และให้ฟล็อกที่มีขนาดเล็กกระจายสามารถอยู่รวมตัวกันเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ การกวนผสมที่ดีนั้นปริมาณความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยในระบบ และการถ่ายเทออกซิเจนและออกซิเจนละลายในถังเติมอากาศจะต้องมีความสม่ำเสมอกันทั่วทั้งถัง การกวนผสมแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. การกวนผสมแบบไหลตามกัน (Plug Flow)
2. การกวนผสมสมบูรณ์ (Completely Mixing)

#### 2.2.4.9 อัตราการไหลของน้ำเสีย

การไหลของน้ำที่เหมาะสม จะทำให้ระบบทำงานและปฏิกิริยาชีวเคมีของจุลินทรีย์ในระบบดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะต้องควบคุมอัตราการไหลเข้า-ออกของน้ำในระบบให้สมดุลกัน เพื่อการควบคุมปัจจัยต่างๆ เช่น ระยะเวลาที่กักน้ำ อัตราการเติมอากาศ และปริมาณการเวียนตะกอน เป็นต้น

## 2.3 การบำบัดธาตุอาหารด้วยวิธีทางชีวภาพ

เป็นกระบวนการที่ใช้จุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียมาช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย โดยจุลินทรีย์เหล่านี้จะใช้สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียเป็นแหล่งอาหารสำหรับการดำรงชีพและการเจริญเติบโต จุลินทรีย์เหล่านี้ต้องไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องมลภาวะเป็นพิษและก่อให้เกิดโรคธาตุอาหารที่นิยมบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส วิธีการบำบัดธาตุอาหารสามารถจำแนกชนิดของกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพได้ 3 กลุ่ม คือ

### 1. กระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศ หรือ แอโรบิก (Aerobic Process)

เป็นการบำบัดที่ต้องมีการเติมออกซิเจนหรืออากาศให้แก่ระบบ เพื่อช่วยให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลาย เพิ่มจำนวน และการเจริญเติบโตของกลุ่มจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศ

### 2. กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ หรือ แอนแอโรบิก (Anaerobic Process)

เป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งการบำบัดด้วยวิธีนี้นิยมใช้กับน้ำเสียที่มีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูง เช่น น้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกร น้ำเสียจากโรงงานผลิตอาหารทะเล และโรงงานผลิตแปงมันสำปะหลัง เป็นต้น จุลินทรีย์ในระบบนี้เป็นแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ก๊าซมีเทน

### 3. กระบวนการแอนอกซิก (Anoxic Process)

เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่จำเป็นต้องให้เกิดสภาวะที่ออกซิเจนละลายต่ำมากและเป็นกระบวนการที่ผสมผสานระหว่างการใช้อากาศสลับกับไม่ใช้อากาศ ซึ่งกระบวนการแอน็อกซิกมีวัตถุประสงค์สำหรับการบำบัดธาตุอาหารไนโตรเจนในน้ำเสียเป็นหลัก โดยใช้หลักการของปฏิกิริยานิไตรฟิเคชัน และดีไนไตรฟิเคชัน เพื่อเปลี่ยนไนโตรเจนที่อยู่ในรูปแอมโมเนีย-ไนโตรเจนให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน

### 2.3.1 การบำบัดไนโตรเจนทางชีวภาพ

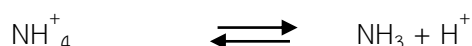
น้ำเสียจากอาคารส่วนใหญ่มีไนโตรเจนเจือปนอยู่ ซึ่งมาจากการขับถ่ายของเสียจากร่างกายของมนุษย์ (ปัสสาวะ) ซึ่งในน้ำเสียที่ถูกปล่อยทิ้งนี้จะประกอบด้วยไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนเตรท และสารละลายอินทรีย์ไนโตรเจน กระบวนการทางชีวภาพในการบำบัดไนโตรเจน คือ ปฏิกริยาไนตริฟิเคชันและปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชัน (U.S. Environmental Protection Agency, 2007) ในสภาวะแอโรบิก จุลินทรีย์จะใช้ออกซิเจนมาออกซิไดซ์สารอินทรีย์คาร์บอนให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แต่สำหรับการย่อยสลายไนโตรเจนจะต้องอาศัยหลักการการบำบัดไนโตรเจนทางชีวภาพต้องอาศัยแบคทีเรีย 2 กลุ่มคือ

1. กลุ่มทำหน้าที่ออกซิไดซ์ไนโตรเจนให้อยู่ในรูปไนเตรท เช่น พวก *Nitrosomonas* เปลี่ยนแอมโมเนียให้กลายเป็นไนเตรท และพวก *Nitrobacter* เปลี่ยนไนเตรทให้กลายเป็นไนเตรท
2. กลุ่มที่ทำหน้าที่ลดรูปไนโตรเจนให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน เช่น พวก Facultative ได้แก่ *Achromobater*, *Aerobater*, *Alcaligenes*, *Bacillus* และ *Lactobacillus* เป็นต้น

#### 2.3.1.1 ปฏิกริยาแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification)

แอมโมนิฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่สารประกอบไนโตรเจนเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปของแอมโมเนียหรือแอมโมเนียมไอออน จากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์จะใช้แอมโมเนียที่ถูกเปลี่ยนรูปเป็นสารอินทรีย์นำไปใช้เพื่อเป็นพลังงานในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ใหม่ กระบวนการนี้สามารถเกิดได้ทั้งในสภาวะแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ

ในสภาวะปกติของระบบบำบัดน้ำเสียจะมีการเกิดปฏิกริยาแอมโมนิฟิเคชัน ดังนี้



เมื่อพีเอชในน้ำเพิ่มขึ้นแอมโมเนียมจะเปลี่ยนรูปไปเป็นแอมโมเนีย ซึ่งเป็นรูปแบบที่สามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ (ธงชัย พรณสวัสดิ์, 2544)



### 2.3.1.2 ปฏิกริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

ปฏิกริยาไนตริฟิเคชันอาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มไนตริฟายอิง (Nitrifying Bacteria) ปฏิกริยาไนตริฟิเคชันแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ที่ออกซิไดซ์  $\text{NH}_4^+$  ให้กลายเป็น  $\text{NO}_2^-$  มีขั้นตอนโดยย่อ ดังนี้ คือ

ขั้นตอนที่ 1 เป็นกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) ทางชีวภาพของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนให้เป็นไนไตรท์และไนเตรท ตามลำดับ ในสภาวะใช้ออกซิเจน โดยอาศัยแบคทีเรียกลุ่ม Ammonia-Oxidizing Bacteria หรือ AOB เช่น *Nitrosomonas*, *Nitrosospira* และ *Nitrosococcus* เป็นต้น

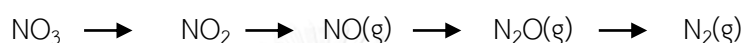
ขั้นตอนที่ 2 เป็นการเปลี่ยนไนไตรท์ไปเป็นไนเตรท เกิดจากกลุ่มแบคทีเรีย Nitrite – Oxidizing Bacteria หรือ NOB ได้แก่ *Nitrospira*, *Nitrobater* และ *Nitrococcus* เป็นต้น ปฏิกริยาไนตริฟิเคชันนี้จะมีการใช้ต่างของระบบและปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) ออกมามากทำให้ค่าพีเอชของน้ำลดลง เกิดการเสียดุลภายในระบบบำบัดและอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้ (Lin, Tay et al., 2009)

### 2.3.1.3 ปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

การเกิดปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการที่แบคทีเรียลดรูป (รีดิวซ์) ของไนเตรทไปเป็นไนไตรท์ จนได้เป็นไนตรัสออกไซด์และก๊าซไนโตรเจน ไนเตรทและไนไตรท์จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนในสภาวะออกซิเจนจำกัด (Anoxic) โดยแบคทีเรียที่มีบทบาทในปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชัน ได้แก่ *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Spirillum* และ *Moraxella* เป็นต้น ซึ่งปฏิกริยาการบำบัดไนเตรท สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1. วิธีการรีดิวซ์ไนเตรทแบบแอสสิมิเลชัน (Assimilatory Nitrate Reduction : ANR) เป็นกลไกที่เกิดจากจุลินทรีย์แบบใช้ในเตรทแทนแอมโมเนียในการสังเคราะห์โปรตีนเพื่อสร้างเซลล์ (เป็นโปรตีนหรือกรดนิวคลีอิก) รูปแบบนี้ไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนรูปโดยจุลินทรีย์ให้กลายเป็นแอมโมเนียม

2. วิธีการรีดิวซ์ไนเตรทแบบดิสสมิเลชัน (Dissimilatory Nitrate Reduction : DNR) หรือที่นิยมเรียกกันว่า ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) เป็นกระบวนการหายใจแบบไร้อากาศของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟและออโตโทรฟเช่นเดียวกันกับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน แต่มีข้อแตกต่างคือ ขั้นตอนของปฏิกิริยานี้จะอยู่ในสภาวะแอนน็อกซิก และแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟมีบทบาทหน้าที่มากกว่ากลุ่มออโตโทรฟ โดยการใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ไนเตรทจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นไนตรัสออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน ตามลำดับ (Shapleigh, 2009) ดังนี้



#### 2.3.1.4 ปฏิกิริยาเอสเอ็นดี (Simultaneous Nitrification and Denitrification)

เป็นปฏิกิริยาที่ผสมผสานปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันไว้ด้วยกันในกระบวนการเดียว เรียกสภาวะนี้ว่า ไชมอลทาเนียสไนตริฟิเคชัน-ดีไนตริฟิเคชัน (Simultaneous Nitrification and Denitrification) หรือ เอสเอ็นดี (SND) สามารถแบ่งลักษณะการเกิดปฏิกิริยาได้ 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาที่เกิดเนื่องจากลักษณะทางชีวภาพ และปฏิกิริยาที่เกิดจากลักษณะทางกายภาพของฟล็อก โดยฟล็อกในระบบที่มีขนาดใหญ่จะมีไนตริไฟอิงแบคทีเรียและดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียอยู่ในฟล็อกเดียวกัน โดยแบ่งแยกเป็น 2 ส่วน คือ บริเวณที่ออกซิเจนละลายสูง (Aerobic Zone) ไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะเป็นผู้ทำงานและส่วนที่ออกซิเจนเข้าไม่ถึงหรือมีความเข้มข้นออกซิเจนละลายต่ำ (Anaerobic Zone) ดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะเป็นผู้ทำงาน อัตราการเกิดปกติของปฏิกิริยาเอสเอ็นดีขึ้นอยู่กับปริมาณของสารอินทรีย์คาร์บอนและออกซิเจนที่ได้รับภายในก้อนฟล็อกเดียวกันนี้ บริเวณชั้นนอกมีปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนมากกว่าชั้นกลางและชั้นในจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและมีการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนให้กลายเป็นไนไตรท์และไนเตรท จากนั้นส่วนบริเวณตรงกลางและชั้นในของฟล็อกที่มีปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำก็จะเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเปลี่ยนไนไตรท์และไนเตรทให้กลายเป็นก๊าซออกสู่อากาศต่อไป (Trivedi, 2009)

### 2.3.2 การบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต โดยฟอสฟอรัสที่เจือปนในน้ำเสียนี้จะถูกแบคทีเรียนำไปใช้สำหรับสร้างเซลล์ การบำบัดฟอสฟอรัสอย่างเพิ่มพูน (Enhance Biological Phosphorus Removal, EBPR) เป็นการบำบัดฟอสฟอรัสที่เพิ่มขั้นการสังเคราะห์เซลล์ของจุลินทรีย์ที่สะสมฟอสฟอรัสในกลุ่ม Phosphorus Accumulating Organisms หรือ PAOs ที่อยู่ในระบบการบำบัดน้ำเสียที่มีทั้งสภาวะใช้อากาศ ไม่ใช้อากาศและแอนน็อกซิก สลับกันไปมา นอกจากนี้แล้วชนิดและองค์ประกอบของสารอาหารยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการคัดเลือกสายพันธุ์จุลินทรีย์ในกลุ่ม PAOs โดยสภาวะที่ได้กล่าวมานี้จะทำให้แบคทีเรียกลุ่ม PAOs อยู่ในระบบได้ เป็นผลทำให้การสะสมโพลีฟอสเฟตได้ดีขึ้นและมีประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสดีขึ้นตามไปด้วย (เทียนนลิน รมสกุล, 2555)

แบคทีเรียกลุ่ม PAOs มีกระบวนการบำบัดฟอสฟอรัสแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ คือ

ขั้นตอนที่ 1. กระบวนการบำบัดในสภาวะที่ไม่ใช้อากาศ โดย PAOs จะย่อยสลายโพลีฟอสเฟตในเซลล์ซึ่งสะสมมาจากการเติมอากาศซึ่งเป็นสภาวะใช้ออกซิเจน เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในการตรึงแหล่งอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอกเซลล์มาเก็บไว้ในเซลล์

ขั้นตอนที่ 2. กระบวนการบำบัดในสภาวะใช้อากาศ ซึ่งแหล่งอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอกเซลล์ลดต่ำลง จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียอื่นๆ ไม่สามารถสะสมสาร พีเอชเอ (Polyhydroxylakanoat ; PHA) หรือพีเอชบี (Polyhydroxybutyrate ; PHB) ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนเหมือนกลุ่ม PAOs ที่มีแหล่งพลังงานและคาร์บอนเพื่อใช้ในการรักษาเซลล์และการเจริญ

## 2.4 การเติมอากาศในระบบบำบัดน้ำเสีย

การเติมอากาศ (Aeration) เป็นกลไกการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำ ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจากซัลเฟต (สารอินทรีย์) ให้จุลินทรีย์นำไปใช้สำหรับการสร้างพลังงานในกระบวนการปฏิกิริยาชีวเคมีภายในเซลล์ การเติมอากาศในปริมาณที่เหมาะสมและเพียงพอ มีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียดีขึ้น โดยทั่วไปความต้องการออกซิเจนของระบบบำบัดน้ำเสียขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำเสีย และปริมาณความสกปรก (สสารที่เจือปนมากับน้ำทิ้ง) รวมทั้งปริมาณจุลินทรีย์ในระบบ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

อย่างไรก็ตาม ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศตลอดเวลายังคงประสบปัญหาในเรื่องการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจนออกจากน้ำเสีย (Lim, Choi et al., 2007) ทำให้ปัจจุบันมีการคิดค้นระบบและปรับปรุงกระบวนการเดินระบบที่มีรูปแบบการเติมอากาศแบบใหม่ๆ สำหรับประยุกต์ใช้ในเรื่องการแก้ไขปัญหาดังกล่าว เพื่อให้สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

### 2.4.1 กระบวนการเติมอากาศ

การเติมอากาศเป็นกระบวนการถ่ายเทออกซิเจนในสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลว เพื่อเพิ่มปริมาณการละลายออกซิเจนในน้ำให้มากขึ้น ออกซิเจนเป็นก๊าซที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยและค่าการละลายจะแปรผันตามกับ อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรยากาศ และความเข้มข้นของเกลือต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายออกซิเจนลงสู่น้ำจะลดน้อยลง หรือเมื่อระดับความสูงเพิ่มขึ้นทำให้ความดันบรรยากาศเปลี่ยนแปลงความสามารถในการละลายออกซิเจนลดลง เป็นต้น ดังนั้นค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำสามารถคำนวณได้จากกฎของเฮนรี (Henry's law) การเติมออกซิเจนหรืออากาศลงสู่น้ำจะต้องเติมในอัตราส่วนที่ไม่ทำให้ออกซิเจนปจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียลดลง กล่าวคือ หากเติมออกซิเจนน้อยกว่าความต้องการหรือมากเกินไปจะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ลดลง โดยกระบวนการเติมอากาศมีหลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมต่อวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

### 2.4.2 ทฤษฎีของการเติมอากาศ

กฎของเฮนรี (Henry's Law) ปริมาณของก๊าซที่สามารถละลายอยู่ในน้ำ ณ สภาวะสมดุล ซึ่งเป็นก๊าซที่สามารถละลายน้ำได้น้อยโดยไม่เกิดปฏิกิริยากับน้ำ จะเปลี่ยนแปลงเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความกดดันย่อยของก๊าซ (Partial Pressure) ที่กระทำเหนือผิวน้ำ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้ (นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์, 2553)

$$C = K_h P$$

เมื่อ

$C$  = ความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายน้ำ (โมล/ลิตร)

$K_h$  = ค่าคงที่ของเฮนรี (โมล/ลิตร-บรรยากาศ)

$P$  = ความดันย่อยของก๊าซในก๊าซผสม (บรรยากาศ)

ความดันย่อยของก๊าซเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าเศษส่วนโมลของก๊าซ (นันทนากร จริยานุกูล, 2551)

$$P_g = \frac{H}{P_T} X_g$$

เมื่อ

$P_g$  = เศษส่วนโมลของก๊าซในอากาศ

$H$  = ค่าคงที่ของเฮนรี

$P_T$  = แรงดันทั้งหมด (บรรยากาศ)

$X_g$  = เศษส่วนโมลของก๊าซในน้ำ

$$X_g = \frac{\text{Mol gas } (n_g)}{\text{Mol gas } (n_g) + \text{Mol Water } (n_w)}$$

$$P_g = H X_g$$

โดยที่  $P_g$  = ความดันย่อยของก๊าซ, บรรยากาศ

### 2.4.3 การถ่ายเทก๊าซออกซิเจน

กลไกการแพร่ของสารจะแพร่จากความเข้มข้นสูงไปสู่ความเข้มข้นต่ำเสมอ ซึ่งการถ่ายเทออกซิเจนก็เช่นเดียวกัน โดยมีตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลวหรือน้ำ ได้แก่

1. ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจน ขึ้นอยู่กับความเค็มของเกลือที่ละลายน้ำ อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ เช่น เมื่ออุณหภูมิ ความเค็ม และความดันเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนก็จะลดลง
2. อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการละลายของก๊าซออกซิเจนลดลง
3. คุณลักษณะของน้ำเสีย เมื่อน้ำเสียมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้น้ำมีแรงตึงผิวมากขึ้น สภาวะเช่นนี้จะทำให้เกิดการขัดขวางการแพร่กระจายของสารและเกิดแรงต้านทำให้ก๊าซออกซิเจนไม่สามารถผ่านชั้นฟิล์มของน้ำเข้าสู่ชั้นน้ำได้หรือเข้าไปน้อย
4. ความปั่นป่วนของของเหลว ในน้ำนิ่งจะเกิดความปั่นป่วนน้อยแรงต้านการกระจายตัวของออกซิเจนมากขึ้น แต่หากมีความปั่นป่วนเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถทำได้โดยเพิ่มอัตราการกวนในถังเดิมอากาศก็จะทำให้การละลายและการแพร่ของก๊าซสู่น้ำดีขึ้น

กลไกการถ่ายเทออกซิเจนในสถานะก๊าซเข้าสู่สถานะของเหลวตามทฤษฎีได้พิจารณาเป็น 2 ชั้นคือ

ชั้นที่ 1 เป็นของก๊าซ

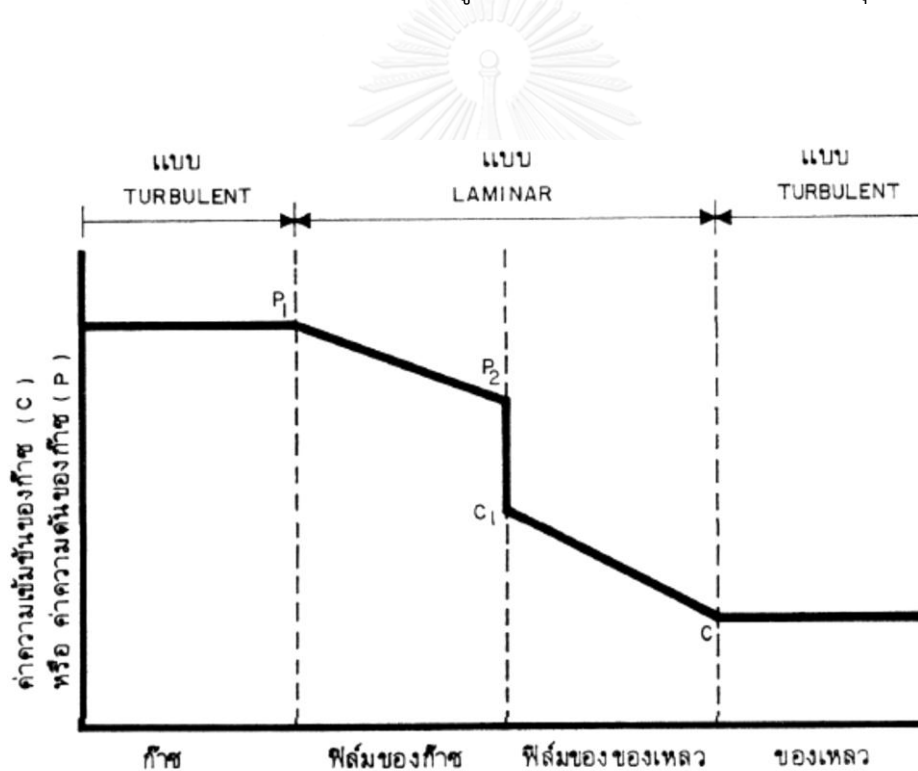
ชั้นที่ 2 เป็นของเหลวหรือน้ำ

ณ บริเวณผิวสัมผัสระหว่างช่วงชั้นของก๊าซและช่วงชั้นของน้ำจะมีชั้นฟิล์มคอยกันโมเลกุลของก๊าซที่จะแพร่เข้าสู่ใต้น้ำอยู่ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการละลายผ่านชั้นฟิล์มนี้ ได้แก่ ความสามารถในการละลายของสาร ความดันบรรยากาศ ความดันย่อยของก๊าซในก๊าซผสม อุณหภูมิ และค่าความเค็ม เป็นต้น สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ แสดงในรูปที่ 2

ขั้นตอนที่ 1 การถ่ายเทก๊าซจากบรรยากาศเข้าสู่ฟิล์มของก๊าซ เป็นกระบวนการที่ก๊าซแพร่กระจายลงสู่ผิวในขั้นตอนนี้เป็นช่วงที่การถ่ายเทมีอัตราเร็วมาก เนื่องจากความต้านทานของชั้นฟิล์มต่ำมาก ค่าความดันของก๊าซจะค่อยๆ ลดลงในปริมาณที่น้อย

ขั้นตอนที่ 2 การถ่ายเทก๊าซออกซิเจนจากฟิล์มของก๊าซเข้าสู่ฟิล์มของน้ำ กระบวนการนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของบริเวณผิวของน้ำ หากมีความปั่นป่วนที่บริเวณผิวน้ำมากชั้นฟิล์มจะแตกออก ทำให้การถ่ายเทของก๊าซเข้าสู่ผิวน้ำได้มากขึ้น

ขั้นตอนที่ 3 การถ่ายเทของก๊าซออกซิเจนจากชั้นฟิล์มของน้ำเข้าสู่ชั้นน้ำ ในขั้นตอนนี้จะมีความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนจะแพร่เข้าสู่เนื้อจนถึงสภาวะอิ่มตัว (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2545)



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของก๊าซบริเวณชั้นผิวของเหลว

ที่มา: เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2545)

จากการถ่ายเทก๊าซออกซิเจนสามารถเขียนในรูปสมการได้ ดังนี้

$$r_m = K_g A (C_s - C)$$

เมื่อ

$r_m$  = อัตราการถ่ายเทมวลสาร (กิโลกรัมต่อวัน)

$K_g$  = ค่าสัมประสิทธิ์ในการกระจายของก๊าซ  
(กิโลกรัมต่อวัน-ตารางเมตร (มิลลิกรัมต่อลิตร))

$A$  = พื้นที่ผิวที่ก๊าซกระจายได้ (ตารางเมตร)

$C_s$  = ความเข้มข้นอิ่มตัวของก๊าซในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C$  = ความเข้มข้นของก๊าซในสารละลาย

จากสมการ สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$r_m = V \frac{dC}{dt} = K_g A (C_s - C)$$

เมื่อ  $V$  = ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)

$$= \frac{dC}{dt} = \frac{K_g A (C_s - C)}{V}$$

กำหนด  $\frac{A}{V} = a$  และพิจารณาให้  $K_g = k_L$  = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทก๊าซผ่านชั้นฟิล์มของน้ำ

โดยกำหนดให้เป็น  $K_L$

ดังนั้น ค่า  $K_g \frac{A}{V}$  จึงสามารถเขียนใหม่เป็น  $K_L a$  และได้เป็นสมการใหม่ คือ

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C)$$

เมื่อ  $\frac{dC}{dt}$  = ค่าเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของก๊าซต่อเวลา (มิลลิกรัมต่อลิตร-วินาที)

$K_L a$  = ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในการถ่ายเทก๊าซ (วินาที)



#### 2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทออกซิเจน

อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำมีความสัมพันธ์กับหลายปัจจัย และในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงผลกระทบการถ่ายเทออกซิเจนสำหรับระบบเติมอากาศแบบใช้หัวฟู่กระจายอากาศ ดังนี้

##### 2.4.4.1 ขนาดของฟองอากาศ

ฟองอากาศสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ ฟองอากาศขนาดใหญ่ และฟองอากาศแบบละเอียด เมื่อมีการเติมอากาศในปริมาณที่เท่ากันพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศขนาดเล็กหรือละเอียดจะมีค่ามากกว่าฟองอากาศใหญ่ เนื่องจากฟองอากาศแบบละเอียดมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า ทำให้เคลื่อนย้ายก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่า

##### 2.4.4.2 อัตราการให้อากาศ

อัตราการให้อากาศที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทอากาศลดลง เนื่องจากมีการชนกันของฟองอากาศเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการสัมผัสอากาศของน้ำและฟองอากาศลดลง หัวฟู่กระจายอากาศมีแรงดันเพิ่มขึ้น

##### 2.4.4.3 ระดับความลึกของน้ำ

ระดับความลึกเพิ่มขึ้นปริมาตรอากาศที่ถูกอัดผ่านหัวฟู่กระจายอากาศมีแรงดันเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

##### 2.4.4.4 รูปทรงของถังเติมอากาศ

รูปร่างของถังมีผลต่อประสิทธิภาพในการเติมอากาศและการกวนน้ำในถังเติมอากาศ ลักษณะของถังเติมอากาศ อัตราส่วนระหว่างความกว้างและความลึกของถังเป็นตัวกำหนดแนวการไหลของน้ำในถัง ความกว้างและความลึกของถัง (กว้าง : ลึก) ควรอยู่ในช่วง 1.0 – 2.2 : 1 แต่ค่าที่นิยมใช้คือ 1.5 : 1 เมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกลดลงจะทำให้ระยะเวลาการสัมผัสระหว่างน้ำกับฟองอากาศเพิ่มมากขึ้น

#### 2.4.4.5 การจัดวางหัวฟูกระจายอากาศ

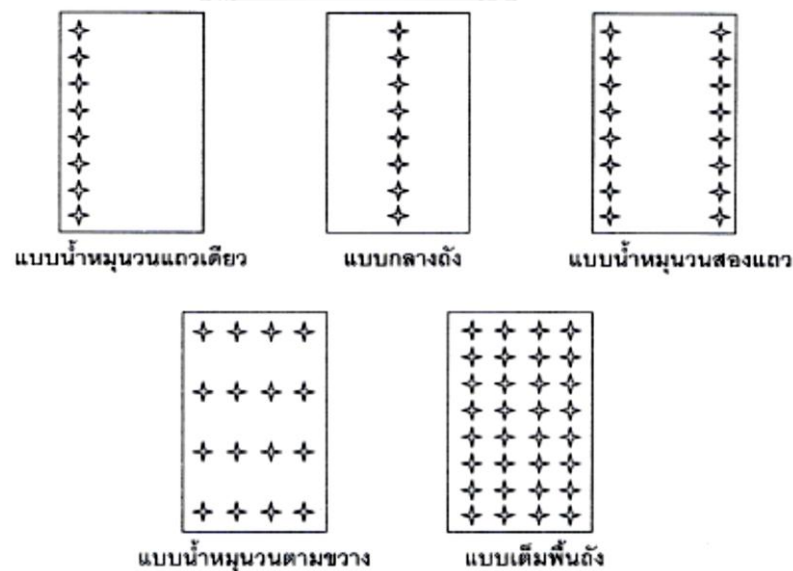
รูปแบบการจัดวางหัวฟูที่นิยมใช้ในระบบเอเอส ได้แก่ แบบน้ำหมุนวนแถวเดียว (Single Spiral Roll) แบบกลางถึง (Central) แบบน้ำหมุนวนสองแถว (Dual Spiral Roll) แบบน้ำหมุนวนตามขวาง (Cross Roll) และแบบเต็มพื้นที่ (Total Floor Coverage) แสดงในรูปที่ 3 การจัดวางหัวฟูแบบต่างๆ มีผลต่อการถ่ายเทออกซิเจนและการกวนผสมที่แตกต่างกัน เช่น การจัดวางหัวฟูหมุนวนสองแถว จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมและการถ่ายเทก๊าซออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น หรือการจัดวางหัวฟูแบบกระจายเต็มพื้นที่จะไม่ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวน

#### 2.4.4.6 ความหนาแน่นของหัวฟู

หมายถึง ร้อยละของพื้นที่หน้าตัดของถังเติมอากาศที่ถูกครอบคลุมด้วยพื้นที่ของหัวฟู เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของหัวฟูจะทำให้ประสิทธิภาพอัตราการถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

#### 2.4.4.7 ผลกระทบจากการอุดตันของหัวฟู

เมื่อระยะเวลาการใช้งานของหัวฟูเพิ่มขึ้นจะเกิดการอุดตันเนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์ของแข็งแขวนลอยในน้ำเสีย (สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ, 2552)



รูปที่ 3 รูปแบบการจัดวางหัวฟูกระจายอากาศ

ที่มา: สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ (2552)

## 2.5 กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process)

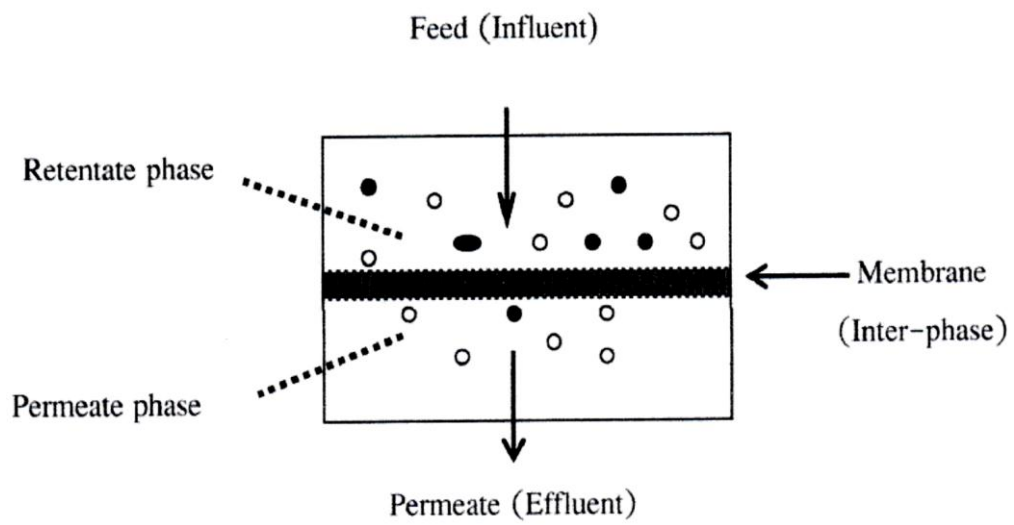
เมมเบรน (Membrane) หรือแผ่นเยื่อเลือกผ่าน (Permeable Membrane) มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ของสารสังเคราะห์ หรือสารอนินทรีย์ มีความสามารถในการเลือกคัดกรองให้ของเหลวหรือ สารที่ต้องการ และก๊าซผสม ที่มีขนาดอนุภาคและความเข้มข้นแตกต่างกัน (Visvanathan, 2557) กระบวนการเมมเบรนเป็นกระบวนการที่อาศัยโดยอาศัยของแรงขับดันให้สารละลายเคลื่อนที่ไหลผ่านช่องว่างหรือรูพรุน (Pore Size) ของเยื่อเมมเบรน แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางทำให้เกิดการคัดแยกของสารโดยมีกลไก 2 รูปแบบ คือ

1. การกรองแบบตีดัก (Sieve Mechanism)
2. การแพร่ผ่าน (Diffusion Mechanism)

ทั้งสองรูปแบบนี้สามารถเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารหรือทำให้สารมีความบริสุทธิ์มากขึ้นได้ สารที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ เรียกว่า รีเทนเทต (Retentate) ส่วนสารที่สามารถผ่านเมมเบรนได้ เรียกว่า เพอมีเอต (Permeate) ของแข็งแขวนลอยหรือตะกอนจุลินทรีย์ที่เจือปนมากับสารละลาย เมื่อเดินระบบการกรอง สารเหล่านี้จะตีดักอยู่ที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรน โดยรูปแบบของทิศทางการเคลื่อนที่การกรองของเมมเบรนแบ่งได้ 2 รูปแบบ แสดงในรูปที่ 5 คือ

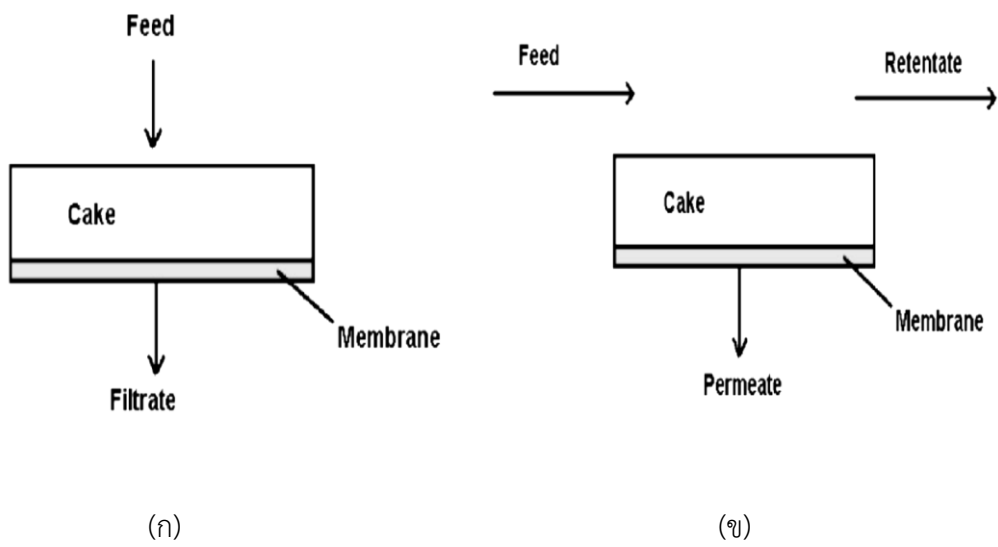
1. ทิศทางการไหลแบบตั้งฉากกับเมมเบรน (Dead-End Filtration)
2. ทิศทางการไหลแบบแนวขนานกับเมมเบรน (Cross-Flow Filtration)

โดยทั่วไปกระบวนการของการกรองทิศทางการไหลแบบแนวขนานกับเมมเบรนนิยมนำมาประยุกต์ใช้กับโมดูลเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fibre (HF) และโมดูลแบบท่อ (Tubular) (ผกาวิดี แก้วกันเนตร, 2554)



รูปที่ 4 หลักการทำงานของกระบวนการเมมเบรน

ที่มา: ผกาวัตติ แก้วกันเนตร (2554)



รูปที่ 5 ทิศทางการเคลื่อนที่ของสารในกระบวนการเมมเบรน

(ก) ทิศทางการไหลแบบตั้งฉากกับเมมเบรน (Dead-End Filtration)

(ข) ทิศทางการไหลแบบแนวขนานกับเมมเบรน (Cross-Flow Filtration)

ที่มา: Mutamim, Noor et al. (2013)

### 2.5.1 หลักเกณฑ์การจำแนกกระบวนการเมมเบรน

ชนิดของเมมเบรนที่เลือกใช้ มีความสำคัญต่อกระบวนการแยกสาร โดยจำแนกและแบ่งชนิดของเมมเบรนตามวัตถุประสงค์การใช้งาน การแบ่งกระบวนการเมมเบรนออกจากกัน แสดงในตารางที่ 1 โดยใช้เกณฑ์การจำแนก ดังนี้ คือ

1. แรงดัน (Pressure) ที่ใช้สำหรับการคัดแยก เช่น ความดัน อุณหภูมิ
2. โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมี
3. กลไกของการคัดแยกหรือค่าฟลักซ์เมมเบรน (Flux)
4. โครงสร้างเรขาคณิตของเมมเบรน

ตารางที่ 1 การจำแนกชนิดของเมมเบรน

กระบวนการเมมเบรน	แรงดัน (Pressure)		ค่าฟลักซ์เมมเบรน (Flux)
	บาร์ (Bar)	กิโลปาสคาล (kPa)	ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง
ไมโครฟิลเตรชัน (MF)	0.1-2.0	10-200	>50
อัลตราไมโครฟิลเตรชัน (UF)	1.0-5.0	100-500	10-50
นาโนฟิลเตรชัน (NF)	5.0-2.0	500-2000	1.4-12
รีเวอร์ออสโมซิส (RO)	10-100	1000-10000	0.05-1.4

ที่มา: ผกาวัตติ แก้วกันเนตร (2554)

### 2.5.1.1 ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration Membrane : MF)

เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงผลักดันเพื่อแยกอนุภาคขนาดไมโครเมตร ( $\mu = 10^{-6}$ ) หรือเล็กกว่าก็ได้ เมมเบรนชนิดนี้มีความสามารถกรองไม่ให้อนุภาคสารแขวนลอย จุลินทรีย์ และกลุ่มตะกอนของแข็งแขวนลอยที่มีอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1-1 ไมโครเมตร ผ่านได้ และยอมให้สารละลายและน้ำผ่านได้ที่ขนาดรูพรุนของเมมเบรนอยู่ในช่วง 0.03-10 ไมโครเมตร ใช้แรงดันต่ำ ประมาณ 100-400 กิโลปาสคาล (kPa) หรือ 15-60 Psi

### 2.5.1.2 อัลตราไมโครฟิลเตรชัน (Ultrafiltration Membrane : UF)

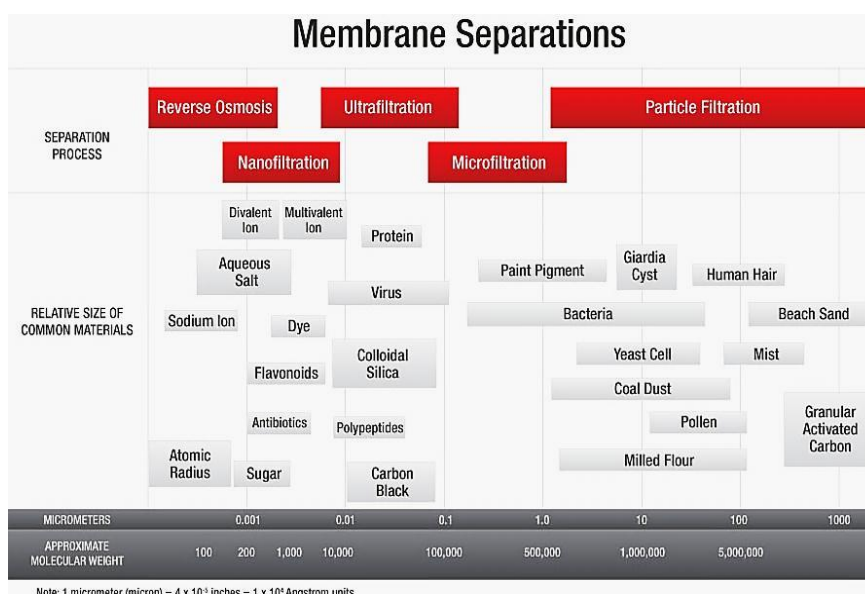
นิยมใช้ในการแยกของแข็งแขวนลอย สารอนุภาคละเอียด สารคอลลอยด์ จุลินทรีย์ ในระดับต่ำกว่าไมโครเมตรและตัวถูกละลายที่มีโมเลกุลสูง รวมถึงไวรัส เป็นต้น การกรองแบบอัลตราไมโครฟิลเตรชันมีขนาดของช่องว่างหรือรูพรุนอยู่ในช่วง 0.01-0.1 ไมโครเมตร ใช้แรงดันต่ำ ประมาณ 200-700 กิโลปาสคาล (kPa) หรือ 30-100 Psi

### 2.5.1.3 นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration Membrane : NF)

การกรองด้วยนาโนฟิลเตรชันเป็นการกรองเมมเบรนที่มีขนาดของรูพรุนเล็กเป็นพิเศษ เพราะสามารถกำจัดสารที่มีอนุภาคขนาด 1 นาโนเมตร หรือ 10 อังสตรอม (Å) การกรองด้วยนาโนฟิลเตรชันเป็นการกรองที่อยู่ระหว่างอัลตราไมโครฟิลเตรชันและรีเวอร์ออสโมซิส มีขนาดของช่องว่างหรือรูพรุนอยู่ในช่วง 0.001-0.01 ไมโครเมตร ใช้แรงดันประมาณ 600-1,000 กิโลปาสคาล (kPa) หรือ 90-225 Psi

### 2.5.1.4 รีเวอร์ออสโมซิส (Reverse Osmosis membrane : RO)

เป็นการกรองแบบละเอียดที่มีความสามารถกำจัดเกลือที่ละลายน้ำ และแยกเกลือออกจากน้ำเกลือได้ จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้ในทำน้ำจืดจากน้ำทะเลซึ่งเป็นที่นิยมสำหรับประเทศที่ขาดแคลนน้ำจืดหรือการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากกระบวนการนี้สามารถผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์มาก ๆ ได้รวมถึงกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ชั้นเมมเบรนนี้จะคอยกั้นโมเลกุลสารอินทรีย์ และกั้นชั้นเกลือที่ละลายน้ำ โดยใช้ค่าความดันเท่ากับ 1,380-6,890 กิโลปาสคาล (kPa) หรือ 200-1,000 Psi



รูปที่ 6 แสดงการจำแนกชนิดและอนุภาคการกรองของเมมเบรน

ที่มา: <http://www.synderfiltration.com/degrees-of-filtration-separation> (2557)

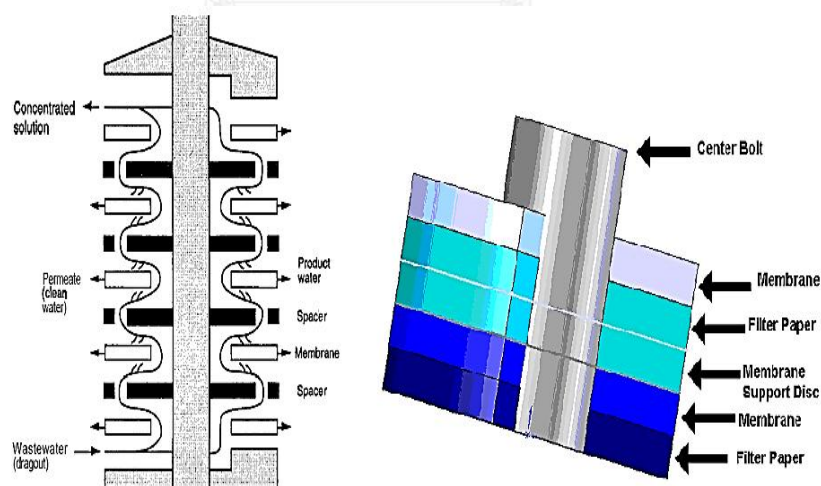
จากตารางที่ 1 และรูปที่ 6 สามารถสรุปได้ว่า ไมโครฟิลเตรชัน (MF) และอัลตราไมโครฟิลเตรชัน (UF) เป็นกระบวนการที่ใช้แรงดันในการกรองต่ำและมีประสิทธิภาพในการคัดกรองอนุภาคของจุลินทรีย์ ส่วนกระบวนการกรองแบบนาโนฟิลเตรชัน (NF) และรีเวอร์ออสโมซิส (RO) จะใช้แรงดันในการกรองสูง อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการคัดกรองเกลือและสารอินทรีย์และอนินทรีย์โมเลกุลต่ำได้ดี จึงทำให้เป็นที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตน้ำเพื่ออุปโภค บริโภค

## 2.5.2 โมดูลชนิดต่างๆ ในกระบวนการเมมเบรน

การนำเมมเบรนไปใช้นั้นจำเป็นต้องบรรจุอุปกรณ์และเมมเบรนลงในวัสดุรองรับ อุปกรณ์ที่ใช้บรรจุนั้น เรียกว่า โมดูล (Module) เป็นโครงสร้างที่มีหน้าที่ในการป้องกันการฉีกขาด และรองรับการกระแทกที่เกิดจากแรงดันในขณะที่เดินระบบ การเลือกใช้กระบวนการกรองเมมเบรน อีกสิ่งที่จะต้องพิจารณานอกเหนือจากวัตถุประสงค์การใช้งานและอนุภาคสารที่ผ่านเมมเบรน คือ ชนิดของโมดูลที่ใช้ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

### 2.5.2.1. โมดูลแบบแผ่นและแบบกรอบ (Plate and Frame Module)

ประกอบด้วยแผ่นเมมเบรนและมีช่องว่างสำหรับให้สารที่ต้องการคัดกรองเข้าสู่ เมมเบรนและช่องว่างสำหรับเก็บสารที่ผ่านการกรองแล้ว เมมเบรนจะถูกวางบนแผ่นรองรับ ซึ่งมีลักษณะเป็นช่องว่างหรือรูพรุน จากนั้นนำแผ่นรองรับนี้มาวางซ้อนกันและสลับกันเป็นชั้นๆ สารที่ต้องการคัดกรองจะถูกสูบด้วยความดันผ่านเข้าไปในท่อ สารเหล่านั้นจะซึมผ่านเมมเบรน และถูกรวบรวมไหลไปตามช่องจะต่อจากนั้นจึงสูบออกสู่ภายนอก แสดงในรูปที่ 7



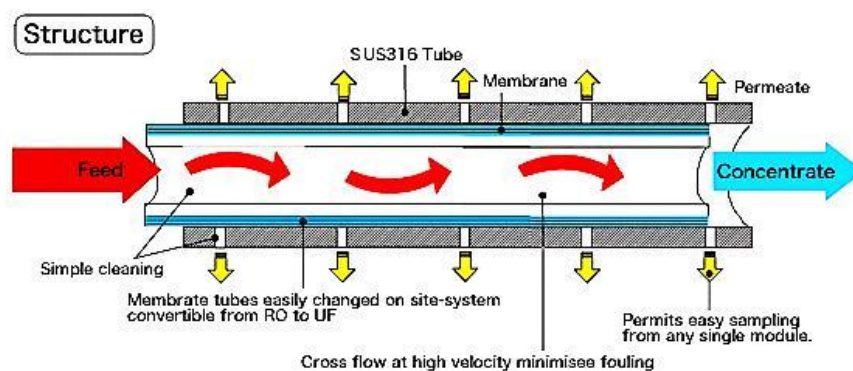
รูปที่ 7 โครงสร้างและโมดูลเมมเบรนแบบแผ่น

ที่มา: [http://purewaterlab.org/pwl\\_net/labs/D2\\_Process\\_Units/D2L1\\_RO/Membranes.html](http://purewaterlab.org/pwl_net/labs/D2_Process_Units/D2L1_RO/Membranes.html). (2557)



### 2.5.2.2 โมดูลแบบท่อ (Tubular Module)

มีลักษณะคล้ายท่อกลวงยาว โดยสามารถให้น้ำและอนุภาคของสารละลายที่ต้องการคัดกรองผ่านได้ เมมเบรนที่บรรจุในโมดูลนี้ต้องมีลักษณะรูปร่างเป็นท่อกลวงเหมือนกับวงแหวนหรือท่อขนาดเล็กจากนั้นนำไปบรรจุในโมดูลชนิดท่ออีกอันหนึ่งที่ทำด้วยสแตนเลส หรือไฟเบอร์กลาส กระบวนการกรองเริ่มจากสารละลายที่ต้องการคัดกรองถูกสูบผ่านเข้าไปในท่อความดัน แรงดันนี้จะทำให้ของเหลวไหลผ่านเมมเบรนและออกมายังท่อรองรับและสูบลูกออกไปยังส่วนกักเก็บสารละลายนั้น ๆ แสดงในรูปที่ 8

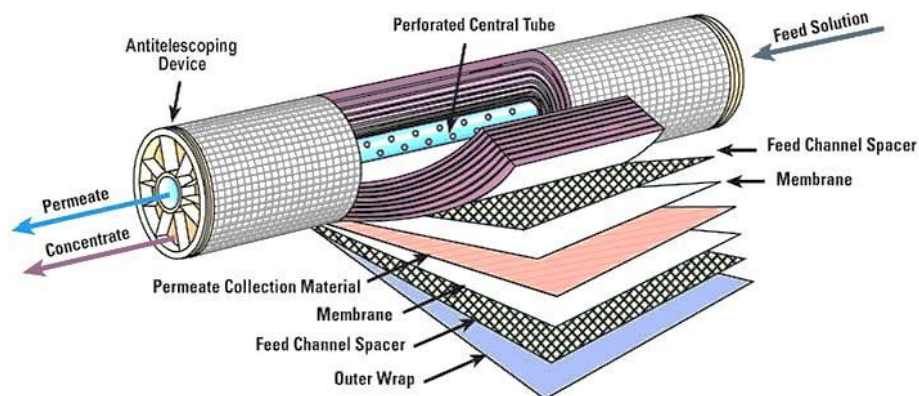


รูปที่ 8 โมดูลแบบท่อ (Tubular Module)

ที่มา: [http://www.tske.co.jp/english/technology/seizou\\_bunri.html](http://www.tske.co.jp/english/technology/seizou_bunri.html).(2557)

### 2.5.2.3. โมดูลแบบม้วน (Spiral Wound Module)

โมดูลชนิดนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 5 10 20 30 เซนติเมตร มีความยาวไม่เกิน 1 เมตร โมดูลแบบม้วนจะประกอบด้วยเมมเบรนสองแผ่นประกบกันเป็นคู่ และมีจำนวนหลายๆ คู่ โดยมีลักษณะเป็นวัสดุเนื้อพรุนสอดอยู่ตรงกลางระหว่างเมมเบรนทั้งคู่และทำการม้วนเป็นแผ่นเมมเบรนและแผ่นวัสดุทั้งสามรอบท่อเจาะรูซึ่งมีหน้าที่สำหรับรวบรวมสารที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน บริเวณด้านนอกของเมมเบรนนี้ถูกคลุมด้วยพลาสติกโพลีโพรไพลีน (Polypropylene) การไหลของสารละลายจะไหลไปตามท่อเจาะรูเสมอ สารละลายจะถูกแยกโดยให้ไหลไปตามแนวแกนของโมดูลและใช้แรงดันอัดให้สารละลายซึมผ่านเข้าสู่เมมเบรนและถูกกรองออกมาตามท่อเจาะรู แสดงในรูปที่ 9

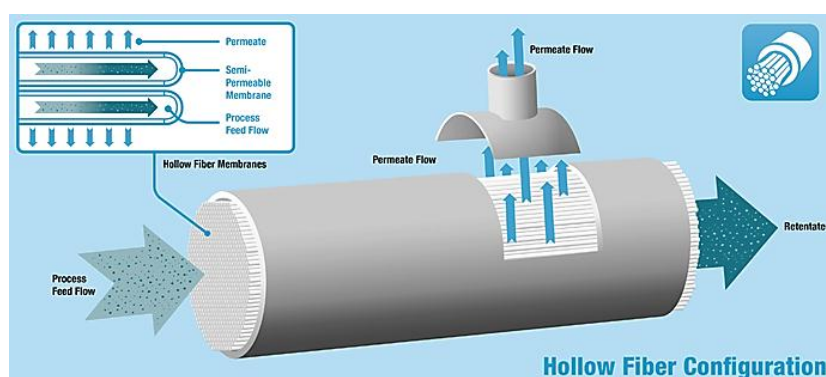


รูปที่ 9 โมดูลแบบม้วน (Spiral Wound Module)

ที่มา: <http://www.lixus.net.cn/en/products/Membrane.aspx>. (2557)

#### 2.5.2.4. โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module)

เป็นเมมเบรนที่มีลักษณะเป็นเส้นใยกลวงผิวเหมือนฟองน้ำรอมลอบขึ้นในหนาประมาณ 0.1 ไมโครเมตร โดยนำเมมเบรนชนิดนี้มามัดรวมกัน จากนั้นจับพับหรืออเป็นรูปตัวยูปลายทั้งสองข้างจับมัดติดไว้ด้านใดด้านหนึ่ง สารละลายจะถูกแรงดันผลักดันให้เข้าไปยังบริเวณด้านข้างของเมมเบรน สารที่สามารถผ่านเมมเบรนได้จะไหลผ่านผนังไฟเบอร์และออกสู่ปลายอีกด้านของไฟเบอร์โมดูลเมมเบรน แสดงในรูปที่ 10 (ผกาวิ แก้วกันเนตร, 2554)



รูปที่ 10 โมดูลแบบใยกลวง (Hollow fiber Module)

ที่มา: [http://www.alibaba.com/product-detail/PVDF-MBR-Membrane-PVDF-hollow-fiber\\_1534732218.html](http://www.alibaba.com/product-detail/PVDF-MBR-Membrane-PVDF-hollow-fiber_1534732218.html) (2557)

### 2.5.3 ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration Membrane : MF)

เป็นกระบวนการเมมเบรนที่ใช้วัสดุกรองที่มีคุณสมบัติในการคัดแยกสารที่มีอนุภาคเล็กกว่ารูพรุนในระดับไมโครเมตร มีขนาดประมาณ 0.1 - 1.0 ไมโครเมตร โดยทั่วไปนิยมใช้ในการกรองเพื่อคัดแยกจุลินทรีย์ในน้ำ ได้แก่ เซลล์แบคทีเรีย เชื้อรา โพรโทซัว และไวรัสบางชนิด ซึ่งกลไกการกรองอาศัยแรงดันในการผลักให้สารละลายหรือน้ำที่ต้องการแยกซึมผ่านเมมเบรน อนุภาคที่ใหญ่กว่ารูพรุนจะไม่สามารถลอดผ่านเมมเบรนไปได้ โดยจะเคลือบอยู่บริเวณพื้นผิวของเมมเบรนด้านหนึ่งของเมมเบรน สารละลายที่ผ่านเมมเบรนได้ก็จะไหลออกไปตามช่องว่างของเมมเบรนแล้วจึงถูกสูบออกไป ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนที่สังเคราะห์ขึ้นผลิตจากวัสดุที่หลากหลาย เช่น สารโพลีเมอร์สังเคราะห์จากปิโตรเคมี ได้แก่ โพลีโพรไพลีนและโพลีเอทิลีน หรือสังเคราะห์จากธรรมชาติ ได้แก่ ไบโอฟอสเฟอไรต์ สารพวกเซลลูโลส เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เมื่ออายุการใช้งานของเมมเบรนเหล่านี้เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการคัดกรองสารก็จะลดต่ำลง เนื่องจากปัญหาการอุดตันของแข็งแขวนลอยที่ไม่ละลายน้ำ ถ้าหากเป็นการนำไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียก็จะมีตะกอนจุลินทรีย์อุดตันอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้น เพื่อเป็นการรักษาให้สามารถใช้งานได้นานจึงควรนำออกมาล้างทำความสะอาด ซึ่งอาจจะสังเกตจากค่าความดันของการกรองที่เพิ่มขึ้นก็ได้

#### 2.5.3.1 คุณลักษณะของไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน

ลักษณะที่เป็นตัวบ่งชี้ว่าเป็นเมมเบรนตามกระบวนการไมโครฟิลเตรชันประกอบด้วย 3 ประการ ดังนี้

1. ขนาดของรูพรุน (Pore Size) : มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนอยู่ในช่วง 1 - 10 นาโนเมตร หรือ 0.1-1.0 ไมโครเมตร
2. ความสามารถในการกรอง (Filtration Capacity) : หมายถึง ความสามารถของเมมเบรนที่กรองสารทั้งหมดได้ เมื่อเดินระบบในขณะที่ใช้แรงดันสูงสุด
3. ประสิทธิภาพในการกำจัดสาร (Removal Efficiency) : เป็นการทดสอบความสามารถในการกรองทำได้โดยนำสารละลายที่เจือปนด้วยเซลล์แบคทีเรียมาผ่านการกรองด้วยเมมเบรน สังเกตสารละลายที่ผ่านการกรองว่ามีเซลล์แบคทีเรียหลุดรอดผ่านออกมาหรือไม่

### 2.5.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน

1. การสะสมความเข้มข้นสูง (Concentration Polarization) เป็นสภาวะที่เกิดการสะสมของอนุภาคสารอินทรีย์ไว้ ณ บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนจนทำให้ค่าความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นจากค่าเฉลี่ยของสารนั้นๆ ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลง แนวทางการแก้ไขปัญหา คือ ใช้แรงดันน้ำย้อนกลับเข้าไปและนำออกมาล้างด้วยสารเคมี
2. อุณหภูมิ พีเอช และสารออกซิไดซ์ เมมเบรนที่สังเคราะห์จากสารอินทรีย์จะเสื่อมสภาพได้เร็วอันเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส ค่าฟลักซ์เมมเบรนเพิ่มขึ้นร้อยละ 3-5 ตัวอย่างเช่น เมมเบรนอินทรีย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส และค่าพีเอชอยู่ในช่วง 3-7 ถูกสลายตัวโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต่ำกว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 4 องศาเซลเซียส และค่าพีเอชอยู่ในช่วง 2 - 11
3. ความดัน เมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นประสิทธิภาพการกรองดีขึ้นและทำให้ค่าฟลักซ์เมมเบรนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามหากความดันเพิ่มขึ้นจนเกินขีดจำกัดจะทำให้เกิดการอุดตันบริเวณผิวหน้าเมมเบรนได้เช่นกัน ส่งผลให้การไหลของน้ำผ่านเมมเบรนได้น้อยลง
4. ความสกปรกของเมมเบรน เกิดจากการสะสมของสารอินทรีย์และสิ่งสกปรกต่าง ๆ ในรูพรุนของเมมเบรน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกรองลดลง
5. ลักษณะของน้ำเสีย หากน้ำเสียมีการเจือปนของวัสดุหรืออนุภาคละลายไม่น้ำ และน้ำเสียมีความสกปรกมากก็จะทำให้อัตราการกรองของเมมเบรนลดลง (เทียนนลิน ร่มสกุล, 2555)

### 2.5.3.3 ปัญหาการอุดตันของเมมเบรน

การอุดตันของเมมเบรนบริเวณผิวหน้าและภายในรูพรุน ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้ค่าฟลักซ์การกรองลดลง เกิดจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization, CP) และปรากฏการณ์ฟาวลิง (Fouling) โดยทั้งสองปรากฏการณ์นี้ มีผลทำให้ประสิทธิภาพการกรองลดลง ดังนั้น จึงมีแนวทางการแก้ไขปัญหาการอุดตันของเมมเบรน ดังนี้

1. การขัดถูจากฟองอากาศบริเวณภายนอกของโมดูลเมมเบรน โดยอาศัยหลักการของแรงเฉือนของฟองอากาศ
2. ฉีดอากาศอัดเข้าไปภายในโมดูลเมมเบรน
3. การเติมอากาศเป็นช่วงๆ
4. การสูบน้ำออกจากเมมเบรนเป็นระยะๆ
5. การล้างย้อน เป็นการฉีดพ่นก๊าซหรือของเหลวไหลย้อนในทิศทางกับการสูบน้ำออก (Tiranuntakul, 2012)

### 2.5.4 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเมมเบรน

การประยุกต์ใช้เมมเบรนในงานบำบัดน้ำเสีย นิยมติดตั้งในบริเวณถังเติมอากาศ เพื่อลดขั้นตอนการตกตะกอนในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบต่างๆ เมมเบรนสามารถช่วยกำจัดความขุ่นของน้ำ ทำให้น้ำที่ผ่านการกรองมีลักษณะใส และยังพบว่าข้อดีของการใช้ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนมาช่วยในการบำบัดน้ำเสียเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกรองแบบเดิม คือ ใช้พื้นที่น้อยกว่าและลดค่าใช้จ่ายเรื่องต้นทุนการก่อสร้างถังตกตะกอน หากดูแลรักษาเมมเบรนสามารถใช้ได้เป็นระยะเวลานานและลดต้นทุนการบำรุงรักษา ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียปัจจุบันนี้มีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 1.0 - 10 ไมโครเมตรขึ้นไป ขนาด 0.2 - 0.5 ไมโครเมตร ใช้สำหรับอุตสาหกรรมผลิตน้ำเพื่อการบริโภค เป็นต้น

## 2.6 การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

กระบวนการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ คือ การนำน้ำเสียที่ไม่ผ่านกระบวนการบำบัด หรือนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว จากนั้น นำน้ำเหล่านี้กลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำอีก การนำกลับมาใช้ใหม่นั้น ต้องคำนึงถึงเรื่องของ คุณภาพน้ำ วัตถุประสงค์ สุขอนามัย และการยอมรับของประชาชน ประโยชน์ของการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่นี้ไม่เพียงแต่ช่วยลดแทนทรัพยากรน้ำจืดของโลก ประหยัดต้นทุนการผลิตน้ำประปา และยังช่วยให้สิ่งแวดล้อมมีคุณภาพดีขึ้นอีกด้วย (Spulber & Sabbaghi, 1998, ธรรมชาติ นรพัลลภ, 2557) โดยน้ำทิ้งที่นำกลับมาใช้นี้ สามารถมาประยุกต์ได้หลายกิจกรรม เช่น นำกลับมาใช้ในเมือง นำมาเก็บไว้เพื่อใช้สำหรับงานภูมิทัศน์ นำไปใช้ในอุตสาหกรรม เติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล และการนำดื่มเพื่อการบริโภค (Heaton, 1981) แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่สำหรับกิจกรรมต่างๆ

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่นำน้ำกลับไปใช้ใหม่
การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่สำหรับเมือง Urban Reuse	: สนามกอล์ฟ สวนสาธารณะ ศูนย์บริการล้างรถ น้ำสำหรับโถชักโครก : ระบบบำบัดน้ำเสีย น้ำสำหรับระบบทำความเย็น
การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่สำหรับการเกษตร Agricultural Reuse For Non-Food Crops	: ใช้สำหรับพืชที่เป็นอาหาร และพืชที่ไม่ใช่เป็นอาหาร : งานปศุสัตว์
การนำน้ำมากักเก็บไว้สำหรับการนันทนาการ Recreational Impoundments	: เติมน้ำเข้าสู่อ่างเก็บน้ำหรือทะเลสาบ เพื่อการพักผ่อนหย่อนใจ : ใช้สำหรับกิจกรรมนันทนาการ เช่น การเล่นกีฬาทางน้ำและการเล่นเรือใบ
การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่สำหรับงานภูมิทัศน์ Landscape Impoundments	: รดน้ำต้นไม้ : งานสนามหญ้า
การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่สำหรับสิ่งแวดล้อม Environmental Reuse	: เติมน้ำสู่พื้นที่ชุ่มน้ำ บึง หนอง : ระบบชลประทาน
การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่สำหรับอุตสาหกรรม Industrial Reuse	: น้ำหล่อเย็น : ระบบน้ำร้อน
การเติมน้ำลงสู่ใต้ดิน Groundwater Recharge	: เพิ่มระดับชั้นน้ำใต้ดิน : ป้องกันการทรุดตัวของชั้นดิน
การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่สำหรับการบริโภค Potable Reuse	: การดื่มกิน การชำระล้างทำความสะอาดร่างกาย : การประกอบอาหาร

ที่มา: Guidelines for Water Reuse (U.S. Environmental Protection Agency (2012))

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พัฒน์พงษ์ ตีชะรา (2552) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นสูง ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเมมเบรนเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดมลสาร โดยใช้เมมเบรนที่มีขนาดของรูพรุนเท่ากับ 0.5 ไมโครเมตร และกำหนดระยะเวลาพักน้ำ (HRT) ที่ 2 1 และ 0.63 วัน อัตราการบำบัดที่ 10 20 และ 32 ลิตร กำหนดให้ซีโอดี (COD) เท่ากับ 1.33 และ 4.14 กิโลกรัม-บีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน ผลการศึกษาพบว่า ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน มีประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี (BOD) เท่ากับร้อยละ 99.79 99.61 และ 99.54 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (COD) เท่ากับร้อยละ 98.54 93.49 และ 94.10 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอย (SS) เท่ากับร้อยละ 98.88 98.24 และ 98.36 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีเคเอ็น (TKN) เท่ากับร้อยละ 91.20 75.13 และ 74.47 จากการศึกษาครั้งนี้ จึงสามารถสรุปได้ว่า การใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเมมเบรนสามารถบำบัดน้ำที่มีค่าซีโอดี บีโอดี และ ทีเคเอ็น ที่ความเข้มข้นระดับสูงได้ โดย ณ ระยะเวลาพักน้ำ (HRT) ที่ 2 วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุด

Peng, Wang et al. (2006) ศึกษาการดูดซับฟอสฟอรัสในสภาวะแอนอกซิกและผลของการเติมอากาศที่มากเกินไปต่อการบำบัดฟอสฟอรัสในระบบ A<sup>2</sup>O (Anaerobic-Anoxic-Oxic) พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพในสภาวะที่มีการเติมอากาศมากเกินไปต่อการบำบัด ซีโอดี ฟอสฟอรัส แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนโตรเจนรวม มีค่าเท่ากับร้อยละ 92.3 95.5 96 และ 79.5 ตามลำดับ การทดลองแสดงให้เห็นว่าในสภาวะแอน็อกซิกการดูดซับฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรียมีอัตราเท่ากับร้อยละ 69 เมื่อมีการเติมอากาศมากเกินไปจะทำให้ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสได้น้อยลง

Lim et al. (2007) ศึกษาผลของปัจจัยในการ เปิด / ปิด เวลาในการเติมอากาศ โดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนปริมาตร 5.5 ลิตร น้ำที่เข้าระบบมีความเข้มข้นบีโอดี (BOD) ซีโอดี (COD) ไนโตรเจนรวม (TN) และ ฟอสฟอรัสรวม (TP) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 133 195 30 และ 3.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาที่กักน้ำ (HRT) เท่ากับ 8.8 ชั่วโมง อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที และกำหนดค่าเอ็มแอลเอสเอส (MLSS) เท่ากับ 6,300 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีอัตราส่วน เปิด/ปิด การเติมอากาศ 3 สัดส่วน คือ 60/60 50/70 40/80 นาที โดยมีอัตราส่วน เปิด/ปิด ระยะเวลาการกรองน้ำ เท่ากับ 10/2 8/2 8/2 นาที พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าบีโอดี ซีโอดี ไนโตรเจนรวม และฟอสฟอรัส ของอัตราส่วนการเปิด/ปิด การเติมที่ 50/70 ยังมีประสิทธิภาพ การบำบัดได้น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 2 สัดส่วนเวลา โดยมีร้อยละการบำบัดเท่ากับ 97.5 92.3 82.2 และ 38.2 ดังนั้นจึงทำให้มีการศึกษาซ้ำที่อัตราส่วน เปิด/ปิด การเติมอากาศที่ 50/70 นาที อีกครั้ง โดยเพิ่มค่าเอ็มแอลเอสเอส (MLSS) เท่ากับ 8,300 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ เอ็มแอลเอสเอสทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดของอัตราส่วน เปิด/ปิด การเติมอากาศที่ 50/70 นาที มีค่าเพิ่มมากขึ้น

Chen, Fujiwara et al. (2012) ได้ทำการพัฒนารูปแบบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ คลองวนเวียนในระดับ pilot-scale โดยเพิ่มส่วนของถังไร้อากาศและระบบควบคุมอากาศ ในส่วนของถังเติมอากาศ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัส จากน้ำเสียชุมชนเป็นระยะเวลา 310 วัน ปริมาตรใช้งานของถังเท่ากับ 300 ลิตร โดยมีค่า ซีโอดี (T-COD) ของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบอยู่ในช่วง  $116 \pm 45$  -  $169 \pm 49$  มิลลิกรัมต่อลิตร บีโอดี (T-BOD) เท่ากับ  $59 \pm 22$  -  $99 \pm 36$  มิลลิกรัมต่อลิตร ไนโตรเจนรวม (TN) เท่ากับ  $14 \pm 4$  -  $21 \pm 5$  มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร แอมโมเนีย  $7.3 \pm 1.9$  -  $12.7 \pm 3.3$  มิลลิกรัม-ไนโตรเจนต่อลิตร และ ฟอสฟอรัสรวม (TP) เท่ากับ  $1.8 \pm 0.2$  -  $2.6 \pm 0.5$  มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัสต่อลิตร โดยกำหนดค่ากักน้ำ (HRT) ประมาณ 11 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนนี้สามารถบำบัด ซีโอดี ไนโตรเจนรวม และฟอสฟอรัสรวม อยู่ในช่วงร้อยละ 83-91 78-90 และ 69-82 ตามลำดับ ซึ่งจากการศึกษาสรุปผลได้ว่า ระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ทำให้มีกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นทำให้ สามารถบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้เพิ่มมากขึ้น



Kimura, Ogyu et al. (2015) ศึกษาองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดการอุดตันของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนขนาดต้นแบบสำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้เทคนิค Fourier transform infrared (FTIR) สำหรับวิเคราะห์การอุดตันของเมมเบรน ชนิดของโพลีเมอร์เมมเบรนที่ใช้เป็นแบบเส้นใยกลวง (Hollow-fiber membranes) ทำจากวัสดุ (Polyvinylidene difluoride , PVDF) ขนาดรูพรุน 0.4 ไมโครเมตร แบ่งระยะเวลาการศึกษาของการอุดตันออกเป็น 3 ช่วง คือ 1 วัน 8 วัน และ 24 วัน โดยกำหนดให้วันที่ 1 เป็นช่วงแรกของการวิเคราะห์และวันที่ 24 เป็นช่วงสุดท้ายของการทดลอง พบว่า องค์ประกอบสารที่ก่อให้เกิดการอุดตัน คือ โพลีแซคคาไรด์และโปรตีน

Yin, Meng et al. (2015) ศึกษาลักษณะของสาร (Extracellular Polymeric Substances, EPS) จากแอมโมเนียออกซิไดซ์ซึ่งแบคทีเรีย (AOBs) โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มทดลองคือ Aerobic ammonium oxidizing bacteria (AerAOB) และ anaerobic ammonium oxidizing bacteria (AnAOB) ใช้หลักการความเข้มของแสงในการชี้วัดปริมาณของ EPS พบว่า AerAOB มีความเข้มข้นโพลีแซคคาไรด์ของ EPS เท่ากับ  $31.74 \pm 1.48$  mg/g-VSS และ AnAOB  $30.12 \pm 1.52$  mg/g-VSS ตามลำดับ ใช้เทคนิค (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) ในการวิเคราะห์ลักษณะองค์ประกอบของ EPS ที่แบคทีเรียกลุ่ม AOBs มีส่วนประกอบของเอไมด์และโพลีแซคคาไรด์ ซึ่งเป็นแถบของ EPS

Hu, Wang et al. (2016) ศึกษาพฤติกรรมที่ทำให้เกิดการอุดตันของเมมเบรนและการสะสมของชั้นเค้กบริเวณผิวหน้าเมมเบรนในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน โดยเปรียบเทียบกับตะกอนไม่จมตัว (Bulk Sludge) ทำการวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณ ขนาดอนุภาค องค์ประกอบทางเคมี และอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนจุลินทรีย์ ผลการศึกษาพบว่า มีสารที่มีลักษณะเหมือนเส้นใยโครงข่ายเชื่อมเซลล์จุลินทรีย์ให้รวมกันเป็นกลุ่มตะกอนสลัดจ์ขนาดใหญ่ และองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนที่ทำให้เกิดการอุดตันที่ตรวจพบเป็นหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ ได้แก่ โพลีแซคคาไรด์ โปรตีน และกรดฮิวมิก ซึ่งสารเหล่านี้ได้เข้าไปอุดตันที่ผิวหน้าของเมมเบรนในระหว่างการกรองน้ำ

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 พื้นที่วิจัย

การศึกษานี้ดำเนินการทดลอง ณ บริเวณอาคารจุลจักรพงษ์ ซึ่งเป็นอาคาร 4 ชั้น อยู่ติดด้านหลังของศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ถูกใช้เป็นพื้นที่สำหรับติดตั้งและเดินระบบบำบัดน้ำเสียโดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน

วิเคราะห์การทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ หลักสูตรสหสาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ชั้น 17 อาคารมหามกุฏ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัตถุประสงค์ผลของการเติม-หยุดเติมอากาศที่มีสัดส่วนแตกต่างกันต่อการบำบัดน้ำเสีย จากอาคาร ไม่มีการเวียนตะกอนจุลินทรีย์จากส่วนเติมอากาศกลับมายังในส่วนไร้อากาศ จากนั้น จึงทำการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ และต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าของระบบบำบัดน้ำเสีย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.2.1 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียนที่ใช้ครั้งนี้ ได้รับการออกแบบ และวางแผน การเดินระบบโดย รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล มีรายละเอียด ดังนี้ แสดงในรูปที่ 11

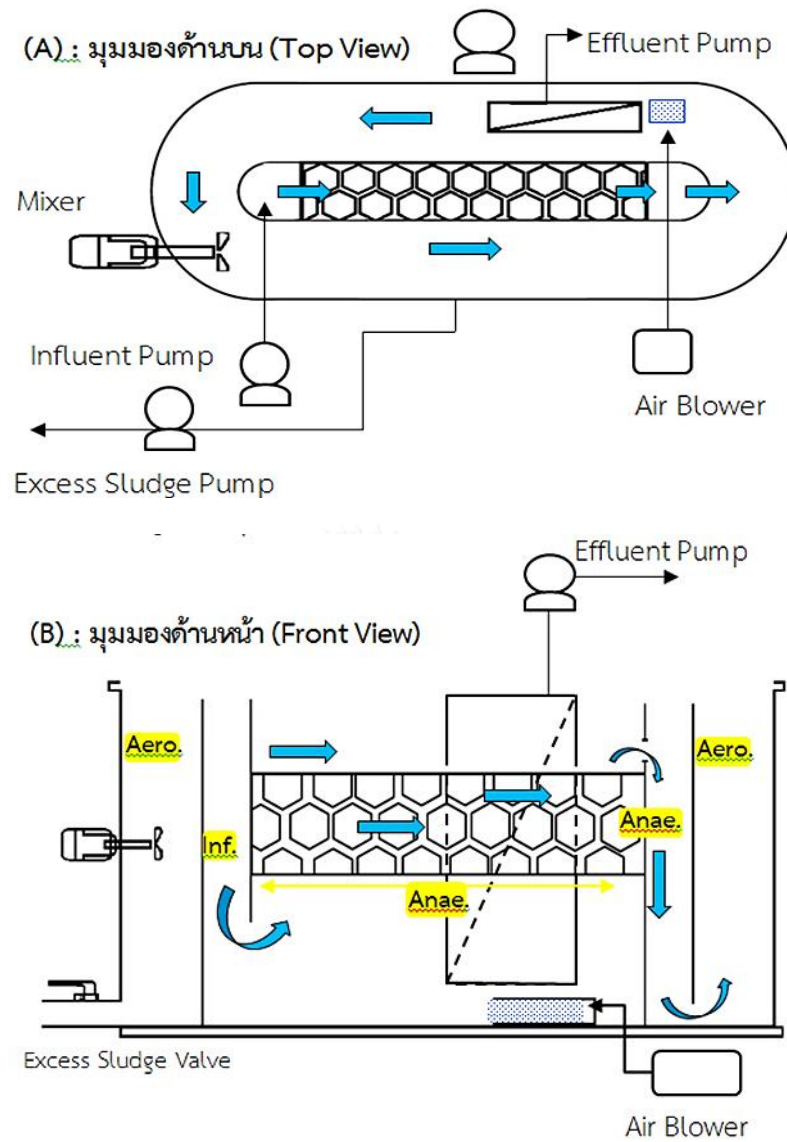


รูปที่ 11 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน




1. รูปแบบมีลักษณะเป็นทรงวงรีแบบคลองวนเวียนทั่วไป ขนาด 1 x 2.8 เมตร สูง 1.8 เมตร ปริมาตรรวมทั้งหมดเท่ากับ 5.04 ลูกบาศก์เมตรโดยส่วนที่ใช้สำหรับการทดลองมีปริมาตร 4.20 ลูกบาศก์เมตร โดยมีลูกลอย ทำหน้าที่กำหนดและควบคุมระดับน้ำที่การเติมเข้าสู่ระบบ โดยถังปฏิกรณ์แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนน้ำเสียเข้าระบบ ส่วนไร้อากาศ และส่วนเติมอากาศ แสดงในรูปที่ 12

2. แผ่นกั้นแบบเอียง ติดตั้งในส่วนไร้อากาศ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เป็นวัสดุเกาะยึดของกลุ่มจุลินทรีย์หรือจุลชีพที่ไม่ใช้อากาศ กรองตะกอนแขวนลอยก่อนเข้าสู่ส่วนเติมอากาศ

3. มอเตอร์และใบพัดกวนตะกอน ทำหน้าที่กวนผสมน้ำที่มีสารอินทรีย์และตะกอนจุลินทรีย์ ในส่วนเติมอากาศเพื่อให้ประสิทธิภาพการรวมตะกอนได้อย่างทั่วถึงทั้งถังปฏิกรณ์



รูปที่ 12 แบบจำลองถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวงเวียน

- หมายเหตุ
- Aero. : ส่วนเติมอากาศ (Aerobic Zone)
  - Anae. : ส่วนไร้อากาศ (Anaerobic Zone)
  - Inf. : ส่วนน้ำเข้าระบบ (Influent)
  - leff. : ส่วนน้ำไหลออกจากส่วนไร้อากาศ
  -  : ไมโครฟิลเตอร์ชั้นเมมเบรน
  -  : หัวฟุ้งกระจายอากาศ (Tube Diffuser)
  -  : ชุดแผ่นกั้น

#### 4. ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน (Microfiltration Membrane : MF)

ที่ได้รับการสนับสนุนจาก บริษัทมิตซูบิชิ เรยอน.แสดงในรูปที่ 13 มีรายละเอียด ดังนี้

-ชื่อทางการค้า : SteraporeTM5000 series (The pvdf hollow-fiber membrane)

-รุ่น : SADF0690

-วัสดุที่ใช้ผลิตเมมเบรน : Polyvinylidene Fluoride (PVDF)

-ขนาดรูพรุน : 0.4 ไมโครเมตร

-พื้นที่ผิวเมมเบรน : 6 ตารางเมตร

-อัตราการกรองน้ำสูงสุด : 5 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน



รูปที่ 13 ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน (Microfiltration Membrane ; MF)

### 3.2.2 เครื่องสูบน้ำ

1. เครื่องสูบน้ำแบบจุ่ม (Submersible Pump) ยี่ห้อ WORMAC รุ่น PRF ขนาด 0.5 แรงม้า ใช้สำหรับการสูบน้ำเสียเข้าสู่ส่วนน้ำเข้าของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน
2. เครื่องสูบน้ำแบบชัก (Piston Pump) ยี่ห้อ WORMAC รุ่น WORM GEAR REDUCER ขนาด 0.5 แรงม้า ใช้สำหรับสูบน้ำออกจากส่วนเติมอากาศผ่านเมมเบรน
3. เครื่องสูบน้ำแบบเครื่องหอยโข่งเป็นชนิดไม่ล่อน้ำ (Self-Priming Pump) ยี่ห้อ YE รุ่น IE100BASS ขนาด 1 แรงม้า ใช้สำหรับเวียนตะกอนจุลินทรีย์จากส่วนเติมอากาศเข้าสู่ส่วนไร้อากาศ และจากส่วนไร้อากาศออกสู่ส่วนเติมอากาศ
4. เครื่องปั๊มน้ำแบบอัตโนมัติ ยี่ห้อ มิทซูบิชิ MITSUBISHI รุ่น WP-105QS ขนาด 100 วัตต์ ใช้สำหรับปั๊มน้ำออกจากถังเก็บน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว แสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 ปั๊มน้ำแบบอัตโนมัติ

ที่มา: [http://millennium-vrp.tarad.com/product.detail\\_878248\\_th\\_4419009#](http://millennium-vrp.tarad.com/product.detail_878248_th_4419009#.). (2556)

### 3.2.3 ระบบเครื่องเติมอากาศ (Aerator)

1. เครื่องเติมอากาศ ยี่ห้อ มิตซูบิชิ รุ่น Super Liner ขนาด 0.5 แรงม้า แสดงในรูปที่ 15
2. หัวฟู่กระจายอากาศ (Tube Diffuser) ยี่ห้อ LONGTECH รุ่น LTF -275 แสดงในรูปที่ 16 เป็นแบบฟองอากาศละเอียด (fine bubble)
3. อินเวอร์เตอร์ เป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับการปรับเพิ่ม-ลดความเร็วรอบมอเตอร์ของเครื่องเติมอากาศ



รูปที่ 15 เครื่องเติมอากาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 16 หัวฟู่กระจายอากาศ (Tube Diffuser)

### 3.2.4 อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของระบบ

ประกอบด้วยเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการเข้า-ออกของน้ำเสียในระบบ มีรายละเอียด ดังนี้

#### 1. วาล์วลูกกลอย 2 ตัว

- มีหน้าที่ควบคุมระบบการจ่ายน้ำเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ เมื่อน้ำในถังมีระดับลดลงจากระดับเดิม 5 เซนติเมตร เครื่องสูบน้ำจะทำการสูบน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ และเครื่องสูบน้ำจะสูบน้ำออกจากส่วนเติมอากาศผ่านเมมเบรนโดยตั้งเวลาการกรองผ่านเมมเบรนที่ 50 นาที และหยุด 10 นาที จนกระทั่งระดับน้ำลดลง 5 เซนติเมตร จากนั้นเครื่องสูบน้ำจะทำการสูบน้ำเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ จนกระทั่งถึงระดับที่ตั้งไว้อีกครั้ง

- มีหน้าที่ควบคุมระดับน้ำในถังเก็บน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว เมื่อน้ำเต็มถึงระดับปริมาตรสูงสุดของถังเก็บน้ำระบบจะหยุดการกรองน้ำออกจากระบบ

#### 2. วาล์วมือ 4 ตัว

- ใช้สำหรับปรับอัตราการไหลของน้ำที่กรองผ่านเมมเบรน โดยอัตราการไหลเข้า-ออกจากระบบมีค่าเท่ากัน

- ใช้สำหรับระบายตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกินโดยแบ่งออกเป็น 2 ตัว ติดตั้งอยู่บริเวณต่ำสุด ของถังปฏิกรณ์และท่อที่ต่อแยกมาจากระบบเวียนตะกอน

- ใช้สำหรับเวียนตะกอนจากส่วนเติมอากาศมายังส่วนไร้อากาศ

#### 3. ไทม์เมอร์ 4 ตัวโดยแบ่งการควบคุมที่แตกต่างกัน ดังนี้

- ควบคุมมอเตอร์ใบกวนในถังปฏิกรณ์

- ควบคุมเครื่องสูบน้ำที่เติมน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์

- ควบคุมเครื่องสูบน้ำที่กรองน้ำออกจากเมมเบรนเข้าสู่ถังเก็บน้ำ

- ควบคุมการเติม-หยุดเติมอากาศของเครื่องเติมอากาศ



### 3.2.5 น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัย

น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียจริงจากบ่อกักน้ำเสียของอาคารจุลจักรพงษ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาคารจุลจักรพงษ์ น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยเป็นน้ำเสียจากห้องสุขาและอ่างล้างมือ ซึ่งถูกใช้เป็นตัวแทนของน้ำเสียจากอาคารสูง

การรวบรวมน้ำเสีย เครื่องสูบน้ำจะสูบน้ำเสียขึ้นจากบ่อกักน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ สามารถเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่จะทำการวิเคราะห์ได้ทันที ปริมาตรของน้ำที่เข้าระบบเท่ากับน้ำที่ออกจากระบบและมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 165 - 308 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นไม่คงที่แปรผันตรงกับจำนวนและปริมาณการใช้น้ำของผู้ใช้อาคารแห่งนี้

### 3.2.6. การทำงานของถังปฏิกรณ์

ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบคลอววนเวียนที่ใช้ในการวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

1. การจ่ายน้ำเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ เครื่องสูบน้ำจะสูบน้ำเสียจากบ่อกักเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ โดยเริ่มจากเข้าส่วนพักน้ำก่อน จากนั้นจึงเข้าสู่ส่วนไร้อากาศ และส่วนเติมอากาศ ตามลำดับ ชุดเมมเบรนโมดูล ติดตั้งในส่วนของส่วนเติมอากาศและจุ่มอยู่ใต้น้ำประกอบด้วย ไมโครฟิลเทรชันเมมเบรน (Microfiltration Membrane : MF) มีหน้าที่ในการกรองน้ำถูกต่อเข้ากับท่อของเครื่องสูบน้ำแบบชักเพื่อสูบน้ำออกจากเมมเบรน ซึ่งชุดเมมเบรนนี้สามารถถอดแยกออกล้างทำความสะอาดได้ หลังจากกระบวนการกรองน้ำสิ้นสุดลงจะมีค่าสูญเสียความดัน (Head Loss) หากมีมากเกินไป จะทำให้ประสิทธิภาพการกรองของเมมเบรนลดต่ำลง ต้องหยุดการกรองน้ำ โดยทั่วไปจะนำเมมเบรนออกมาล้างทำความสะอาดเมื่อค่าความดันการกรองของเครื่องสูบน้ำเท่ากับ 100 กิโลปาสกาล และอัตราการกรองน้ำสามารถปรับได้ด้วยวาล์วมือที่ต่อกับท่อสูบน้ำออก

2. ส่วนไร้อากาศมีชุดแผ่นกั้นหลายแผ่นทำมุมเอียง 40 องศากับแนวนอน เพื่อทำหน้าที่ในการดักกักตะกอนขนาดเล็กและให้จุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศยึดเกาะ และแผ่นเอียงจะส่งผลให้การไหลของน้ำจากจุดที่น้ำเสียที่เข้าระบบผ่านส่วนไร้อากาศนี้ไปยังส่วนเติมอากาศอย่างช้าๆ

3. ระบบเติมอากาศ ประกอบด้วยหัวฟู่กระจายอากาศ 2 ตัว เป็นรูปตัวแอล “L” ติดตั้งอยู่ใต้เมมเบรนขนานในทิศทางตามการไหลของน้ำในส่วนเติมอากาศ หัวฟู่กระจายอากาศต่อเข้ากับท่อจ่ายอากาศ ปรับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องเติมอากาศด้วยอินเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมค่าออกซิเจนละลาย และปรับรอบเวลาการเติม-หยุดเติมอากาศเป็นช่วงๆ ด้วยไมโครเมอร์
4. การกวนผสม ใบกวนถูกติดตั้งในส่วนเติมอากาศมีหน้าที่ในการกวนผสมควบคู่ไปกับการผลักดันน้ำให้เกิดการไหลเวียนไปทั่วถึงปฏิกรณ์ ควบคุมรอบการกวนให้อยู่ในช่วง 25-30 รอบต่อวินาที
5. ไม่มีการเวียนตะกอนเข้าส่วนไร้อากาศที่มีแผ่นกั้น
6. การระบายตะกอนจุลินทรีย์ออกจากถังปฏิกรณ์ทุกวัน ปริมาตร 75 ลิตรต่อวัน โดยใช้วาล์วมือที่ต่อจากท่อเวียนตะกอน



### 3.3 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย

#### ตัวแปรอิสระ

1. รอบการเติม-หยุดเติมอากาศ (On/Off Aeration Time) เติมอากาศตลอดเวลา, 60/60, 40/80, 30/90, 80/40, 90/30 นาที

#### ตัวแปรตาม

1. อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส (Organic Nitrogen and Phosphorus loading)
2. ความเข้มข้นของซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในน้ำที่ออกจากระบบ
3. ความเข้มข้นของจุลชีพในระบบ
4. ค่าความดันที่สูญเสียในกระบวนการกรองด้วยเมมเบรน

#### ตัวแปรควบคุม

1. ความเร็วน้ำ (Flow Rate) 0.3 เมตรต่อวินาที
2. รอบเวลาการทำงานของเครื่องสูบน้ำจากเมมเบรน 50 นาที และหยุด 10 นาที
3. ปริมาตรออกซิเจนละลายภายในถังปฏิกรณ์ 3.0-4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. ค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือพีเอช (pH) 6.5-8.5
5. ค่าฟลักซ์การกรองน้ำผ่านไมโครฟิลเทรชันเมมเบรนแปรผันในระหว่างการทดลอง
6. ไม่มีการเวียนตะกอนจากส่วนเติมอากาศกลับมายังส่วนไร้อากาศ

### 3.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

เริ่มต้นการเดินระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพโดยใช้กากตะกอนน้ำเสีย (สลัดจ์) จากส่วนเวียนตะกอน ของโรงควบคุมคุณภาพน้ำสีพระยา สำนักงานระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร เติมเข้าสู่ส่วนเติมอากาศของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน ปริมาตร 750 ลิตร เดินระบบภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 7 วัน ในช่วงนี้ไม่มีการกรองน้ำออกจากระบบ เพื่อปรับสภาพการทำงานของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ จากนั้น เดินระบบอย่างต่อเนื่องจนเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) และควบคุมพีเอช ปริมาณการทิ้งตะกอน และออกซิเจนละลายน้ำมีค่าไม่ต่ำกว่า 2.0-3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้เหมาะสมต่อการสร้างพลังงานในกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) และกระตุ้นการสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

#### 3.4.1 ศึกษาการอุดตันของเมมเบรน (Membrane Fouling)

การเดินระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน เมื่อเริ่มกรองน้ำผ่านเมมเบรน จะทำให้ตะกอนจุลินทรีย์เข้าสะสมและอุดตันที่ผิวหน้าและภายในรูพรุนของเมมเบรน จนส่งผลทำให้ อัตราการกรองน้ำและปริมาณน้ำที่ออกจากระบบมีจำนวนลดลง รวมถึงทำให้ค่าระยะเวลากักพักน้ำ (HRT) ของระบบนานขึ้น ดังนั้น จึงต้องมีการศึกษาการอุดตันของเมมเบรน เพื่อหาสาเหตุของการอุดตัน

1. ลักษณะพื้นผิวหน้าเมมเบรนและสัณฐานวิทยา ตรวจสอบลักษณะของกลุ่มของเซลล์จุลินทรีย์ที่เข้าเกาะติดบริเวณบนผิวหน้าเมมเบรนและรูปร่างสัณฐานวิทยา โดยนำเมมเบรนที่ติดตั้งในส่วนเติมอากาศ นำไปวิเคราะห์การอุดตันด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) และตรวจสอบลักษณะตะกอนจุลินทรีย์ในส่วนเติมอากาศโดยกล้องจุลทรรศน์แบบคอมพาวนด์

2. การตรวจสอบขนาดอนุภาคของตะกอนจุลินทรีย์ โดยนำตะกอนสลัดจ์ในส่วนเติมอากาศของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเมมเบรน เพื่อวิเคราะห์ขนาดของตะกอนที่เป็นสาเหตุของการอุดตันด้วยเครื่อง laser-particle size analyzer

3. วิเคราะห์องค์ประกอบโมเลกุลสารที่ก่อให้เกิดการอุดตันของเมมเบรน โดยนำตะกอนจุลินทรีย์ที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรนไปอบเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR).

### 3.4.2 ศึกษาผลของช่วงเวลาการเติม-หยุดเติมอากาศ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส

กำหนดสัดส่วนของการเติม-หยุดเติมอากาศ (On/Off Aeration Time) ที่แตกต่างกัน คือเติมอากาศตลอดเวลา 60/60 40/80 30/90 80/40 90/30 นาที แบ่งออกเป็น 6 ชุดการทดลอง โดยใช้รอบการเติม-หยุดเติมอากาศเป็นช่วงๆ เท่ากับ 120 นาที แสดงในตารางที่ 3 รอบเวลาการทำงานของเครื่องสูบน้ำจากเมมเบรน 50 นาที และหยุด 10 นาที

กำหนดค่าตัวแปรต้น และตัวแปรควบคุมดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น เติมน้ำระบบต่อเนื่องจนเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) วิเคราะห์ผลการทดลองตามพารามิเตอร์ แสดงในตารางที่ 4 และจุดเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ แสดงในภาพที่ 17

ศึกษาความสัมพันธ์ของการเติม-หยุดเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส

ตารางที่ 3 สัดส่วนระยะเวลาการเติม-หยุดเติมอากาศ

การทดลอง	ช่วงระยะเวลา	
	การเติม-หยุดเติมอากาศ (นาที)	จำนวนรอบต่อวัน
1	เติมอากาศตลอดเวลา	0
2	60/60 (1:1)	12
3	40/80 (1:2)	12
4	30/90 (1:3)	12
5	80/40 (2:1)	12
6	90/30 (3:1)	12

#### ตารางที่ 4 พารามิเตอร์และวิธีการตรวจวิเคราะห์

พารามิเตอร์	ตำแหน่ง ในการเก็บตัวอย่าง	ความถี่ การวิเคราะห์	วิธีการวิเคราะห์
อัตราการกรองน้ำออก จากระบบ	Eff.	5 วัน/สัปดาห์	Cylinder
อุณหภูมิ	Inf. /Anae. /Aero. /Eff.	5 วัน/สัปดาห์	Thermometer
ออกซิเจนละลายน้ำ	Inf. /Anae. /Aero. /Eff.	5 วัน/สัปดาห์	DO Meter
พีเอช	Inf. /Anae. /Aero. /Eff.	5 วัน/สัปดาห์	Multi-meter (pH Prob.)
ซีโอดี	Inf. /Eff.	3 วัน/สัปดาห์	Close Reflux Method
เอ็มแอลเอสเอส	Aero.	3 วัน/สัปดาห์	Gravimetric Method
ทีเคเอ็น	*Inf. / Eff	2 วัน/สัปดาห์	Kjeldahl Method
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	*Inf. / Eff	2 วัน/สัปดาห์	Titrate
ไนโตรท์-ไนโตรเจน	*Inf. / Eff.	2 วัน/สัปดาห์	Colorimetric method
ไนเตรท-ไนโตรเจน	*Inf. / Eff	2 วัน/สัปดาห์	Brucine Method
ออร์โธฟอสเฟต	*Inf. / Eff.	2 วัน/สัปดาห์	Vanadomolybdate method
Total Coliform	Eff.	สิ้นสุดการทดลอง	Fecal Coliform Procedure 9221 E.
Fecal (E.Coli)	Eff	สิ้นสุดการทดลอง	Escherichia Coli Procedure 9221 F.

ที่มา: APHA (2012)

(APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for examination of water and wastewater.  
22<sup>nd</sup> 2012)

หมายเหตุ: ( \* ) = กรองน้ำตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์

Inf. = น้ำเข้าระบบ

Anae. = ส่วนไร้อากาศ

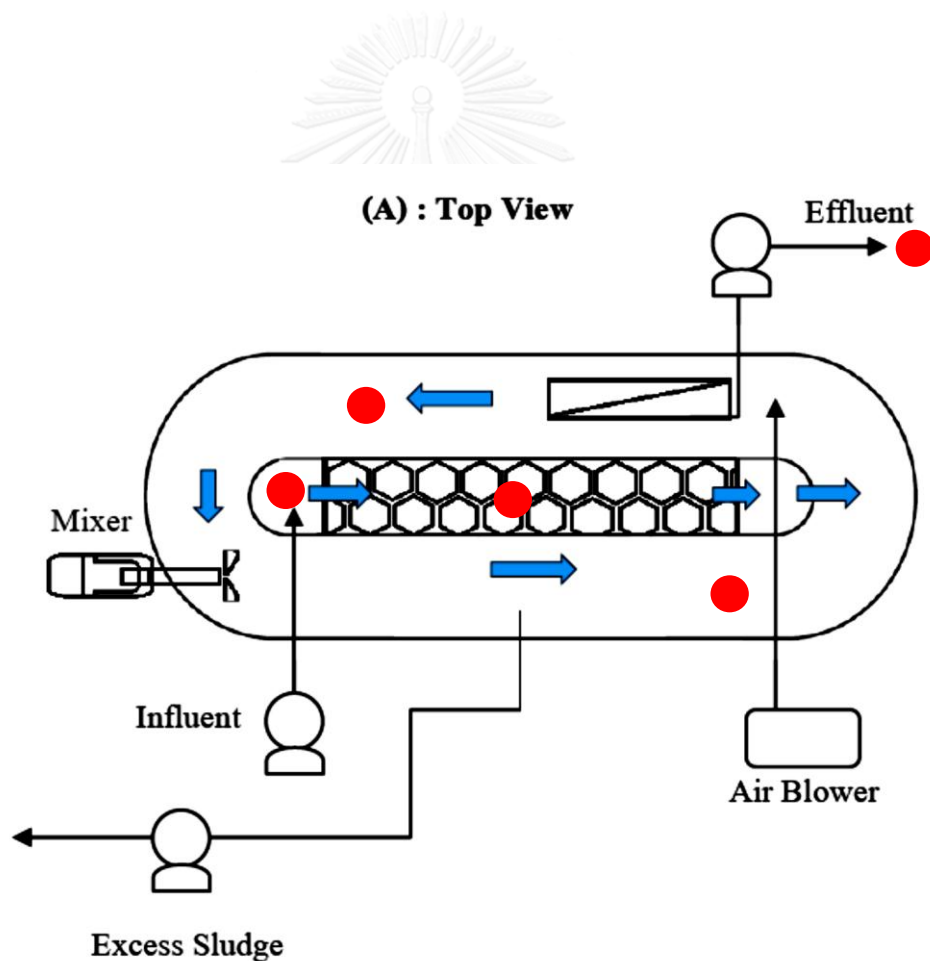
Aero. = ส่วนเติมอากาศ

Eff. = น้ำออกจากระบบ

### การวิเคราะห์ข้อมูล

ผลลัพธ์ในแต่ละพารามิเตอร์จากการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ นำมาคำนวณในรูปร้อยละ ประสิทธิภาพการบำบัด และรายงานผลออกมาเป็น ค่าเฉลี่ย  $\pm$  ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\text{ร้อยละการบำบัด} = \frac{(\text{ความเข้มข้นน้ำเสียเข้าระบบ} - \text{ความเข้มข้นน้ำเสียออกจากระบบ})}{\text{ความเข้มข้นน้ำเสียเข้าระบบ}} \times 100$$



รูปที่ 17 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างน้ำเสียสำหรับการวิเคราะห์

หมายเหตุ: ● ตำแหน่งจุดเก็บวิเคราะห์น้ำเสีย

### 3.4.3 คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน

ศึกษาคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน จากการศึกษา ที่ 3.4.2 และวิเคราะห์ความเหมาะสมในการนำกลับไปใช้สำหรับงานภูมิทัศน์ โดยนำมาวิเคราะห์ตามแนวทางของสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐฯ (U.S. Environmental Protection Agency; EPA)

### 3.4.4. การประเมินต้นทุนการใช้พลังงานในการเดินระบบ

การศึกษาต้นทุนค่าใช้จ่ายของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ โดยนำข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของระบบบำบัดน้ำเสีย จากการศึกษาผลของช่วงเวลาการเติม-หยุดเติมอากาศที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพการบำบัด อินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส มาใช้ในการประเมินต้นทุนค่าการใช้พลังงาน

#### 3.4.4.1 อัตราการใช้ไฟฟ้า

นำค่าพลังงานการใช้ไฟฟ้าของปั้มน้ำและมอเตอร์ในระบบมาคำนวณการใช้ไฟฟ้า จากนั้นนำไปเทียบกับค่าบริการการใช้ไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ประเภทที่ 2 (อัตราปกติ) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของกิจการขนาดเล็ก ได้แก่ ประกอบธุรกิจ ธุรกิจร่วมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรม หน่วยราชการ สำนักงาน หรือหน่วยงานอื่นใดของรัฐ แสดงในภาคผนวก ก

#### 3.4.4.2 ปริมาณน้ำเสียที่บำบัดได้

ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน ที่วัดได้ นำไปคำนวณค่าการใช้น้ำประปาของการประปานครหลวง ประเภทที่ 2 ธุรกิจ ราชการ รัฐวิสาหกิจ อุตสาหกรรม และอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ก (การประปานครหลวง, 2559)



### 3.4.4.3 การคำนวณค่าบำบัดน้ำเสีย

เมื่อได้ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในหัวข้อที่ 3.4.4.1 และปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดจากทดลอง นำมาคิดค่าบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน โดยการศึกษาครั้งนี้จะไม่นำค่าต้นทุนการก่อสร้างระบบมาคำนวณ ซึ่งสามารถหาได้จากสูตรคำนวณการบำบัดน้ำเสีย ดังนี้

$$\text{ค่าบำบัดน้ำเสีย} = \frac{(\text{ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/วัน)} + \text{ค่าสารเคมี (บาท/วัน)})}{\text{ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)}}$$

จากนั้น นำไปเปรียบเทียบกับการใช้น้ำประปาที่คำนวณได้จาก หัวข้อ 3.4.4.2 เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนสำหรับการนำน้ำกลับไปใช้ใหม่แทนการใช้น้ำประปา

## บทที่ 4

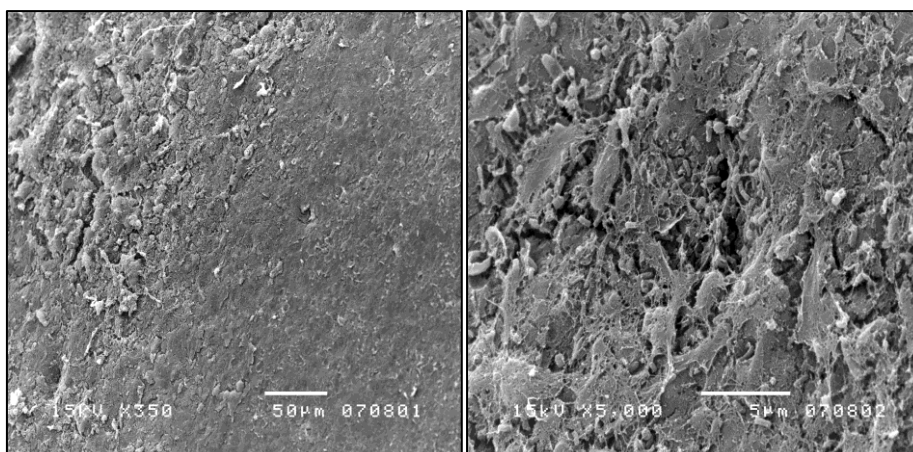
### ผล และวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการอุดตันของเมมเบรน

การนำเมมเบรนมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียเป็นเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดตะกอนแขวนลอยและสารละลายที่ไม่ต้องการออกจากระบบ นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการตกตะกอนอาศัยกลไกการคัดแยกตามขนาดของรูพรุน (Radjenović, Matošić et al., 2008) แต่กระบวนการกรองด้วยเมมเบรนยังคงมีข้อจำกัดในการเดินระบบคือ การอุดตันบนผิวหน้า และภายในรูพรุนของเมมเบรน (Interior pore blocking) ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้อากาศ ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์และสารแขวนลอยเข้าไปสะสมบริเวณผิวหน้าเมมเบรน จุลินทรีย์เหล่านี้จะเข้าไปเกาะยึดติดและก่อตั้งถิ่นฐานที่บนผิวหน้าเมมเบรนจนกระทั่งเกิดการอุดตัน ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้พื้นที่ช่องว่างรูพรุน อัตราการกรองน้ำของเมมเบรน และแรงดันการซึมผ่านของน้ำที่ผ่านการกรองลดลง ทำให้ค่าระยะเวลาพักน้ำ (HRT) ของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนเปลี่ยนแปลง (Wang, Yang et al., 2015) อายุการใช้งานของเมมเบรนลดลง ส่งผลต่อคุณภาพน้ำมีค่ามาตรฐานน้ำทิ้งเกินค่าที่กำหนดไว้ ดังนั้นจึงมีการศึกษาลักษณะของจุลินทรีย์ ขนาด รวมถึงสารองค์ประกอบของตะกอนจุลินทรีย์ (สลัดจ์) เพื่อให้เกิดความเข้าใจในเรื่องการอุดตันของเมมเบรน

##### 4.1.1 ลักษณะพื้นผิวหน้าเมมเบรนและสัณฐานวิทยา

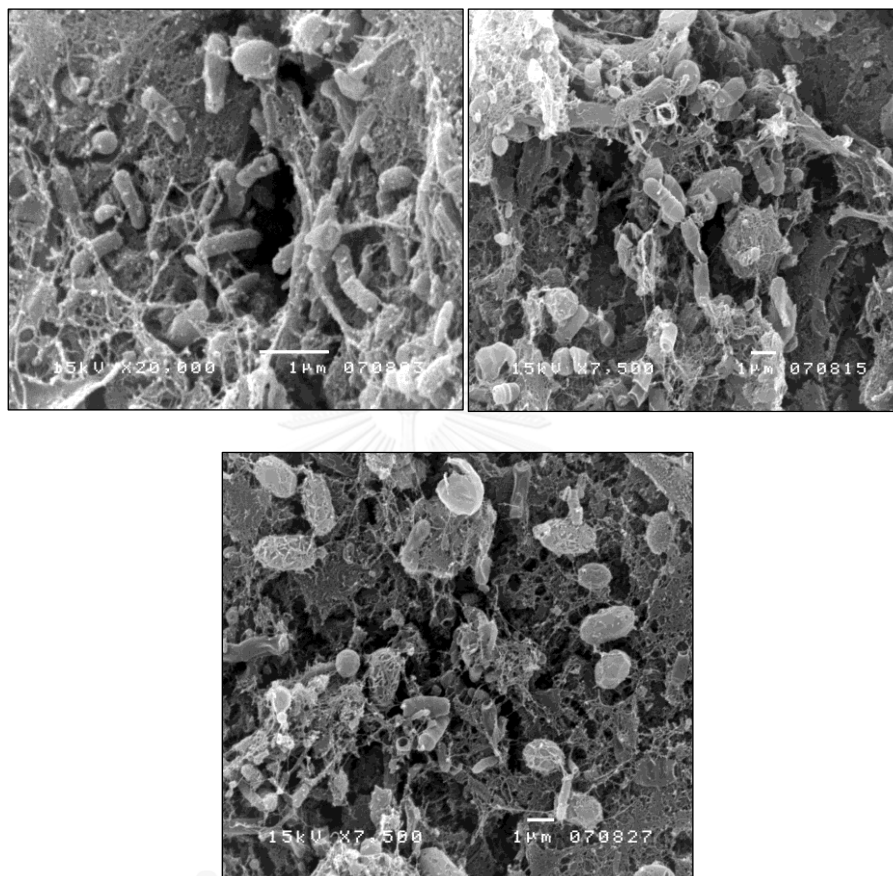
การตรวจสอบกลุ่มของเซลล์จุลินทรีย์จะเข้าเกาะติดที่บริเวณบนผิวหน้าเมมเบรนเมื่อเริ่มต้นการกรองน้ำ ปล่อยสารเหนียวเคลือบที่พื้นผิวขรุขระของเมมเบรนเป็นชั้นฟิล์มเจล หรือชั้นเค้กบางๆ (Cake layer) และเมื่อระยะเวลาการกรองเพิ่มขึ้นจะมีการเกาะติดอย่างหนาแน่นมากเกิดจากการเหนียวน้ำให้จุลินทรีย์เซลล์อื่นเข้ามายึดเกาะและสะสมบนผิวหน้าวัสดุจนกระทั่งบริเวณนั้นกลายเป็นชั้นฟิล์มชีวภาพหรือเรียกกันว่า ไบโอฟิล์ม (Biofilm) แสดงในรูปที่ 18 ซึ่งไบโอฟิล์มที่ปกคลุมบนผิวหน้าเมมเบรนจะเพิ่มแรงต้านการซึมผ่านของน้ำเพอมีเอทและทำให้ค่าฟลักซ์การกรองน้ำลดลง



รูปที่ 18 ไบโอฟิล์มที่ปกคลุมบริเวณผิวหน้าเมมเบรน

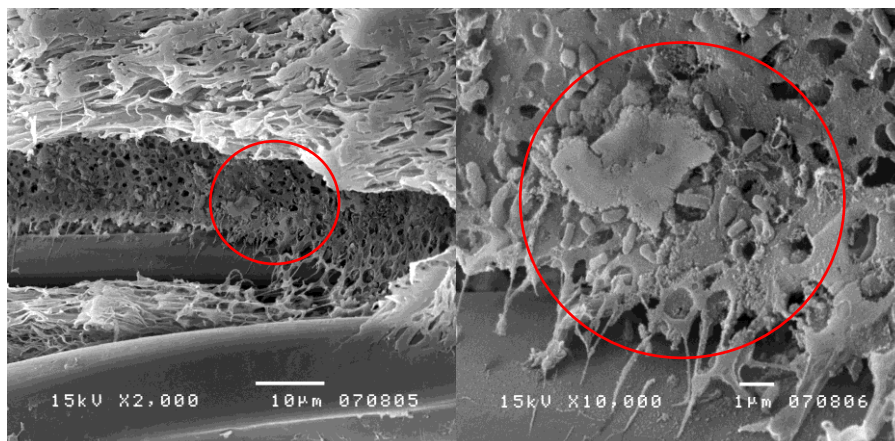
การวิเคราะห์รูปร่างของจุลินทรีย์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ; SEM) จำแนกเป็น 2 รูปแบบ คือ ทรงกลม ทรงรี (Spherical) และแบบแท่งยาวทรงกระบอก (Rod) จุลินทรีย์รวมกลุ่มกันเป็นชั้นฟิล์มชีวภาพ แสดงในรูปที่ 19 จุลินทรีย์ที่อยู่ในส่วนเติมอากาศของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนและบนพื้นผิวหน้าเมมเบรน จะผลิตสารเหนียวที่มีคุณสมบัติเสมือนกาวทำหน้าที่ช่วยในการเกาะยึดระหว่างเซลล์จุลินทรีย์หลายๆ เซลล์ไว้ด้วยกัน รวมถึงปกป้องตัวเองและภายในกลุ่มจุลินทรีย์ เรียกว่า Extracellular Polymeric Substances (EPS) เป็นโพลิเมอร์ภายนอกเซลล์ โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ ที่ปล่อยออกมา เป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยมีโพลีแซกคาไรด์ และโปรตีน เป็นส่วนประกอบหลัก และสารประกอบอื่นๆ เช่น กรดฮิวมิก กรดนิวคลีอิก ไลพิด กรดยูโรนิก โดยองค์ประกอบเหล่านี้ก็เป็นส่วนประกอบของ EPS ที่อยู่ในตะกอนกลุ่มจุลินทรีย์ด้วย (Lin, Zhang et al., 2014) การสังเคราะห์ EPS ของจุลินทรีย์ เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) สารอินทรีย์คาร์บอนในรูปแบบของคาร์โบไฮเดรตและไนโตรเจนในรูปแบบของเกลือแอมโมเนียม กรดอะมิโน เป็นแหล่งพลังงานของเซลล์จุลินทรีย์ โดยน้ำที่จากอาคารมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์คาร์บอน และธาตุอาหารไนโตรเจนซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่จำเป็นของจุลินทรีย์

อย่างไรก็ตาม ปริมาณสาร EPS ที่สามารถผลิตได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของจุลินทรีย์ โดยการศึกษาี้จำแนกเพียงลักษณะรูปร่างของแบคทีเรียเท่านั้นไม่ได้ตรวจสอบสายพันธุ์ของจุลินทรีย์ในระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีผลต่อการสร้างชั้นแค้กและการอุดตันภายในรูพรุน



รูปที่ 19 ลักษณะรูปร่างจุลินทรีย์

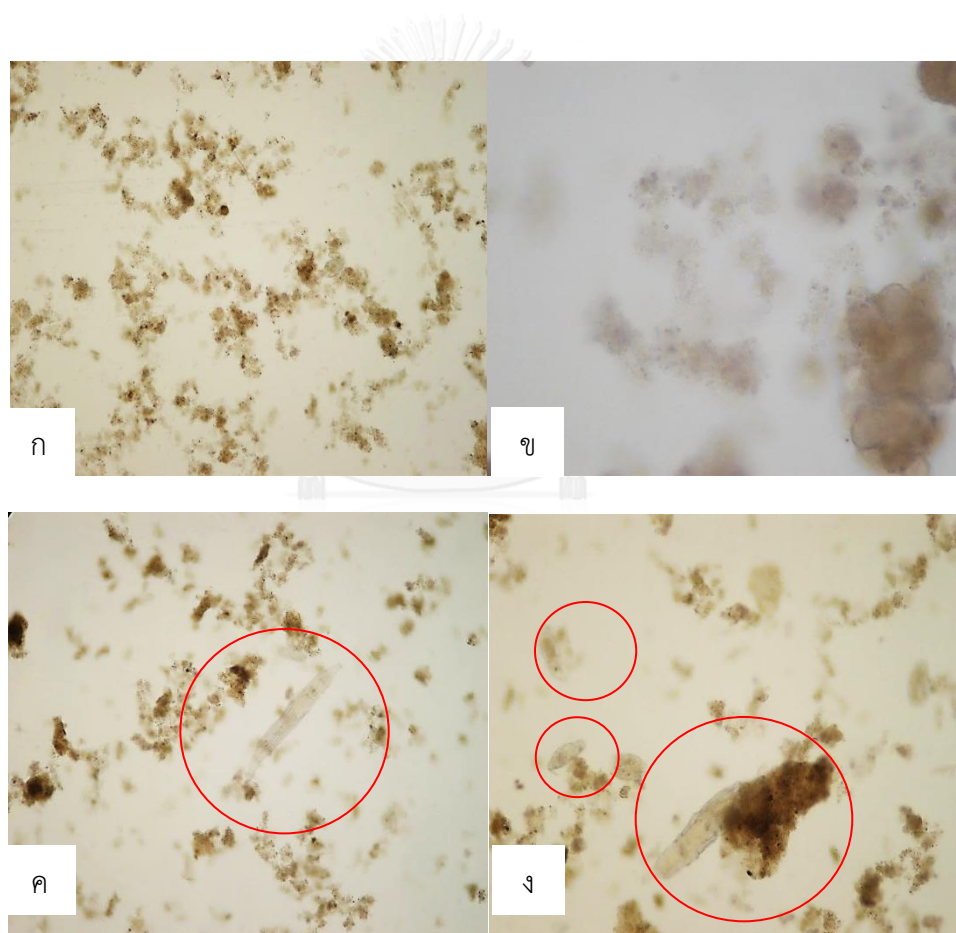
อนุภาคตะกอนขนาดเล็กที่เพิ่มจำนวนในส่วนเติมอากาศก่อให้เกิดการสะสมเป็นชั้นแค้กบนผิวหน้าเมมเบรนได้ง่ายขึ้น ตะกอนเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ผ่านผิวหน้าเมมเบรนเข้าไปอุดตันภายในช่องว่างระหว่างรูพรุนและทำให้แรงดันการกรองน้ำเพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 20 การดูดตันจากตะกอนจุลินทรีย์ภายในรูพรุนของเมมเบรน

การตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบคอมพาวนด์ พบว่า ตะกอนจุลินทรีย์มีลักษณะกระจุกกระจายเป็นตะกอนแขวนลอยขนาดเล็กและแตกตัวเป็นคอลลอยด์ไม่จับตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ แสดงในรูปที่ 21 การแตกกระจายของกลุ่มตะกอนจุลินทรีย์ อาจมีสาเหตุจากสภาวะการเดินระบบของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียนไม่เหมาะสมต่อการสร้างก้อนตะกอนจุลินทรีย์ทั้งทางกายภาพและชีวภาพ กล่าวคือ จุลินทรีย์สามารถยึดเกาะกันระหว่างเซลล์และเกาะกลุ่มรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่เมื่อมีพีเอชที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ EPS ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 5.5 - 6.5 โดยพีเอชเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้จุลินทรีย์สังเคราะห์ EPS เมื่อพีเอชลดลงต่ำกว่า 2-3 หรือ มากกว่า 10 จะมีผลต่อการสังเคราะห์ EPS ทำให้ตะกอนไม่จับตัวรวมกันเป็นก้อนใหญ่ จากการทดลองเรื่องสัดส่วนการเติม-หยุดเติมอากาศ พบว่า ในการทดลองที่ 1 มีการเติมอากาศตลอดเวลา ทำให้พีเอชของส่วนเติมอากาศลดต่ำมีลงเฉลี่ยเท่ากับ 5.5 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 4.3 ส่งผลให้ตะกอนจุลินทรีย์ มีลักษณะแตกกระจาย สันนิษฐานว่าอาจจะมีปริมาณความเข้มข้นของ EPS ค่อนข้างต่ำ ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนมีการติดตั้งท่อกระจายอากาศแบบฟองละเอียด (fine bubble) และกำหนดความเร็วของการไหลเวียนกระแสน้ำมีค่าเท่ากับ 0.3 เมตรต่อวินาที ซึ่งทั้ง 2 ปัจจัยนี้มีอิทธิพลต่อลักษณะตะกอน เช่น ขนาด ความทนทานต่อการแตกตัว การยึดเกาะระหว่างกันระหว่างเซลล์ทั้งแบบชั่วคราวและถาวร เป็นต้น โดยแรงเฉือนที่เกิดจากฟองอากาศและการความแปรปรวนของน้ำในระบบ เป็นสาเหตุทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ (ฟล็อก) แตกกระจายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็ก (De Temmerman, Maere et al., 2015)

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการเติมอากาศบริเวณด้านล่างของเมมเบรนจะเป็นวิธีในการป้องกันการยัดเกาะของจุลินทรีย์ที่ผิวหน้าของเมมเบรน แต่ก็ส่งผลกระทบต่อการทำงานของกลุ่มฟล็อก ความแปรปรวนของกระแสที่ไหลเวียนในส่วนเติมอากาศของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพมีโอกาสเกิดรูปแบบกระบวนการกรองเมมเบรนแบบการกรองน้ำที่ทิศทางไหลแบบปิดตาย (Dead end filtration) และการกรองแบบไหลขวาง (Cross flow filtration) พร้อมกันในระบบ ซึ่งตามทฤษฎีรูปแบบการกรองที่เหมาะสมต่อกระบวนการเมมเบรนในสภาวะที่สารป้อนมีความเข้มข้นสูง เป็นแบบการกรองแบบไหลขวาง (ผกาวิดี แก้วกันเนตร, 2554)

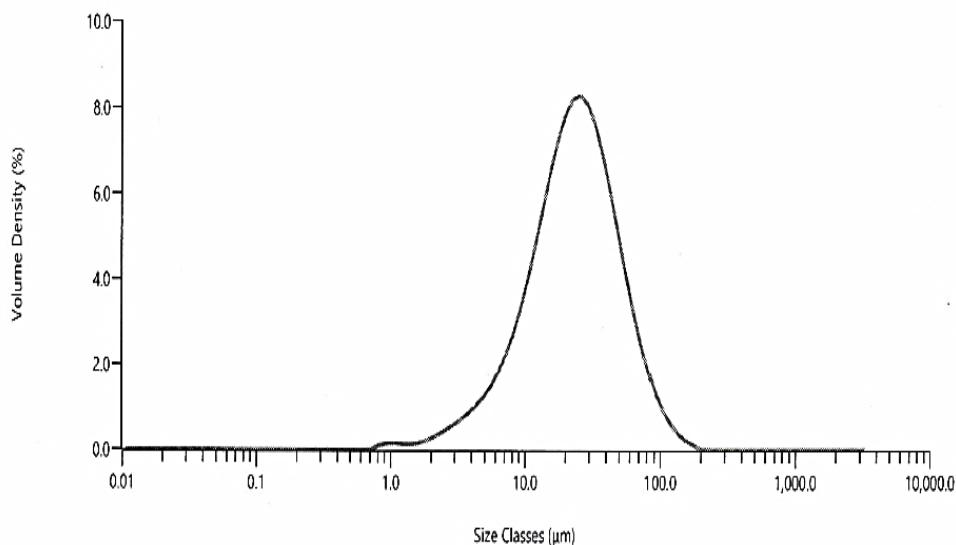


**รูปที่ 21** ก,ข ลักษณะตะกอนจุลินทรีย์ ค,ง จุลชีพที่พบในส่วนเติมอากาศของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์

#### 4.1.2 ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคของตะกอนจุลินทรีย์

การแบ่งขนาดอนุภาคของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบจากส่วนเติมอากาศ และน้ำที่ออกจาก ระบบ โดยเครื่อง laser-particle size analyzer พบว่าตะกอนที่มาจากส่วนเติมอากาศมีขนาด อนุภาคอยู่ในช่วง 0.767-163 ไมโครเมตร แสดงในรูปที่ 22 โดยมี D [3,2] หรือค่าเฉลี่ยเส้นผ่าน ศูนย์กลางอนุภาคในเชิงพื้นที่ผิวเท่ากับ 14.4 ไมโครเมตร และค่า D [4,3] หรือค่าเฉลี่ยเส้นผ่าน ศูนย์กลางอนุภาคในเชิงปริมาตรเท่ากับ 29.0 ไมโครเมตร จากผลลัพธ์ทางสถิติพบว่าขนาดอนุภาค ของฟล็อก ที่ Dv (10) Dv (50) Dv (90) มีขนาดเท่ากับ 7.59 23.1 และ 57.4 ไมโครเมตร โดยมีขนาดที่เล็กสุดเท่ากับ 0.767 ไมโครเมตร และขนาดใหญ่ที่สุดเท่ากับ 163 ไมโครเมตร เมื่อเทียบกับขนาดรูพรุนของเมมเบรนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีขนาดเท่ากับ 0.4 ไมโครเมตร สามารถประเมินได้ ว่าตะกอนจุลินทรีย์ในระบบถึงปฏิกิริยชีวภาพไม่สามารถผ่านออกจากรูพรุนของเมมเบรนได้และ เกิดการอุดตันที่บนผิวหน้า

อย่างไรก็ตาม จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM ยังคงพบว่ามีจุลินทรีย์สามารถเข้าไป อุดตันภายในช่องว่างระหว่างรูพรุน อาจเกิดจากเซลล์แบคทีเรียที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดความกว้างของ รูพรุนของเมมเบรน ซึ่งเซลล์แบคทีเรียที่มีเล็กกว่ารูพรุนนี้อาจเกิดจากกระบวนการแบ่งเซลล์ของ จุลินทรีย์เล็ดลอดเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนขณะมีการกรองน้ำ และปนเปื้อนออกไปกับ น้ำที่ผ่านการกรองแล้ว ซึ่งขนาดอนุภาคตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร จัดเป็นตะกอนชนิดก้อนเล็กแตกกระจาย (Pin floc) (Basuvaraj, Fein et al., 2015) และทำให้สลัดจ์ไม่จมตัว (Bulking Sludge) ในขั้นตอนการตกตะกอนในระบบบำบัดน้ำแบบเอเอส จากผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค ผลลัพธ์ทางสถิติพบว่าขนาดอนุภาคของฟล็อก ที่ Dv (90) ดังกล่าวไว้ในข้างต้น มีขนาดเท่ากับ 57.4 ไมโครเมตร จึงสามารถจัดได้ว่าขนาดของตะกอนจุลินทรีย์ ในระบบเป็นชนิดก้อนเล็กแตกกระจาย



รูปที่ 22 ขนาดอนุภาคของตะกอนแขวนลอยในชั้นบรรยากาศของถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

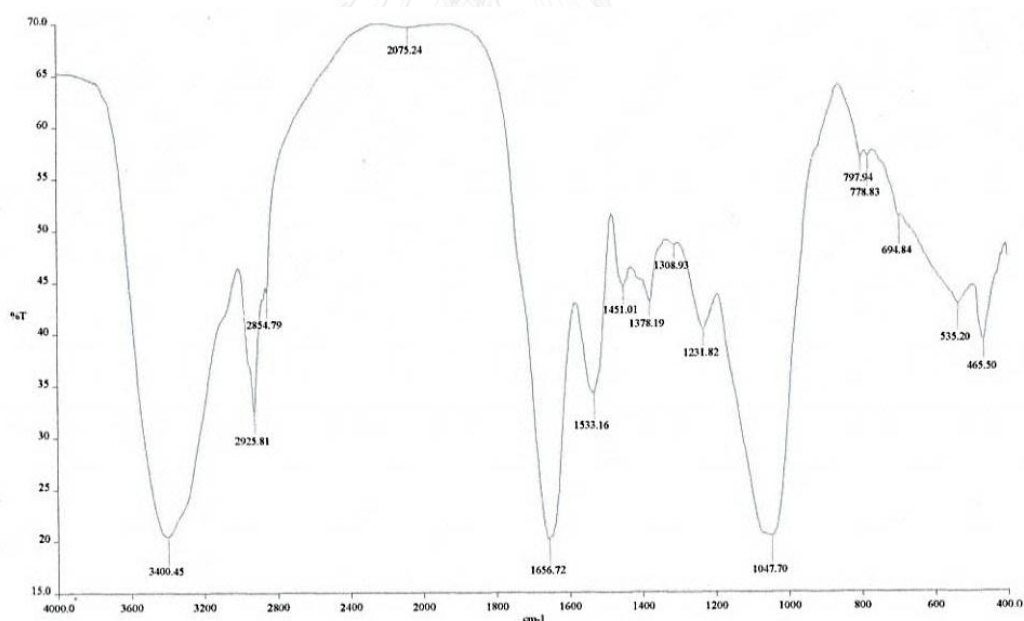
#### 4.1.3 องค์ประกอบโมเลกุลสารที่ก่อให้เกิดการอุดตันของเมมเบรน

การวิเคราะห์ด้วยหลักการ Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) เป็นวิธีที่ใช้จำแนกโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของตะกอนที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการอุดตันในรูพรุนและผิวหน้าของเมมเบรนขณะกรองน้ำออกจากระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ จากการทดลองเมื่อนำตะกอนจุลินทรีย์บริเวณผิวหน้าเมมเบรนในชั้นบรรยากาศไปวิเคราะห์สาร EPS ด้วยเทคนิค FT-IR ที่ช่วงค่าความถี่การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด  $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$  พบว่าตำแหน่งพีกของอินฟราเรดสเปกตรัมที่  $2925$  และ  $2854\text{ cm}^{-1}$  เป็นพันธะ C-H หมู่แอลคีน (Alkenes)  $1656$   $1533\text{ cm}^{-1}$  เป็นพันธะ C=O หมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (Carbonyl) ซึ่งเป็นโครงสร้างทั่วไปของโปรตีนลำดับที่ 2 คือ เอไมด์ I และ เอไมด์ II  $1378$   $1308$  และ  $1231\text{ cm}^{-1}$  คือ เอไมด์ III ตำแหน่งพีกที่  $1451\text{ cm}^{-1}$  มีความสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ (Esters,  $\text{—COO}^-$ ) ตามลำดับ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้สามารถระบุได้ว่าเป็นหมู่ฟังก์ชันของกรดอะมิโน ซึ่งเป็นโมเลกุลของโปรตีน (Sajjad, Kim et al., 2016, Suwal, Doyen et al., 2015) ตำแหน่งพีกที่  $3400\text{ cm}^{-1}$  มีลักษณะของพันธะ N-H (N-H Stretching) พันธะ C-N (C-N Stretching) และพันธะ O — H (Stretching O-H) เป็นพีกที่มีความสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Hydroxyl) (Ma, Wang et al., 2013) และ



ตำแหน่งพีกที่  $1047\text{ cm}^{-1}$  เป็นพันธะ C=O หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl) ลักษณะที่บ่งบอกถึงโมเลกุลของโพลีแซคคาไรด์หรือสารที่มีความเหมือนกับโพลีแซคคาไรด์

โปรตีนและโพลีแซคคาไรด์เป็นองค์ประกอบของไบโอพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดการอุดตันบนผิวหนังและรูพรุนของเมมเบรนในระบบล้างปฏิกรณ์ชีวภาพ แสดงในรูปที่ 23 โดยโปรตีน (Protein) และโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharide) เป็นองค์ประกอบที่มักพบในสาร EPS ที่มีคุณสมบัติทำให้จุลินทรีย์สามารถยึดเกาะกับพื้นผิววัตถุหรือจุลินทรีย์เซลล์อื่นจนเกิดเป็นกลุ่มก้อนโคโลนีและความสำคัญในการเกิดและความคงตัวของฟล็อกในระบบ (Zhang, Cao et al., 2016, Zhou, Yang et al., 2007) จับตัวรวมตัวเป็นฟล็อกของตะกอนจุลินทรีย์และความสามารถในการตกตะกอนได้ดีขึ้น (Lin et al., 2014) ดังนั้น การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR จึงเป็นการยืนยันเรื่องสาเหตุการอุดตันของเมมเบรนอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ (Wang, Wu et al., 2009)



รูปที่ 23 กราฟอินฟราเรดสเปกตรัมของโครงสร้างโมเลกุลของสารที่ก่อให้เกิดการอุดตันของเมมเบรน

## 4.2 ผลของช่วงเวลาการเติม-หยุดเติมอากาศ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของการเติม-หยุดเติมอากาศ ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน แบบคลองวนเวียน ในอัตราสัดส่วนรอบการเติม-หยุดเติมอากาศ โดยแบบออกเป็น 6 การทดลอง ที่แตกต่างกัน 6 สัดส่วน ตามลำดับ ดังนี้ การทดลองที่ 1 : เติมอากาศตลอดเวลา การทดลองที่ 2 : 60/60 นาที การทดลองที่ 3 : 40/80 นาที การทดลองที่ 4 : 30/90 นาที การทดลองที่ 5 : 80/40 นาที และการทดลองที่ 6 : 90/30 นาที กำหนดให้ค่าการกักพักน้ำ (HRT) เท่ากับ 24 ชั่วโมง และความเร็วในการไหลของน้ำในระบบ (Velocity) เท่ากับ 0.3 เมตรต่อวินาที

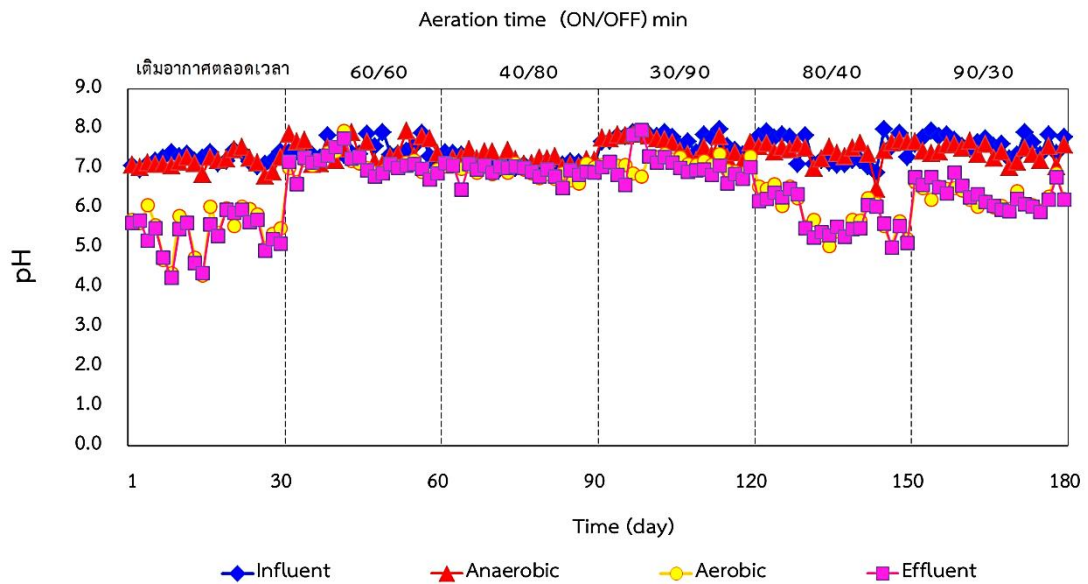
การวิเคราะห์ปัจจัยคุณภาพน้ำที่เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อน มากับน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบถังปฏิกรณ์ โดยน้ำเสียที่ใช้การทดลองเป็นน้ำเสียจริงจากกิจกรรมการใช้น้ำ ของอาคารจากห้องน้ำและอ่างล้างมือ ทำการเดินระบบทดลองในสภาวะจริง โดยมีขนาด ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนเป็นขนาดต้นแบบ (Pilot scale) ระยะเวลารวม 180 วัน (ไม่รวมระยะเวลาการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่) ดังนี้

### 4.2.1 สภาวะการเดินระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน

การควบคุมสภาวะการเดินระบบเป็นสิ่งสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัดมลสาร ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสีย เมื่อมีปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อปัจจัยอื่นๆในระบบ ทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ โดยการศึกษานี้ได้ควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อ ประสิทธิภาพการทำงานของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน อันประกอบด้วย พีเอช (pH) ออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen; DO) อุณหภูมิ (Temperature) และ เอ็มแอลเอสเอส (Mix Liquor Suspended Solids, MLSS) เป็นต้น

#### 4.2.1.1 พีเอช (pH)

พีเอชเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อจุลชีพในระบบบำบัดน้ำเสีย จากการทดลองเดินระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน แสดงในรูปที่ 24 น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบของการทดลองที่ 1-6 มีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ  $7.23 \pm 0.1$   $7.46 \pm 0.2$   $7.14 \pm 0.1$   $7.70 \pm 0.2$   $7.43 \pm 0.4$  และ  $7.63 \pm 0.2$  และส่วนไร้อากาศมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $7.15 \pm 0.2$   $7.48 \pm 0.3$   $7.23 \pm 0.1$   $7.60 \pm 0.1$   $7.43 \pm 0.3$  และ  $7.42 \pm 0.2$  ตามลำดับ เนื่องจากเป็นส่วนที่ยังไม่มีการเกิดปฏิกิริยาเพราะในการออกแบบการเดินระบบของการทดลองกำหนดให้ไม่มีการเวียนตะกอนจากส่วนเติมอากาศกลับไปในส่วนไร้อากาศ ดังนั้นส่วนไร้อากาศจึงเป็นเพียงขั้นตอนการกักพื้และคัดกรองตะกอนละเอียดจากแผ่นเอียงที่ถูกติดตั้งไว้ในส่วนนี้ ค่าพีเอชส่วนเติมอากาศของการทดลองที่ 1-6 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $5.14 \pm 0.5$   $7.10 \pm 0.3$   $6.92 \pm 0.1$   $7.11 \pm 0.2$   $5.79 \pm 0.5$  และ  $6.29 \pm 0.3$  และน้ำออกจากระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $5.31 \pm 0.5$   $7.09 \pm 0.3$   $6.91 \pm 0.2$   $7.06 \pm 0.3$   $5.72 \pm 0.5$  และ  $6.30 \pm 0.3$  ตามลำดับ แต่ในการทดลองที่ 1 มีการเติมอากาศแบบต่อเนื่องตลอดเวลา ทำให้ค่าพีเอชของส่วนเติมอากาศและน้ำออกจากระบบปรับลดลง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $5.5 \pm 0.5$  และ  $5.3 \pm 0.5$  มีค่าสูงสุดเท่ากับ 6.1 และ 6.0 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 4.3 และ 4.2 ค่าพีเอชที่ลดลงนี้ สาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายเออร์ในส่วนเติมอากาศเกิดการออกซิไดซ์ธาตุอาหารไนโตรเจนในน้ำเสียให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมเป็นไนเตรท และไนเตรท ตามลำดับ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของส่วนเติมอากาศจะมีการใช้ด่าง ( $\text{OH}^-$ ) ในระบบทำให้ค่าพีเอชของการทดลองที่ 1 ลดลง (Ergas & Aponte-Morales, 2014, Lee, Cotter et al., 2013) อย่างไรก็ตาม ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการเดินระบบและการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันควรมีค่าเท่ากับ 6.5-8.0 (Lin et al., 2009) ซึ่งเป็นช่วงที่จุลินทรีย์ในระบบเจริญเติบโตได้ดี ดังนั้น ในการทดลองที่ 1 จึงมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อปรับค่าพีเอชให้เพิ่มสูงขึ้น ค่าพีเอชน้ำที่ออกจากระบบของการทดลองที่ 2-6 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $6.9 \pm 0.2$   $7.0 \pm 0.2$   $7.1 \pm 0.3$   $5.7 \pm 0.5$  และ  $6.3 \pm 0.3$  ตามลำดับ แม้ว่าค่าเฉลี่ยพีเอชของการทดลองที่ 2-4 อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบแต่สัดส่วนการเติม-หยุดเติมอากาศ ของการทดลอง ที่ 5-6 มีการเติมอากาศให้กับระบบมากกว่าหยุดเติมอากาศ ทำให้ค่าพีเอชปรับลดลงมากกว่าการทดลองที่ 2-4 แต่ไม่ลดลงเท่ากับการทดลองที่ 1 เนื่องจากยังคงมีการหยุดเติมอากาศให้กับระบบ



รูปที่ 24 ค่าพีเอชของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน

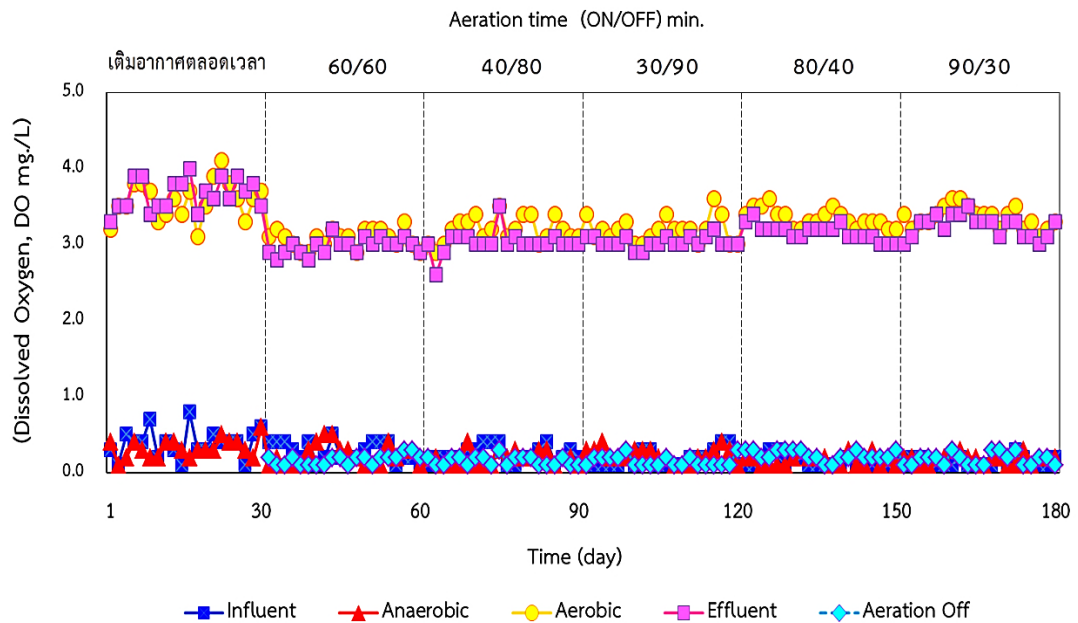
#### 4.2.1.2 ออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen; DO)

ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำที่เหมาะสมในระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ ซึ่งหมายถึงความต้องการออกซิเจนที่เพียงพอของจุลินทรีย์ในระบบเพื่อการเจริญและการดำรงชีวิต รวมถึงคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัด มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์และธาตุอาหาร จากการศึกษาการทำงานของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนนี้ แบ่งส่วนออกเป็น 4 ส่วน คือ น้ำเข้าระบบ ส่วนไร้อากาศ ส่วนเติมอากาศ และน้ำออกจากระบบ พบว่า ค่าออกซิเจนละลายน้ำในส่วนน้ำเข้าของการทดลองที่ 1-6 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.4 \pm 0.2$   $0.3 \pm 0.1$   $0.2 \pm 0.1$   $0.2 \pm 0.1$   $0.1 \pm 0.1$  และ  $0.1 \pm 0.1$  มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนไร้อากาศ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.3 \pm 0.1$   $0.2 \pm 0.1$   $0.2 \pm 0.1$   $0.2 \pm 0.1$  และ  $0.2 \pm 0.1$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากทั้ง 2 นี้เป็นส่วนที่ไม่มีการเติมอากาศ ส่วนเติมอากาศระบบของการทดลองที่ 1-6 มีค่าเฉลี่ยปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเท่ากับ  $4.08 \pm 0.2$   $3.07 \pm 0.1$   $3.20 \pm 0.2$   $3.20 \pm 0.2$   $3.35 \pm 0.1$  และ  $3.36 \pm 0.1$  มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำที่ออกจากระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $3.81 \pm 0.2$   $3.00 \pm 0.1$   $3.03 \pm 0.2$   $3.03 \pm 0.1$   $3.16 \pm 0.1$  และ  $3.24 \pm 0.1$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบในแต่ละชุดการทดลอง พบว่า ในส่วนของน้ำเข้าและส่วนไร้อากาศมีค่าออกซิเจนละลายน้ำค่อนข้างคงที่ แต่สำหรับการทดลองที่ 1

มีการเติมอากาศตลอดเวลา ทำให้ค่าออกซิเจนละลายสูงกว่าการทดลองที่ 2-6 โดยส่วนเติมอากาศ และน้ำออกจากระบบ ในช่วงที่มีการเติมอากาศมีค่าเฉลี่ยออกซิเจนละลายประมาณ 3.0 มิลลิกรัมต่อลิตรและเมื่อหยุดเติมอากาศค่าออกซิเจนละลายประมาณ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเปิดปั๊มเติมอากาศให้กับส่วนเติมอากาศประมาณ 30-45 นาที ค่าปริมาณค่าออกซิเจนละลายจะปรับเพิ่มขึ้นเป็น 3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงในรูปที่ 25

การเติมอากาศให้กับระบบมีผลต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Chang, Liang et al., 2010) ที่มีปริมาณออกซิเจนละลายสูงจะมีการออกซิไดซ์จากแอมโมเนียไปเป็นไนโตรเจนเร็วกว่าปริมาณออกซิเจนละลายต่ำ (Li, Healy et al., 2008) และเมื่อเติมอากาศอยู่ในช่วง 2.0-2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (Lin et al., 2009) ในช่วงที่หยุดเติมอากาศค่าพีเอชจะปรับเพิ่มขึ้นในสัดส่วนการหยุดเติมอากาศมากกว่าช่วงการเติมอากาศเนื่องจากในระหว่างที่หยุดเติมอากาศปริมาณออกซิเจนของระบบจะค่อยๆ ลดลงทำให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจนหรือเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจากปฏิกิริยานี้ทำให้ค่าความเป็นด่างปรับเพิ่มขึ้น (Pan, Fei et al., 2015) จากการศึกษาของ (Yongzhen, Shouyou et al., 2007) พบว่าที่ออกซิเจนละลายต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสภาวะออกซิเจนจำกัดทำให้จุลินทรีย์กลุ่มแอนีโรบิกในระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนจะลดต่ำลงเมื่อดำเนินระบบในช่วงที่มีการเติมอากาศตลอดเวลา (Chang et al., 2010)

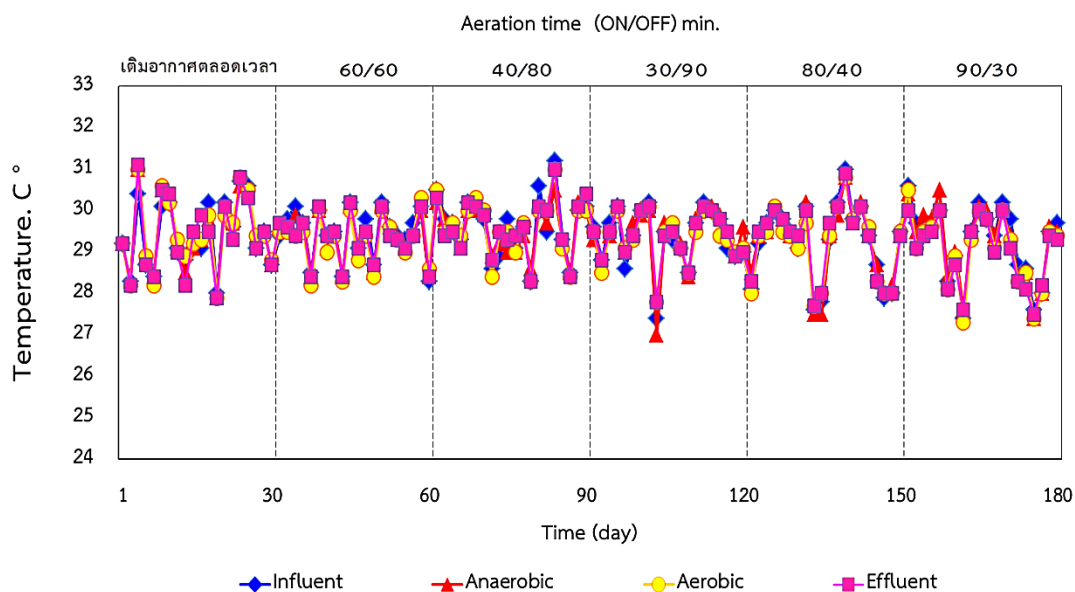
อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการเดินระบบแบบเติม/หยุดเติมอากาศแบบเป็นช่วงๆ ซึ่งเป็นสภาวะที่ใช้ออกซิเจนและจำกัดออกซิเจนสลับกันทำให้สามารถบำบัดไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่การบำบัดฟอสฟอรัสยังคงทำได้ยาก เนื่องจากปริมาณไนเตรทที่เกิดขึ้นจะเข้าไปยังถังการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในช่วงที่ไม่ใช้อากาศ (Radjenović et al., 2008)



รูปที่ 25 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน

#### 4.2.1.3 อุณหภูมิ (Temperature)

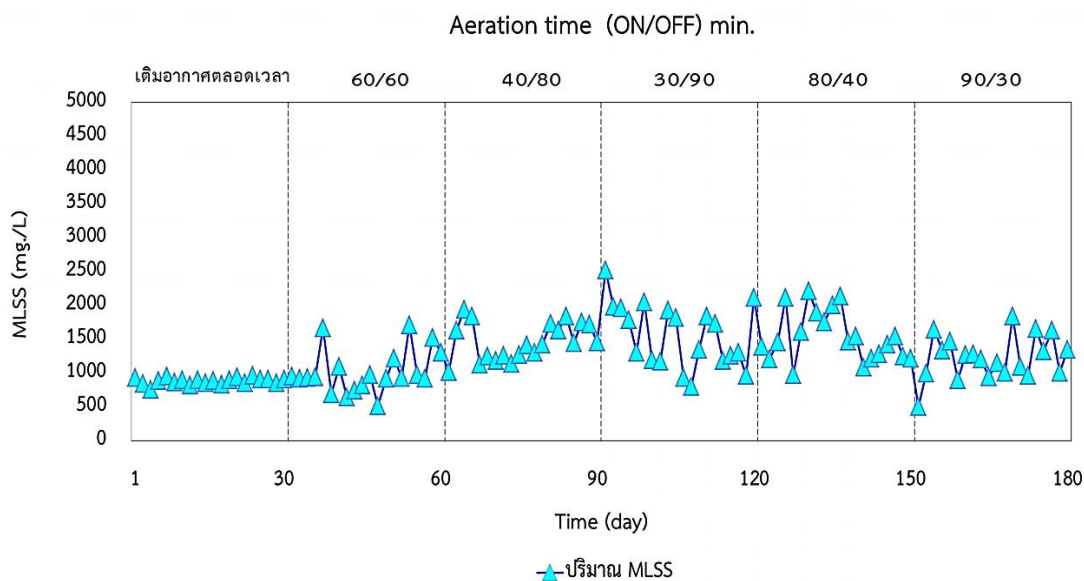
การวัดอุณหภูมิของน้ำในระบบเป็นไปตามสภาวะแวดล้อมจริง อุณหภูมิแปรผันตรงกับฤดูกาลที่ทำการทดลอง แสดงในรูปที่ 26 จากการทดลอง อุณหภูมิน้ำของทั้งระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $29.3 \pm 0.8$  องศาเซลเซียส โดยมีค่าเฉลี่ยสูงสุด-ต่ำสุด เท่ากับ 31.2 และ 27.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในช่วงที่มีผลต่อการดำเนินปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันให้สมบูรณ์ คือ 21-36 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่กลุ่มจุลินทรีย์กลุ่มไนโตรแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้ดี (Zhu, Peng et al., 2008)



รูปที่ 26 อุณหภูมิของถังปฏิกรณ์ชีวภาพในขณะเดินระบบการทดลอง

#### 4.2.1.4 เอ็มแอลเอสเอส (Mix Liquor Suspended Solids, MLSS)

ปริมาณความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในส่วนเดิมอากาศของระบบเป็นปัจจัยที่แสดงถึงอัตราการเจริญเติบโตและแบ่งจำนวนของจุลินทรีย์ในระบบ ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอนและธาตุอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โดยจุลินทรีย์ในระบบจะนำไปใช้สำหรับสร้างเซลล์และเป็นแหล่งพลังงาน จากการทดลอง แสดงในรูปที่ 27 พบว่า การทดลองที่ 1 มีค่าเฉลี่ยเอ็มแอลเอสเอสค่อนข้างคงที่ เท่ากับ  $887.3 \pm 49.9$  มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเอ็มแอลเอสเอสของการทดลองที่ 2-6 มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากการทดลองที่ 1 โดยการทดลองที่ 2-4 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $1,023.7 \pm 319.2$ ,  $1,474.1 \pm 274.9$  และ  $1,563.7 \pm 470.8$  มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองที่ 5-6 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $1,543.1 \pm 369.6$  และ  $1,232.2 \pm 320.9$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สำหรับการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนปริมาณความเข้มข้นของเอ็มแอลเอสเอสที่เหมาะสมต่อการบำบัดสารปนเปื้อนของระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพนี้ควรมีค่าอยู่ในช่วง 1,500-5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Shammas & Wang, 2009) ซึ่งการออกแบบการทดลองกำหนดให้ทิ้งตะกอนส่วนเกินทุกวัน เพื่อควบคุมปริมาณตะกอนในส่วนเดิมอากาศของระบบถังปฏิกรณ์แบบคลองวนเวียน จึงทำให้ค่าปริมาณความเข้มข้นของเอ็มแอลเอสเอสมีค่าน้อยกว่ามาตรฐานของการออกแบบระบบคลองวนเวียนทั่วไป



รูปที่ 27 ปริมาณเอ็มแอลเอสเอสในส่วนเติมอากาศของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน

#### 4.2.2 การบำบัดน้ำเสียของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน

การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบคลองวนเวียนเป็นการออกแบบระบบที่อาศัยกระบวนการความแตกต่างของสภาวะที่บริเวณเติมอากาศและจำกัดอากาศ โดยปริมาณออกซิเจนที่เติมให้กับระบบจะค่อยๆลดลงตามแนวการไหลของน้ำในระบบ ซึ่งเป็นสถานะที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ไซมอลทาเนียส และดีไนตริฟิเคชัน (Simultaneous Nitrification-Denitrification: SND) ภายในถังปฏิกรณ์ไบโอเดียวกัน (Alaya, Haouech et al., 2010, Elena & Igor, 2015)

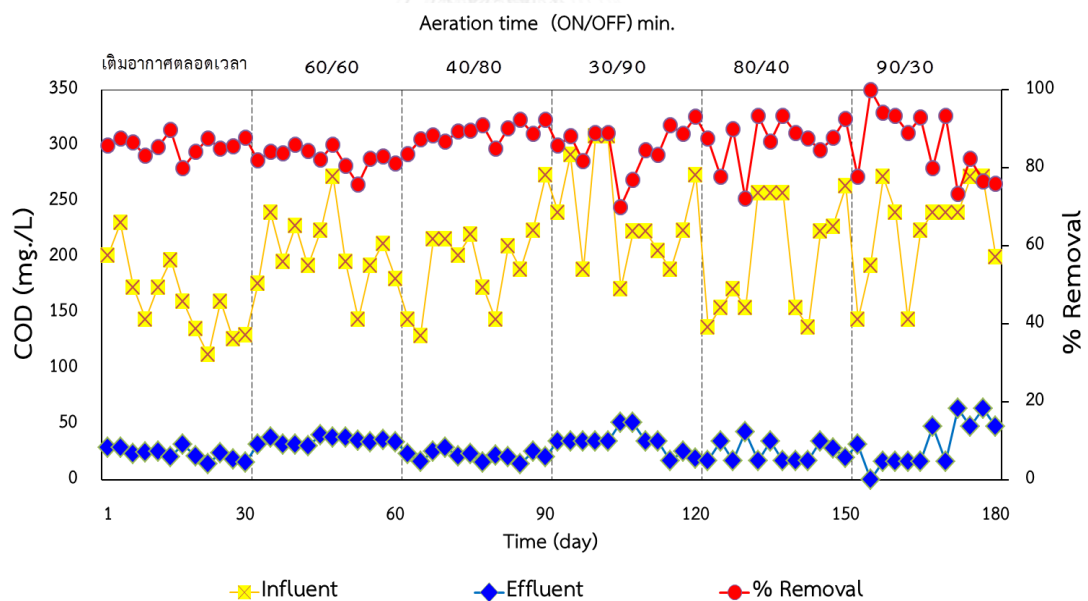
การศึกษาค้นคว้านี้มีการออกแบบการทดลองที่มีสัดส่วนการเติม-หยุดเติมอากาศที่ต่างกัน ทำให้เกิดความแตกต่างของปริมาณออกซิเจนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียทั้งสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส



#### 4.2.2.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน

กลไกการบำบัดสารอินทรีย์ด้วยวิธีทางชีวภาพแบบใช้อากาศเป็นกระบวนการที่อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยจุลินทรีย์ใช้สารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อสังเคราะห์เซลล์ใหม่ ทำให้สารอินทรีย์คาร์บอนของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบลดปริมาณลงเมื่อผ่านการบำบัดแล้ว ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดขึ้นอยู่กับความสามารถของจุลินทรีย์แต่ละสายพันธุ์ รวมถึงสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมต่อการทำงานและเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

การวัดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในน้ำเสียจากอาคารออกมาในรูปของซีโอดี (COD) น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบถึงปฏิกรณ์ในการทดลองเป็นน้ำเสียจริงจากอาคาร ทำให้ไม่สามารถควบคุมปริมาณค่าความเข้มข้นของซีโอดีได้ พบว่า ค่าซีโอดีของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบตลอดระยะเวลาการทดลอง อยู่ในช่วง 112-308 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงในรูปที่ 28



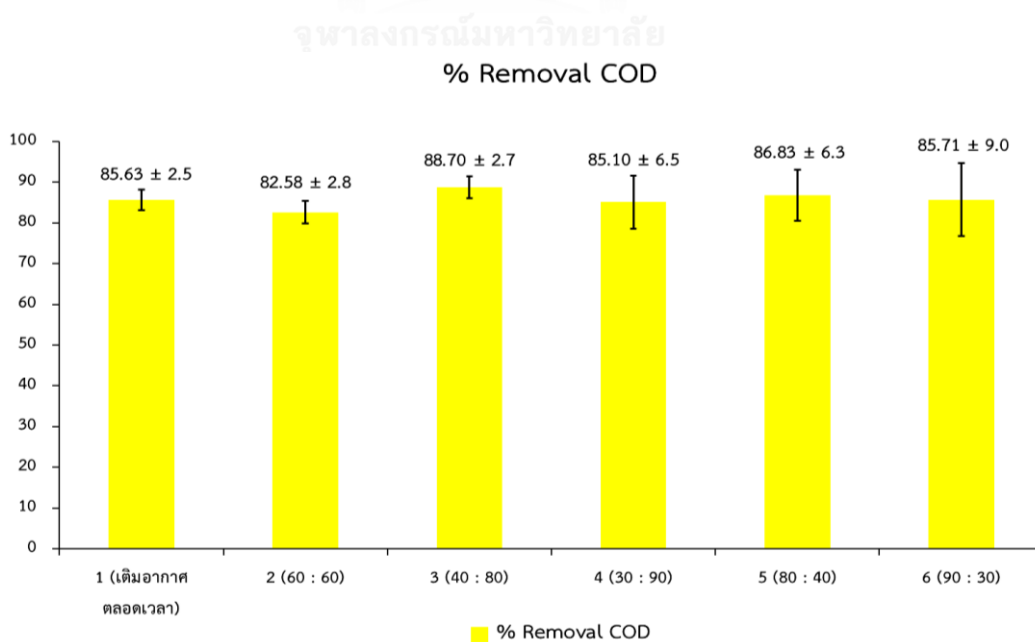
รูปที่ 28 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน (ซีโอดี)

จากการทดลองสัดส่วนของการเติม-หยุดเติมอากาศที่แตกต่างกัน พบว่าการทดลองที่ 1-6 ค่าซีไอดีน้ำเสียที่เข้าระบบของ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $161.9 \pm 35.1$   $204.4 \pm 33.5$   $195.0 \pm 41.1$   $237.2 \pm 47.8$   $199.5 \pm 52.3$  และ  $223.3 \pm 45.1$  มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำออกระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $23.1 \pm 5.4$   $34.9 \pm 3.1$   $21.4 \pm 4.3$   $33.7 \pm 10.4$   $24.7 \pm 9.5$  และ  $32.0 \pm 21.6$  มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีเท่ากับร้อยละ  $85.6 \pm 2.5$   $82.6 \pm 2.8$   $88.7 \pm 2.7$   $85.1 \pm 6.5$   $86.8 \pm 6.3$  และ  $85.7 \pm 9.0$  ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 5 ประสิทธิภาพการบำบัดจากร้อยละการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของซีไอดี จากการทดลองทั้งหมด พบว่า การทดลองที่ 3 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ  $88.70 \pm 2.7$  แสดงในรูปที่ 29 โดยค่าซีไอดีของน้ำที่เข้าสู่ระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $195.00 \pm 41.4$  มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำที่ออกจากระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $21.41 \pm 4.3$  มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพบำบัดต่ำที่สุด เท่ากับร้อยละ  $82.58 \pm 2.8$  โดยค่าซีไอดีของน้ำที่เข้าสู่ระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $204.36 \pm 33.5$  มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำที่ออกจากระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $34.91 \pm 3.1$

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีจากผลการทดลองทั้งหมดมีค่ามากกว่าร้อยละ 80 ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าการเดินระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียนแบบเติมอากาศตลอดเวลาและการเติม-หยุดเติมอากาศที่สัดส่วนแตกต่างกันมีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอนใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน

การเติม : หยุดเติมอากาศ (นาที)	ซีโอดี (COD) (มิลลิกรัมต่อลิตร, mg/l)		
	Influent	Effluent	% Removal
	การทดลองที่ 1 (เติมอากาศตลอดเวลา)	161.87±35.1 <sup>c</sup>	23.07±5.4 <sup>cd</sup>
การทดลองที่ 2 (60 : 60)	204.36±33.5 <sup>ab</sup>	34.91±3.1 <sup>a</sup>	82.58±2.8 <sup>b</sup>
การทดลองที่ 3 (40 : 80)	195.00±41.4 <sup>bc</sup>	21.41±4.3 <sup>d</sup>	88.70±2.7 <sup>a</sup>
การทดลองที่ 4 (30 : 90)	237.20±47.8 <sup>a</sup>	33.66±10.4 <sup>ab</sup>	85.09±6.5 <sup>ab</sup>
การทดลองที่ 5 (80 : 40)	199.49±52.3 <sup>ab</sup>	24.69±9.5 <sup>bcd</sup>	86.83±6.3 <sup>ab</sup>
การทดลองที่ 6 (90 : 30)	223.33±45.1 <sup>ab</sup>	32.00±21.6 <sup>abc</sup>	85.71±9.0 <sup>ab</sup>



รูปที่ 29 ร้อยละการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน

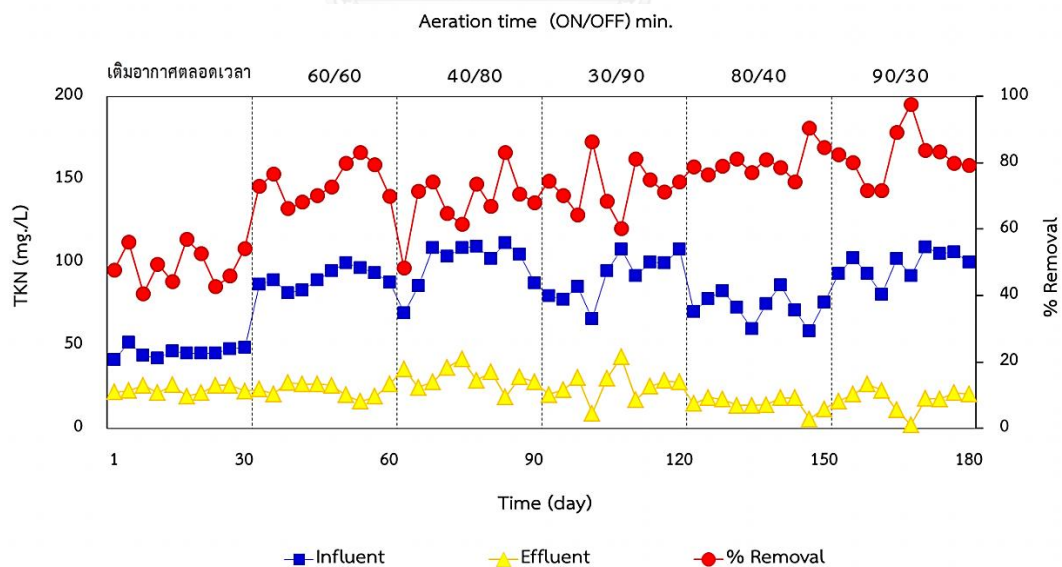
#### 4.2.2.2 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจน

การปนเปื้อนของธาตุอาหารไนโตรเจนในน้ำเสีย มีความสัมพันธ์ต่อการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำลดลง อันเนื่องมาจาก การเพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็วของจุลชีพ สาหร่ายและพืชน้ำ โดยการบำบัดธาตุอาหารไนโตรเจนต้องอาศัยหลักการความแตกต่างของปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนที่ละลายน้ำและชนิดของกลุ่มแบคทีเรีย ทั้งสองปัจจัยมีผลในการกำหนดการเกิดปฏิกิริยาในระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ ปฏิกิริยาการบำบัดไนโตรเจน คือ ไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน (Trivedi, 2009) โดยการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยคุณภาพน้ำของสารประกอบไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (TKN-N) แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) ไนไตรท์ ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) และไนเตรท ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) ค่าเหล่านี้เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณไนโตรเจนของน้ำเสียในรูปแบบต่างๆ และประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันภายในระบบ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดจากระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน จากรูปที่ 30 แสดงถึงประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น พบว่า น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีอัตราการปนเปื้อนของไนโตรเจนสูง ตลอดระยะเวลาการทดลองมีค่าทีเคเอ็นอยู่ในช่วง 41.47-111.80 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีเปลี่ยนแปลงไปตามกิจกรรมการใช้น้ำของอาคารในแต่ละวัน และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $83.00 \pm 21.1$  มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการทดลอง ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนของการทดลองที่ 1-6 ไม่สม่ำเสมอกัน โดยการทดลองที่ 1 มีร้อยละการบำบัดเท่ากับ  $49.05 \pm 5.6$  มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการทดลองที่ 2-6 เนื่องจากการทดลองที่ 1 เป็นช่วงที่มีการเติมอากาศตลอดเวลา ค่าเฉลี่ยทีเคเอ็นของน้ำเสียเข้าระบบและน้ำออกจากระบบ เท่ากับ  $45.80 \pm 3.1$  และ  $23.27 \pm 2.4$  มิลลิกรัมต่อลิตร สาเหตุที่น้ำเสียเข้าระบบมีค่าทีเคเอ็นไม่สูงมาก เนื่องจากช่วงที่ทำการทดลองเป็นช่วงปิดภาคการศึกษา อัตราการใช้น้ำจึงอยู่ในเกณฑ์ต่ำ สังเกตได้จากกราฟของการทดลองที่ 1 ที่วันที่ 1-30 ค่าทีเคเอ็นของน้ำเสียเข้าระบบและน้ำออกจากระบบค่อนข้างคงที่ ในการทดลองที่ 2-6 เริ่มมีความแปรปรวน โดยค่าเฉลี่ยทีเคเอ็นของน้ำเสียเข้าสู่ระบบเท่ากับ  $90.34 \pm 5.9$   $99.26 \pm 13.8$   $91.08 \pm 13.7$   $73.08 \pm 8.7$  และ  $98.45 \pm 5.9$  มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำที่ออกจากระบบมีค่าเฉลี่ยทีเคเอ็น เท่ากับ  $23.32 \pm 3.9$   $30.76 \pm 6.6$   $25.49 \pm 9.0$   $14.65 \pm 4.0$  และ  $17.70 \pm 6.8$  มิลลิกรัมต่อลิตร ร้อยละการบำบัดเท่ากับ

73.91±5.6 68.22±9.2 72.52±7.6 80.11±4.6 และ 81.84±7.7 ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 31 เมื่อพิจารณาผลการทดลองทั้งหมด สรุปได้ว่า การทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนที่ดีที่สุด คือ การทดลองที่ 6 ซึ่งเป็นสัดส่วนการเติม-หยุดเติมอากาศ เท่ากับ 90/30 นาที และผลที่เคเอ็นของน้ำออกจากระบบทุกการทดลองมีค่าเฉลี่ยไม่เกิน 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากอาคารประเภท ค (กรมควบคุมมลพิษ, 2548a)

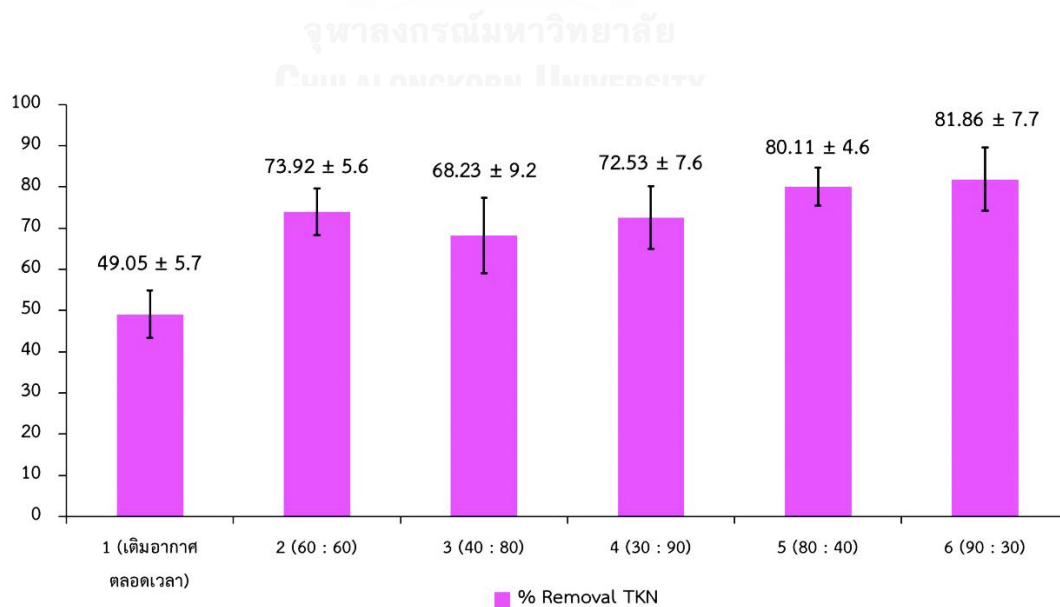
อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเรื่องสภาวะการเดินระบบพบว่า น้ำที่ออกจากระบบของการทดลองที่ 5 และ 6 มีค่าพีเอชของส่วนเติมอากาศลดต่ำลง เนื่องจากการทดลองที่มีสัดส่วนการเติมอากาศมากกว่าหยุดเติมอากาศ ทำให้มีค่าพีเอชต่ำสุดในช่วงที่ทำการทดลอง เท่ากับ 5.0 และ 5.9 อันเนื่องมาจากกระบวนการที่แอมโมเนียถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไนไตรท์ เมื่อค่าพีเอชลดต่ำกว่า 6 จะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอมโมเนียลดลงและการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันให้ช้าลงตามไปด้วย แม้ว่าที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 6 จะเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการออกซิไดซ์แอมโมเนีย แต่ยักเว้นแอมโมเนียออกซิไดซ์ซึ่งแบคทีเรีย (Ammonia oxidizing bacteria , AOB) โดยพบว่าแบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถปรับตัวได้ในสภาวะแวดล้อมที่มีค่าพีเอชต่ำและเจริญเติบโตได้ที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 4 (Fumasoli, Morgenroth et al., 2015)



รูปที่ 30 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น

ตารางที่ 6 การบำบัดไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็นของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน

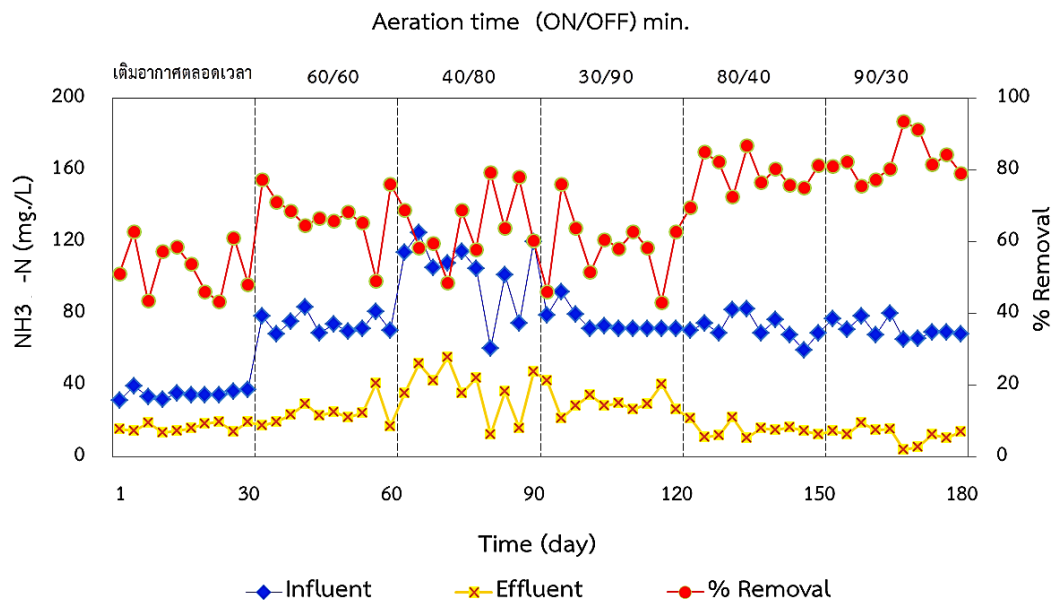
การเติม : หยดเติมอากาศ (นาที)	ทีเคเอ็น (TKN)		
	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg./l)		
	Influent	Effluent	% Removal
การทดลองที่ 1 (เติมอากาศตลอดเวลา)	45.80±3.1 <sup>c</sup>	23.27±2.4 <sup>b</sup>	49.05±5.6 <sup>c</sup>
การทดลองที่ 2 (60 : 60)	90.34±5.9 <sup>a</sup>	23.32±3.9 <sup>b</sup>	73.91±5.6 <sup>b</sup>
การทดลองที่ 3 (40 : 80)	99.26±13.8 <sup>a</sup>	30.76±6.6 <sup>a</sup>	68.22±9.2 <sup>b</sup>
การทดลองที่ 4 (30 : 90)	91.08±13.7 <sup>a</sup>	25.49±9.0 <sup>ab</sup>	72.52±7.6 <sup>b</sup>
การทดลองที่ 5 (80 : 40)	73.08±8.7 <sup>b</sup>	14.65±4.0 <sup>c</sup>	80.11±4.6 <sup>a</sup>
การทดลองที่ 6 (90 : 30)	98.45±5.9 <sup>a</sup>	17.70±6.8 <sup>c</sup>	81.84±7.7 <sup>a</sup>



รูปที่ 31 ร้อยละการบำบัดไนโตรเจน (ทีเคเอ็น)

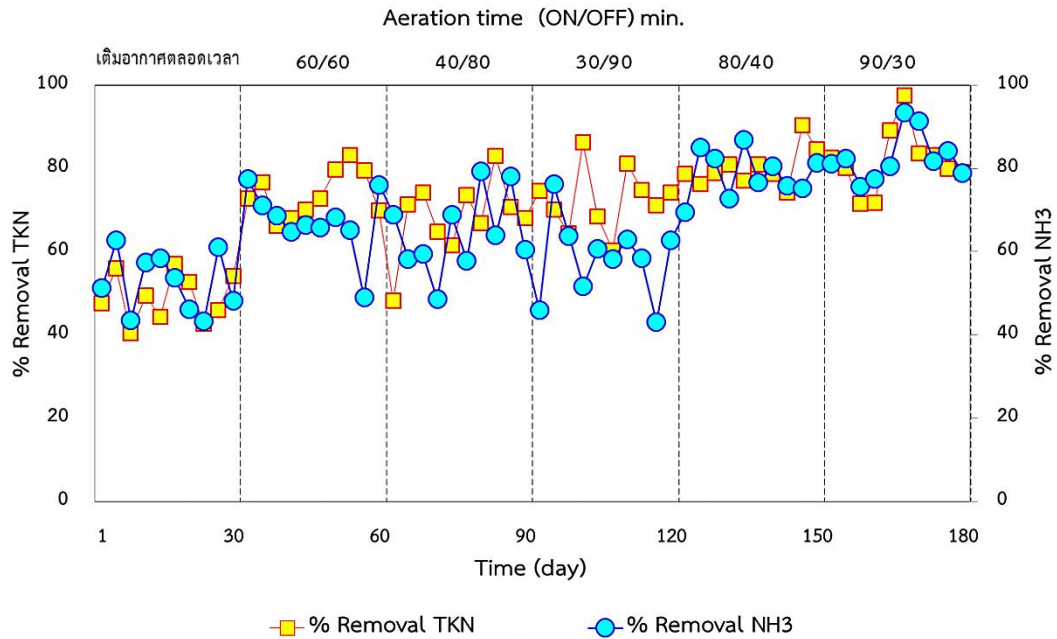
การวิเคราะห์ค่าแอมโมเนีย ไนโตรท์ และไนเตรท ซึ่งสามารถอธิบายในเรื่อง การเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดไนโตรเจนของระบบถัง ปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน ซึ่งในกระบวนการบำบัดไนโตรเจนเริ่มจากการที่แอมโมเนียถูกออกซิไดซ์ ไปเป็นไนโตรท์หรือไนเตรท จากการทดลอง พบว่า ค่าแอมโมเนียของน้ำเข้าระบบของการทดลองที่ 1-6 แสดงในรูปที่ 32 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $35.2 \pm 2.4$   $74.5 \pm 5.3$   $103.0 \pm 20.3$   $75.5 \pm 6.6$   $72.3 \pm 6.9$  และ  $71.5 \pm 5.2$  มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าแอมโมเนียของน้ำออกจากระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $16.6 \pm 2.3$   $24.5 \pm 7.0$   $37.9 \pm 14.1$   $31.1 \pm 6.5$   $15.4 \pm 4.0$  และ  $12.5 \pm 4.6$  มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัด เท่ากับร้อยละ  $52.6 \pm 7.2$   $67.3 \pm 7.8$   $64.4 \pm 9.6$   $58.4 \pm 9.6$   $78.6 \pm 5.5$  และ  $82.7 \pm 5.7$  ตามลำดับ

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียมีค่าไม่คงที่ การทดลอง ที่มีแนวโน้มการบำบัดแอมโมเนียอยู่ในเกณฑ์ดี คือ การทดลองที่ 5 และ 6 ซึ่งสัดส่วนการเติมอากาศ มากกว่าการหยุดเติมอากาศ และการทดลองที่ 6 มีประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียได้ดีที่สุด



รูปที่ 32 ปริมาณและประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

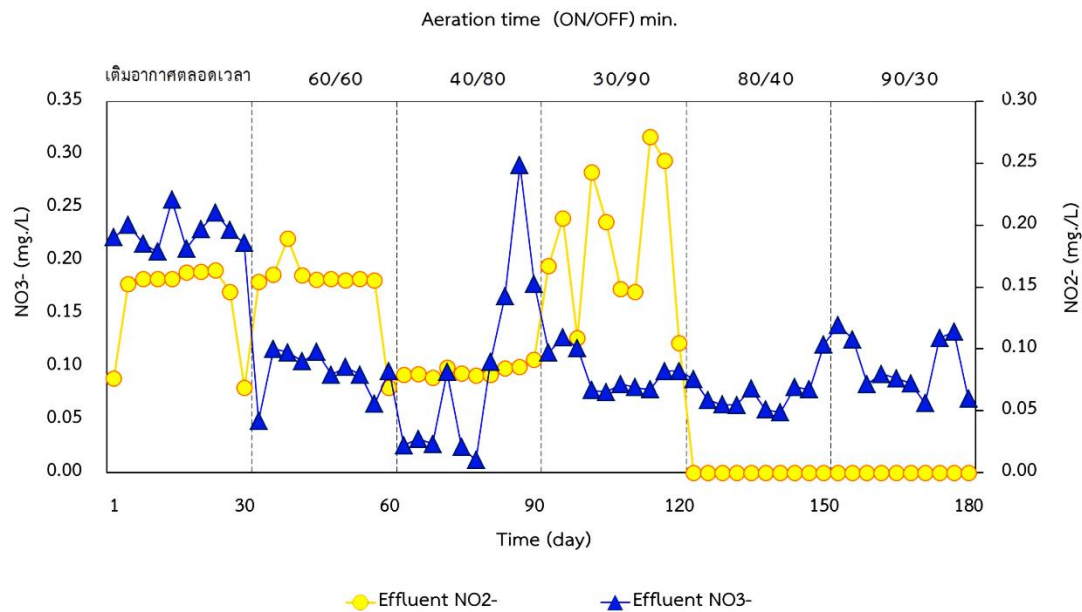
เมื่อทำการเปรียบเทียบร้อยละการบำบัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นและแอมโมเนีย แสดงในรูปที่ 33 พบว่า การทดลองที่ 5 และ 6 มีแนวโน้มในการบำบัดไนโตรเจนได้ดี และการทดลองที่ 1 มีการบำบัดได้น้อยที่สุด



รูปที่ 33 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นและแอมโมเนีย

ค่าไนโตรเจนของน้ำออกระบบของการทดลองที่ 1-6 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.16 \pm 0.04$   $0.18 \pm 0.04$   $0.10 \pm 0.01$   $0.22 \pm 0.07$  มิลลิกรัมต่อลิตร โดยในการทดลองที่ 5 และ 6 ไม่สามารถตรวจหาค่าไนโตรเจนได้ (ND) ค่าไนเตรทของน้ำออกระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.19 \pm 0.01$   $0.08 \pm 0.02$   $0.08 \pm 0.08$   $0.08 \pm 0.02$   $0.07 \pm 0.02$  และ  $0.09 \pm 0.02$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากกราฟในการทดลองที่ 1 มีค่าเฉลี่ยไนเตรทสูงที่สุด ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเต็มอากาศตลอดเวลา แสดงในรูปที่ 34





**รูปที่ 34** ปริมาณไนไตรท์และไนเตรทของน้ำออกจากระบบบำบัดถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน

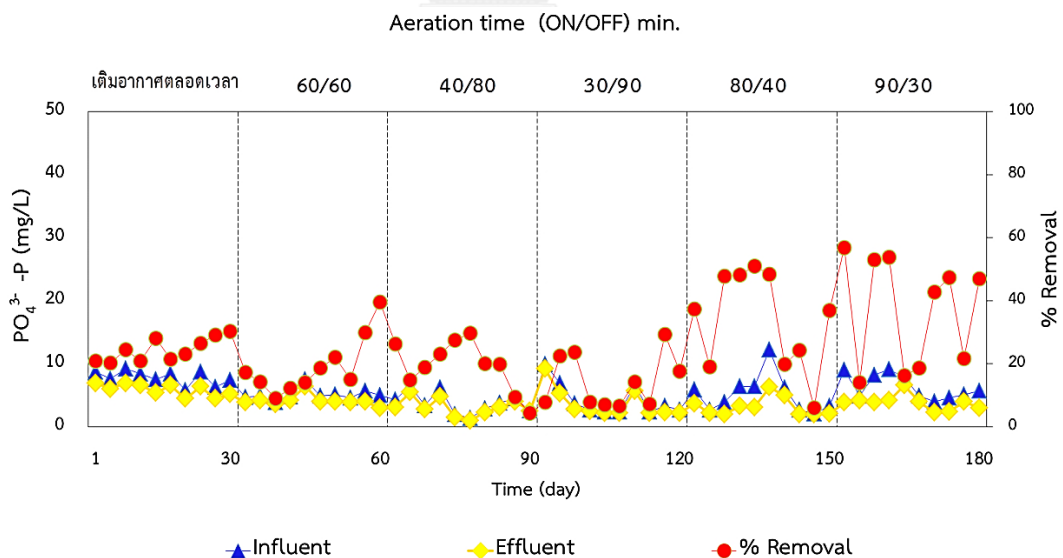
ประสิทธิภาพบำบัดไนโตรเจนของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียนที่สัดส่วนการเติม-หยุดเติมอากาศที่แตกต่างกันทั้ง 6 สัปดาห์นี้ ผลการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น สามารถอธิบายสัมพันธ์ของสัดส่วนของอากาศที่เติมเข้าสู่ระบบกับการบำบัดน้ำเสียจากอาคาร พบว่า ปริมาณไนไตรท์และไนเตรทของน้ำที่ออกจากระบบมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่มีปริมาณแอมโมเนียยังคงมีปริมาณสูง โดยมีความเป็นไปได้ว่าช่วงที่มีการหยุดเติมอากาศมากกว่าการเติมอากาศ คือการทดลองที่ 3 และ 4 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้น้อยลง เนื่องจากในสภาวะเติมอากาศนั้น จุลินทรีย์จะใช้ออกซิเจนมาออกซิไดส์สารอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนีย เมื่อปริมาณออกซิเจนละลายในระบบลดลงก็ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันลดลงตามไปด้วย (Liu & Wang, 2015) จึงทำให้แอมโมเนียที่ปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งบางส่วนไม่ได้รับการออกซิไดส์และเปลี่ยนรูปไปเป็นไนไตรท์หรือไนเตรท อีกทั้งช่วงที่หยุดเติมอากาศอาจจะทำให้เซลล์จุลินทรีย์ตายเนื่องจากสภาวะการขาดอากาศ เพราะจุลินทรีย์ในระบบถังปฏิกรณ์ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มที่ใช้อากาศ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายคือ แอมโมเนีย ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียลดต่ำลง

#### 4.2.2.3 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส

การบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสียมีวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับการบำบัดไนโตรเจน คือ ลดปริมาณธาตุอาหารในน้ำเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเสียหรือพีชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนมากับน้ำทั้งเกิดจาก น้ำยาทำความสะอาด ผงซักฟอก และการขับถ่าย เป็นต้น ซึ่งอยู่ในรูปสารอินทรีย์ฟอสเฟต ทั้งละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ กระบวนการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพนี้ ต้องอาศัยจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการกักเก็บฟอสฟอรัส ซึ่งจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการจับฟอสฟอรัสไว้ใช้เพื่อการสังเคราะห์เซลล์ หรือเก็บไว้ในเซลล์ คือ จุลินทรีย์กลุ่มพีโอโอ (Polyphosphate accumulating organisms , PAOs) การใช้จุลินทรีย์ชนิดนี้ในการบำบัดฟอสฟอรัสเป็นวิธีที่เรียกว่า การบำบัดฟอสฟอรัสอย่างเพิ่มพูน โดยสภาวะที่เหมาะสมในการต่อการสะสมฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์สามารถทำได้โดยการเดินระบบบำบัดให้มีการสลับกันไปมาของสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนและใช้ออกซิเจน (Chen, Wang et al., 2013)

จากการทดลองเติม-หยุดเติมอากาศ การวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรูปออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphates) โดยค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นฟอสฟอรัสของน้ำเข้าระบบของการทดลองที่ 1-6 มีค่าเท่ากับ  $7.82 \pm 1.1$   $5.13 \pm 0.9$   $3.78 \pm 1.7$   $4.31 \pm 2.6$   $5.2 \pm 3.0$  และ  $6.4 \pm 2.0$  มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำที่ออกกระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $6.0 \pm 1.0$   $4.1 \pm 1.0$   $3.1 \pm 1.4$   $3.7 \pm 2.4$   $3.2 \pm 1.5$  และ  $3.9 \pm 1.2$  มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ ร้อยละ 24.5 19.2 19.5 14.4 34.0 และ 37.1 ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 35 และตารางที่ 7 จากผลการวิเคราะห์ พบว่า การทดลองที่ 6 ที่สัดส่วนการเติม-หยุดเติมอากาศเท่ากับ 90/30 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 37.1 แสดงในรูปที่ 36 การบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพต้องอาศัยกระบวนการไนตริฟิเคชันสลับกันกับดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งการเติม-หยุดเติมอากาศทำให้เกิดสภาวะไซมอลทานเนียส หรือ ปฏิกริยาเอสเอ็นดี (simultaneous nitrification and denitrification , SND) ช่วงที่มีการเติม-หยุดเติมอากาศ จะมีความแตกต่างของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พบว่าในช่วงที่หยุดเติมอากาศปริมาณออกซิเจนละลายมีค่าเท่ากับ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงที่เติมอากาศมีปริมาณออกซิเจนละลายเท่ากับ 3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

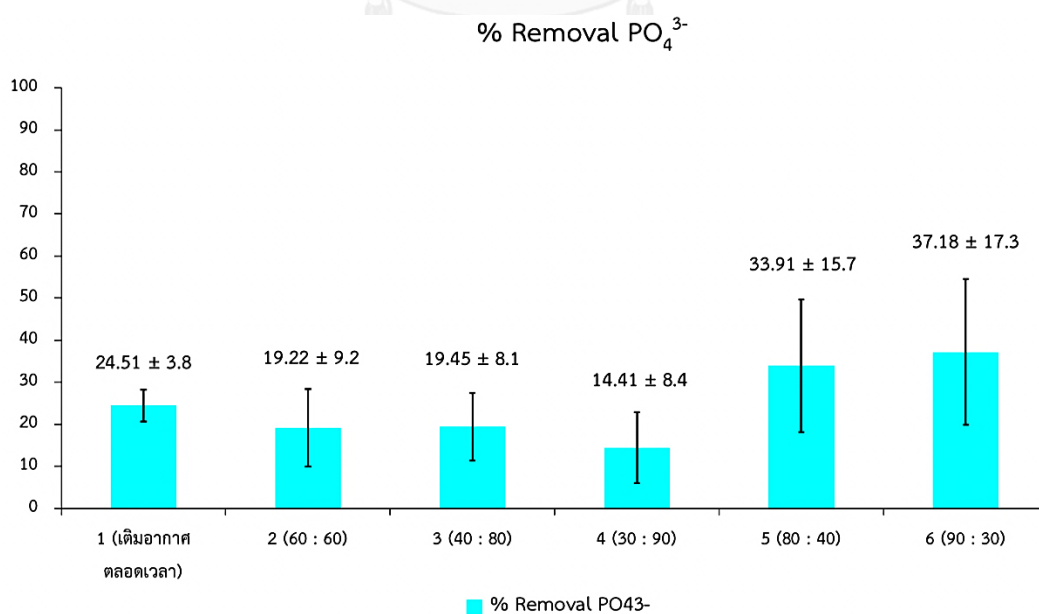
อย่างไรก็ตาม ระบบถังปฏิกรณ์เมมเบรนยังคงมีประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสได้น้อย เนื่องจากไม่มีการเวียนตะกอนกลับไปยังส่วนไร้อากาศ การเวียนตะกอนนี้จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสได้ดีขึ้น (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) โดยในสภาวะไร้อากาศ จุลินทรีย์จะปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาและถูกดูดซึมไปใช้ในสภาวะใช้อากาศ จุลินทรีย์ดีไนตริไฟอิงจะสะสมฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์ หรือเรียกว่า Denitrifying polyphosphate accumulating organisms (PAOs) ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ไนโตรเจนและไนเตรท เพื่อนำไปเป็นพลังงานให้แก่เซลล์ในรูปแบบของ ATP และกรดนิวคลีอิก (Zeng, Li et al., 2011) อีกทั้งน้ำที่เข้าสู่ระบบเป็นน้ำเสียจากอาคารมีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน (ซีโอดี) ค่อนข้างต่ำและจำกัด การเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันต้องใช้คาร์บอนเป็นตัวให้อิเล็กตรอน เพื่อให้ไนเตรทเปลี่ยนรูปไปเป็นไนโตรเจน ไนตรัสออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน ตามลำดับ เพราะฉะนั้น ระบบจึงต้องมีปริมาณคาร์บอนเพียงพอสำหรับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ภายใต้สภาวะจำกัดอากาศ (Anoxic) ซึ่งส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาเอสเอ็นดีทำให้การบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสลดลงตามไปด้วย (Peng et al., 2006)



รูปที่ 35 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส

ตารางที่ 7 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

การเติม : หยดเติมอากาศ (นาที)	ฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ )		
	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg./l)		
	Influent	Effluent	% Removal
การทดลองที่ 1 (เติมอากาศตลอดเวลา)	$7.8 \pm 1.1^a$	$5.9 \pm 1.0^a$	$24.51 \pm 3.8^{bc}$
การทดลองที่ 2 (60 : 60)	$5.1 \pm 0.9^{bc}$	$4.1 \pm 0.9^b$	$19.22 \pm 9.2^c$
การทดลองที่ 3 (40 : 80)	$3.8 \pm 1.7^c$	$3.1 \pm 1.4^b$	$19.45 \pm 8.1^c$
การทดลองที่ 4 (30 : 90)	$4.3 \pm 2.6^c$	$3.7 \pm 2.4^b$	$14.41 \pm 8.4^c$
การทดลองที่ 5 (80 : 40)	$5.2 \pm 3.0^{bc}$	$3.2 \pm 1.5^b$	$33.91 \pm 15.7^{ab}$
การทดลองที่ 6 (90 : 30)	$6.4 \pm 2.0^{ab}$	$3.9 \pm 1.2^b$	$37.17 \pm 17.3^a$



รูปที่ 36 ร้อยละการบำบัดฟอสฟอรัส

#### 4.3 ผลคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียนสำหรับการนำไปใช้ในงานภูมิทัศน์

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียนในหัวข้อ 4.2 นำผลที่ได้จากพารามิเตอร์วิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วในแต่ละการทดลองมาพิจารณา เพื่อประยุกต์ใช้ในงานภูมิทัศน์ พบว่า โดยการทดลองที่ 3 มีปริมาณไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (TKN) และแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) มากที่สุดจากการทดลองทั้งหมด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $30.8 \pm 6.6$  และ  $37.9 \pm 14.1$  มิลลิกรัมต่อลิตร และการทดลองที่ 1 มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปออร์โธฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) มากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $5.9 \pm 0.1$  มิลลิกรัมต่อลิตร การตรวจสอบคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดทางด้านสุขาภิบาล เรื่อง การปนเปื้อนโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Total coliform bacteria) การตรวจหาเชื้ออีโคไล (Fecal Esherlichia coli) จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดเมื่อสิ้นสุดการวิจัย พบว่า ตรวจสอบไม่พบแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดนี้ (ND) แสดงในภาคผนวก ข และเมื่อนำมาวิเคราะห์ตามแนวทางของสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐฯ (U.S. Environmental Protection Agency; EPA) เรื่องการใช้น้ำซ้ำ (Guidelines for Water Reuse) ทางด้านคุณภาพที่ผ่านการบำบัดเพื่อจะนำไปใช้ซ้ำสำหรับงานภูมิทัศน์ (Landscape irrigation) ซึ่งถูกจัดในหัวข้อการนำน้ำกลับมาใช้ซ้ำสำหรับเมือง (Urban Reuse) (U.S. Environmental Protection Agency, 2004) ได้เสนอน้ำที่จะนำกลับมาใช้สำหรับงานภูมิทัศน์ควรมี ค่าพีเอช (PH) อยู่ในช่วง 6-9 ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวภาพหรือบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD) ควรมีค่าน้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความขุ่นของน้ำ (Turbidity) ควรมีค่าน้อยกว่า 2 NTU (Nephelometric Turbidity Unit) และ ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ไม่ควรตรวจพบต่อปริมาตรตัวอย่าง 100 มิลลิตร (No detectable fecal coliform/100 mL)

จากวัตถุประสงค์การศึกษาได้มุ่งเน้นการบำบัดน้ำเสียจากอาคารเพื่อการนำกลับไปใช้ใหม่สำหรับงานภูมิทัศน์ ดังนั้น น้ำเสียจากอาคารที่ผ่านการบำบัดโดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียนจึงมีแนวโน้มที่จะนำไปใช้ใหม่ได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าพีเอชของการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 5 ยังคงมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับนำกลับไปใช้ แสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน

พารามิเตอร์	การทดลอง					
	1 (เต็มอากาศ ตลอดเวลา)	2 (60/60)	3 (40/80)	4 (30/90)	5 (80/40)	6 (90/30)
พีเอช (pH)	5.3±0.5	7.1±0.3	6.2±0.2	7.1±0.3	5.7±0.5	6.3±0.3
ซีโอดี (COD)	23.1±5.3	35.0±3.1	21.4±4.2	33.7±10.4	24.7±9.4	32.0±21.6
ทีเคเอ็น (TKN)	23.3±2.4	23.3±3.4	30.8±6.6	25.5±9.0	14.7±4.0	17.70±7.0
แอมโมเนีย (NH <sub>3</sub> )	16.6±2.3	24.5±7.0	37.9±14.1	31.1±6.5	15.4±4.0	12.5±4.6
ไนไตรท์ (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	0.16±0.04	0.18±0.04	0.10±0.01	0.22±0.07	ND	ND
ไนเตรท (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0.19±0.01	0.08±0.02	0.08±0.08	0.08±0.02	0.07±0.02	0.09±0.02
ฟอสเฟต (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	5.9±0.1	4.1±0.1	3.1±1.4	3.7±2.3	3.2±1.5	3.9±1.7
Total coliform				ND		
Fecal E.coli				ND		

หมายเหตุ

(ND) = Not Detectable : ตรวจไม่พบ

#### 4.4 ผลการประเมินต้นทุนการใช้พลังงานในการเดินระบบ

การใช้พลังงานสำหรับการเดินระบบบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียนของการศึกษาผลของการเติม-หยุดเติมอากาศ ที่สัดส่วนแตกต่างกันต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากอาคารในครั้งนี้ได้คำนวณการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าบำบัดน้ำเสียของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบคลองวนเวียน โดยกำหนดให้ปริมาณน้ำที่ได้จากการกรองด้วยเมมเบรนเป็นอัตราการใช้น้ำประปาและนำมาคำนวณเป็นค่าน้ำประปา เพื่อหาสัดส่วนของการเติม-หยุดเติมอากาศที่เหมาะสมในการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และค่าการใช้พลังงานที่ดีที่สุด ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ของระบบถูกคำนวณจากอัตราการใช้ไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ประเภทที่ 2 และอัตราค่าน้ำประปาได้จากปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดถูกนำมาเป็นค่าปริมาณการใช้น้ำของการประปานครหลวง ประเภทที่ 2 โดยอัตราค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าและปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ได้จะถูกนำไปคำนวณเป็นค่าบำบัดน้ำเสีย

ค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าของทั้ง 6 การทดลอง พบว่า การทดลองที่ 1 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับการเดินระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียนมากที่สุดเท่ากับ 1,908 หน่วยต่อเดือน โดยคำนวณเป็นค่าไฟฟ้าของระบบเท่ากับ 9,517.44 บาทต่อเดือน และเท่ากับ 114,209.28 บาทต่อปี เนื่องจาก มีการเติมอากาศให้กับระบบอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา และการทดลองที่ 3 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเดินระบบน้อยที่สุดเท่ากับ 477 หน่วยต่อเดือน มีค่าไฟฟ้าของระบบเท่ากับ 2,582.21 บาทต่อเดือน และ เท่ากับ 30,986.52 บาทต่อปี เนื่องจากมีสัดส่วนการเติมอากาศน้อยกว่าการหยุดเติมอากาศ แสดงในตารางที่ 9

ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดออกจากระบบขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการกรองน้ำและการอุดตันของเมมเบรน พบว่า ค่าน้ำประปาของการทดลองที่ 3 มีปริมาณน้ำที่ออกจากระบบมากที่สุดเท่ากับ 557.172 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน โดยมีค่าน้ำประปาเท่ากับ 9,228.61 บาทต่อเดือน และเท่ากับ 110,743.32 บาทต่อปี การทดลองที่ 1 มีปริมาณน้ำที่ออกจากระบบ 505.494 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน มีค่าน้ำประปาเท่ากับ 8,346.09 บาทต่อเดือน และเท่ากับ 100,153.08 บาทต่อปี แสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 9 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเดินระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน

อัตราค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้า			
การทดลอง	จำนวน พลังงานไฟฟ้า (หน่วย/เดือน)	ค่าพลังงานไฟฟ้า x ค่าFt (บาท/เดือน)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/ปี)
1	1,908	9,517.44	114,209.28
2	954	4,925.77	59,109.24
3	636	3,331.58	39,978.96
4	477	2,582.21	30,986.52
5	1,272	6,284.84	75,418.08
6	1,431	7,028.68	84,344.16

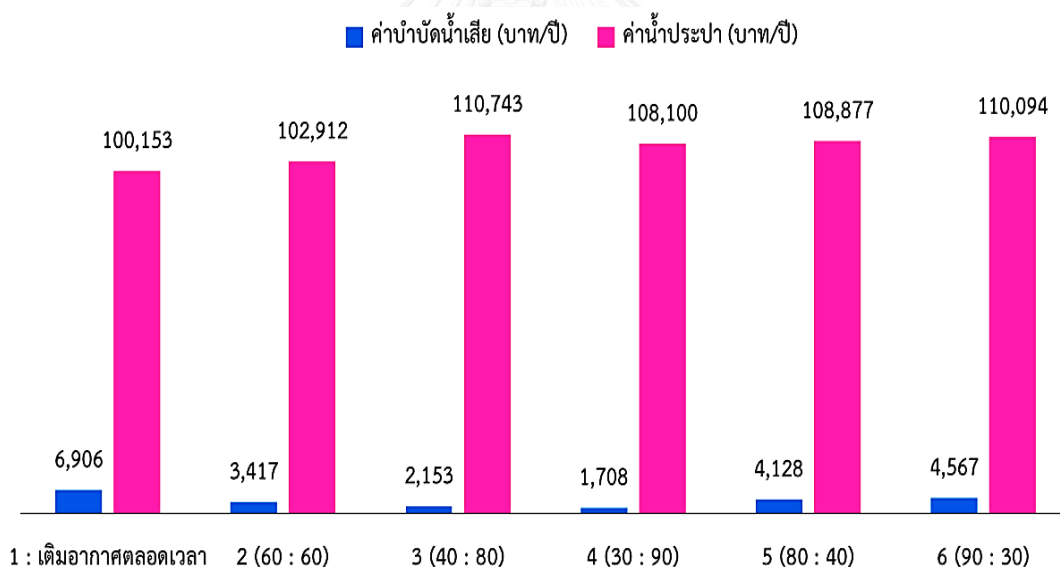
ตารางที่ 10 ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดและอัตราค่าบริการการใช้น้ำประปา

อัตราค่าน้ำประปา			
การทดลอง	ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัด (ลูกบาศก์เมตร/เดือน)	ค่าน้ำประปา (บาท/เดือน)	ค่าน้ำประปา (บาท/ปี)
1	505.494	8,346.09	100,153.08
2	518.958	8,576.02	102,912.24
3	557.172	9,228.61	110,743.32
4	544.302	9,008.32	108,099.84
5	548.064	9,073.07	108,876.84
6	554.004	9,174.51	110,094.12



ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบและปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดถูกนำมาคำนวณเป็นค่าบำบัดน้ำเสียของระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน จากนั้น นำไปเปรียบเทียบกับค่าการใช้น้ำประปา พบว่า ค่าบำบัดน้ำเสียในทุกการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าการใช้น้ำประปา แสดงในรูปที่ 37 โดยการทดลองที่ 1 มีการเติมอากาศตลอดเวลา ทำให้ค่าพีเอชลดต่ำลง จึงต้องเติมสารเคมี สำหรับปรับพีเอชให้เป็นกลางเพื่อให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ในส่วนเติมอากาศ เป็นจำนวนเงิน 180 บาท

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการบำบัดน้ำเสียจากอาคารโดยถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน มีต้นทุนค่าบำบัดน้ำเสียต่ำกว่าค่าการใช้น้ำประปา โดยในการคำนวณค่าบำบัดน้ำเสียในหัวข้อนี้ มิได้รวมต้นทุนการก่อสร้างระบบ



รูปที่ 37 การเปรียบเทียบอัตราค่าบำบัดน้ำเสียจากถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียนกับอัตราค่าน้ำประปา

เมื่อพิจารณาค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า ค่าการใช้น้ำประปา และค่าบำบัดน้ำเสีย เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัดซีโอที ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส พบว่า อัตราค่าการใช้พลังงาน และประสิทธิภาพการบำบัดที่มีความเหมาะสมต่อการเดินระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน คือ การทดลองที่ 4 (30/90 นาที) มีค่าการใช้พลังงานน้อยที่สุด และมีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เหมาะสมสำหรับการใช้น้ำในงานภูมิทัศน์ แสดงในตารางที่ 11 โดยการทดลองที่ 1 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดและมีประสิทธิภาพการบำบัดน้อยที่สุด เนื่องจากมีการเติมอากาศตลอดเวลาทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน อีกทั้งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน โดยเกินความจำเป็น

จากวัตถุประสงค์ของการศึกษาครั้งนี้มีเป้าหมายเพื่อนำน้ำกลับไปใช้ใหม่ในงานภูมิทัศน์และมุ่งเน้นเรื่องการประหยัดพลังงาน ดังนั้น จึงสรุปว่า การเติม-หยุดเติมอากาศ ที่ 30/90 นาที เป็นสถานะที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน-ดีไนตริฟิเคชัน ควบคู่กันในส่วนเติมอากาศ ทำให้อัตราการบำบัดไนโตรเจนเพิ่มขึ้น และช่วยประหยัดต้นทุนการเดินระบบ

ตารางที่ 11 ผลการเปรียบเทียบอัตราค่าใช้จ่ายพลังงานต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ทีเคเอ็น และฟอสฟอรัส

การประเมินอัตราค่าการใช้พลังงาน : ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ทีเคเอ็น ฟอสฟอรัส						
การทดลอง	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/ปี)	อัตราค่าน้ำประปา (บาท/ปี)	อัตราค่าน้ำดื่มเสีย (บาท/ปี)	% Removal COD	% Removal TKN	% Removal PO43-
1	114,209	100,153	6,906	85.64±2.5	49.05±5.6	24.51±3.8
2	59,109	102,912	3,417	82.58±2.8	73.91±5.6	19.22±9.2
3	39,979	110,743	2,153	88.70±2.7	68.22±9.2	19.45±8.1
4	30,987	108,100	1,708	85.09±6.5	72.52±7.6	14.41±8.4
5	75,418	108,877	4,128	86.83±6.3	80.11±4.6	33.91±15.7
6	84,344	110,094	4,567	85.71±9.0	81.84±7.7	37.17±17.3

## บทที่ 5

### บทสรุป และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนของช่วงเวลาการเติม-หยุดเติมอากาศที่เหมาะสมต่อการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน ธาตุอาหารไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เพื่อนำน้ำกลับมาใช้ในงานภูมิทัศน์ โดยถึงปฏิกรณณ์ชีวภาพแบบคลองวนเวียนขนาดต้นแบบ มีไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน (MF) ติดตั้งอยู่ที่ส่วนเติมอากาศทำหน้าที่กรองตะกอนจุลินทรีย์และสารแขวนลอย และใช้น้ำเสียจริงจากอาคาร ดำเนินระบบที่สภาวะอุณหภูมิห้อง มีระยะเวลาพักน้ำเท่ากับ 24 ชั่วโมง ควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเท่ากับ 0.2-4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแบ่งการศึกษาเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้

##### 1. การศึกษาการอุดตันของเมมเบรน

ลักษณะพื้นผิวหน้าและสัณฐานวิทยาเมมเบรนเมื่อเริ่มกรองน้ำ มีกลุ่มตะกอนจุลินทรีย์เข้าเกาะติดและสร้างโคโลนีอยู่ที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรน ลักษณะเป็นพื้นผิวขรุขระปกคลุมด้วยชั้นไบโอฟิล์ม เนื่องจากจุลินทรีย์ในระบบปล่อยสารเหนียวที่มีชื่อว่า Extracellular Polymeric Substances (EPS) หรือ EPS ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกาวทำหน้าที่ช่วยในการเกาะยึดกันระหว่างเซลล์จุลินทรีย์และเมื่อเพิ่มระยะเวลาเดินระบบส่งผลให้ตะกอนจุลินทรีย์เกาะติดที่ผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สาร EPS เป็นโพลิเมอร์ภายนอกเซลล์มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบเชิงซ้อน คือ โปรตีนและโพลีแซกคาไรด์ โดยปริมาณการผลิตสาร EPS มากหรือน้อยจะมีผลต่อการรวมกลุ่มของตะกอนจุลินทรีย์และการเกาะติดที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรน เมื่อตรวจสอบลักษณะของตะกอนภายใต้กล้องจุลทรรศน์ชนิดคอมพาวน์ พบว่า ตะกอนแตกกระจายไม่รวมกลุ่มเป็นก้อนตะกอนขนาดใหญ่ สาเหตุที่ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์มีขนาดเล็กไม่รวมกลุ่มเป็นก้อนขนาดใหญ่

นอกเหนือจากปริมาณสาร EPS ยังมีปัจจัยทางกายภาพที่ทำให้ตะกอนแตกละเอียด คือ แรงเฉือนของฟองอากาศและความแปรปรวนของระแสน้ำในระบบ โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.767 – 163 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคในเชิงพื้นที่ผิว D [3,2] เท่ากับ 14.4 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคในเชิงปริมาตร D [4,3] เท่ากับ 29.0 ไมโครเมตร

2. ศึกษาผลของการเติม-หยุดเติมอากาศที่สัดส่วนแตกต่างกัน 6 สัดส่วน คือ เติมอากาศ ตลอดเวลา 60/60 40/80 30/90 80/40 และ 90/30 นาที การทดลองนี้แบ่งย่อยเป็น 2 การทดลอง คือ

- สภาวะการเดินระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน
- การบำบัดน้ำเสียของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเพื่อบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน (ซีโอดี) ไนโตรเจน (ทีเคเอ็น) และฟอสฟอรัส (ฟอสเฟต)

ปัจจัยควบคุมสภาวะการเดินระบบประกอบด้วย พีเอช ออกซิเจนละลายน้ำ อุณหภูมิ และ ปริมาณความเข้มข้นของเอ็มแอลเอสเอส พบว่า อุณหภูมิของระบบเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลที่ทำการทดลอง ค่าพีเอชของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบทุกการทดลองมีค่าคงที่ แต่พีเอชในส่วนเติมอากาศ มีค่าไม่สม่ำเสมอแปรผันตรงกับสัดส่วนการเติม-หยุดเติมอากาศ กล่าวคือ เมื่อเติมอากาศให้กับ ส่วนเติมอากาศ ค่าพีเอชจะลดต่ำลง และเมื่อหยุดเติมอากาศค่าพีเอชจะปรับเพิ่มขึ้น การเติมอากาศ จะเป็นการเพิ่มออกซิเจนให้กับระบบทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็น ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) และเมื่อหยุดเติมอากาศปริมาณออกซิเจนในส่วนเติมอากาศจะลดต่ำลงทำให้เกิดสภาวะจำกัดอากาศและขาดอากาศ ระบบจึงเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็น ไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) พีเอชจึงปรับเพิ่มขึ้น การเติมอากาศให้กับระบบมีผลต่ออัตราการบำบัด สารอินทรีย์และไนโตรเจน เนื่องจากจุลินทรีย์ในส่วนเติมอากาศใช้ออกซิเจนเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ และผลิตเซลล์ใหม่ ซึ่งการวิเคราะห์ค่าเอ็มแอลเอสเอสเป็นปัจจัยที่บ่งชี้ถึงการใส่สารอินทรีย์และ ธาตุอาหารจากน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ โดยในการทดลองที่ 1 ซึ่งมีการเติมอากาศตลอดเวลาปริมาณ เอ็มแอลเอสเอสน้อยที่สุดและค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับทุกการทดลอง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $887.3 \pm 49.9$  มิลลิกรัมต่อลิตร

ประสิทธิภาพการบำบัด ซีโอดี ทีเคเอ็น และฟอสเฟต ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบ คลองวนเวียน พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงที่สุดคือ การทดลองที่ 3 สัดส่วนการเติม-หยุดเติมอากาศ 40/80 นาที ร้อยละการบำบัดเท่ากับ  $88.70 \pm 2.7$  และมีประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็นสูงที่สุด คือ การทดลองที่ 6 สัดส่วนการเติม-หยุดเติมอากาศ 90/30 นาที ร้อยละการบำบัดเท่ากับ  $81.84 \pm 7.7$  ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตยังไม่เป็นที่น่าพอใจในทุกการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบการทดลองทั้งหมด พบว่า การทดลองที่ 6 สัดส่วนการเติม-หยุดเติมอากาศ 90/30 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ  $37.1 \pm 17.3$

### 3. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน

คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว พบว่า มีความเป็นไปได้ที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้มุ่งหวังที่จะบำบัดน้ำเสียจากอาคารเพื่อนำกลับไปใช้สำหรับงานด้านภูมิทัศน์

### 4. การประเมินต้นทุนการใช้พลังงานในการเดินระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการเดินระบบและอัตราการกรองน้ำจากเมมเบรน (คิดเป็นค่าการใช้น้ำประปา) เปรียบเทียบกับค่าบำบัดน้ำเสีย และประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส พบว่า การทดลองที่ 4 สัดส่วนการเติม-หยุดเติมอากาศ 30/90 นาที เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเดินระบบ ประสิทธิภาพการบำบัดรวมถึงความคุ้มค่าทางด้านพลังงานและค่าใช้จ่ายของการเดินระบบ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การอุดตันของเมมเบรนที่เกิดขึ้นในระหว่างการกรองน้ำ เป็นสาเหตุที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ดังนั้น ในการออกแบบระบบโดยเพิ่มไบโอบอล (Bioball) ลงในส่วนเติมอากาศอาจจะทำให้ลดการอุดตันของเมมเบรน รวมถึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบได้จากจุลินทรีย์ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของไบโอบอล

2. การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการตรวจสอบเพียงองค์ประกอบของสารที่เป็นสาเหตุการอุดตันของเมมเบรน คือ สาร Extracellular Polymeric Substances (EPS) ของจุลินทรีย์ในระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน ดังนั้น เพื่อให้เกิดความชัดเจนในประเด็นนี้ จึงควรศึกษาปริมาณการผลิตสาร EPS ของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบด้วย

3. การศึกษานี้ได้ทำการทดลอง โดยใช้น้ำเสียจริงจากอาคาร ดังนั้น หากจะมีการศึกษาต่อไปในอนาคตจึงควรทำการศึกษาในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไว้อย่างแน่นอน ก่อนเดินระบบจากน้ำเสียจริง เพื่อแสดงให้เห็นถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาในช่วงการเติม-หยุดเติมอากาศต่อการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

## รายการอ้างอิง

- Alaya SB, Haouech L, Cherif H, Shayeb H (2010) Aeration management in an oxidation ditch. *Desalination* 252: 172-178
- APHA APHAA, the American Water Works Association and WEE, the Water Environment Federation (2012) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. In 22nd (ed) American Public Health Association 1015 fifteenth street, NW Washington, DC 20005:
- Basuvaraj M, Fein J, Liss SN (2015) Protein and polysaccharide content of tightly and loosely bound extracellular polymeric substances and the development of a granular activated sludge floc. *Water Research* 82: 104-117
- Chang J, Liang W, Xiao E, Wu Z (2010) Effect of intermittent aeration on the treatment performance in a submerged membrane bioreactor. *Wuhan University Journal of Natural Sciences* 15: 455-460
- Chen H, Wang D, Li X, Yang Q, Luo K, Zeng G (2013) Biological phosphorus removal from real wastewater in a sequencing batch reactor operated as aerobic/extended-idle regime. *Biochemical Engineering Journal* 77: 147-153
- Chen X, Fujiwara T, Nakamachi K, Kawaguchi Y, Nishimura F, Ohtoshi K (2012) Evaluation of a novel oxidation ditch system with dual DO control technology for biological nutrient removal by mass balance analysis. *Desalination* 286: 24-33



- De Temmerman L, Maere T, Temmink H, Zwijnenburg A, Nopens I (2015) The effect of fine bubble aeration intensity on membrane bioreactor sludge characteristics and fouling. *Water Research* 76: 99-109
- Elena G, Igor G (2015) Simultaneous Denitrification and Nitrification in the Lab-scale Oxidation Ditch with Low C/N Ratio. *Procedia Engineering* 117: 107-113
- Ergas SJ, Aponte-Morales V (2014) 3.8 - Biological Nitrogen Removal A2 - Ahuja, Satinder. In *Comprehensive Water Quality and Purification*, pp 123-149. Waltham: Elsevier
- Fumasoli A, Morgenroth E, Udert KM (2015) Modeling the low pH limit of *Nitrosomonas eutropha* in high-strength nitrogen wastewaters. *Water Research* 83: 161-170
- Guo C-Z, Fu W, Chen X-M, Peng D-C, Jin P-K (2013) Nitrogen-removal performance and community structure of nitrifying bacteria under different aeration modes in an oxidation ditch. *Water Research* 47: 3845-3853
- Heaton RD (1981) Wastewater reclamation and reuse. *GeoJournal* 5: 483-501
- Hu Y, Wang XC, Yu Z, Ngo HH, Sun Q, Zhang Q (2016) New insight into fouling behavior and foulants accumulation property of cake sludge in a full-scale membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science* 510: 10-17
- Kimura K, Ogyu R, Miyoshi T, Watanabe Y (2015) Transition of major components in irreversible fouling of MBRs treating municipal wastewater. *Separation and Purification Technology* 142: 326-331
- Lee P-H, Cotter SF, Reyes Prieri SC, Attalage D, Sung S (2013) pH-gradient real-time aeration control for nitrification community selection in a non-porous

hollow fiber membrane biofilm reactor (MBfR) with dilute wastewater. *Chemosphere* 90: 2320-2325

Li J, Healy MG, Zhan X, Norton D, Rodgers M (2008) Effect of Aeration Rate on Nutrient Removal from Slaughterhouse Wastewater in Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactors. *Water, Air, and Soil Pollution* 192: 251-261

Lim BS, Choi BC, Yu SW, Lee CG (2007) Effects of operational parameters on aeration on/off time in an intermittent aeration membrane bioreactor. *Desalination* 202: 77-82

Lin H, Zhang M, Wang F, Meng F, Liao B-Q, Hong H, Chen J, Gao W (2014) A critical review of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane bioreactors: Characteristics, roles in membrane fouling and control strategies. *Journal of Membrane Science* 460: 110-125

Lin Y-M, Tay J-H, Liu Y, Hung Y-T (2009) Biological Nitrification and Denitrification Processes. In *Biological Treatment Processes*, Wang LK, Pereira NC, Hung Y-T (eds) pp 539-588. Totowa, NJ: Humana Press

Liu G, Wang J (2015) Quantifying the chronic effect of low DO on the nitrification process. *Chemosphere* 141: 19-25

Ma J, Wang Z, Xu Y, Wang Q, Wu Z, Grasmick A (2013) Organic matter recovery from municipal wastewater by using dynamic membrane separation process. *Chemical Engineering Journal* 219: 190-199

Mutamim NSA, Noor ZZ, Hassan MAA, Yuniarto A, Olsson G (2013) Membrane bioreactor: Applications and limitations in treating high strength industrial wastewater. *Chemical Engineering Journal* 225: 109-119

- Pan J, Fei H, Song S, Yuan F, Yu L (2015) Effects of intermittent aeration on pollutants removal in subsurface wastewater infiltration system. *Bioresource Technology* 191: 327-331
- Peng Y-z, Wang X-l, Li B-k (2006) Anoxic biological phosphorus uptake and the effect of excessive aeration on biological phosphorus removal in the A2O process. *Desalination* 189: 155-164
- Radjenović J, Matošić M, Mijatović I, Petrović M, Barceló D (2008) Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology. In *Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste: Removal Technologies*, Barceló D, Petrovic M (eds) pp 37-101. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
- Sajjad M, Kim IS, Kim KS (2016) Development of a novel process to mitigate membrane fouling in a continuous sludge system by seeding aerobic granules at pilot plant. *Journal of Membrane Science* 497: 90-98
- Shammas NK, Wang LK (2009) Oxidation Ditch. In *Biological Treatment Processes*, Wang LK, Pereira NC, Hung Y-T (eds) pp 513-538. Totowa, NJ: Humana Press
- Shapleigh JP (2009) Dissimilatory and Assimilatory Nitrate Reduction in the Purple Photosynthetic Bacteria. In *The Purple Phototrophic Bacteria*, Hunter CN, Daldal F, Thurnauer MC, Beatty JT (eds) pp 623-642. Dordrecht: Springer Netherlands
- Spulber N, Sabbaghi A (1998) Water Reuse and Recycling. In *Economics of Water Resources: From Regulation to Privatization*, pp 143-167. Dordrecht: Springer Netherlands

- Suwal S, Doyen A, Bazinet L (2015) Characterization of protein, peptide and amino acid fouling on ion-exchange and filtration membranes: Review of current and recently developed methods. *Journal of Membrane Science* 496: 267-283
- Tiranuntakul M (2012) Submerged Membrane Bioreactor and Fouling Problems. *The Journal of KMUTNB* 22: 678-687
- Trivedi HK (2009) Simultaneous Nitrification and Denitrification (SymBio® Process). In *Advanced Biological Treatment Processes*, Wang LK, Shammas NK, Hung Y-T (eds) pp 185-208. Totowa, NJ: Humana Press
- U.S. Environmental Protection Agency (2000) Wastewater Technology Fact Sheet Oxidation Ditches. In Office of Water Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency
- U.S. Environmental Protection Agency (2004) Guidelines for Water Reuse. Municipal Support Division Office of Wastewater Management Office of Water Washington, DC
- U.S. Environmental Protection Agency (2007) Biological Nutrient Removal Processes and Costs. In *Journal of Environmental Engineering* 133(10): 1075-1082
- U.S. Environmental Protection Agency (2012) Guidelines for Water Reuse. In U.S. Environmental Protection Agency Office of Wastewater Management Office of Water Washington, D.C. :
- Visvanathan C, and Aim, R. Ben (2557) Membrane Bioreactor Applications in Wastewater Treatment. In *Journal of Environmental Engineering* 133(10): 1075-1082
- Wang J, Yang J, Zhang H, Guo W, Ngo H-H (2015) Feasibility study on magnetic enhanced flocculation for mitigating membrane fouling. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 26: 37-45

- Wang Z, Wu Z, Tang S (2009) Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. *Water Research* 43: 2504-2512
- Yin C, Meng F, Chen G-H (2015) Spectroscopic characterization of extracellular polymeric substances from a mixed culture dominated by ammonia-oxidizing bacteria. *Water Research* 68: 740-749
- Yongzhen P, Shouyou GAO, Shuying W, Lu BAI (2007) Partial Nitrification from Domestic Wastewater by Aeration Control at Ambient Temperature\*. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 15: 115-121
- Zeng W, Li L, Yang Y-y, Wang X-d, Peng Y-z (2011) Denitrifying phosphorus removal and impact of nitrite accumulation on phosphorus removal in a continuous anaerobic-anoxic-aerobic (A2O) process treating domestic wastewater. *Enzyme and Microbial Technology* 48: 134-142
- Zhang W, Cao B, Wang D, Ma T, Xia H, Yu D (2016) Influence of wastewater sludge treatment using combined peroxyacetic acid oxidation and inorganic coagulants re-flocculation on characteristics of extracellular polymeric substances (EPS). *Water Research* 88: 728-739
- Zhou J, Yang F-l, Meng F-g, An P, Wang D (2007) Comparison of membrane fouling during short-term filtration of aerobic granular sludge and activated sludge. *Journal of Environmental Sciences* 19: 1281-1286
- Zhu G, Peng Y, Li B, Guo J, Yang Q, Wang S (2008) Biological Removal of Nitrogen from Wastewater. In *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, Whitacre DM (ed) pp 159-195. New York, NY: Springer New York

กรมควบคุมมลพิษ (2548a) ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด. In ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม:

กรมควบคุมมลพิษ (2548b) เรื่อง กำหนดประเภทของอาคารเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่จะต้องถูกควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม. In ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ed)

กรมโยธาธิการและผังเมือง (2522) พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522. In กระทรวงมหาดไทย ก (ed) กรุงเทพฯ:

การประปานครหลวง (2559) อัตราค่าน้ำประปา. แหล่งที่มา:

[http://www.mwa.co.th/ewt\\_news.php?nid=303](http://www.mwa.co.th/ewt_news.php?nid=303). 2 มีนาคม 2559. In

การไฟฟ้านครหลวง (2559) อัตราค่าไฟฟ้าประเภทต่างๆ. แหล่งที่มา:

<http://www.meo.or.th/profile/index.php?l=th&tid=3&mid=112&pid=109>.

13 มีนาคม 2559. In

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2545) วิศวกรรมกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 3. บริษัท เอส. อาร์. พรินติ้ง แมสโปรดักส์ จำกัด, นนทบุรี

เทียนนลิน รมสกุล (2555) การกำจัดสารอาหารของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน เพื่อการนำน้ำเสียจากอาคารกลับมาใช้ใหม่. In วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2544) การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ

ธรรมธร นรพลภ (2557) การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ( Water Reuse ) In pp 1-3. กรมควบคุมมลพิษ: สำนักจัดการคุณภาพน้ำ

นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์ (2553) การวิเคราะห์อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นจากของเสียประเภท  
ยางในกระบวนการเติมอากาศ. In วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์,  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นันทนากร จรรย์านุกูล (2551) การหาประสิทธิภาพการเติมอากาศแบบหัวฟู่ที่ทำมาจากเซรามิก. In  
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผกาวดี แก้วกันเนตร (2554) เทคโนโลยีเมมเบรนและการประยุกต์ใช้. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น,  
ขอนแก่น

พัฒนพงษ์ ตีชะรา (2552) การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นสูงโดย  
ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใช้เมมเบรน. In วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย,  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วีรานุช หลาง (2551) จุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ (2552) กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ พื้นฐานและการคำนวณ  
ออกแบบ. หจก. สยามสเตชันซีฟฟลายส์., กรุงเทพฯ

สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ (2551) เทคโนโลยีน้ำเสีย. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



**ภาคผนวก ก**  
**มาตรฐานน้ำทิ้งที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์**  
**ชีวภาพเมมเบรน**

ตารางที่ ก-1 เกณฑ์คุณภาพน้ำสำหรับน้ำกลับมาใช้ใหม่ ของประเทศญี่ปุ่น

	Japan Sewage Association (proposed in 1981)			Working group composed of Ministry of Construction and some big city (proposed in 1990)	
	Toilet flushing use	Spraying use	Landscape use	Landscape use**	Recreational use***
Coliform group	10 or below (cfu/mL)	Not detective	Not detective	1,000 or below (cfu/100mL)	50 or below (cfu/100mL)
Chlorine Residual (mg/L)*	Trace amount	0.4 or over	—	—	—
Appearance	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant	—	—
Color (color unit)	—	—	—	40 or below	10 or below
Turbidity (mg- kaolin equivalent/L)	—	—	10 or below	10 or below	5 or below
Odor	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant	Not unpleasant
pH	5.8-8.6	5.8-8.6	5.8-8.6	5.8-8.6	5.8-8.6
BOD (mg/L)	—	—	10 or below	10 or below	3 or below

Note : (\*) combined residual chlorine, (\*\*) restricted human contact, (\*\*\*) limited human contact

ตารางที่ ก-2 การคำนวณค่าไฟฟ้า

	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)	ค่าบริการ (บาท/เดือน)
1. แร่งตัน 12 – 24 กิโลวัตต์	3.9086	312.24
2. แร่งตันต่ำกว่า 12 กิโลวัตต์		46.16
150 หน่วย (กิโลวัตต์ชั่วโมง) แรก (หน่วยที่ 1 – 150)	3.2484	
250 หน่วยต่อไป ( หน่วยที่ 151 – 400)	4.2218	
เกินกว่า 400 หน่วย ( หน่วยที่ 401 เป็นต้นไป )	4.4217	

ที่มา: การไฟฟ้านครหลวง (2559)

การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าสามารถหาได้จาก

$$1. \text{ค่าพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)} = \text{กำลังไฟฟ้า} \times \text{ระยะเวลาที่ใช้ไฟฟ้า}$$

หมายเหตุ : 1 กิโลวัตต์ = 1,000 วัตต์

$$2. \text{ค่าไฟฟ้าฐาน (บาท)} = (\text{จำนวนพลังงานไฟฟ้า} \times \text{อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า}) + \text{ค่าบริการรายเดือน}$$

$$3. \text{ค่าไฟฟ้าผันแปร หรือ ค่า ( F<sub>v</sub> ) (บาท)} = \text{จำนวนพลังงานไฟฟ้า} \times \text{ค่า F<sub>v</sub>}$$

หมายเหตุ :

ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่า ( F<sub>v</sub> ) จากการไฟฟ้านครหลวง

$$4. \text{ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7% (บาท)} = (\text{ค่าไฟฟ้าฐาน} + \text{ค่า F<sub>v</sub>}) \times 7/100$$

$$5. \text{ค่าไฟฟ้าทั้งหมด (บาท)} = \text{ค่าไฟฟ้าฐาน} + \text{ค่าไฟฟ้าผันแปร ( F<sub>v</sub> )} + \text{ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%}$$

ตารางที่ ก-3 การคำนวณค่าน้ำประปา

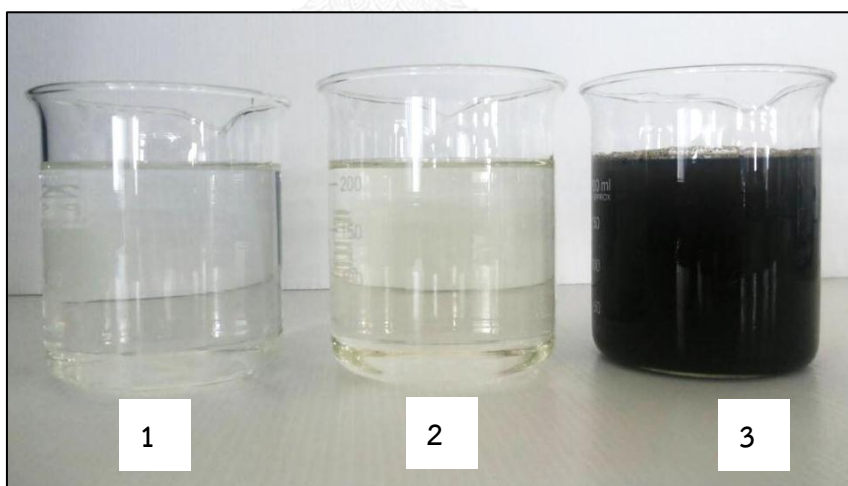
ประเภทที่ 1 ที่พักอาศัย		ประเภทที่ 2 ธุรกิจ ราชการ รัฐวิสาหกิจ อุตสาหกรรม และอื่นๆ	
ปริมาณน้ำใช้ (ลูกบาศก์เมตร)	ราคาค่าน้ำ (บาท/ลูกบาศก์ เมตร)	ปริมาณน้ำใช้ (ลูกบาศก์เมตร)	ราคาค่าน้ำ (บาท)
1-30	8.5	0-10	9.5 แต่ไม่ต่ำกว่า 90.00 บาท
31-40	10.03	11-20	10.7
41-50	10.35	21-30	10.95
51-60	10.68	31-40	13.21
61-70	11	41-50	13.54
71-80	11.33	51-60	13.86
81-90	12.5	61-80	14.19
91-100	12.82	81-100	14.51
101-120	13.15	101-120	14.84
121-160	13.47	121-160	15.16
161-200	13.8	161-200	15.49
มากกว่า 200	14.45	มากกว่า 200	15.81

ที่มา: การประปานครหลวง (2559)

ภาคผนวก ข  
ข้อมูลการอุดตันของเมมเบรน



รูปที่ ข-1 ลักษณะเมมเบรนที่เกิดการอุดตันในส่วนเติมอากาศของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบ  
คลองวนเวียน



รูปที่ ข-2 ลักษณะน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยเมมเบรน ชนิด MF

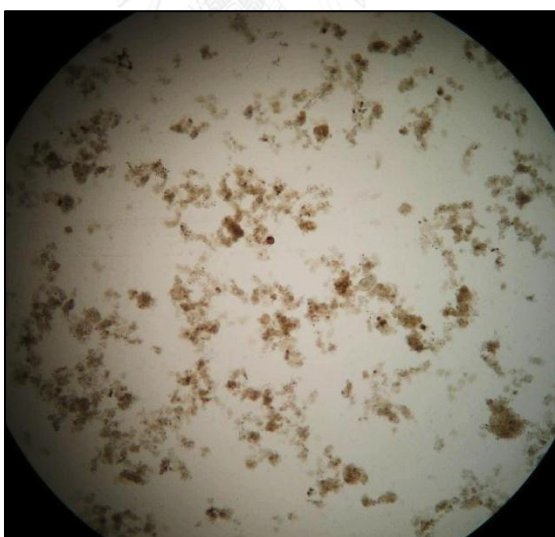
หมายเหตุ: หมายเลข 1 คือ น้ำประปา

หมายเลข 2 คือ น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเมมเบรน

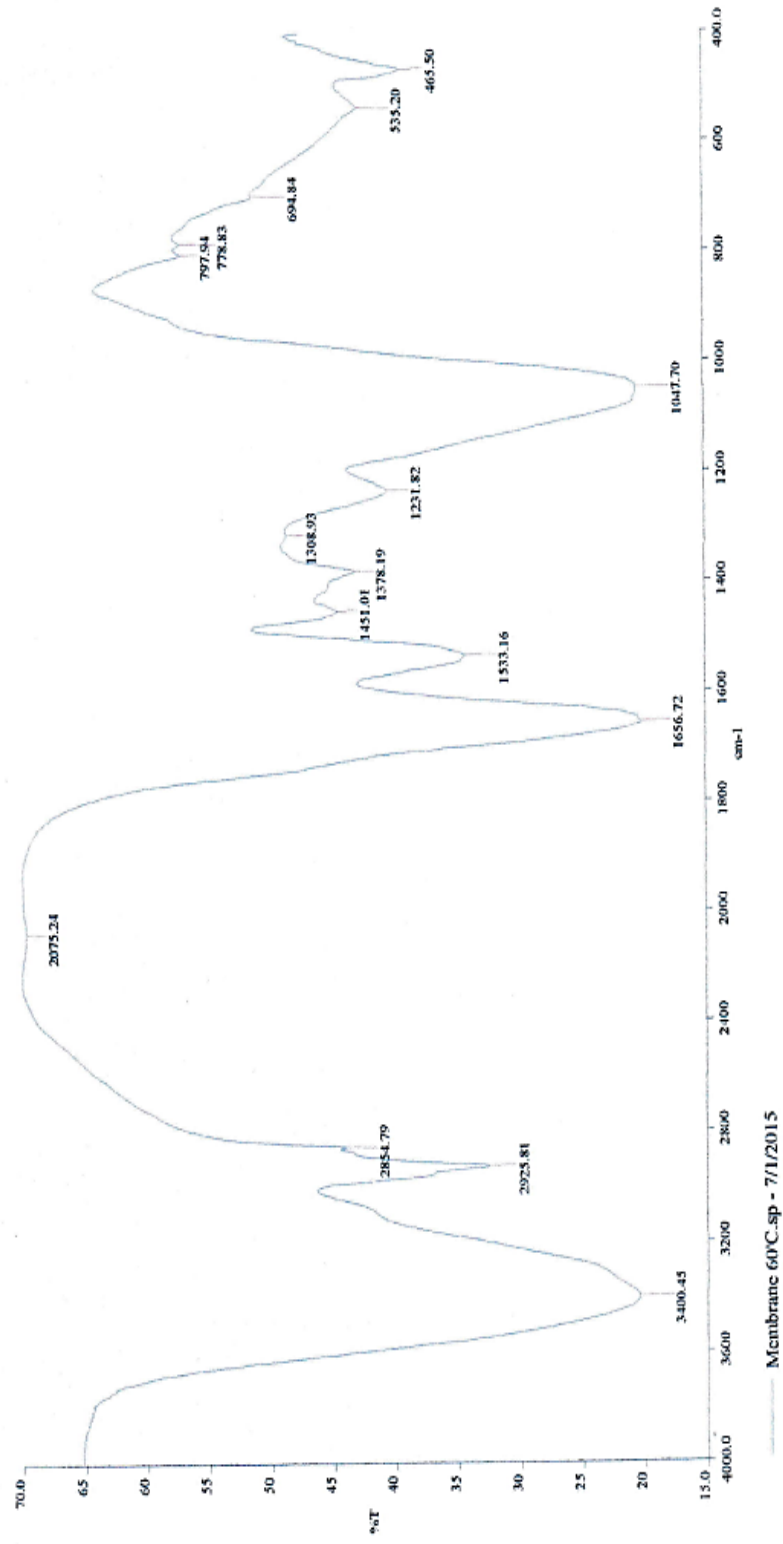
หมายเลข 3 คือ น้ำจากส่วนเติมอากาศ



รูปที่ ข-3 SV30 ของตะกอนจากส่วนเต็มอากาศ



รูปที่ ข-4 ตะกอนจุลินทรีย์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 10X



รูปที่ ข-5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโมเลกุลของสารที่ก่อให้เกิดการอุดตันบนผิวหน้าเมมเบรน

# Analysis Result

Scientific and Technological Research Equipment Centre (STREC), Chulalongkorn University

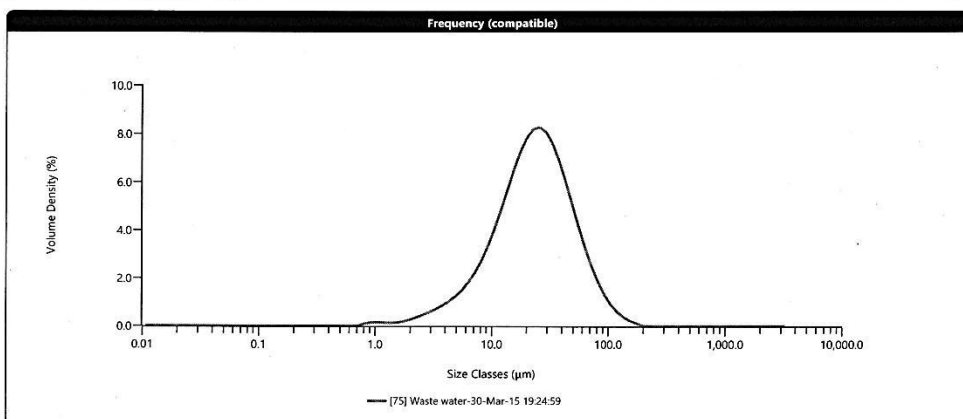


Created by: AdminN  
Last edited: 01-Dec-14 22:12:13

Sample Details	
Sample Name	Waste water
File Name	S580958
Measurement Date Time	30-Mar-15 19:24:59
Instrument Type	Mastersizer3000
Instrument Serial No.	MAL1099267
Accessory Name	Hydro EV

Analysis details	
Particle Name	Standard wet
Dispersant Name	Water
Dispersant Refractive Index	1.330
Analysis Model	General Purpose
Analysis Sensitivity	Normal
Weighted Residual	0.47 %
Particle Refractive Index	1.530
Particle Absorption Index	0.100
Particle Density	1.00 g/cm <sup>3</sup>
Laser Obscuration	15.60 %
Ultrasound Achieved	0 %
Stirrer Speed Achieved	2500 rpm

Result	
Concentration	0.0303 %
Uniformity	0.680
Specific Surface Area	415.9 m <sup>2</sup> /kg
D [3,2]	14.4 μm
D [4,3]	29.0 μm
Span	2.154
Result Units	Volume
Dv (10)	7.59 μm
Dv (50)	23.1 μm
Dv (90)	57.4 μm



Size (μm)	% Volume In	Size (μm)	% Volume In	Size (μm)	% Volume In	Size (μm)	% Volume In	Size (μm)	% Volume In	Size (μm)	% Volume In
0.0100	0.00	0.0679	0.00	0.460	0.00	3.12	0.59	21.2	6.85	144	0.18
0.0114	0.00	0.0771	0.00	0.523	0.00	3.55	0.72	24.1	6.92	163	0.09
0.0129	0.00	0.0876	0.00	0.594	0.00	4.03	0.86	27.4	6.75	186	0.00
0.0147	0.00	0.0995	0.00	0.675	0.00	4.58	1.04	31.1	6.34	211	0.00
0.0167	0.00	0.113	0.00	0.767	0.09	5.21	1.25	35.3	5.75	240	0.00
0.0189	0.00	0.128	0.00	0.872	0.12	5.92	1.52	40.1	5.03	272	0.00
0.0215	0.00	0.146	0.00	0.991	0.13	6.72	1.85	45.6	4.25	310	0.00
0.0244	0.00	0.166	0.00	1.13	0.11	7.64	2.27	51.8	3.47	352	0.00
0.0278	0.00	0.188	0.00	1.28	0.11	8.68	2.78	58.9	2.74	400	0.00
0.0315	0.00	0.214	0.00	1.45	0.12	9.86	3.37	66.9	2.10	454	0.00
0.0358	0.00	0.243	0.00	1.65	0.16	11.2	4.03	76.0	1.55	516	0.00
0.0407	0.00	0.276	0.00	1.88	0.22	12.7	4.73	86.4	1.10	586	0.00
0.0463	0.00	0.314	0.00	2.13	0.30	14.5	5.43	98.1	0.76	666	0.00
0.0526	0.00	0.357	0.00	2.42	0.39	16.4	6.05	111	0.49	756	0.00
0.0597	0.00	0.405	0.00	2.75	0.49	18.7	6.55	127	0.31	859	0.00

Software Version: 3.00  
Malvern Instruments Ltd - www.malvern.com  
Page 1 of 1



รูปที่ ข-6 ขนาดอนุภาคของตะกอนในส่วนเติมอากาศของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบ  
คลองวนเวียน



สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถาบัน 2 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330  
โทร. 02-2188211 , 02-2188213 โทรสาร. 02-2188212

### รายงานผลวิเคราะห์

เจ้าของตัวอย่าง : น.ส.จิรันธินี กองวงศ์

ที่อยู่ : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประเภทตัวอย่าง : น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว

รหัสงานวิเคราะห์ : C 02355

วันที่ส่งตัวอย่าง : 19 เมษายน 2559

วันที่ออกผลวิเคราะห์ : 25 เมษายน 2559

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลวิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
Total Coliform	MPN/100mL	<3	Fecal Coliform Procedure 9221 E.
Fecal ( E.coli )	MPN/100mL	<3	Escherichia coli Procedure 9221 F.

BASED ON STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER 22<sup>nd</sup> Edition (2012)

หมายเหตุ : รายงานฉบับนี้รับรองผลให้เฉพาะตัวอย่างที่ส่งตรวจเท่านั้น ห้ามนำไปใช้อ้างอิงเพื่อการค้าหรือโฆษณาสินค้า การคัดลอกหรือสำเนารายงานผลวิเคราะห์ไปเผยแพร่ต่อสาธารณะต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้อำนวยการสถาบันฯ

รูปที่ ข-7 ผลการวิเคราะห์จุลินทรีย์ Coliform และ E.coli

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



**ภาคผนวก ค**  
**ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ**

ข้อมูลสภาวะการเดินระบบของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน ของการทดลองที่ 1-6 เป็นระยะเวลา 180 วัน และข้อมูลการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส จากการศึกษาผลของสัดส่วนการเติม-หยุดเติมอากาศที่แตกต่างกัน 6 สัดส่วน

**ตารางที่ ค-1** สภาวะการเกิดระบบของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน การทดลองที่ 1-6

Date	pH				Temp.				DO				MLSS mg/l
	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	
RUN 1													
1	7.1	7.1	5.7	5.6	29.2	29.2	29.2	29.2	0.3	0.4	3.2	3.3	938.8
	7.0	7.0	5.6	5.7	28.3	28.3	28.2	28.2	0.1	0.1	3.5	3.5	849.4
	7.1	7.1	6.1	5.2	30.4	31.0	31.0	31.1	0.5	0.2	3.5	3.5	762.4
	7.2	7.1	5.6	5.5	28.7	28.9	28.9	28.7	0.4	0.4	3.8	3.9	888.6
	7.3	7.1	4.7	4.7	28.4	28.4	28.2	28.4	0.4	0.3	3.8	3.9	961.6
	7.4	7.1	4.4	4.2	30.1	30.5	30.6	30.5	0.7	0.2	3.7	3.4	870.8
	7.3	7.2	5.8	5.5	30.2	30.3	30.2	30.4	0.2	0.2	3.3	3.5	899.4
	7.4	7.3	5.6	5.6	29.1	29.1	29.3	29.0	0.4	0.4	3.4	3.5	820.6
	7.2	7.1	4.8	4.6	28.8	28.5	28.9	28.2	0.3	0.4	3.6	3.8	905.0
	7.3	6.9	4.3	4.4	29.1	29.1	29.2	29.5	0.1	0.3	3.4	3.8	853.0
	7.4	7.3	6.0	5.6	29.1	29.3	29.3	29.9	0.8	0.2	3.7	4.0	895.4
	7.1	7.2	5.4	5.3	30.2	29.8	29.9	29.5	0.3	0.3	3.1	3.4	839.4
	7.2	7.3	6.0	6.0	28.0	27.9	27.9	27.9	0.3	0.3	3.5	3.7	906.4
	7.5	7.5	5.5	5.9	30.2	30.1	29.9	30.1	0.5	0.3	3.9	3.6	940.2
	7.4	7.5	6.0	6.0	29.6	29.7	29.7	29.3	0.4	0.5	4.1	3.9	855.4
	7.2	7.3	6.0	5.7	30.7	30.6	30.8	30.8	0.4	0.4	3.8	3.6	965.4
	7.0	7.1	5.8	5.7	30.6	30.5	30.5	30.3	0.4	0.4	3.6	3.9	917.4
	7.1	6.8	5.0	4.9	29.1	29.1	29.4	29.1	0.1	0.3	3.3	3.7	912.4
	7.2	6.9	5.4	5.2	29.5	29.5	29.4	29.5	0.5	0.2	3.6	3.8	855.2
30	7.4	7.3	5.5	5.1	28.7	28.7	28.8	28.7	0.6	0.6	3.7	3.5	909.8

ตารางที่ ค-1 สภาวะการเกิดระบบของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน (ต่อ)

Date	pH				Temp.				DO				MLSS mg/l
	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	
RUN 2													
31	7.4	7.9	7.0	7.2	29.4	29.6	29.5	29.7	0.4	0.1	3.1	2.9	957.8
	7.4	7.7	6.7	6.6	29.8	29.5	29.5	29.6	0.4	0.2	3.2	2.8	927.0
	7.4	7.7	7.2	7.3	30.1	29.9	29.4	29.4	0.4	0.1	3.1	2.9	937.2
	7.3	7.1	7.1	7.1	29.7	29.7	29.5	29.7	0.3	0.1	3.0	3.0	945.6
	7.3	7.1	7.2	7.2	28.5	28.4	28.2	28.4	0.2	0.1	2.9	2.9	1666.2
	7.8	7.5	7.4	7.3	30.0	30.0	30.0	30.1	0.4	0.3	2.9	2.8	696.4
	7.3	7.2	7.4	7.5	29.4	29.1	29.0	29.4	0.1	0.4	3.1	3.0	1100.2
	7.3	7.5	8.0	7.8	29.5	29.5	29.4	29.5	0.2	0.5	3.0	2.9	653.7
	7.4	7.9	7.2	7.3	28.4	28.4	28.3	28.4	0.5	0.5	3.2	3.2	752.5
	7.4	7.3	7.1	7.3	30.2	30.1	30.0	30.2	0.2	0.3	3.1	3.0	823.0
	7.9	7.7	7.0	6.9	29.1	29.0	28.8	29.1	0.2	0.3	3.1	3.0	975.1
	7.6	7.2	6.9	6.8	29.8	29.5	29.4	29.5	0.2	0.2	2.9	2.9	512.7
	7.9	7.1	6.9	6.9	28.7	28.5	28.4	28.7	0.3	0.1	3.2	3.1	928.4
	7.3	7.3	7.1	7.1	30.2	30.1	30.0	30.1	0.4	0.1	3.2	3.0	1218.2
	7.4	7.4	7.1	7.0	29.6	29.6	29.6	29.4	0.4	0.1	3.2	3.1	934.8
	7.4	7.9	7.1	7.1	29.4	29.4	29.3	29.3	0.4	0.4	3.1	3.0	1712.0
	7.6	7.3	7.2	7.1	29.3	29.1	29.0	29.1	0.1	0.2	3.0	3.0	980.2
	7.9	7.8	6.9	7.0	29.7	29.4	29.4	29.4	0.2	0.3	3.3	3.1	926.2
	7.3	7.8	6.8	6.7	30.1	30.0	30.3	30.1	0.2	0.3	3.0	3.0	1524.0
60	7.0	7.4	7.0	6.9	28.3	28.4	28.6	28.4	0.1	0.1	2.9	2.9	1303.2

**ตารางที่ ค-1** สภาวะการเกิดระบบของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน (ต่อ)

Date	pH				Temp.				DO				MLSS mg./l
	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	
RUN 3													
61	7.4	7.1	7.1	7.1	30.5	30.2	30.5	30.3	0.1	0.2	3.0	3.0	1027.2
	7.4	7.3	7.1	7.1	29.8	29.8	29.5	29.4	0.2	0.2	2.9	2.6	1632.2
	7.3	7.3	7.0	6.5	29.7	29.5	29.7	29.5	0.2	0.1	3.0	2.9	1948.4
	7.3	7.5	7.0	7.1	29.3	29.1	29.4	29.1	0.2	0.1	3.2	3.1	1846.4
	7.2	7.3	6.9	7.0	30.2	30.0	30.0	30.2	0.1	0.1	3.3	3.1	1128.6
	7.1	7.4	7.0	7.1	30.1	30.0	30.3	30.1	0.3	0.4	3.3	3.1	1255.6
	7.0	7.4	6.9	6.9	29.8	30.0	30.0	29.9	0.3	0.1	3.4	3.0	1190.2
	7.0	7.0	7.0	7.1	28.6	28.9	28.4	28.8	0.4	0.1	3.1	3.0	1264.6
	7.1	7.5	6.9	7.0	28.9	29.2	29.5	29.5	0.4	0.1	3.2	3.0	1140.4
	7.0	7.2	7.1	7.1	29.8	29.0	29.5	29.3	0.4	0.3	3.5	3.5	1278.4
	7.1	7.1	7.0	7.0	29.1	29.0	29.0	29.4	0.1	0.2	3.1	3.0	1421.8
	7.0	7.1	6.9	6.9	29.6	29.4	29.7	29.6	0.1	0.3	3.2	3.1	1310.0
	7.2	7.3	6.8	6.8	28.3	28.6	28.3	28.3	0.2	0.2	3.4	3.0	1430.8
	7.2	7.2	6.9	7.0	30.6	30.1	30.0	30.1	0.2	0.2	3.4	3.0	1730.8
	7.1	7.3	6.7	6.8	29.5	29.7	30.0	30.0	0.3	0.3	3.0	3.0	1635.6
	7.1	7.0	6.9	6.5	31.2	30.5	31.0	31.0	0.4	0.3	3.1	3.0	1849.8
	7.2	7.1	6.7	7.0	29.3	29.2	29.1	29.3	0.1	0.1	3.4	3.1	1453.2
	7.2	7.1	6.6	6.8	28.5	28.5	28.4	28.4	0.2	0.2	3.2	3.0	1755.0
	7.0	7.2	7.1	6.9	30.0	30.2	30.0	30.1	0.3	0.2	3.1	3.0	1723.4
90	7.1	7.2	7.0	6.9	30.1	30.0	30.0	30.4	0.2	0.1	3.1	3.0	1458.6

ตารางที่ ค-1 สภาวะการเกิดระบบของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน (ต่อ)

Date	pH				Temp.				DO				MLSS mg./l
	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	
RUN 4													
91	7.7	7.8	7.1	7.0	29.6	29.3	29.5	29.5	0.1	0.3	3.4	3.1	2528.2
	7.7	7.7	7.1	7.2	28.8	28.7	28.5	28.8	0.1	0.3	3.1	3.1	1985.8
	7.8	7.8	7.1	6.8	29.7	29.4	29.5	29.5	0.1	0.4	3.2	3.0	1960.2
	7.8	7.8	7.1	6.6	30.1	30.1	30.0	30.1	0.1	0.2	3.1	3.0	1791.2
	7.9	7.9	6.9	7.9	28.6	29.0	29.1	29.0	0.1	0.2	3.2	3.0	1302.6
	7.9	7.9	6.8	8.0	29.4	29.7	29.3	29.4	0.2	0.2	3.3	3.1	2058.4
	7.8	7.8	7.3	7.3	30.0	29.9	30.0	30.0	0.1	0.3	3.0	2.9	1199.4
	7.8	7.7	7.3	7.1	30.2	30.0	30.1	30.1	0.3	0.3	3.0	2.9	1177.7
	7.9	7.7	7.4	7.3	27.4	27.0	27.8	27.8	0.3	0.3	3.1	3.0	1936.4
	7.8	7.7	7.2	7.2	29.5	29.7	29.5	29.4	0.1	0.2	3.2	3.0	1823.8
	7.6	7.4	7.3	7.0	29.3	29.5	29.7	29.5	0.1	0.2	3.4	3.1	935.9
	7.7	7.4	7.1	6.9	29.1	29.2	29.1	29.1	0.1	0.1	3.2	3.0	799.3
	7.4	7.2	7.1	7.0	28.5	28.4	28.5	28.5	0.1	0.1	3.2	3.0	1351.4
	7.9	7.5	7.2	7.0	29.7	29.8	29.5	29.7	0.2	0.1	3.2	3.1	1839.4
	7.8	7.3	7.1	6.8	30.2	30.0	30.0	30.1	0.2	0.2	3.0	3.0	1737.0
	8.0	7.8	7.4	7.1	30.0	30.1	30.0	30.0	0.2	0.2	3.2	3.1	1189.6
	7.6	7.3	6.9	6.6	29.8	29.9	29.4	29.8	0.3	0.3	3.6	3.2	1268.2
	7.5	7.4	6.9	6.9	29.1	29.5	29.3	29.5	0.4	0.4	3.4	3.0	1307.4
	7.3	7.2	6.9	6.7	28.9	28.9	29.0	28.9	0.4	0.3	3.0	3.0	962.9
120	7.5	7.7	7.3	7.0	29.0	29.6	29.1	29.0	0.1	0.1	3.0	3.0	2120.0

ตารางที่ ค-1 สภาวะการเกิดระบบของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน (ต่อ)

Date	pH				Temp.				DO				MLSS
	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	mg./l
RUN 5													
121	7.8	7.6	6.5	6.2	28.1	28.5	28.0	28.3	0.1	0.2	3.4	3.3	1391.2
	7.9	7.6	6.5	6.2	29.2	29.4	29.4	29.5	0.1	0.2	3.5	3.4	1208.4
	7.8	7.4	6.6	6.4	29.7	29.5	29.5	29.7	0.2	0.1	3.5	3.2	1465.8
	7.9	7.5	6.1	6.3	30.0	30.0	30.1	30.0	0.3	0.1	3.6	3.2	2121.6
	7.8	7.5	6.5	6.5	29.8	29.8	29.5	29.8	0.3	0.1	3.4	3.2	982.0
	7.1	7.6	6.3	6.4	29.5	29.4	29.4	29.5	0.1	0.1	3.4	3.2	1611.6
	7.8	7.5	5.5	5.5	29.1	29.2	29.1	29.4	0.2	0.2	3.2	3.1	2220.6
	7.1	7.0	5.7	5.3	30.1	30.2	29.7	30.0	0.2	0.3	3.2	3.1	1897.0
	7.2	7.2	5.3	5.4	27.6	27.5	27.7	27.7	0.1	0.2	3.3	3.2	1755.6
	7.1	7.5	5.0	5.3	27.8	27.5	28.0	28.0	0.1	0.2	3.3	3.2	2013.2
	7.1	7.4	5.4	5.5	29.3	29.4	29.4	29.7	0.1	0.2	3.4	3.2	2144.2
	7.1	7.3	5.3	5.3	30.2	29.9	30.1	30.1	0.1	0.1	3.5	3.2	1467.2
	7.2	7.5	5.7	5.5	31.0	30.8	30.8	30.9	0.1	0.1	3.4	3.3	1545.2
	7.2	7.6	5.7	5.5	29.8	29.7	29.8	29.7	0.2	0.3	3.3	3.1	1086.6
	7.0	7.4	6.3	6.1	30.1	30.2	30.1	30.1	0.1	0.1	3.2	3.1	1221.0
	6.9	6.5	6.1	6.0	29.4	29.4	29.6	29.4	0.1	0.1	3.3	3.1	1282.4
	8.0	7.5	5.6	5.6	28.7	28.7	28.3	28.3	0.1	0.3	3.3	3.1	1423.4
	7.6	7.7	5.0	5.0	27.9	28.0	28.0	28.0	0.1	0.1	3.3	3.0	1552.8
	7.9	7.7	5.7	5.5	28.0	28.2	28.0	28.0	0.1	0.2	3.2	3.0	1247.8
150	7.3	7.7	5.2	5.1	29.5	29.4	29.5	29.4	0.2	0.1	3.2	3.0	1224.6

ตารางที่ ค-1 สภาวะการเกิดระบบของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน (ต่อ)

Date	pH				Temp.				DO				MLSS mg./l
	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	Inf.	Anae.	Aero.	Eff.	
RUN 6													
151	7.6	7.7	6.7	6.8	30.6	30.4	30.5	30.0	0.1	0.2	3.4	3.0	508.6
	7.8	7.4	6.5	6.6	29.7	29.5	29.1	29.1	0.2	0.2	3.2	3.1	995.2
	7.9	7.4	6.2	6.8	29.4	29.9	29.5	29.4	0.2	0.1	3.3	3.3	1643.4
	7.8	7.4	6.5	6.5	29.6	29.8	29.6	29.5	0.1	0.1	3.3	3.3	1340.2
	7.8	7.6	6.5	6.4	30.0	30.5	30.0	30.0	0.1	0.2	3.4	3.4	1475.6
	7.7	7.6	6.5	6.9	28.3	28.4	28.1	28.1	0.1	0.2	3.5	3.2	904.2
	7.6	7.5	6.5	6.6	28.9	29.0	28.9	28.7	0.1	0.3	3.6	3.4	1276.2
	7.5	7.7	6.2	6.3	27.4	27.6	27.3	27.6	0.2	0.3	3.6	3.4	1283.6
	7.7	7.4	6.0	6.3	29.5	29.5	29.3	29.5	0.1	0.2	3.5	3.5	1210.8
	7.7	7.6	6.2	6.1	30.2	30.1	30.0	30.0	0.1	0.2	3.4	3.3	943.0
	7.6	7.3	6.0	6.1	29.8	30.0	29.8	29.8	0.1	0.1	3.4	3.3	1155.8
	7.6	7.4	6.1	6.0	29.4	29.4	29.1	29.0	0.1	0.2	3.4	3.3	1005.8
	7.3	7.0	6.0	5.9	30.2	30.0	30.0	30.0	0.2	0.2	3.2	3.1	1843.6
	7.3	7.2	6.4	6.2	29.8	29.4	29.3	29.1	0.1	0.1	3.4	3.3	1096.3
	7.9	7.5	6.1	6.1	28.7	28.4	28.3	28.3	0.3	0.1	3.5	3.3	969.4
	7.7	7.4	6.1	6.0	28.6	28.5	28.5	28.1	0.2	0.3	3.2	3.1	1657.2
	7.3	7.2	5.9	5.9	27.6	27.4	27.4	27.5	0.1	0.1	3.3	3.1	1331.4
	7.8	7.6	6.3	6.2	28.0	28.0	28.0	28.2	0.1	0.2	3.1	3.0	1640.4
	7.4	7.1	6.9	6.8	29.5	29.6	29.5	29.4	0.1	0.2	3.2	3.1	1008.2
180	7.8	7.6	6.2	6.2	29.7	29.5	29.4	29.3	0.2	0.2	3.3	3.3	1355.4

ตารางที่ ค-2 ข้อมูลการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน (ซีโอดี)

Concentration COD (mg./l)							
Date	Inf.	Eff.	% Removal	Date	Inf.	Eff.	% Removal
<u>RUN 1</u>	201.6	28.8	85.7	<u>RUN 4</u>	240.0	34.3	85.7
	230.4	28.8	87.5		291.4	34.3	88.2
	172.8	23.2	86.6		188.6	34.3	81.8
	144.0	24.4	83.1		308.6	34.3	88.9
	172.8	25.4	85.3		308.6	34.3	88.9
	197.3	20.4	89.7		171.4	51.4	70.0
	160.0	32.0	80.0		222.9	51.4	76.9
	135.4	21.5	84.1		222.9	34.3	84.6
	112.0	14.0	87.5		205.7	34.3	83.3
	160.0	24.2	84.9		188.6	17.1	90.9
	126.5	18.4	85.5		224.0	25.1	88.8
30	129.6	15.8	87.8	120	273.6	18.8	93.1
<u>RUN 2</u>	176.3	32.0	81.8	<u>RUN 5</u>	137.1	17.1	87.5
	240.0	38.0	84.2		154.3	34.3	77.8
	196.0	32.0	83.7		171.4	17.1	90.0
	228.0	32.0	86.0		154.3	42.9	72.2
	192.0	30.0	84.4		257.1	17.1	93.3
	224.0	40.0	82.1		257.1	34.3	86.7
	272.0	38.0	86.0		257.1	17.1	93.3
	196.0	38.0	80.6		154.3	17.1	88.9
	144.0	35.0	75.7		137.1	17.1	87.5
	192.0	34.0	82.3		222.9	34.3	84.6
	212.0	36.0	83.0		227.5	28.1	87.6
60	180.0	34.0	81.1	150	263.6	19.8	92.5
<u>RUN 3</u>	144.0	23.6	83.6	<u>RUN 6</u>	144.0	32.0	77.8
	129.0	16.4	87.3		192.0	0.0	100.0
	216.0	25.2	88.3		272.0	16.0	94.1
	216.0	28.8	86.7		240.0	16.0	93.3
	201.6	21.4	89.4		144.0	16.0	88.9
	220.0	23.2	89.5		224.0	16.0	92.9
	172.8	15.5	91.0		240.0	48.0	80.0
	144.0	21.6	85.0		240.0	16.0	93.3
	210.0	20.8	90.1		240.0	64.0	73.3
	189.0	14.5	92.3		272.0	48.0	82.4
	224.0	25.1	88.8		272.0	64.0	76.5
90	273.6	20.8	92.4	180	200.0	48.0	76.0

ตารางที่ ค-3 ข้อมูลการบำบัดไนโตรเจน

Date	TKN (mg./L)			NH <sub>3</sub> (mg./L)			NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	Inf.	Eff.	% Removal	Inf.	Eff.	% Removal	Eff.	Eff.
<u>RUN 1</u>	41.47	21.7	47.68	31.9	15.56	51.22	0.09	0.19
	51.6	22.66	56.09	39.7	14.77	62.8	0.18	0.2
	43.7	25.99	40.54	33.62	18.99	43.51	0.18	0.19
	42.15	21.32	49.43	32.42	13.79	57.47	0.18	0.18
	46.67	26.01	44.26	35.9	14.89	58.54	0.18	0.22
	45.27	19.5	56.93	34.82	16.09	53.8	0.19	0.18
	45.28	21.44	52.66	34.83	18.76	46.14	0.19	0.2
	45.33	25.93	42.79	34.87	19.76	43.32	0.19	0.21
	47.74	25.82	45.92	36.72	14.25	61.18	0.17	0.20
30	48.78	22.35	54.18	37.53	19.45	48.16	0.08	0.19
<u>RUN 2</u>	86.81	23.56	72.86	78.87	17.81	77.42	0.18	0.04
	89.15	20.79	76.68	68.93	19.89	71.15	0.19	0.1
	81.71	27.59	66.23	75.72	23.73	68.66	0.22	0.1
	83.1	26.52	68.08	83.91	29.59	64.74	0.19	0.09
	89.46	26.65	70.21	69	23.1	66.52	0.18	0.1
	94.88	25.89	72.71	74.04	25.31	65.82	0.18	0.08
	99.86	20.16	79.81	70.4	22.28	68.35	0.18	0.09
	96.45	16.25	83.15	71.8	24.93	65.28	0.18	0.08
	93.81	19.22	79.52	81.32	41.37	49.12	0.18	0.06
60	88.14	26.52	69.91	70.96	16.95	76.11	0.08	0.08
<u>RUN 3</u>	69.36	35.85	48.32	114.11	35.6	68.8	0.09	0.02
	85.93	24.63	71.33	125.3	52.26	58.29	0.09	0.03
	108.8	28.1	74.17	105.51	42.67	59.56	0.09	0.02
	103.7	36.6	64.7	108.09	55.62	48.54	0.1	0.08
	108.68	41.77	61.57	114.79	35.74	68.86	0.09	0.02
	109.43	28.85	73.63	104.99	44.21	57.89	0.09	0.01
	102.31	33.96	66.81	60.61	12.5	79.37	0.09	0.09
	111.76	18.9	83.09	101.9	36.79	63.89	0.1	0.14
	104.96	30.81	70.65	74.63	16.35	78.09	0.1	0.25
90	87.63	28.04	68.01	120.47	47.64	60.45	0.11	0.15



ตารางที่ ค-3 ข้อมูลการบำบัดไนโตรเจน (ต่อ)  $\text{NO}_3^-$

Date	TKN (mg./L)			NH <sub>3</sub> (mg./L)			NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	Inf.	Eff.	% Removal	Inf.	Eff.	% Removal	Eff.	Eff.
<u>RUN 4</u>	79.7	20.29	74.55	79.11	42.71	46.01	0.19	0.10
	77.74	23.31	70.02	91.99	21.92	76.17	0.24	0.11
	85.43	30.43	64.38	79.64	28.78	63.87	0.13	0.1
	66.09	9.07	86.27	71.83	34.73	51.65	0.28	0.07
	95.07	30.05	68.39	73.25	28.85	60.62	0.24	0.07
	107.73	42.84	60.23	71.95	30.11	58.16	0.17	0.07
	91.67	17.2	81.24	71.74	26.61	62.91	0.17	0.07
	99.98	25.2	74.8	71.83	29.9	58.38	0.32	0.07
	99.67	28.73	71.18	71.74	40.82	43.11	0.29	0.08
120	107.73	27.78	74.21	71.93	26.75	62.82	0.12	0.08
<u>RUN 5</u>	70.31	14.92	78.79	70.55	21.51	69.51	ND	0.08
	77.9	18.48	76.28	74.84	11.22	85	ND	0.06
	82.69	17.39	78.97	69.39	12.25	82.34	ND	0.05
	72.95	13.83	81.04	82.06	22.41	72.69	ND	0.05
	59.95	13.75	77.07	82.75	10.88	86.85	ND	0.07
	74.96	14.24	81	69.27	16.21	76.6	ND	0.05
	86.25	18.43	78.63	76.75	15.01	80.45	ND	0.05
	71.24	18.32	74.28	68.16	16.51	75.78	ND	0.07
	58.71	5.63	90.41	59.88	14.83	75.23	ND	0.07
150	75.89	11.67	84.62	69.45	12.94	81.36	ND	0.1
<u>RUN 6</u>	93.37	16.31	82.53	77.32	14.63	81.08	ND	0.12
	102.66	20.49	80.04	71.23	12.52	82.43	ND	0.11
	93.22	26.52	71.55	78.61	19.14	75.65	ND	0.07
	80.68	22.81	71.73	68.22	15.41	77.41	ND	0.08
	102.04	11.05	89.17	80.08	15.64	80.46	ND	0.08
	91.98	2.23	97.58	65.84	4.27	93.51	ND	0.07
	109.31	17.88	83.64	66.14	5.67	91.43	ND	0.06
	105.44	17.7	83.21	69.79	12.77	81.69	ND	0.11
	105.91	21.26	79.92	69.55	10.93	84.29	ND	0.11
180	99.87	20.8	79.18	68.46	14.38	78.99	ND	0.06

ตารางที่ ค-4 ข้อมูลการบำบัดฟอสฟอรัส  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

Concentration $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (mg/L)									
Date	Inf.	Eff.	% Removal	Date	Inf.	Eff.	% Removal		
RUN 1	8.78	6.96	20.81	RUN 3	9.99	9.22	7.78		
	7.60	6.06	20.20		6.88	5.33	22.57		
	9.20	6.94	24.56		3.67	2.78	23.75		
	8.40	6.64	20.91		2.71	2.49	7.83		
	7.52	5.40	28.15		2.42	2.25	7.11		
	8.40	6.60	21.43		2.36	2.21	6.67		
	5.86	4.51	23.08		6.67	5.72	14.24		
	8.71	6.39	26.60		2.41	2.24	7.15		
30	6.32	4.48	29.12	120	3.33	2.35	29.39		
	7.46	5.20	30.28		2.68	2.21	17.65		
	RUN 2	4.68	3.88		17.21	RUN 4	5.93	3.72	37.34
		4.94	4.24		14.27		2.72	2.21	19.01
		3.96	3.60		9.08		3.90	2.03	47.82
		4.80	4.21		12.30		6.41	3.31	48.28
		7.49	6.44		14.03		6.42	3.14	51.07
		4.91	3.99		18.75		12.22	6.29	48.51
5.14		4.01	22.11	6.22	4.98		19.85		
60	4.61	3.92	14.98	150	2.67	2.02	24.28		
	5.72	4.01	29.95		2.13	2.00	5.99		
	5.06	3.06	39.54		3.27	2.06	36.95		
	RUN 3	4.29	3.16		26.41	RUN 5	9.00	3.88	56.93
		6.48	5.52		14.89		4.93	4.24	14.02
		3.44	2.78		18.98		8.28	3.89	53.01
		6.27	4.81		23.21		9.11	4.21	53.84
		2.02	1.46		27.57		7.88	6.60	16.26
1.40		0.97	29.79	4.91	3.99		18.75		
2.91		2.32	20.12	3.98	2.28		42.73		
90	3.86	3.10	19.82	180	4.61	2.42	47.45		
	4.49	4.06	9.43		5.11	4.01	21.67		
	2.64	2.52	4.33		5.78	3.06	47.09		

ตารางที่ ค-5 ข้อมูลค่าบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียน

การทดลอง	ค่าบำบัดน้ำเสีย (บาท/ปี)	ค่าน้ำประปา (บาท/ปี)
1 : เต็มอากาศตลอดเวลา	6,906	100,153
2 (60 : 60)	3,417	102,912
3 (40 : 80)	2,153	110,743
4 (30 : 90)	1,708	108,100
5 (80 : 40)	4,128	108,877
6 (90 : 30)	4,567	110,094



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจิรฉัตรนิ น กงวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 14 มีนาคม พ.ศ. 2530 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะเทคโนโลยีการเกษตร สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การประมง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2552 และได้เข้าทำงานในหน่วยงานการวางแผน ของบริษัทผลิตยางรถยนต์ เป็นระยะเวลา 2 ปี และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 และได้นำเสนอผลงานวิชาการ เรื่อง “การพัฒนาถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบคลองวนเวียนขนาดต้นแบบ สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากอาคาร” ในงานประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 1 ธุรกิจเทคโนโลยี การจัดการและนโยบายนวัตกรรม ระหว่างวันที่ 27-28 มิถุนายน 2558

