

การศึกษาการอุดต้นและกระบวนการล้างย้อนในการประยุกต์ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคแทนที่
หน่วยตกตะกอนในระบบเอเอส



นายเจียรลลิตธิ กิตติจิตต์

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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Clogging phenomena and optimum backwash rate of ceramic diffuser applying as a
sedimentation unit in Activated sludge process

Mr. Tiensith Kittichit



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการอุดหนุนและกระบวนการล่างย้อนในการประยุกต์ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคแทนที่หน่วยตกตะกอนในระบบเอเอส
โดย	นายเชียรสิทธิ กิตติจิตต์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภู่งประเสริฐ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณะ ฝั่งรัมย์)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภู่งประเสริฐ)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)
..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. โสภา ชินเวชกิจวานิชย์)

เธียรสิทธิ กิตติจิตต์ : การศึกษาการอุดตันและกระบวนการล้างย้อนในการประยุกต์ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิกแทนที่หน่วยตกตะกอนในระบบเอเอส (Clogging phenomena and optimum backwash rate of ceramic diffuser applying as a sedimentation unit in Activated sludge process) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร. ศิริมา ปัญญาเมธิกุล, 126 หน้า.

การประยุกต์ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิกเพื่อใช้แทนที่หน่วยตกตะกอนในกระบวนการแยกทิวเด็ดสลัดจ์ เป็นการศึกษาเพื่อแก้ปัญหาการตกตะกอนซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัด งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระยะเวลาในการสูบกรองและล้างย้อนที่เหมาะสมในการเดินระบบและการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการทำนายอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศ โดยระบบมีการทำงานคล้ายระบบแอโรบิคเมมเบรนไบโอรีแอกเตอร์ แต่ใช้หัวกระจายอากาศเซรามิกแทนเมมเบรน การเดินระบบทำในถังปฏิกริยาปริมาตร 12.5 ลิตร ควบคุมภาระสารอินทรีย์ 37.5 กรัม-ซีโอดี/วันและอายุตะกอน 20 วัน แล้วทำการทดลองใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิกสูบกรองและเป่าอากาศต่อเนื่องที่ระยะเวลา 15, 30 และ 60 นาที จากการทดลองพบว่าระยะเวลาสูบกรองและล้างย้อนที่เหมาะสมที่สุดคือ 60 นาที โดยทำให้หัวกระจายอากาศมีอายุการใช้งานนานที่สุดคือ 122 วัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากระยะเวลาการสูบกรองและล้างย้อน 60 นาที เป็นระยะเวลานานที่สุดในการดำเนินการวิจัย ดังนั้นการยืดระยะเวลาในการสูบกรองและล้างย้อนให้นานขึ้น อาจทำให้อายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศยาวนานขึ้นอีก กลไกการอุดตันที่เกิดขึ้นที่หัวกระจายอากาศจะเกิดการอุดตันภายในรูพรุนและการอุดตันแบบชั้นเค้กพร้อมกัน สำหรับการประยุกต์ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการทำนายอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศสามารถคำนวณได้ด้วยค่าระดับการอุดตันถาวร โดยที่ระยะเวลาสูบกรองที่ 15, 30 และ 60 นาที มีค่าระดับการอุดตันถาวรเท่ากับ 0.001088, 0.002893 และ 0.002455 ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5670238521 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: ACTIVATED SLUDGE PROCESS / CERAMIC DIFFUSER / FILTRATION / MICROFILTRATION / BACKWASH / ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส / หัวกระจายอากาศแบบเซรามิค / การกรอง / ไมโครฟิลเตรชัน / ล้างย้อน

TIENSITH KITTICHIT: Clogging phenomena and optimum backwash rate of ceramic diffuser applying as a sedimentation unit in Activated sludge process.

ADVISOR: ASST. PROF. CHAIYAPORN PUPRASERT, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. SIRIMA PANYAMETHEEKUL, Ph.D., 126 pp.

This research study about an application of ceramic diffuser as a sedimentation unit of activated sludge system for solve sludge bulking problem that effect to effluent water. The ceramic diffusers were used in place of membrane of aerobic membrane bioreactor. This study investigated for optimized filtration and backwash time and proved equation to predict ceramic diffuser lifetime. The system volume was 12.5 L operating at organic loading 37.5 g COD/day and sludge ages 20 day. Moreover, using ceramic diffuser in continuously alternate filtrate and backwash in difference time of 15, 30 and 60 minutes were studies. The results showed that optimize operating time was 60 minutes that make ceramic diffuser had longest lifetime 122 days. However, this research investigated maximum operating time at 60 minutes. So if the operating time prolonged, ceramic diffuser's lifetime possibly extended. This research found both pore blocking and cake filtration in ceramic diffuser. From lifetime predicting mathematic model, Report degree of fouling at backwash time of 15, 30 and 60 minutes was 0.001088, 0.002893 and 0.002455 respectively.

Department: Environmental
Engineering

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2016

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการอนุเคราะห์จากหน่วยงานและบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนแก้ไขสิ่งบกพร่องและอุปสรรคปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาในการทำวิจัยและส่งผลให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนรองศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ ลากปรีสุทธิ และรองศาสตราจารย์ ดร. โสภา ชินเวชกิจวานิชย์ ที่ให้คำแนะนำและแก้ไขจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรม สั่งสอน ให้ความรู้และคำแนะนำที่ดีตลอดมา

ครูปฏิบัติกร และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจให้ตลอดมา และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกัน และกันตลอดระยะเวลาของการทำวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	1
สารบัญตาราง.....	3
บทที่ 1 บทนำ	5
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	5
1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	6
1.3. ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 การกรอง.....	7
2.1.1 ชนิดของการกรองของเหลว.....	7
2.1.2 ลักษณะการเดินระบบของการกรอง	8
2.1.3 กลไกของเครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการกรอง.....	8
2.2 กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process).....	9
2.2.1 ชนิดและกลไกในการแยกสารของเมมเบรน	10
2.2.2 การอุดตันบนเยื่อเมมเบรน (Fouling).....	13
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเมมเบรน.....	15
2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส	16
2.3.1 กลไกในการทำงาน	16

2.3.2	กลไกการเกิดแอ็คติเวตเต็ดจัสลัดจ์.....	17
2.3.3	การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์.....	18
2.3.4	การแบ่งประเภทของจุลินทรีย์.....	19
2.3.5	ส่วนประกอบและการทำงานของระบบ.....	21
2.3.6	ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบ.....	21
2.3.7	หลักการออกแบบระบบเอเอส	24
2.3.8	การควบคุมการทำงานของระบบบำบัดแบบเอเอส	28
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
2.4.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเอเอสและระบบแอโรบิคเมมเบรนไปโอรีแอกเตอร์	30
2.4.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ระบบต่างๆ.....	32
2.4.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	35
บทที่ 3	ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	37
3.1	แผนการทดลอง	37
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	41
3.3	การดำเนินการทดลอง.....	45
3.4	การวิเคราะห์ผลการทดลองและการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	51
บทที่ 4	ผลการวิจัย	54
4.1	การทดลองหาความต้านทานของหวักระจายอากาศแบบเซรามิค	54
4.2	การทดลองเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบเยื่อกรองชีวภาพโดยการประยุกต์ใช้หวักระจายอากาศแบบเซรามิคแทนเมมเบรน	56
4.2.1	ผลการเดินระบบบำบัดน้ำเสียของถังปฏิริยาที่ 1 ระยะเวลาสุบกรอง 15 นาที.....	57
4.2.2	ผลการเดินระบบบำบัดน้ำเสียของถังปฏิริยาที่ 2 ระยะเวลาสุบกรอง 30 นาที.....	59
4.2.3	ผลการเดินระบบบำบัดน้ำเสียของถังปฏิริยาที่ 3 ระยะเวลาสุบกรอง 60 นาที.....	62

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองและการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	66
4.4 ปัญหาที่พบระหว่างการทดลอง.....	75
4.5 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้จริง.....	78
4.5.1 แนวทางในการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสเดิม	78
4.5.2 แนวทางในการเลือกเครื่องสูบน้ำเสียขาออก	78
4.5.3 แนวทางในการเลือกชนิดวาล์วควบคุม	78
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	79
5.1.1 ระยะเวลาในการกรองและล้างย้อนของการใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคแทน หน่วยตกตะกอนในระบบเอเอส.....	79
5.1.2 กลไกการอุดตันของตะกอนจุลินทรีย์บริเวณหัวกระจายอากาศเซรามิค.....	79
5.1.3 การประเมินระยะเวลาในการอุดตันด้วยสมการทางคณิตศาสตร์	79
5.2 แนวทางการวิจัยในอนาคต.....	81
รายการอ้างอิง	82
ภาคผนวก.....	84
ภาคผนวก ก การคำนวณความต้านทานของหัวกระจายอากาศแบบเซรามิค	85
ภาคผนวก ข ผลการทำงานของหัวกระจายอากาศแบบเซรามิคและการคำนวณความต้านทาน รวม	100
ภาคผนวก ค การคำนวณระดับการอุดตันถาวรและการประมาณอายุการใช้งานของหัว กระจายอากาศ.....	123
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	126

สารบัญรูป

บทที่ 2

รูปที่ 2. 1 ตัวอย่างโมเลกุลและอนุภาคที่สามารถแยกได้ด้วยเมมเบรนชนิดต่างๆ	10
รูปที่ 2. 2 กลไกการออสโมซิสและการออสโมซิสผันกลับ	13
รูปที่ 2. 3 การอุดตันประเภทต่างๆภายในเมมเบรน.....	14
รูปที่ 2. 4 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเทียบกับเวลา.....	18
รูปที่ 2. 5 ส่วนประกอบของระบบเอเอส	21
รูปที่ 2. 6 การกระจายตัวของขนาดตะกอนในระบบเอเอสที่อายุตะกอนต่างๆ	31

บทที่ 3

รูปที่ 3. 1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	40
รูปที่ 3. 2 ถังปฏิกริยา	41
รูปที่ 3. 3 หัวกระจายอากาศแบบเซรามิค	42
รูปที่ 3. 4 เครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบชนิดไดอะแฟรม (Diaphragm Pump).....	42
รูปที่ 3. 5 เครื่องสูบน้ำเสียออกจากระบบชนิดรีดสาย (Peristaltic Pump)	43
รูปที่ 3. 6 เกจวัดความดัน (Pressure Gauge).....	43
รูปที่ 3. 7 เครื่องเติมอากาศ.....	44
รูปที่ 3. 8 เครื่องหน่วงเวลา.....	44
รูปที่ 3. 9 การติดตั้งชุดการทดลองเพื่อหาค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศแบบเซรามิค	46
รูปที่ 3. 10 การติดตั้งชุดการทดลองเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบเยื่อกรองชีวภาพโดยการประยุกต์ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคแทนเมมเบรน	47
รูปที่ 3. 11 กราฟแสดงความดันผ่านเมมเบรนที่ระยะเวลาต่างๆ (ประมาณการณ์).....	52
รูปที่ 3. 12 กราฟแสดงความดันผ่านเมมเบรนที่ระยะเวลาต่างๆของหัวกระจายอากาศ (ประมาณการณ์).....	53

บทที่ 4

รูปที่ 4. 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอร์มิทฟลักซ์ และค่าความดันผ่านหัวกระจายอากาศ.....	54
รูปที่ 4. 2 กราฟแสดงความต้านทานของหัวกระจายอากาศที่ระยะเวลาสูบกรอง 15 นาที	58
รูปที่ 4. 3 กราฟแสดงความต้านทานของหัวกระจายอากาศที่ระยะเวลาสูบกรอง 30 นาที	61
รูปที่ 4. 4 กราฟแสดงความต้านทานของหัวกระจายอากาศที่ระยะเวลาสูบกรอง 60 นาที	63
รูปที่ 4. 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ และจำนวนวันที่ทำการทดลองของถังปฏิกริยาที่ 1 ระยะเวลาสูบกรอง 15 นาที	70
รูปที่ 4. 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ และจำนวนวันที่ทำการทดลองของถังปฏิกริยาที่ 2 ระยะเวลาสูบกรอง 30 นาที	70
รูปที่ 4. 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ และจำนวนวันที่ทำการทดลองของถังปฏิกริยาที่ 3 ระยะเวลาสูบกรอง 60 นาที	71
รูปที่ 4. 8 ลักษณะชั้นเค้กของหัวกระจายอากาศหลังทำความสะอาดด้วยการเป่าอากาศ	72
รูปที่ 4. 9 พื้นผิวของหัวกระจายอากาศก่อนและหลังทำการทดลอง กำลังขยาย 200 เท่า.....	74
รูปที่ 4. 10 แผนภาพแสดงการติดตั้งวาล์วควบคุมและหัวกระจายอากาศ.....	76

สารบัญตาราง

บทที่ 2

ตารางที่ 2. 1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบเอสแต่ละประเภท	27
---	----

บทที่ 3

ตารางที่ 3. 1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในขั้นตอนที่ 1	38
--	----

ตารางที่ 3. 2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในขั้นตอนที่ 2	39
--	----

ตารางที่ 3. 3 ส่วนประกอบของธาตุอาหารเสริมในน้ำเสียสังเคราะห์.....	45
---	----

ตารางที่ 3. 4 ระยะเวลาในการสลับการทำงานของการสูบลมกรองน้ำเสียและการเป่าอากาศของหัวกระจายอากาศ.....	48
--	----

ตารางที่ 3. 5 ค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ วิธีการวิเคราะห์ และความถี่ในการวิเคราะห์.....	50
---	----

บทที่ 4

ตารางที่ 4. 1 ความต้านทานต่างๆของหัวกระจายอากาศ.....	55
--	----

ตารางที่ 4.4 ความต้านทานก่อนและหลังการล้างของหัวกระจายอากาศที่ระยะเวลาสูบลมกรอง 15 นาที.....	64
--	----

ตารางที่ 4.5 ความต้านทานก่อนและหลังการล้างของหัวกระจายอากาศที่ระยะเวลาสูบลมกรอง 30 นาที.....	65
--	----

ตารางที่ 4.6 ความต้านทานก่อนและหลังการล้างของหัวกระจายอากาศที่ระยะเวลาสูบลมกรอง 60 นาที.....	65
--	----

ตารางที่ 4. 7 ระดับการอุดตันถาวรของถังปฏิกรณ์ที่ 1 ระยะเวลาสูบลมกรอง/เป่าอากาศ 15 นาที ...	67
--	----

ตารางที่ 4. 8 ระดับการอุดตันถาวรของถังปฏิกรณ์ที่ 2 ระยะเวลาสูบลมกรอง/เป่าอากาศ 30 นาที ...	67
--	----

ตารางที่ 4. 9 ระดับการอุดตันถาวรของถังปฏิกรณ์ที่ 3 ระยะเวลาสูบลมกรอง/เป่าอากาศ 60 นาที ...	68
--	----

ตารางที่ 4. 10 การประมาณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศด้วยค่าระดับการอุดตันถาวร	69
---	----

ตารางที่ 4. 11 การประมาณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศด้วยกราฟเส้นตรง.....	71
--	----

ตารางที่ 4. 12 ความต้านทานของชิ้นแก้วของถังปฏิกรณ์ต่างๆ	73
---	----

บทที่ 5

ตารางที่ 5. 1 ค่าระดับการดูดตันถาวรที่ระยะเวลาการสูบกรองต่างๆ.....	80
ตารางที่ 5. 2 ค่า k ที่ระยะเวลาการสูบกรองต่างๆ	81



บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอส (Activated Sludge) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง โดยใช้ถังเติมอากาศและถังตกตะกอนเป็นองค์ประกอบหลักในการบำบัดน้ำเสีย แต่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอสมักพบปัญหาในการเดินระบบที่ส่งผลต่อคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัด เช่น ปัญหาการตกตะกอน ระบบแอโรบิกเมมเบรนไบโอรีแอกเตอร์เป็นรูปแบบหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอส ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาในการตกตะกอน โดยการใช้เมมเบรนในการกรองแยกตะกอนจุลินทรีย์ในระบบแทนการตกตะกอน อย่างไรก็ตามเนื่องจากเมมเบรนซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบมีราคาค่อนข้างสูงและเกิดการอุดตันได้ง่าย ทำให้ระบบแอโรบิกเมมเบรนไบโอรีแอกเตอร์ถูกเลือกใช้งานโดยมีข้อจำกัดเรื่องราคาต้นทุนของระบบ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำหัวกระจายอากาศแบบเซรามิกมาทดลองประยุกต์ในระบบแทนการใช้เมมเบรน เนื่องจากหัวกระจายอากาศนั้นมีความพรุนสูงและมีรูพรุนขนาดเล็ก จึงสามารถนำมาใช้ในการกรองแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกได้เช่นเดียวกับเมมเบรนแต่มีราคาถูกกว่า โดยหัวกระจายอากาศแบบเซรามิกนี้จะทำหน้าที่ (1) สูบกรองน้ำเสียเพื่อแยกน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วและตะกอนจุลินทรีย์ออกจากกัน และ (2) เป่าอากาศเพื่อเติมอากาศให้แก่ระบบและลดการสะสมตัวของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผิวหน้าของหัวกระจายอากาศแบบเซรามิกที่เกิดจากการสูบกรองด้วย พบว่าหัวกระจายอากาศแบบเซรามิกสามารถสูบกรองตะกอนจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและน้ำเสียที่บำบัดผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งตามกฎหมาย(1) แต่ในงานวิจัยยังไม่มีการศึกษาเรื่องการอุดตันที่เป็นปัญหาหลักในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง เพราะในการใช้งานจริงนั้นหัวกระจายอากาศแบบเซรามิกจะถูกติดตั้งที่ก้นถังเติมอากาศ หากเกิดการอุดตันจนไม่สามารถดำเนินการต่อได้ จะต้องหยุดระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำความสะอาดหรือเปลี่ยนหัวกระจายอากาศ

งานวิจัยนี้ทำการทดลองเพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกรองและการเป่าอากาศ เพื่อลดการอุดตันที่หัวกระจายอากาศให้น้อยที่สุด รวมถึงการศึกษากลไกที่ทำให้เกิดการอุดตันและการประยุกต์ใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการอุดตันและระยะเวลาที่ทำให้การอุดตันมีค่ามากกว่าค่าที่ยอมรับได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อประเมินระยะเวลาในการกรองและล้างย้อนของการใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิค แทนหน่วยตกตะกอนในระบบเอเอส
2. เพื่อศึกษากลไกการอุดตันของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบเอเอสบริเวณหัวกระจายอากาศเซรามิค
3. เพื่อประเมินระดับและระยะเวลาในการอุดตันด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งส่งผลให้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคไม่สามารถคืนสภาพด้วยการล้างย้อนได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ใช้ระบบเอเอสแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous flow activated sludge reactor) ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง
2. น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน และธาตุอาหารต่างๆจากสารเคมี
3. หัวเชื้อจุลินทรีย์นำมาจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำสีพระยา โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์จากส่วนตะกอนเวียนกลับ
4. หัวกระจายอากาศเซรามิคเป็นของบริษัท Schumacher ขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 190 – 280 ไมครอน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบระยะเวลาที่เหมาะสมในการกรองสลับการล้างย้อน เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบระบบโดยใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคแทนหน่วยตกตะกอนในระบบเอเอส
2. ทราบกลไกที่ทำให้เกิดการอุดตันที่หัวกระจายอากาศเซรามิค
3. สามารถประเมินระยะเวลาหรือจำนวนรอบในการเดินระบบที่ทำให้เกิดการอุดตันจนไม่สามารถฟื้นฟูสภาพด้วยการล้างย้อนได้
4. เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบและการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส โดยประยุกต์ใช้หัวกระจายอากาศแทนที่หน่วยตกตะกอน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกรอง

การกรองเป็นการแยกเอาอนุภาคของของแข็งออกจากของไหล โดยบังคับให้ของไหลไหลผ่านตัวกลาง(filtering medium) ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน อนุภาคของของแข็งที่ปะปนอยู่ในของไหลจะถูกกักอยู่บนรูและสะสมตัวกลายเป็นเบด (bed) เกาะอยู่บนผิวของตัวกลาง ในขณะที่ของไหลซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือก๊าซก็ได้ จะไหลผ่านเบดและตัวกลางไป ซึ่งของเหลวที่ไหลผ่านตัวกลางจะเรียกว่า ฟิลเตรท (filtrate) และอนุภาคที่ตกค้างอยู่ที่ผิวหน้าของตัวกลางเรียกว่า ฟิลเตอร์เค้ก (filter cake) (2-4)

2.1.1 ชนิดของการกรองของเหลว

แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

2.1.1.1 การกรองผ่านตัวกลาง (Screening/Straining Filtration) ในการกรองผ่านตัวกลางอนุภาคของแข็งที่ค้างอยู่จะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของรูในตัวกลาง ทำให้อนุภาคของของแข็งไม่สามารถผ่านตัวกลางออกไปได้ โดยประสิทธิภาพของการกรองจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคและขนาดของรูพรุนของตัวกลางที่เลือกใช้ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวกลาง ความเร็วในการกรอง ความหนืดของของไหล และแรงดึงดูดหรือแรงผลักระหว่างอนุภาคและผิวสัมผัสของตัวกลางอีกด้วย

2.1.1.2 การกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง (Depth Filtration) กลไกการแยกของอนุภาคของแข็งจะเกิดขึ้นภายในชั้นตัวกลาง ซึ่งอนุภาคที่ถูกคัดแยกจะมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของตัวกลาง ประสิทธิภาพในการกรองจึงสัมพันธ์กับความสูง ความพรุน และขนาดของตัวกลางที่เลือกใช้ เนื่องจากตัวแปรข้างต้นส่งผลต่อปรากฏการณ์การเคลื่อนย้าย (Transport Phenomena) อนุภาคดังกล่าวเข้าหาสารกรองและปรากฏการณ์การทำให้อนุภาคเกิดการเกาะติด (Attachment Phenomena) กับสารกรอง

2.1.1.3 การกรองแบบติดค้างที่ผิวหน้า (Surface Filtration/Cake Filtration) การกรองประเภทนี้เกิดจากอนุภาคของของแข็งที่สะสมตัวอยู่บนตัวกรองหรือฟิลเตอร์เค้กจะทำหน้าที่เป็นตัวกรอง โดยกลไกการดักจับอนุภาคด้วยชั้นเค้กที่เกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคของแข็งจะทำให้สามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงได้ การกรองแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งสูงมาก โดยมีความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งอย่างน้อย 10,000 mg/l หรือ 1%

ในทางปฏิบัติอาจมีการกรองหลายชนิดเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกันไปเป็นลำดับเช่น ในระยะแรกของการกรองขนาดของรูพรุนใหญ่กว่าอนุภาคของของแข็งทำให้เกิดการกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง

ทำให้เกิดการอุดตันและสะสมตัวของอนุภาคภายในชั้นกรองเพิ่มขึ้นจนกระทั่งรูพรุนมีขนาดเล็กลง ทำให้ชนิดการกรองเปลี่ยนมาเป็นการกรองผ่านตัวกลางและการกรองแบบติดค้างที่ผิวหน้าตามลำดับ

2.1.2 ลักษณะการเดินระบบของการกรอง

แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.1.2.1 การกรองแบบทีละเท (Batch filtration process) ในการกรองแบบนี้จะรวมเอา การกรอง การล้าง และการลดความชื้นเข้ามาไว้ด้วยกัน โดยในหนึ่งรอบของการดำเนินการจะ ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน คือ

- (1) การกรองหรือการก่อกำ
- (2) การล้างฟิลเตอร์เค้กเพื่อละลายสารปนเปื้อนออกไปจากฟิลเตอร์เค้ก
- (3) การลดความชื้นออกจากชั้นเค้ก (deliquoring) เพื่อความสะดวกในการจัดการ

ในภายหลัง

- (4) การทำความสะอาดเครื่องกรอง (cleaning)

2.1.2.2 การกรองแบบต่อเนื่อง (Continuous filtration process) การกรองแบบต่อเนื่อง จะมีพื้นที่ผิวการกรองมาก โดยจะมีการป้อนของไหล ผลิตภัณฑ์และฟิลเตอร์เค้กอย่างต่อเนื่อง ลักษณะสำคัญของการกรองแบบต่อเนื่องคือมีโซนในการทำงานมากกว่า 2 โซนขึ้นไป เช่น การก่อกำ ฟิลเตอร์เค้ก การล้างเค้ก การลดความชื้นในฟิลเตอร์เค้ก การทำแห้ง การกำจัดฟิลเตอร์เค้กออกจาก ระบบ เครื่องกรองที่มีลักษณะการกรองแบบต่อเนื่องอาจแบ่งตัวเครื่องออกเป็นสองส่วนคือ

- (1) ส่วนที่อยู่หนึ่งซึ่งมีหน้าที่ยึดอุปกรณ์ต่างๆ
- (2) อุปกรณ์ส่วนที่เคลื่อนที่ได้

2.1.2.3 การกรองแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi - Continuous filtration process) เป็นการกรอง แบบนี้จะเป็นลักษณะผสมระหว่างการกรองแบบต่อเนื่องและการกรองแบบทีละเท โดยจะขึ้นอยู่กับ ลักษณะของสารที่ต้องการกรองและช่วงเวลาในการเดินระบบ

2.1.3 กลไกของเครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการกรอง

ในการกรองมีตัวแปรสำคัญที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้คือ ความดันลด (ΔP) และอัตราการ กรอง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกลไกการทำงานของเครื่องสูบน้ำจะเป็นตัวตัดสินรูปแบบในการกรอง แบ่งได้ ดังนี้

2.1.3.1 การกรองด้วยความดันตกคงที่ (Constant - Pressure Filtration) ทำได้โดยควบคุม ความดันตกและความดันขาออก (outlet pressure) ให้คงที่ แต่เนื่องจากฟิลเตอร์เค้กสะสมตัวมาก

ขึ้น จะทำให้อัตราการกรองลดลงไปเรื่อยๆ โดยอัตราการกรองจะมีค่ามากที่สุดที่จุดเริ่มต้นของการกรองและจะลดลงจนกระทั่งหยุดไหลในที่สุด

2.1.3.2 การกรองด้วยอัตราคงที่ (Constant – Rate Filtration) การควบคุมให้อัตราการกรองคงที่ทำได้ด้วยการเพิ่มความดันตกให้มีค่าสูงขึ้นตามการสะสมตัวที่มากขึ้นของชั้นเค้ก

2.1.3.3 การกรองด้วยการแปรความดันและอัตราการกรอง (Variable – Pressure and Variable – Rate Filtration) การกรองในลักษณะนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งความดันและอัตราการกรองไปพร้อมกัน ซึ่งมักจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการทำงานของเครื่องสูบน้ำ

ในทางปฏิบัติ อาจมีการกรองหลายรูปแบบประกอบกัน เช่น ในช่วงแรกมีการสะสมตัวของฟิลเตอร์เค้กน้อยแรงต้านการไหลเกิดจากอิทธิพลของตัวกรองเป็นหลัก ความต้านทานในช่วงนี้จึงต่ำและค่อนข้างคงที่ ทำให้เป็นการกรองด้วยอัตราคงที่ แต่เมื่อมีการสะสมตัวของฟิลเตอร์เค้กมากขึ้น ความต้านทานจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจึงเปลี่ยนวิธีการกรองเป็นการกรองด้วยความดันคงที่แทนเพื่อป้องกันอันตรายกับเครื่องสูบน้ำหรือเพื่อลดการใช้พลังงาน

2.2 กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process)

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนเป็นการแยกอนุภาคขนาดต่างๆที่ปนเปื้อนอยู่ในของเหลวหรือก๊าซ โดยใช้เมมเบรนซึ่งเป็นแผ่นฟิล์มบางๆที่มีคุณสมบัติในการเลือกผ่าน (Semi-permeable) เป็นตัวขวางกั้น และคัดแยกโดยอาศัยแรงขับเคลื่อนในรูปแบบต่างๆ เช่น แรงดัน (Pressure) แรงทางไฟฟ้า (Electrostatic force) และความเข้มข้น (Concentration) เป็นต้น ความสามารถในการแยกสารขึ้นอยู่กับขนาดรูกรอง (pore size) ของเมมเบรน หรือการคัดแยกด้วยน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight Cut-off ,MWCO) ของอนุภาค โดยอาศัยกลไก 2 ชนิด คือ การกรองติดค้าง (Sieve Effect) และการแพร่ผ่าน (Diffusion Effect) โดยรูปที่ 2.1 แสดงถึงขนาดและตัวอย่างของอนุภาคที่สามารถแยกได้ด้วยกระบวนการเมมเบรนชนิดต่างๆ (3, 4)

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมประกอบด้วย 4 กระบวนการ คือ

- (1) กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration : MF)
- (2) กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration : UF)
- (3) กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration : NF)
- (4) กระบวนการออสโมซิสผ่นกลับ (Reverse Osmosis : RO)

แผ่นเมมเบรนที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน กล่าวได้ว่าเป็นแผ่นเมมเบรนที่มีการสังเคราะห์หรือผลิตขึ้น (Synthetic membranes) หรือมาจากธรรมชาติ มีลักษณะเป็นฟิล์มของแข็งหรือของเหลว

ลักษณะที่สำคัญที่สุดของแผ่นเมมเบรนคือ มีคุณสมบัติในการเลือกผ่านสาร เป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมี หรือทางกายภาพ ซึ่งอาจพิจารณาได้จากการมีแรงดึงดูดระหว่างแผ่นเมมเบรนกับสารนั้นๆ หรือจากขนาดของรูพรุน หรือจากประจุของแผ่นเมมเบรน เป็นต้น

	Cut-offs of different liquid filtration techniques							
Micrometer logarithmic scaled	0,001	0,01	0,1	1	10	100	1000	
Angstroms logarithmic scaled	1	10	100	1000	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷
Molecular weight (Dextran in kD)	0,5	50	7.000					
Size ratio of substances to be separated								
Separating process								

รูปที่ 2. 1 ตัวอย่างโมเลกุลและอนุภาคที่สามารถแยกได้ด้วยเมมเบรนชนิดต่างๆ

2.2.1 ชนิดและกลไกในการแยกสารของเมมเบรน

2.2.1.1 ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF)(1, 3, 4)

เป็นการกรองเพื่อกำจัดสารแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำ ใช้กรองสารขนาดเล็กในช่วง 0.06-10 ไมครอน สามารถกรองแบคทีเรียได้เกือบทั้งหมด และสามารถกรองไวรัสได้บางส่วน ใช้ความดันในการกรองต่ำประมาณ 100-400 kPa (15-60 psi) การแยกอนุภาคทำได้โดยอนุภาคแขวนลอยจะถูกกั้นด้วยผิวหน้าของเมมเบรน ในขณะที่น้ำสามารถผ่านเข้าไปในโครงข่ายรูพรุน ตัวแปรควบคุมของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน ได้แก่

- สภาพะในการใช้งาน เช่น แรงดันในการกรอง ความเร็วไหลผ่าน
- สภาพะการบำบัดทางชีวภาพ เช่น ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ กระบวนการบำบัดขั้นต้น

- ลักษณะสมบัติของเมมเบรน เช่น ขนาดรูพรุน การกระจายขนาดของรูพรุน สมบัติความชอบ/ไม่ชอบน้ำ ความแข็งแรงเชิงกล ความทนทานสารเคมีและความร้อน

ปัจจัยหลักที่ทำให้ประสิทธิภาพของไมโครฟิลเตรชันลดลงคือ การอุดตันภายในรูพรุน และการที่คอลลอยด์สะสมตัวอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนระหว่างรูของเมมเบรน ในบางเวลาอนุภาคของคอลลอยด์จะปิดกั้นรูพรุนได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ความสามารถในการกรองลดลง ซึ่งการล้างย้อน (Backwashing) เป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยในการแก้ปัญหา

ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์การกรองและความดันตกที่เกิดขึ้นทางทฤษฎี สามารถคำนวณได้ด้วยการพิจารณาจาก ความพรุน (porosity, ϵ) และความคดเคี้ยวของรูพรุน (Tortuosity, τ) โดยใช้สมการ Hagen-Poiseuille

$$J = \frac{Q_P}{A_m} = \frac{\epsilon r^2 \Delta P}{8\mu\tau L} \quad (2.1)$$

นอกจากนี้แบบจำลองอีกประเภทหนึ่งที่นิยมใช้ในปัจจุบันสามารถเขียนรูปแบบของความสัมพันธ์ในเชิงอนุกรม (Resistance in series model) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์อย่างง่ายที่เกี่ยวข้องกับค่าการไหล (permeate flux, J) และค่าแรงดันผ่านเมมเบรน ดังสมการต่อไปนี้

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_M + R_P + R_G + R_C)} \quad (2.2)$$

โดย

J	คือ อัตราส่วนของของเหลวที่ผ่านต่อพื้นที่ของเมมเบรน (permeate flux)
ΔP	คือ แรงดันผ่านเมมเบรน (Transmembrane Pressure)
μ	คือ ความหนืดของสารละลาย
R_M	คือ ความต้านทานเชิงกลศาสตร์ (Hydraulic Resistance)
R_P	คือ ความต้านทานด้วยการอุดตันถาวร (Irreversible fouling resistance)
R_G	คือ ความต้านทานเนื่องมาจากเมือกหรือเจล (Resistance due to gel layer)
R_C	คือ ความต้านทานจากการไหลผ่านชั้นกรองเค้ก (Resistance due to cake layer)

2.2.1.2 อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF)

เป็นการกรองเพื่อกำจัดสารแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำเช่นเดียวกับไมโครฟิลเตรชัน แต่สามารถกรองสารต่างๆที่มีขนาดเล็กถึง 0.002 ไมครอน ซึ่งสามารถกรองแบคทีเรีย ไวรัส และสารอินทรีย์ทั้งหลาย เช่น โปรตีน และไขมันต่างๆ ไปได้หมด ความดันที่ใช้ในการกรองต่ำ สิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบออสโมซิสผันกลับ โดยจะแยกตามขนาดเล็กสุดของน้ำหนัโมเลกุลของวัสดุที่สามารถกั้นได้ด้วยเมมเบรน ซึ่งอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนโดยทั่วไปจะทำขึ้นจากแผ่นฟิล์มที่กั้น

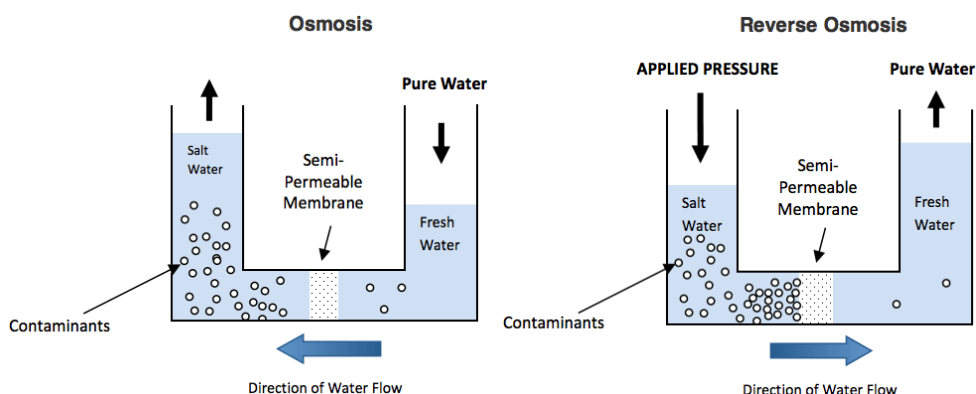
สารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แยกได้ในช่วง 1,000 – 80,000 ดาลตัน โดยกลไกในการเคลื่อนผ่านอัลตราฟิลเตรชันนั้นจะมีการกั้นและดูดซับผ่านเมมเบรน ซึ่งสารละลายของสารโมเลกุลใหญ่นั้นมีแรงดันออสโมติกน้อยมาก ทำให้อัลตราฟิลเตรชันไม่ต้องการใช้แรงดันสูง

2.2.1.3 นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF)

เป็นการกรองเพื่อเอาสารเกลือแร่ (inorganics) ที่ละลายออกจากน้ำ ซึ่งแตกต่างจากการกรองแบบ MF และ UF เป็นการกรองแบบ Diffusion หรือแบบอาศัยการแพร่ ที่สกัดเอาสารอินทรีย์ออกไป NF จะสามารถสกัดเอาสารอินทรีย์ที่มีวาเลนซ์สอง ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดความกระด้างออกไปได้ จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เมมเบรนทำน้ำอ่อน (Softening Membrane) น้ำหนักโมเลกุลที่แยกได้ (MWCO) อยู่ในช่วง 100 – 200 ดาลตัน ใช้แรงดันที่ 6 – 20 บาร์ มีกระบวนการแยกสารรวม 2 กลไก คือ การลอดผ่านและไฟฟ้าสถิตย์เนื่องจากตัวเมมเบรนจะประกอบด้วยโพลิเมอร์ที่มีรูพรุนที่สามารถกั้นสารประกอบที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 นาโนเมตรได้ และมีชั้นประจุลบ ทำให้สามารถใช้นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนในการกำจัดเกลือโดยอาศัยแรงผลักของไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งลักษณะของเมมเบรนหรือปัจจัยต่างๆ เช่น รูปร่าง โมเลกุล และขั้ว จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกได้

2.2.1.4 ออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis, RO)

เป็นกระบวนการทำให้น้ำบริสุทธิ์โดยเฟสของเหลวจะถูกแรงดันขับผ่านเมมเบรนที่ไม่มีรูพรุน (Dense Membrane) ในทิศทางย้อนกับกลไกออสโมซิส (Osmosis Mechanism) ที่เป็นการแพร่โมเลกุลของน้ำจากภาชนะน้ำบริสุทธิ์ไปยังภาชนะน้ำที่มีไอออนปนเปื้อน ทำให้สามารถกรองกำจัดสารเกลือแร่ทั้งวาเลนซ์หนึ่งและสองได้มากถึงร้อยละ 98 การกรองจะใช้ความดันสูงกว่า NF โดยใช้แรงดันที่ 50 - 100 บาร์ ป้อนให้ระบบด้านน้ำไม่บริสุทธิ์ ซึ่งในระบบ RO เกลือส่วนใหญ่และโมเลกุลที่ไม่มีขั้วจะถูกกักเก็บไว้โดยเมมเบรน ทำให้ได้ส่วนเพอร์เมท (permeate) เป็นน้ำบริสุทธิ์และส่วน retentate ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น



รูปที่ 2. 2 กลไกการออสโมซิสและการออสโมซิสผันทกลับ

(<http://puretecwater.com/what-is-reverse-osmosis.html>)

2.2.2 การอุดตันบนเยื่อเมมเบรน (Fouling)

การอุดตันบนเยื่อเมมเบรนเกิดจากการดูดเกาะสารอินทรีย์หรือนินทรีย์บริเวณรูพรุนของเมมเบรน ทำให้อัตราการไหลลดลงและนำไปสู่สภาพที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้เหมือนเดิม โดยแบ่งการอุดตันเป็น 2 ประเภทคือ

2.2.2.1 การอุดตันบริเวณผิวด้านนอก (External Surface Fouling)

เกิดจากการสะสมตัวของชั้นเค้ก (cake) หรือ เจล (gel) บริเวณผิวด้านนอกของเมมเบรน การอุดตันประเภทนี้เรียกว่า คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization) ซึ่งการสะสมของสารอินทรีย์ หรืออนุภาคต่างๆ ใกล้ผิวด้านนอกของเมมเบรนจนความเข้มข้นของสารนั้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยในน้ำหลายเท่า ดังที่แสดงในรูป 2.3 ทำให้ประสิทธิภาพของเมมเบรน กล่าวคือ ฟลักซ์ (Flux) และความสามารถในการคัดเลือก (Selectivity) ลดลง แก้ไขโดยใช้แรงดันน้ำล้างย้อน การถดถอยด้วยสารเคมี หรือเปลี่ยนทิศทางการป้อนของสารละลายให้ไหลในแนวขนานกับแผ่นเยื่อ (Cross Flow) ให้มากพอที่จะช่วยให้เพอร์มิตฟลักซ์คงตัวยาวนานขึ้น เป็นต้น

ชั้นเค้กของอนุภาคแต่ละชนิดจะมีค่าความต้านทานแตกต่างกัน โดยค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นเค้ก (Specific cake resistance, α) สามารถแสดงได้จากสมการที่ 2.3

$$\alpha = \frac{k_1 S_0^2 (1-\epsilon)}{\epsilon^3 \rho_p} \quad (2.3)$$

โดยที่

k_1 คือ ค่าคงที่ = 5 (จากการทดลองของ Kozeny – Carman) .

S_0 คือ พื้นที่หน้าตัดจำเพาะของอนุภาค = $\frac{S_p}{V_p}$

S_p คือ พื้นที่หน้าตัดของ 1 อนุภาค

V_p คือ ปริมาตรของ 1 อนุภาค

ϵ คือ สัดส่วนช่องว่างของฟิลเตอร์เค้ก (Void fraction)

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค

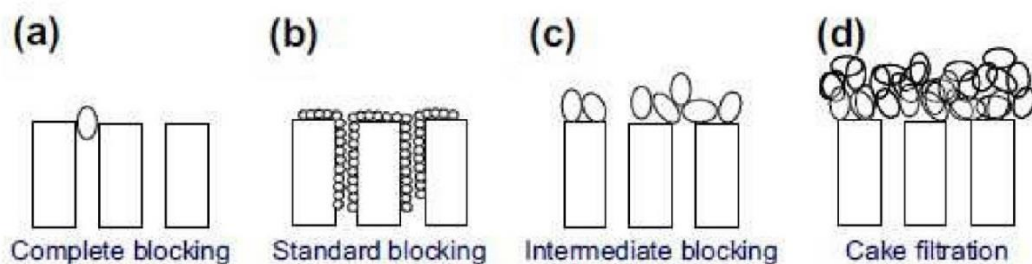
2.2.2.2 การอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรน (Pore Blocking Fouling)

เกิดจากอนุภาคเข้าไปอุดตันอยู่ในรูพรุนของเมมเบรน สามารถแบ่งได้ 3 ประเภทคือ

1 การอุดตันอย่างสมบูรณ์ (Complete pore blocking) เกิดจากอนุภาคที่มีขนาดเท่ากับรูพรุนเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรน และไม่สามารถหลุดออกมาได้อีก

2 การอุดตันแบบไม่สมบูรณ์ (Intermediate pore blocking) เกิดจากอนุภาคที่อุดตันมีขนาดใกล้เคียงกับรูพรุนของเมมเบรน แต่น้ำยังสามารถผ่านไปได้เล็กน้อย

3 การอุดตันแบบธรรมดา (Standard pore blocking) เกิดจากอนุภาคที่ขนาดเล็กกว่ารูพรุนเข้าไปอุดตันและติดค้างอยู่ภายในรูพรุนของเมมเบรน



รูปที่ 2. 3 การอุดตันประเภทต่างๆภายในเมมเบรน

(5)

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเมมเบรน

2.2.3.1 ปัจจัยด้านคุณสมบัติของเมมเบรน

เมมเบรนที่ใช้กันในปัจจุบันผลิตมาจากวัสดุหลายชนิด การเลือกใช้เมมเบรนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับอนุภาคที่ต้องการกรองจะทำให้กระบวนการกรองมีประสิทธิภาพมากขึ้น คุณสมบัติของเมมเบรนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกรองและการอุดตันมีดังต่อไปนี้

1 คุณสมบัติการชอบน้ำ (Hydrophilicity) โดยทั่วไปเมมเบรนที่ใช้กรองจะมีคุณสมบัติชอบน้ำ เนื่องจากหากเมมเบรนที่ใช้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จะทำให้เฟสของแข็งที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำถูกดูดซับและเกิดการอุดตันได้ง่าย

2 ประจุของเมมเบรน (charge of membrane) โดยทั่วไปเมมเบรนจะมีประจุลบ ซึ่งประจุของเมมเบรนจะมีความสำคัญมากในกรณีที่สารปนเปื้อนประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุ โดยแรงกระทำระหว่างอนุภาคและเมมเบรนจะมีผลต่อการอุดตันของเมมเบรน กล่าวคือ ถ้าเมมเบรนและอนุภาคมีประจุเหมือนกันจะมีแนวโน้มที่จะอุดตันน้อยลงและมีค่าฟลักซ์สูงขึ้น

3 ขนาดของรูพรุน (pore size) เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าอนุภาคมากจะให้ค่าฟลักซ์สูงในช่วงแรก และลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการอุดตันภายในรูพรุน ขณะที่เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่าอนุภาคมากๆ จะมีแนวโน้มว่าจะเป็นการอุดตันภายนอก โดยการกระจายของขนาดรูพรุนบนเมมเบรนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการอุดตันได้

4 ลักษณะของผิวหน้าเมมเบรน (surface topography) เมมเบรนที่มีผิวหน้าเรียบมีแนวโน้มจะเกิดการอุดตันน้อยกว่าเมมเบรนที่ผิวหน้าขรุขระ

2.2.3.2 ปัจจัยด้านคุณสมบัติของอนุภาค

อนุภาคแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีแตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน โดยคุณสมบัติของอนุภาคที่มีผลต่อการอุดตันที่เกิดขึ้นในกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนมีดังต่อไปนี้

1 โปรตีน เป็นสารที่ก่อให้เกิดการอุดตันได้มากที่สุด เนื่องจากมีโครงสร้างซับซ้อน มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ กลไกการอุดตันมีความเป็นไปได้หลายกลไก เช่น เข้าไปอุดตันทางเข้าของรูพรุน ไปดูดซับอยู่ที่ผนังรูพรุนหรือสะสมที่ผิวหน้าของเมมเบรนเกิดเป็นชั้นเจล โดย pH, Ionic strength, แรงเฉือน และอุณหภูมิ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพของโปรตีนและส่งผลต่อการอุดตัน เช่น การปรับ pH ของสารละลายให้เหมาะสมอาจช่วยลดการอุดตันได้

2. กลี้อและองค์ประกอบของกลี้อ กลี้อความเข้มข้นสูงอาจตกตะกอนและอุดตันรูพรุนของเมมเบรนได้ การปรับ pH เพื่อตกตะกอนกลี้อบางชนิดก่อนเข้าสู่ระบบเป็นวิธีการลดการอุดตันในลักษณะนี้ได้

3. น้ำมันและไขมัน น้ำมันและไขมันมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำทำให้ถูกดูดซับด้วยเมมเบรนที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลง

2.2.3.3 ปัจจัยด้านสภาวะการดำเนินงาน

การควบคุมสภาวะการดำเนินงานให้เหมาะสมจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบสูงขึ้น โดยปัจจัยด้านสภาวะการดำเนินงานที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเมมเบรนมีดังนี้

1. อุณหภูมิของระบบ โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ของสารป้อนและ permeate ลดลง และทำให้เกิดกลี้อบางชนิดละลายน้ำได้มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่าฟลักซ์สูงขึ้น แต่อุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้โปรตีนเสียสภาพธรรมชาติและดูดซับที่ผิวเมมเบรนมากขึ้น

2. ความเร็วตามขวาง การเพิ่มความเร็วตามขวางทำให้เกิดแรงเฉือนที่สารป้อนกระทำกับผิวหน้าของเมมเบรนมากขึ้น ทำให้การสะสมตัวของอนุภาคที่ผิวหน้าลดลง

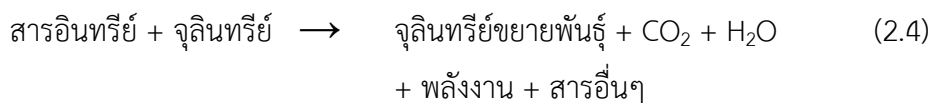
3. ความดันของระบบ ความดันของระบบที่มากเกินไปจะส่งผลให้ชั้นเค้กแน่นขึ้น ซึ่งมีผลต่อค่าฟลักซ์และความแข็งแรงของชั้นเค้ก

2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส (Activated Sludge Process) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียวิธีชีวภาพ ที่อาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยส่วนประกอบหลักได้แก่ ถังเติมอากาศและถังตกตะกอน ภายในถังเติมอากาศจุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นอาหาร และออกซิเจนจากการเติมอากาศในถังเติมอากาศ เพื่อการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณกลายเป็นตะกอน จากนั้นน้ำเสียจะถูกส่งเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อแยกตะกอนออกไปกำจัดและน้ำใสให้ไหลล้นออกมาไปสู่ระบบบำบัดขั้นสุดท้าย โดนมมีตะกอนจุลินทรีย์บางส่วนถูกสูบย้อนกลับเข้าสู่ถังเติมอากาศเพื่อควบคุมปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ภายในถังเติมอากาศ (1, 6)

2.3.1 กลไกในการทำงาน

ในกระบวนการเอเอส น้ำเสียประกอบไปด้วยจุลินทรีย์หลายชนิด จุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียจัดเป็นหลักสำคัญในปฏิกิริยาของการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบนี้ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเขียนได้ดังสมการ 2.4



สมการดังกล่าวสรุปได้ว่า จุลินทรีย์นำสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียมาใช้เป็นอาหารเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ ในปฏิกิริยาจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พลังงาน และน้ำ โดยส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะลอยขึ้นไปในอากาศ พลังงานจะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในการดำรงชีวิต ส่วนน้ำจะผสมออกไปกับน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วถูกปล่อยออกไปจากระบบ ส่วนมวลที่ได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก็คือสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนให้กลายเป็นมวลจุลินทรีย์ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งจุลินทรีย์นั้นโดยปกติจะรวมตัวกันเป็นก้อนเรียกว่าฟล็อกและมีน้ำหนักมากกว่าน้ำ ดังนั้นจึงสามารถแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำได้ง่ายด้วยการตกตะกอนในถังตกตะกอนต่อไป

2.3.2 กลไกการเกิดแอ็คติเวตเต็ดสลัดจ์

กลไกของแอ็คติเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge) เกิดต่อเนื่องกัน 3 ขั้นตอนในถังปฏิกิริยา คือ

1. ขั้นส่งถ่าย (Transfer Step) จุลินทรีย์จะดูดสารอินทรีย์ในน้ำเสียมาติดที่ผนังเซลล์และส่งน้ำย่อยออกมา ย่อยสลายจนสารอินทรีย์เปลี่ยนเป็นโมเลกุลที่เล็กพอที่จะซึมผ่านเข้าไปข้างในเซลล์เพื่อใช้เป็นสารอาหารได้ ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 15 ถึง 20 นาที น้ำย่อยหรือเอนไซม์นี้จุลินทรีย์จะผลิตขึ้นมาไว้ภายในเซลล์และในน้ำที่อยู่รอบตัวของมัน สารอินทรีย์แต่ละชนิดต้องใช้เอนไซม์เฉพาะอย่างในการย่อย ดังนั้นจุลินทรีย์จึงต้องปรับตัวและผลิตเอนไซม์ ออกมาใช้ให้เหมาะสมกับน้ำเสียชนิดต่างๆ และต้องใช้เวลาแก่จุลินทรีย์ในการปรับตัว (Acclimatize) ที่เหมาะสมโดยเฉพาะในช่วงเริ่มการทำงาน (Start-Up) ของระบบบำบัดน้ำเสีย

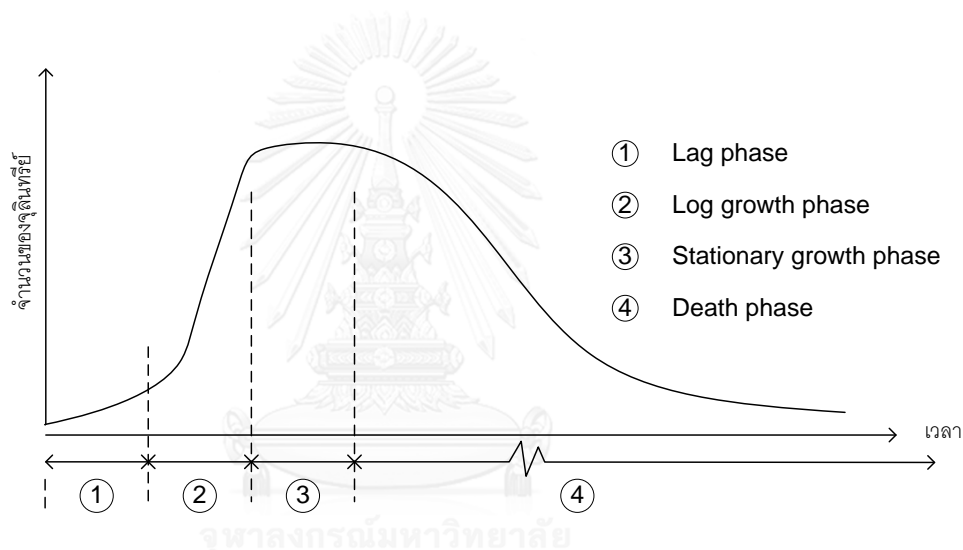
- (2) ขั้นเปลี่ยนรูป (Conversion Step) เมื่อสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายให้มีโมเลกุลเล็กและสามารถละลายน้ำผ่านเข้าไปในเซลล์ได้แล้ว ก็จะถูกจุลินทรีย์ทำการเปลี่ยนรูปโดยกระบวนการสังเคราะห์ (Synthesis) ซึ่งหมายถึงการสร้างเซลล์ใหม่ และกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาที่มีการใช้ออกซิเจนแล้วได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและพลังงาน กระบวนการทั้งสองนี้รวมกันเป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในจุลินทรีย์ (Metabolic Process)

- (3) ขั้นรวมตะกอน (Flocculation Step) เป็นขั้นรวมตะกอน จุลินทรีย์จะถูกกวนผสมรวมกันในถังปฏิกิริยาโดยจับตัวกันจนมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเรียกว่า ฟล็อก (Floc) หรือ Activated Sludge ซึ่งจะมีน้ำหนักมากกว่าเซลล์เดี่ยว สามารถตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสียได้ง่าย และเมื่อฟล็อกไปสัมผัสกับสารแขวนลอย (Suspended Material) หรือสารคอลลอยด์ ก็จะจับมวลสารเหล่านี้เอาไว้และทำการย่อยสลายเป็นอาหารต่อไป

2.3.3 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

การเจริญเติบโต (Growth) ในทางแบคทีเรียวิทยา หมายถึง การเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียซึ่งมีความหมายตรงกับการสืบพันธุ์ของแบคทีเรียมากกว่าที่จะหมายถึงการเพิ่มขนาดหรือมวลของแต่ละเซลล์ ทั้งนี้เพราะเป็นการยากที่จะวิเคราะห์หามวลแต่ละเซลล์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากขนาดที่เล็กมากของแบคทีเรียนั่นเอง

จากการนำแบคทีเรียมาเลี้ยงในอาหารเหลวในที่จำกัด (Batch Culture) และนับจำนวนแบคทีเรียที่มีอยู่เป็นระยะตามเวลาที่ผ่านไป แล้วนำจำนวนของแบคทีเรียมาเขียนกราฟในกราฟ log จะได้เส้นโค้งที่เรียกว่า Population Growth Curve ซึ่งเส้นโค้งดังกล่าวจะใช้สำหรับแบ่งช่วงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งแบ่งได้ออกเป็น 4 ระยะ (Phase) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2. 4 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเทียบกับเวลา
(Qasim, 1999)

ช่วงที่ 1 Lag Phase

เป็นช่วงที่มีอัตราการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ต่ำ เนื่องจากจุลินทรีย์ต้องใช้เวลาปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อม และเริ่มสร้างเอนไซม์ที่จำเป็นในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ช่วงเวลา lag phase จะสั้นยาวแตกต่างกันไปตามชนิดของแบคทีเรีย อาหารเพาะเลี้ยง และสภาพแวดล้อม ตลอดจนระยะการเจริญของแบคทีเรียที่นำมาเพาะเลี้ยง เช่น ถ้านำเอาแบคทีเรียที่เพาะเลี้ยงในอาหารชนิดหนึ่งไปเพาะเลี้ยงใหม่ในอาหารชนิดเดิมช่วงระยะ lag phase จะสั้นลงเนื่องจากแบคทีเรียไม่จำเป็นต้องสร้างเอนไซม์อีกครั้ง เช่นเดียวกับในกระบวนการบำบัดน้ำเสียเอเอสที่นำเอาแบคทีเรียที่ผ่านพ้นระยะ lag phase ไปแล้วกลับในถังปฏิกรณ์ใหม่ ทำให้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารประกอบต่างๆ ในน้ำทิ้งได้ทันที แบคทีเรียในช่วงนี้จะมีอัตราการเกิดและการตายต่ำ

ช่วงที่ 2 Log Growth Phase

เป็นช่วงที่มีการเจริญเติบโตสูงสุด จุลินทรีย์จะเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วในอัตราที่สม่ำเสมอ เนื่องจากมีอาหารเหลือเฟือ จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตแบบเซลล์เดี่ยวไม่รวมเป็นฟลอค ถ้าระบบเอเอสทำงานอยู่ในช่วงนี้จะเป็นผลให้น้ำทิ้งที่ออกมาขุ่น เนื่องจากมีตะกอนจุลินทรีย์หลุดออกมา

ช่วงที่ 3 Stationary Phase หรือ Declining Growth Phase

ระยะนี้อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะช้าลง เนื่องจากสารอาหารถูกใช้จนเกือบหมด และสารพิษที่ขับออกมาจากจุลินทรีย์มีมากขึ้น ซึ่งช่วงนี้จะมีจำนวนประชากรค่อนข้างสมดุลกันคือการเกิดใกล้เคียงกับการตาย จุลินทรีย์จะรวมกันเป็นฟลอคได้ดี ตักตะกอนง่ายทำให้น้ำทิ้งที่ออกมามีคุณภาพดี ช่วงนี้จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้บำบัดน้ำเสีย

ช่วงที่ 4 Endogenous Growth Phase

ในช่วงนี้จุลินทรีย์จะขาดอาหารและตายเพราะมีอาหารเหลืออยู่น้อยหรือไม่มีอาหารเหลืออยู่เลย ดังนั้นเมื่อจุลินทรีย์ได้ใช้อาหารที่เก็บสะสมไว้ภายในตัวจนหมดแล้วก็จะตายและเซลล์ตายกลายเป็นอาหารของจุลินทรีย์ตัวอื่นซึ่งยังมีชีวิตอยู่ จุลินทรีย์ที่อยู่ในช่วงนี้มีสารเฉื่อย(Inert Material) ผสมอยู่สูง มีความเข้มข้นสูง และตกตะกอนเร็ว แต่การที่ตะกอนจุลินทรีย์ตกตะกอนเร็วทำให้ไม่สามารถจับหรือกรองเอาอนุภาคขนาดเล็กให้ลงมากับตะกอนส่วนใหญ่ได้ เป็นผลทำให้น้ำออกขุ่นและมีตะกอนแขวนลอยปนออกมาในปริมาณมาก

2.3.4 การแบ่งประเภทของจุลินทรีย์

ประเภทของจุลินทรีย์ในการควบคุมการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งได้ 4 แบบ คือ

1. แบ่งตามชนิด จุลินทรีย์ที่สำคัญในระบบเอเอสมีอยู่ 2 ชนิด คือ
 - พืช ได้แก่ แบคทีเรีย สาหร่ายเซลล์เดี่ยว และรา ซึ่งแบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์ที่มีความสำคัญมากที่สุด โดยจะเป็นตัวกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสีย
 - สัตว์ ได้แก่ โปรโตซัว ครัสตาเซียนและโรติเฟอร์ ซึ่งจะช่วยกินแบคทีเรียที่ลอยกระจายอยู่ในน้ำทำให้น้ำออกใส และยังสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้สภาพการทำงานของระบบโดยรวมได้อีกด้วย

2. แบ่งตามการใช้ ออกซิเจน

- แอโรบิกแบคทีเรีย (Aerobic bacteria) เจริญเติบโตได้ดีในที่มีออกซิเจน ในการบำบัดน้ำเสียที่ใช้แบคทีเรียประเภทนี้ต้องทำให้มีออกซิเจนในระบบ อาจเติมออกซิเจนโดยการกวน การเป่าอากาศ เป็นต้น

- แอนแอโรบิกแบคทีเรีย (Anaerobic bacteria) เจริญเติบโตได้ดีในที่ไม่มีออกซิเจน

- แฟคัลเททีฟแบคทีเรีย (Facultative bacteria) สามารถเจริญได้ทั้งในที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน

3. แบ่งตามอายุ

หมายถึง ระยะเวลาที่จุลินทรีย์ทำงานอยู่ในระบบ จุลินทรีย์ที่มีอายุน้อยจะมีอัตราการเติบโตสูง ไม่จับตัวเป็นฟล็อก ตกตะกอนไม่ดีและทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดยังคงมีค่าซีโอดีสูง ส่วนจุลินทรีย์ในระบบที่มีอายุมากก็จะมีตะกอนที่หนัก สามารถกำจัดซีโอดีในน้ำได้มากและสามารถตกตะกอนได้เร็ว หากมีอายุสูงเกินไปจะตกตะกอนเร็วแต่ไม่สามารถจับตะกอนเล็กๆ ได้หมด ทำให้น้ำทิ้งที่ออกมาขุ่นมีตะกอนแขวนลอยอยู่มาก

4. แบ่งตามการทำงานในระบบเอเอส สามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภท คือ

- จุลินทรีย์สร้างฟล็อก (Floc Forming Microorganisms) เป็นจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญมากในระบบเอเอส เพราะเป็นจุลินทรีย์ที่จับตัวรวมกันเป็นฟล็อกได้ดี ทำให้สามารถแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำได้ดีด้วยวิธีตกตะกอน แบคทีเรียที่สร้างฟล็อก ได้แก่ Zooglea ramiera นอกจากนี้จุลินทรีย์ เช่น Protozoa และ Fungi ก็ทำให้เกิดฟล็อกได้เช่นกัน การสร้างฟล็อกของ แอคติเวตเต็ดจ์สลัดจ์ (Activated Sludge) เรียกว่า Bioflocculation

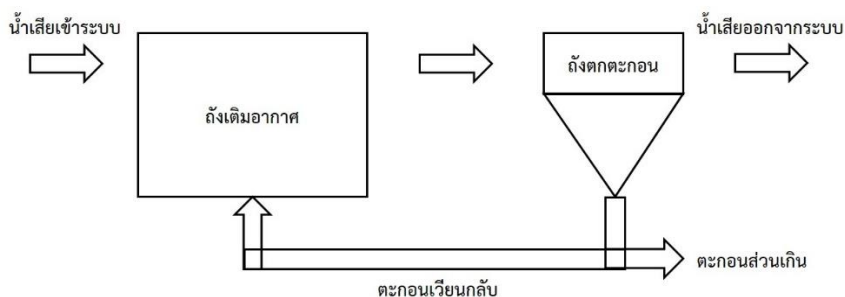
- แซฟโพรไฟท์ (Saprophytes) เป็นจุลินทรีย์พวกหลักที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียซึ่งอาจมีทั้งพวกสร้างและไม่สร้างฟล็อกก็ได้ แซฟโพรไฟท์แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ แบบที่รับผิดชอบในการย่อยสลายอาหารหรือซัสเตรท ให้เป็นซัสเตรทที่มีโมเลกุลเล็กลง และแบบสลายของซัสเตรทโมเลกุลเล็กจนได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

- จุลินทรีย์ทำลาย (Predator) คือพวกโปรโตซัวซึ่งจับแบคทีเรียกินเป็นอาหาร กลุ่มที่สำคัญคือพวกซิลิเอต (Ciliates) หากระบบที่มีจุลินทรีย์พวกนี้มากมักจะเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งโปรโตซัวมีบทบาทสำคัญในการตกตะกอนจุลินทรีย์ให้น้ำใส

- จุลินทรีย์ก่อกวน (Nuisance Microorganisms) เป็นจุลินทรีย์ที่ก่อกวนการทำงานของระบบเอเอส ได้แก่ แบคทีเรียที่เป็นเส้นใยและราบางพวกซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาการจมไม่ลงของตะกอน (Bulking) ได้

2.3.5 ส่วนประกอบและการทำงานของระบบ

ระบบการบำบัดน้ำเสียเอเอสมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ ถังปฏิกริยา ถังตกตะกอน และส่วนหมุนเวียนตะกอน ส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2. 5 ส่วนประกอบของระบบเอเอส

1. ถังปฏิกริยา หรือโดยทั่วไปเรียกว่าถังเติมอากาศ มีด้วยกันหลายลักษณะขึ้นอยู่กับชนิดของระบบเอเอส มีหน้าที่สำคัญคือการเติมอากาศให้กับระบบเพื่อให้จุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนนำไปใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และทำหน้าที่กวนผสมให้จุลินทรีย์ในน้ำเสียได้มีโอกาสสัมผัสสารอินทรีย์อย่างทั่วถึงเพื่อให้เกิดปฏิกริยาได้อย่างสมบูรณ์ และทำให้เกิดฟลอคของจุลินทรีย์ขึ้นมาซึ่งมีน้ำหนักและตกตะกอนได้ง่าย

2. ถังตกตะกอน มีหน้าที่คือทำการแยกของแข็ง ซึ่งในที่นี้คือตะกอนจุลินทรีย์ออกจากของเหลวหรือน้ำด้วยแรงโน้มถ่วง ซึ่งฟลอคที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาจะตกตะกอนได้ดีในถังตกตะกอน และน้ำที่แยกออกมาจะเป็นน้ำใสสามารถปล่อยออกทิ้งได้ ส่วนตะกอนจุลินทรีย์หรือที่เรียกว่าสลัดจ์ จะถูกปล่อยทิ้งออกจากกันถึงเพื่อนำไปกำจัดหรือเข้าสู่ระบบหมุนเวียนตะกอนกลับไปยังส่วนแรกต่อไป

3. ส่วนหมุนเวียนตะกอน เป็นส่วนที่สำคัญ และเป็นส่วนที่บ่งบอกความเป็นระบบเอเอส กล่าวคือ การหมุนเวียนตะกอนเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการควบคุมระบบ โดยเป็นการควบคุมความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในระบบให้มีปริมาณเหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เช่น การควบคุมระบบเอเอสด้วยการควบคุมอายุตะกอน อาจทำการปรับอัตราการทิ้งตะกอนออกจากระบบโดยตรงจากถังเติมอากาศหรือจากกันถังตกตะกอน หากทิ้งตะกอนมากค่าอายุตะกอนก็จะลดลงและหากทิ้งตะกอนน้อยค่าอายุตะกอนก็จะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงกับคุณภาพน้ำทิ้ง

2.3.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบ

การทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียเอเอส ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆหลายชนิด เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงต้องควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อระบบ ดังนี้

2.3.6.1 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

ในระบบเอเอส สารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นอาหารของจุลินทรีย์ ดังนั้นหากความเข้มข้นของสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงมากจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบโดยอาจจะทำให้มีอัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์สูง (มีอาหารมาก) ทำให้จำนวนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนมีลักษณะการเติบโตกระจายอยู่ทั่วไป แทนที่จะรวมตัวกันเป็นฟล็อกที่ดี เป็นผลให้ตกตะกอนได้ไม่ดี น้ำออกขุ่น และมีค่าสารอินทรีย์หรือบีโอดีเหลืออยู่สูง หรืออาจจะเกิดขึ้นในทำนองตรงกันข้ามคือมีอัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์ต่ำ (มีอาหารน้อย) ทำให้จำนวนจุลินทรีย์เจริญเติบโตลดน้อยลง ซึ่งถึงแม้ตะกอนจุลินทรีย์จะตกตะกอนได้เร็วแต่ก็ไม่สามารถจับตะกอนเล็กๆ ตกลงมาได้หมด ทำให้น้ำที่ออกจากถังตกตะกอนขุ่น

2.3.6.2 ธาตุอาหาร

จุลินทรีย์ต้องการธาตุอาหาร (Nutrient) ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และเหล็ก โดยปรกติแร่ธาตุเหล่านี้มีอยู่ครบในน้ำเสียชุมชน แต่อาจมีไม่เพียงพอในน้ำเสียอุตสาหกรรม การขาดธาตุอาหารทำให้จุลินทรีย์สร้างฟล็อก (Floc forming organisms) เจริญเติบโตได้ไม่ดี ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานในระบบต่ำลงไป โดยปรกติจะควบคุมอัตราส่วนบีโอดีต่อธาตุอาหารคือ BOD : N : P : Fe เท่ากับ 100 : 5 : 1 : 0.5 การเติมไนโตรเจนมักใส่ในรูปแอมโมเนีย หรือยูเรีย สำหรับฟอสฟอรัส มักจะใส่ในรูปกรดฟอสฟอริก ส่วนเหล็กมักใส่ในรูปของเฟอร์ริกคลอไรด์

2.3.6.3 ออกซิเจนละลาย

ในถังเติมอากาศจะต้องมีค่าออกซิเจนละลายน้ำระหว่าง 1 ถึง 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณของอากาศหรือออกซิเจนที่ใช้รักษาค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ หากอุณหภูมิสูงจุลินทรีย์สามารถทำงานได้มากก็ต้องการออกซิเจนมาก นอกจากนั้นที่อุณหภูมิสูงออกซิเจนจะมีค่าการละลายน้ำอิมตัวต่ำ จึงทำให้ต้องให้ออกซิเจนมากเมื่ออุณหภูมิของน้ำในถังเติมอากาศสูง ในทำนองกลับกันหากอุณหภูมิต่ำก็ทำให้มีความต้องการเติมอากาศน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง ในการที่จะรักษาระดับความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายน้ำที่ค่าเท่ากัน

2.3.6.4 ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสีย

ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียในถังเติมอากาศจะต้องมีมากพอเพียงที่จุลินทรีย์จะใช้ในการย่อยสลายมลสารต่างๆ หากมีระยะเวลาที่เก็บน้ำต่ำเกินไปสารที่ย่อยยากจะถูกย่อยไม่ถึงขั้นสุดท้าย ทำให้มีบีโอดีเหลืออยู่ในน้ำเสียมาก และสำหรับระยะเวลาที่เก็บน้ำในถังตกตะกอนชั้นสอง หากระยะเวลาที่เก็บสั้นเกินไปจะทำให้ตกตะกอนได้ไม่ดี แต่ถ้าระยะเวลาที่เก็บนานเกินไปจะทำให้ตะกอนขาดออกซิเจนและเน่าได้

2.3.6.5 ค่าพีเอช

จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้ดีที่ค่าพีเอชที่อยู่ในช่วง 6.5-8.5 ดังนั้น จึงควรควบคุมระบบให้มีพีเอชอยู่ในช่วงดังกล่าว ถ้าพีเอชมีค่าต่ำกว่า 6.5 รางจะเจริญเติบโตได้ดีกว่า ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงและตกตะกอนได้ยาก ถ้าพีเอชสูงกว่า 8.5 ฟอสฟอรัสจะแยกตัวออกมาจากน้ำ และจุลินทรีย์ก็ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และหากถ้าพีเอชในระบบมีค่าต่ำหรือสูงมากๆ จุลินทรีย์ก็จะไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้

2.3.6.6 สารพิษ

สารเป็นพิษแบ่งออกได้เป็นสองจำพวกคือ แบบพิษเฉียบพลัน ซึ่งจุลินทรีย์จะตายหมดภายในระยะเวลาไม่กี่ชั่วโมงและแบบพิษออกฤทธิ์ช้า ซึ่งใช้เวลานานและค่อยๆตาย สารพิษเฉียบพลันสามารถสังเกตได้ง่ายเนื่องจากมีผลเกิดขึ้นรวดเร็ว สารพิษจำพวกนี้ได้แก่ ไฮยาไนด์ อาร์เซนิก เป็นต้น สำหรับสารพิษออกฤทธิ์ช้า เช่น ทองแดง และโลหะหนักต่างๆ จุลินทรีย์ จะสะสมเอาไว้ภายในเซลล์จนเกิดเป็นพิษและตายในที่สุด

2.3.6.7 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการทำงานและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปการเพิ่มอุณหภูมิทุกๆ 10 องศาเซลเซียส จะทำให้อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นเท่าตัว จนถึงอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส จากนั้นการเจริญเติบโตก็จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากอุณหภูมิสูงเกินไป แต่ในประเทศไทยอุณหภูมิในฤดูร้อนและฤดูหนาวไม่แตกต่างกันมากนักทำให้อุณหภูมิมีผลกับระบบน้อย นอกจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีน้ำเสียมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมาก นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการตกตะกอนคือ ถ้าอุณหภูมิต่ำการตกตะกอนจะดีกว่าอุณหภูมิสูง แต่ถ้ามีความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแตกต่างกันเกิน 2 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการไหลวนของน้ำเนื่องจากความหนาแน่นที่แตกต่างกันได้ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2538)

2.3.6.8 การกวน

การกวนที่เหมาะสมภายในถังเติมอากาศจะทำให้จุลินทรีย์สัมผัสกับน้ำเสียที่เข้ามาในระบบอย่างทั่วถึง และช่วยให้จุลินทรีย์จับตัวเป็นฟล็อกได้ดี รวมไปถึงสามารถป้องกันการไหลลัดวงจรของน้ำเสียซึ่งทำให้น้ำเสียไหลผ่านถังเติมอากาศไปโดยมีระยะเวลาที่เก็บไม่เพียงพอตามที่ออกแบบไว้ และการตกตะกอนของจุลินทรีย์ภายในถังเติมอากาศซึ่งจะทำให้จุลินทรีย์ขาดออกซิเจนและเน่าได้ แต่การกวนที่รุนแรงเกินไปจะทำให้ฟล็อกแตกตัวและตกตะกอนได้ยากขึ้น

2.3.6.9 อัตราการไหลของน้ำเสีย

การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียที่ส่งเข้ามาในระบบ มีผลโดยตรงต่อการทำงานของกระบวนการทางชีววิทยาและกระบวนการตกตะกอน เช่น หากน้ำเสียมีอัตราการไหลมากขึ้น จนทำให้เวลาในการบำบัดน้อยลง จุลินทรีย์ก็ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียไม่ทัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพ

การทำงานของระบบลดลงไปด้วย ดังนั้นต้องมีการควบคุมให้มีอัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้ามาบำบัด มีความสม่ำเสมอในอัตราใกล้เคียงกับที่ทำการออกแบบไว้

2.3.7 หลักการออกแบบระบบเอเอส

หลักในการออกแบบและควบคุมระบบเอเอส แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีคำนวณอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M) และวิธีทางจลนพลศาสตร์

2.3.7.1 การออกแบบระบบเอเอสโดยใช้อัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์(F/M)

การทำงานของระบบเอเอสที่มีประสิทธิภาพจะต้องควบคุมปริมาณอาหารหรือปริมาณสารอินทรีย์เหมาะสมกับปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ ซึ่งควบคุมได้โดยการรักษาอัตราส่วนของน้ำหนักของสารอินทรีย์ที่ส่งเข้ามาบำบัดต่อน้ำหนักของตะกอนจุลินทรีย์ซึ่งวัดในรูปของตะกอนแขวนลอย (MLSS) หรือตะกอนแขวนลอยระเหย (MLVSS) ให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการและเรียกค่าที่ใช้ควบคุมนี้ว่า ค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (Food to microorganism ratio, F/M) ซึ่งมีค่าต่างๆ ดังนี้

ค่าอาหาร (F) คือปริมาณ (มวล) ของสารอินทรีย์ที่วัดได้ในรูปบีโอดี มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อวันที่เข้าสู่ระบบ โดยคำนวณจาก

$$\text{ค่าอาหาร (F)} = \text{บีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)} \times \text{อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)/1000}$$

ค่าน้ำหนักของจุลินทรีย์ (M) คือปริมาณ(มวล)ของจุลินทรีย์ที่วัดอยู่ในรูปของแข็งแขวนลอยระเหยได้ในตะกอน (MLVSS) ซึ่งเป็นตัวแทนของมวลของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในถังเติมอากาศ (V) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม โดยคำนวณได้จาก

$$\text{ค่าน้ำหนักจุลินทรีย์ (M)} = \text{เอ็มแอลวีเอสเอส (มิลลิกรัมต่อลิตร)} \times \text{ปริมาตรของถังเติมอากาศ (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)/1000}$$

ดังนั้นค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\frac{F}{M} = \frac{BOD \times Q}{MLVSS \times V} \quad (2.5)$$

โดยที่	
F/M	คือ ค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (กิโลกรัมบีโอดี/กิโลกรัมเอ็มแอลวีเอสเอส - วัน)
BOD	คือ ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์วัดอยู่ในรูปบีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Q	คือ อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าระบบ (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
MLVSS	คือ ของแข็งแขวนลอยระเหยได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
V	คือ ปริมาตรถังเติมอากาศ (ลูกบาศก์เมตร)

ในการออกแบบด้วยวิธีนี้ ค่า F/M จะถูกกำหนดจากการเลือกประเภทของระบบเอเอส เช่น ระบบเอเอสแบบธรรมดา (Conventional Activated Sludge, CAS) จะมีค่า F/M เท่ากับ 0.2-0.4 กิโลกรัม บีโอดี/กิโลกรัม เอ็มแอลวีเอสเอส-วัน โดยการเลือกประเภทของเอเอสควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับน้ำเสียที่ต้องการบำบัด ตลอดจนปัจจัยอื่นๆ เช่น ความยากง่ายในการควบคุมระบบ พื้นที่ในการก่อสร้างเป็นต้น และนำข้อมูลจากค่าบีโอดี อัตราการไหลเข้าของน้ำเสียและค่าเอ็มแอลวีเอสเอสจากถังปฏิกรณ์ที่ทำการตรวจวัด หรือจากการประมาณการณโดยขึ้นอยู่กับชนิดของระบบเอเอสมา คำนวณในสมการจะสามารถประมาณขนาดของถังเติมอากาศได้

จากการศึกษาพบว่า การออกแบบโดยใช้อัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M) สามารถ คำนวณออกแบบได้ง่าย ใช้เวลาไม่นานและมีความถูกต้องแม่นยำพอประมาณเหมาะที่จะนำมาใช้ คำนวณออกแบบถังปฏิกรณ์ในงานวิจัยนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.7.2 การออกแบบระบบเอเอสโดยใช้วิธีทางจลนพลศาสตร์

หลังจากทำการศึกษาทฤษฎีจลนพลศาสตร์แล้ว จะสามารถคำนวณออกแบบถังปฏิกรณ์เอเอสได้ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญจะสามารถเปิดหาได้จากตารางโดยเป็นค่ามาตรฐานที่นิยมใช้ อย่างแพร่หลาย โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

$$\text{จากสมการ} \quad x = \frac{\theta_c Y(S_0 - S)}{\theta(1 + k_d \theta_c)} \quad (2.6)$$

โดยที่

X = ความเข้มข้นของตะกอนในถังเติมอากาศ หรือ เอ็มแอลเอสเอส (มิลลิกรัม/ลิตร)

θ_c = ค่าอายุตะกอน (วัน)

Y = สัมประสิทธิ์ประมาณผลิต (Yield coefficient)

S_0 = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่น้ำเสียเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร)

S = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่น้ำเสียออก (มิลลิกรัม/ลิตร)

θ = เวลาที่เก็บกักของน้ำ (วัน)

K_d = ค่าสัมประสิทธิ์ในการลดลงของจุลินทรีย์ (ต่อชั่วโมง)

1) ทำการกำหนดเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.1 เช่น Y จะอยู่ในช่วง 0.4-0.8 และ k_d จะอยู่ในช่วง 0.06-0.15 เป็นต้น

2) คำนวณค่า θ หรือเวลาเก็บกักน้ำ โดย $\theta = \frac{V}{Q}$ ซึ่งจะประมาณขนาดของถังปฏิกริยา (V) ได้

3) คำนวณอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะสุทธิ U ซึ่ง $U = E \left(\frac{F}{M} \right) = \left(\frac{S_0 - S}{\theta X} \right)$ โดยสมมติให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบเป็น 100% ($E = 1$)

4) คำนวณหาค่า θ_c จริงในระบบ จากสมการ $\frac{1}{\theta_c} = YU - k_d$ เพื่อใช้ในการควบคุมระบบต่อไป

จากการศึกษาพบว่า การออกแบบโดยใช้วิธีทางจลนพลศาสตร์ สามารถคำนวณออกแบบได้ยากกว่าวิธีใช้อัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ โดยความถูกต้องนั้นขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าทางจลนพลศาสตร์ซึ่งกำหนดอยู่ในช่วงกว้าง ต้องอาศัยประสบการณ์จากผู้ออกแบบโดยตรงในการเลือกค่าพารามิเตอร์ และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นเป็นของต่างประเทศ ซึ่งอาจนำมาใช้กับประเทศไทยไม่ได้ การออกแบบด้วยวิธีนี้จึงควรคำนวณควบคู่กันไปกับวิธีการออกแบบโดยใช้อัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ จึงจะได้งานออกมาถูกต้องที่สุด

ตารางที่ 2. 1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบเอเอสแต่ละประเภท

รูปแบบของระบบเอเอส	รูปแบบการไหล	อายุตะกอน (d)	F/M (d-1)	Aerator loading (kg/m ³ d)	MLSS (mg/L)	เวลาเก็บกักน้ำ (h)	อัตราการหมุนเวียนตะกอน
Conventional	ไหลต่อเนื่อง	5-15	0.2-0.4	0.3-0.6	1,500 - 3,000	4-8	0.25-0.5
Tapered aeration	ไหลต่อเนื่อง	5-15	0.2-0.4	0.3-0.6	1,500 - 3,000	4-8	0.25-0.5
Step-feed aeration	ไหลต่อเนื่อง	5-15	0.2-0.4	0.6-1.0	2,000 - 3,500	3-5	0.25-0.75
Complete-mix	กวนสมบูรณ์	5-15	0.2-0.6	0.8-0.2	3,000 - 6,000	3-5	0.25-1.0
Modified aeration	ไหลต่อเนื่อง	0.2-0.5	1.5-5.0	1.2-2.4	200 - 1,000	1.5-3	0.05-0.25
High-rate aeration	ไหลต่อเนื่อง	3-10	0.4-1.5	2.0-15	3,000 - 6,000	2-4	0.5-2.0
Extended aeration	กวนสมบูรณ์	20-30	0.05-0.15	0.1-0.4	3,000 - 6,000	18-36	0.5-2.0

ที่มา:ดัดแปลงจาก Qasim, 1998(7)

2.3.8 การควบคุมการทำงานระบบบำบัดแบบเอเอส

การควบคุมการทำงานของระบบบำบัดแบบเอเอส เพื่อให้ระบบบำบัดน้ำเสียสามารถบำบัดได้อย่างต่อเนื่อง และคุณภาพของน้ำที่บำบัดแล้วมีค่าไม่เกินมาตรฐานน้ำเสียดังกล่าว จะต้องควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์ เช่น พีเอช ค่าออกซิเจนละลาย(DO) ปริมาณธาตุอาหาร เป็นต้น และส่วนที่สำคัญที่สุดคือ การควบคุมปริมาณอาหารหรือปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบให้เหมาะสมกับปริมาณจุลินทรีย์ในระบบ ซึ่งสามารถทำได้ด้วยวิธีดังต่อไปนี้

2.3.8.1 การควบคุมค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M)

ค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์(Food to Microorganism Ratio, F/M) เป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้ค่า F/M คงที่ใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ เพื่อให้ระบบทำงานได้ดี จากสมการที่ (2.2) ที่ผ่านมา พบว่าค่าอาหาร (F) หรือค่าบีโอดีในน้ำเข้านั้นเป็นค่าที่ปรับได้ยาก เนื่องจากค่าดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะสมบัติของน้ำเสีย ดังนั้นในการควบคุมระบบ จึงทำการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของจุลินทรีย์ (M) ซึ่งวัดในรูปของเอ็มแอลเอสเอส หรือ เอ็มแอลวีเอสเอส โดยการทิ้งตะกอนออกจากระบบ ถ้าทิ้งตะกอนมาก เอ็มแอลเอสเอสจะต่ำทำให้ค่า F/M สูงขึ้นในทางกลับกัน ถ้าทิ้งตะกอนน้อย เอ็มแอลเอสเอสจะสูงทำให้ค่า F/M ต่ำลง

ในทางปฏิบัติไม่นิยมควบคุมระบบเอเอสด้วยวิธีนี้ เนื่องจากหากต้องการทราบค่า F/M จะต้องทำการวัดค่าบีโอดี ซึ่งจะใช้เวลาอย่างน้อย 5 วัน

2.3.8.2 การควบคุมอายุตะกอน

อายุตะกอน (Sludge Age) คือ ระยะเวลาเฉลี่ยที่ตะกอนจุลินทรีย์หมุนเวียนอยู่ในระบบ (Mean Cell Residence Time, MCRT) เป็นค่าที่สำคัญในการออกแบบและควบคุมการทำงานของระบบเอเอส และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า F/M การควบคุมค่าอายุตะกอนให้มีค่าคงที่ จะทำให้ค่า F/M หรือค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์มีค่าคงที่ตามไปด้วย ซึ่งค่าที่ควบคุมเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดของคุณภาพน้ำทิ้ง การหาค่าอายุตะกอนที่เหมาะสม ทำโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอายุตะกอนกับคุณภาพน้ำทิ้ง เช่น บีโอดี ซีโอดี ตะกอนแขวนลอย แล้วเลือกค่าที่เห็นว่าดีที่สุด

$$\text{อายุตะกอน} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ}}{\text{น้ำหนักตะกอนจุลินทรีย์ที่ทิ้งออกจากระบบต่อวัน}} \quad (2.7)$$

วิธีการควบคุมระบบเอเอสด้วยการควบคุมอายุตะกอน ถือเป็นวิธีการควบคุมค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ไปในตัว และสามารถคำนวณปริมาณตะกอนที่นำไปทิ้งได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ วิธีการควบคุมก็ง่าย ไม่ต้องใช้การวิเคราะห์ที่ซับซ้อน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วิธีควบคุมระบบด้วยการควบคุมอายุตะกอนนี้

จากสมการที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าหากนำตะกอนจุลินทรีย์ไปทิ้งมาก ค่าอายุตะกอนก็จะลดลง และหากนำตะกอนจุลินทรีย์ไปทิ้งน้อย ค่าอายุตะกอนก็จะเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้จากกล่าวได้ว่า ถ้าลดค่าอายุตะกอนจะทำให้มีน้ำหนักรวมของตะกอนจุลินทรีย์ที่ต้องทิ้งออกจากระบบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์มีอัตราการเจริญเติบโตสูงขึ้น และจะให้ผลตรงข้ามหากทำการเพิ่มค่าอายุตะกอน

ในการปรับค่าอายุตะกอนของระบบเอเอสในแต่ละครั้งนั้น จะต้องใช้เวลาประมาณ 1-3 เท่าของค่าอายุตะกอนเพื่อให้ระบบปรับตัวให้อยู่ในสภาวะคงที่ และจะต้องติดตามค่าน้ำหนักของเอ็มแอลเอสเอสที่ใช้บำบัดน้ำเสีย และปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ต้องนำไปทิ้งทุกวัน จนกว่า ค่าที่ได้จากการตรวจสอบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนัก

ในทางปฏิบัติสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป มักจะทำการควบคุมอายุตะกอนโดยการปรับอัตราการทิ้งตะกอนออกจากระบบทางกันถังตกตะกอน ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากจะได้ตะกอนที่มีความเข้มข้นสูง ปริมาณที่ต้องนำไปกำจัดจึงน้อยกว่า โดยการระบายตะกอนทิ้งทางกันถังตกตะกอน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.8 ดังนี้

$$\theta_c = \frac{VX}{Q_w X_r + (Q - Q_w) X_e} \quad (2.8)$$

เมื่อ

θ_c = ค่าอายุตะกอน (วัน)

Q_w = อัตราการระบายตะกอนทิ้ง (ลิตร/วัน)

X_r = ความเข้มข้นของตะกอนที่ถูกหมุนเวียนกลับมาที่ถังเติมอากาศ (มิลลิกรัม/ลิตร)

X_e = ความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในน้ำทิ้งที่ล้นออกจากถังตกตะกอน (มิลลิกรัม/ลิตร)

V = ปริมาตรถังเติมอากาศ (ลิตร)

Q = อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าถังเติมอากาศ (ลิตร/วัน)

X = ความเข้มข้นของตะกอนในถังเติมอากาศหรือเอ็มแอลเอสเอส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ในกรณีระบบเอเอสทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่า X_e จะต่ำมาก ดังนั้นสมการที่ (2.8) จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\theta_c = \frac{VX}{Q_w X_r} \quad (2.9)$$

การควบคุมค่าอายุตะกอนอีกวิธีสามารถทำได้โดยการปรับอัตราการทิ้งตะกอนออกจากระบบโดยการทิ้งตะกอนจุลินทรีย์โดยตรงจากถังเติมอากาศ ดังสมการที่ (2.10)

$$\theta_c = \frac{VX}{Q_w X + (Q - Q_w) X_e} \quad (2.10)$$

ตะกอนในทำนองเดียวกัน เมื่อ X_e มีค่าน้อยมาก จะจัดรูปได้เป็น

$$\theta_c = \frac{V}{Q_w} \quad (2.11)$$

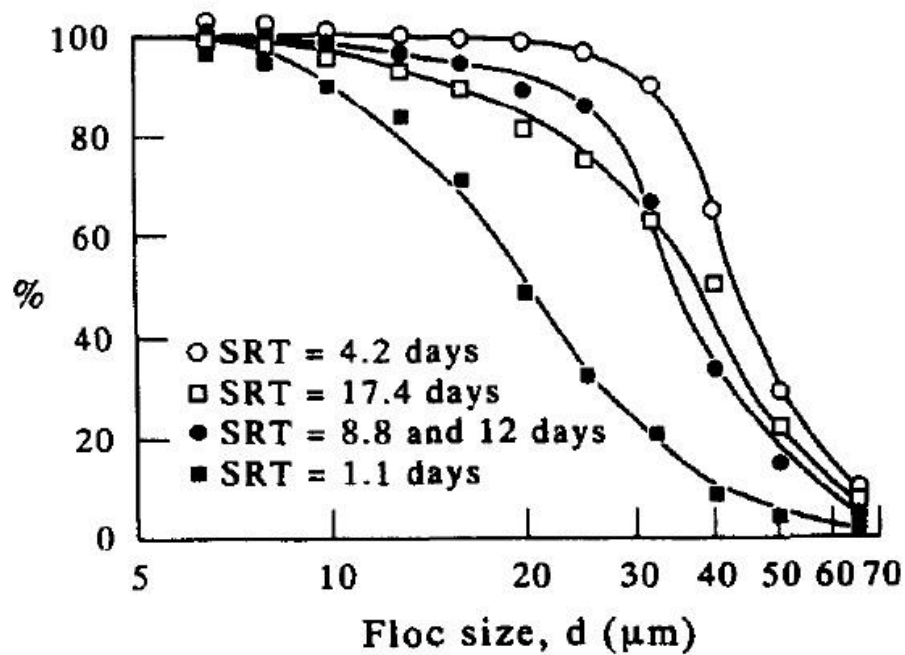
จากสมการที่ (2.8) การควบคุมอายุตะกอนด้วยการทิ้งตะกอนจากถังเติม อากาศจะสามารถควบคุมได้ง่ายกว่าการทิ้งตะกอนจากถังตกตะกอน เนื่องจากไม่ต้องวัดค่าความเข้มข้นตะกอนที่ถังตกตะกอน โดยอายุตะกอนจะขึ้นกับอัตราการระบายตะกอนทิ้งเพียงอย่างเดียว แต่การทิ้งตะกอนจากถังเติมอากาศจะให้ความเข้มข้นของตะกอนต่ำกว่า ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสระบบขนาดใหญ่ มักจะไม่ทิ้งตะกอนโดยตรงจากถังเติมอากาศเพราะมีค่าความเข้มข้นของตะกอนต่ำทำให้น้ำตะกอนที่นำมาทิ้งมีปริมาตรสูง ดังนั้นในระบบเอเอสที่มีขนาดใหญ่จึงทำการทิ้งตะกอนจากถังตกตะกอน แต่ในระบบเล็กๆสามารถทิ้งตะกอนโดยตรงจากถังเติมอากาศได้ น้ำตะกอนที่นำมาทิ้งมีปริมาตรไม่สูงมาก

จะเห็นได้ว่า ในการควบคุมค่าอายุตะกอนนั้น สิ่งที่ต้องวัดมีเพียงเอ็มแอลเอสเอส ซึ่งเป็นค่าที่สามารถวัดได้ง่ายและทราบผลเร็ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการควบคุมอายุตะกอนโดยการทิ้งตะกอนโดยตรงจากถังเติมอากาศ เนื่องจากสามารถทำการควบคุมระบบได้ง่ายกว่าการทิ้งตะกอนจากถังตกตะกอน

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเอเอสและระบบแอโรบิคเมมเบรนไบโอรีแอกเตอร์

2.4.1.1 Andreadkis (1993)(8) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบเอเอส โดยทำการเดินระบบเอเอสที่มีอายุตะกอนแตกต่างกันที่ 1.1, 4.2, 8.8, 12 และ 17.4 วัน โดยมีระยะเวลาพักเก็บน้ำเท่ากับ 10.5 ชั่วโมงและเอ็มแอลเอสเอสประมาณ 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำตะกอนจุลินทรีย์มาวัดขนาดและการกระจายตัวของขนาด พบว่านอกจากตะกอนที่มีอายุ 1.1 วัน แล้วตะกอนร้อยละ 85 จะมีขนาดอยู่ในช่วง 10 – 70 ไมโครเมตร และมีความมัธยฐานอยู่ระหว่าง 35 และ 45 ไมโครเมตร ส่วนตะกอนที่มีอายุ 1.1 วันมีร้อยละ 80 จะมีขนาดในช่วง 10 – 70 ไมโครเมตรและค่ามัธยฐานประมาณ 20 ไมโครเมตรดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2. 6 การกระจายตัวของขนาดตะกอนในระบบเอเอสที่อายุตะกอนต่างๆ

2.4.1.2 Masse และคณะ (2005) (9) ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของตะกอนและการทำงานของระบบเมมเบรนไบโอรีแอกเตอร์และระบบเอเอสที่อายุตะกอนสูง โดยศึกษาระบบเอเอสที่อายุตะกอน 9.2, 14.3 และ 32 วันและระบบเมมเบรนไบโอรีแอกเตอร์ที่อายุตะกอน 10, 37.2, 53 และ 110.3 วัน พบว่าในช่วงอายุตะกอนที่ศึกษาระบบเมมเบรนไบโอรีแอกเตอร์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สูงกว่าระบบเอเอส คือในช่วง $90.8 \pm 0.2\%$ ถึง $94.2 \pm 1.6\%$ ในขณะที่ระบบเอเอสมีประสิทธิภาพ $87.4 \pm 1.8\%$ ถึง $90.3 \pm 0.8\%$ และเมื่อเดินระบบที่อายุตะกอนสูงมากระบบเมมเบรนไบโอรีแอกเตอร์จะมีอัตราการสร้างตะกอนลดลงจาก 0.31 เป็น 0.13 gVSS/gCOD ที่อายุตะกอนเพิ่มจาก 9 วันเป็น 110 วัน นอกจากนี้จากการศึกษาลักษณะของตะกอนจุลินทรีย์ยังพบว่าจำนวนของแบคทีเรียที่ไม่เกิดฟล็อก (non-flocculating bacteria) ในระบบเมมเบรนไบโอรีแอกเตอร์มีปริมาณมากกว่าในระบบเอเอสและจุลินทรีย์ในระบบเมมเบรนไบโอรีแอกเตอร์มีความหลากหลายมากกว่า แต่ขนาดของตะกอนจุลินทรีย์ขนาดใหญ่ในระบบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยขนาดของตะกอนจุลินทรีย์จะลดลงจาก 240 เป็น 80 ไมโครเมตรเมื่ออายุตะกอนเพิ่มขึ้น

2.4.1.3 Fang และ Shi (2005) (10) ศึกษาการอุดตันภายในรูพรุนของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันด้วยตะกอนจุลินทรีย์ ได้ทดลองนำเมมเบรน 4 ชนิดได้แก่ Polycarbonate (PC), Polyvinylidene fluoride (PVDF), Mixed cellulose esters (MCE) และ Polyethersulfone (PES) มาใช้กรองตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชนิดเอเอสที่มีความเข้มข้น 4800 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำความสะอาดเมมเบรนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonication) พบว่าเมมเบรนชนิด PC ซึ่งมีรูพรุนลักษณะเป็นทรงกระบอกเล็กและเป็นระเบียบขนาดรูพรุน 0.2 ไมครอน มีความต้านทานภายในรูพรุนเกิดขึ้นน้อย ส่วนเมมเบรนอีก 3 ชนิดซึ่งมีรูพรุนลักษณะคล้ายฟองน้ำพบว่า เมมเบรนชนิด PVDF และ MCE ที่มีรูพรุนขนาด 0.5 – 3 ไมครอนมีความต้านทานภายในรูพรุนเกิดขึ้น $0.3 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ และ $1.3 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ ตามลำดับ ส่วนเมมเบรนชนิด PES ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ในช่วง 18 – 20 ไมครอนมีความต้านทานภายในรูพรุนเกิดขึ้น $16.4 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ นอกจากนี้ยังพบว่าเมมเบรนชนิด PVDF และ MCE ซึ่งมีลักษณะภายนอกเช่น ค่าความพรุน ขนาดและลักษณะของรูพรุนใกล้เคียงกัน แต่ค่าความต้านทานภายในรูพรุนที่เกิดขึ้นต่างกัน เนื่องจากจากคุณสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilic) กล่าวคือตะกอนจุลินทรีย์ซึ่งมีคุณสมบัติชอบน้ำจะยึดเกาะกับเมมเบรนชนิด MCE ซึ่งมีคุณสมบัติชอบน้ำมากกว่าเมมเบรนชนิด PVDF ได้ดีกว่าและทำให้เกิดความต้านทานภายในรูพรุนสูงกว่า

2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ระบบต่างๆ

2.4.2.1 Pliankarom (1996) (11) ศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีการล้างย้อนด้วยอากาศในระบบเมมเบรนไบโอรีแอกเตอร์เพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีเชื้อโรค (Application of the air backflushing technique in a membrane bioreactor for septic wastewater treatment) โดยใช้ไมโครฟิลเตรชันโมดูลแบบเส้นใยที่มีขนาดรูพรุน 0.2 ไมครอน ในถังเติมอากาศแบบเอเอส ในการทดลองระยะสั้นพบว่า ระยะเวลากการสูบล้าง 15 นาที สลับกับการล้างย้อนด้วยอากาศ 15 นาทีเป็นระยะเวลาที่ให้ผลดีที่สุดในการปรับปรุงให้ค่าเพอร์มิตฟลักซ์ดีขึ้นและมีความเสถียร ถึงแม้ว่าการอัดอากาศเพื่อล้างย้อนด้วยความดัน 1 บาร์จะไม่สามารถขจัดสิ่งอุดตันได้อย่างสมบูรณ์ แต่ก็ช่วยให้ระบบมีค่าเพอร์มิตฟลักซ์ที่เสถียรขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการล้างย้อนด้วยอากาศสำหรับการทดลองเดินระบบระยะยาวด้วยการสูบล้าง 15 นาที สลับกับการล้างย้อนด้วยอากาศ 15 นาที มีค่าความเข้มข้นตะกอนเริ่มต้นที่ 13,000 มิลลิกรัม/ลิตร ควบคุมให้มีระยะเวลาเก็บกักน้ำที่ 26 18 และ 10.5 ชั่วโมง พบว่าระบบมีความเสถียรที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 26 และ 18 ชั่วโมงการเดินระบบทั้งหมดสามารถกำจัดค่า ซีโอดี บีโอดี และ ทีเคเอ็น ได้มากกว่าร้อยละ 90 และมีค่าความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์สุดท้ายที่ 40,000 มิลลิกรัม/ลิตร

2.4.2.2 Parameshwaran (1999) (12) ศึกษาการใช้เมมเบรนในการแยกของแข็ง/ของเหลว และใช้เป็นเสมือนหัวกระจายอากาศในถังปฏิกริยาชีวภาพ (Membrane as solid/liquid separator and air diffuser in a bioreactor) เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้ไมโครฟิลเตรชัน โมดูลแบบเส้นใยที่มีขนาดรูพรุน 0.2 ไมครอนเป็นตัวกระจายอากาศในระบบเอเอส ซึ่งประกอบด้วยแอนน็อกซิโกโซน และออกซิโกโซน เพื่อกำจัดไนโตรเจน ระบบทำการกรองสลักกับการล้างย้อนด้วยอากาศเพื่อรักษา ระดับของค่าเพอร์มีทพลักซ์ และการล้างย้อนของเมมเบรนด้วยอากาศก็เป็นการช่วยเติมอากาศให้แก่ ตะกอนจุลินทรีย์ด้วยในเวลาเดียวกัน ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมมเบรนเป็นตัวกระจายอากาศที่ดีกว่า การใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิก (stone air diffusers) เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการปล่อยก๊าซสูง และระบบสามารถกำจัดค่าซีโอดี บีโอดี ทีเคเอ็น และไนโตรเจน ได้มากกว่าร้อยละ 95 ร้อยละ 98 ร้อยละ 95 และ ร้อยละ 80 ตามลำดับ

2.4.2.3 อังสนา สัจจนดำรงค์ (2010) (1) ศึกษาการประยุกต์หัวกระจายอากาศแบบเซรามิก เพื่อใช้แทนที่หน่วยตกตะกอนในระบบเอเอส (Application of ceramic diffuser as a sedimentation unit of activated sludge system) ในงานวิจัยนี้แบ่งการดำเนินการทดลองเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การหาความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ โดยการทดลองสูบน้ำสะอาด ผ่านหัวกระจายอากาศที่จะนำมาใช้งาน แล้วบันทึกค่าความดันผ่านเมมเบรนที่เกิดขึ้นที่ค่าพลักซ์การกรองต่างๆ

ขั้นตอนที่ 2 การหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันผ่านเมมเบรน และระยะเวลาในการสูบล้าง ที่ค่าความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ต่างๆ โดยสูบล้างน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 5,000 8,000 10,000 และ 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตรผ่านหัวกระจายอากาศด้วยอัตราการสูบล้าง 30 ลิตรต่อวัน ทำการบันทึกค่าความดันผ่านเมมเบรนที่ระยะเวลาในการสูบล้างต่างๆ โดยทำการสูบล้างจนกระทั่งความดันผ่านเมมเบรนมีค่าถึง 10 kPa

ขั้นตอนที่ 3 การเดินระบบและควบคุมระบบแอโรบิกเมมเบรนไบโอรีแอกเตอร์ที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิกทำหน้าที่ในการกรองแยกตะกอนจุลินทรีย์ โดยติดตั้งหัวกระจายอากาศ 2 ชั้นลงในถังปฏิกริยาแต่ละถัง สลับกันทำงานโดยสูบล้างน้ำเสีย 15 นาทีสลับกับเป่าอากาศ 15 นาที การเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราการไหลคงที่ที่ 30 ลิตรต่อวัน ปรับค่าการสารอินทรีย์เป็น 0.24 0.6 1.5 3.0 และ 6.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ ระยะเวลาพักเก็บในแต่ละถังปฏิกริยาเท่ากับ 10 ชั่วโมง และอายุตะกอน 20 วัน

วัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ ความสามารถในการกักเก็บ ตะกอนจุลินทรีย์ และการอุดตันของระบบ

ผลการทดลองจากขั้นตอนที่ 1 พบว่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศมีค่าเท่ากับ $1.80 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ จากขั้นตอนที่ 2 พบว่าค่าความดันผ่านเมมเบรนจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนถึงระยะเวลาหนึ่งค่าความดันผ่านเมมเบรนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและระยะเวลาที่ในการสูบล้างจนกระทั่งความดันผ่านเมมเบรนสูงกว่า 10 kPa จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์สูงขึ้น โดยที่ความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ 5,000 8,000 10,000 และ 15,000 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้เวลา 14 วัน 10 วัน 8 วัน และ 4 วัน ตามลำดับ จากขั้นตอนที่ 3 การทดลองเดินระบบแอโรบิกเมมเบรน ไบโอดีแอกเตอร์พบว่า ในถังปฏิกรณ์ที่มีค่าภาระสารอินทรีย์ 0.24 0.6 1.5 3.0 และ 6.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน จะมีความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ 800 2,000 5,000 10,000 และ 20,000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยในสภาวะปกติจะสามารถรักษาความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ไว้ได้ มีประสิทธิภาพในการกรองได้ถึงร้อยละ 99 ยกเว้นในกรณีที่ความดันในการกรองขึ้นสูงมากจะทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นต่ำหลุดออกจากระบบได้ ด้านประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ ระบบสามารถบำบัดภาระสารอินทรีย์ในช่วง 0.24 – 0.60 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ได้เทียบเท่ากับระบบบำบัดแบบแอโรบิกเมมเบรนไบโอดีแอกเตอร์หรือมากกว่าระบบเอส โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีได้ถึงมากกว่าร้อยละ 90 และของแข็งแขวนลอยในน้ำออกมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง

2.4.2.4 Xiaojie และคณะ (2017) (13) ศึกษาการใช้ต่างในการล้างย้อนเซรามิคเมมเบรนในระบบแอนแอโรบิกเมมเบรนไบโอดีแอกเตอร์ พบว่าในการศึกษาภายนอกระบบการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับกรดไฮโดรคลอริกสามารถกำจัดการอุดตันของเมมเบรนได้เกือบทั้งหมด โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถกำจัดโปรตีนได้ร้อยละ 92 และกรดไฮโดรคลอริกสามารถกำจัดแคลเซียมได้ร้อยละ 85 และแมกนีเซียมร้อยละ 95 สำหรับการศึกษาภายในระบบการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 – 20 มิลลิโมลต่อลิตรมีประสิทธิภาพในการกำจัดการอุดตันของเมมเบรนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและราคาพบว่าที่ความเข้มข้น 12 มิลลิโมลต่อลิตรมีความคุ้มค่ามากที่สุด

2.4.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.4.3.1 Xu Y. และคณะ (1995) (14) ศึกษาความเหมาะสมในการเดินระบบกรองและล้างย้อนของการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันแบบไม่ต่อเนื่อง (Optimization of a discontinuous microfiltration-backwash process) ได้ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการประมาณค่าความต้านทานของเมมเบรนที่เพิ่มขึ้นจากการล้างย้อนไม่สมบูรณ์และค่าความต้านทานของชั้นเค้กดังนี้

1. ค่าความต้านทานของเมมเบรนที่เพิ่มขึ้นจากการล้างย้อนไม่สมบูรณ์ จะแสดงอยู่ในรูปของระดับการอุดตันถาวร (Degree of fouling) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณอัตราการกรองและความดันในการเดินระบบได้ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.12

$$R_{m,i} = (1 + r)R_{m,i-1} = \dots = (1 + r)^i R_{m,0} \quad (2.12)$$

โดยที่ i คือ จำนวนรอบในการทำงาน

$R_{m,i}$ คือ ค่าความต้านทานของเมมเบรนที่การทำงานรอบที่ i

$R_{m,0}$ คือ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของเมมเบรน

r คือ ระดับการอุดตันถาวร (Degree of fouling)

2. ค่าความต้านทานของชั้นเค้กจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13

$$R_c = \frac{\alpha s V}{\Omega} \quad (2.13)$$

โดยที่ R_c คือ ค่าความต้านทานของชั้นเค้ก

α คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นเค้ก (specific cake resistance)

s คือ ความเข้มข้นของอนุภาคของแข็ง

V คือ ปริมาตรของของฟิลเตรทที่ไหลผ่านเมมเบรน

Ω คือ พื้นที่หน้าตัดของเมมเบรน

จากการศึกษางานวิจัยพบว่าขนาดของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบเอเอสมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของหัวกระจายอากาศแบบเซรามิกที่เลือกใช้ แต่หัวกระจายอากาศยังสามารถใช้กรองตะกอนจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อาจเนื่องมาจากรูพรุนของหัวกระจายอากาศมีลักษณะคดเคี้ยวทำให้ตะกอนเข้าไปติดอยู่จนกระทั่งรูพรุนมีขนาดเล็กลงและยังมีการเกิดชั้นเค้กทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองมากขึ้น การศึกษากลไกการอุดตันที่เกิดขึ้นกับหัวกระจายอากาศจะทำให้สามารถทำนายระยะเวลาในการอุดตันรวมถึงไปถึงลักษณะของการอุดตันที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการพัฒนาระบบในอนาคต



บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

การศึกษากลไกการดูดซับบริเวณห้วงกระจายอากาศ ทำได้โดยการวิเคราะห์ความต้านทานต่างๆภายในระบบ ได้แก่

- ความต้านทานเริ่มต้นของห้วงกระจายอากาศ (R_m)
- ความต้านทานจากการสะสมตัวของของแข็งภายในรูพรุนของห้วงกระจายอากาศ (R_p)
- ความต้านทานจากการสะสมตัวของชั้นเค้ก (R_c)

แต่เนื่องจากค่าความต้านทานจากการสะสมตัวของของแข็งภายในรูพรุนของห้วงกระจายอากาศและความต้านทานจากการสะสมตัวของชั้นเค้กนั้นไม่สามารถวัดได้โดยตรง จึงต้องคำนวณจากค่าความต้านทานรวมในระบบ (R_t) โดยจากสมการที่ 3.1 จะสามารถหาค่าความต้านทานเริ่มต้นของห้วงกระจายอากาศ (R_m) จากการทดลองสูบล้างน้ำสะอาดผ่านห้วงกระจายอากาศ และสามารถหาค่าความต้านทานรวมในระบบ (R_t) จากการทดลองเดินระบบจริง นอกจากนี้หลังจากทำการเดินระบบจนเกิดการอุดตันแล้ว เมื่อนำห้วงกระจายอากาศมาขัดล้างชั้นเค้กออกและนำไปวัดค่าความต้านทานด้วยการสูบล้างน้ำสะอาด ค่าความต้านทานที่วัดได้จะมีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างความต้านทานเริ่มต้นของห้วงกระจายอากาศและความต้านทานจากการสะสมตัวของของแข็งภายในรูพรุนของห้วงกระจายอากาศ ($R_m + R_p$) ดังนั้นจะสามารถคำนวณค่าความต้านทานของชั้นเค้กได้จากผลต่างของความต้านทานดังกล่าวและความต้านทานรวม นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าความต้านทานจากการสะสมตัวของของแข็งภายในรูพรุนของห้วงกระจายอากาศได้จากผลต่างระหว่างความต้านทานหลังจากการล้างย้อนและความต้านทานเริ่มต้นของห้วงกระจายอากาศ

$$R_t = R_m + R_p + R_c \quad (3.1)$$

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

- ขั้นตอนที่ 1 การทดลองหาความต้านทานของห้วงกระจายอากาศแบบเซรามิก เพื่อการหาความต้านทานเริ่มต้น (R_m) ของห้วงกระจายอากาศทุกหัวที่ใช้ในการทดลอง

- ขั้นตอนที่ 2 การทดลองเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบเยื่อกรองชีวภาพโดยการประยุกต์ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคแทนเมมเบรน โดยจะทำการทดลองเดินระบบจริงเพื่อหาค่าความต้านทานรวม (R_T) และค่าความต้านทานของชั้นเค้ก (R_C) ที่เกิดขึ้นกับหัวกระจายอากาศและนำค่าดังกล่าวไปคำนวณค่าความต้านทานจากการสะสมตัวของของแข็งภายในรูพรุน (R_p) ด้วยสมการที่ 4.1

ในการทดลองขั้นตอนที่ 1 จะสูบน้ำสะอาดผ่านหัวกระจายอากาศและวัดค่าฟลักซ์การกรองและค่าความดันผ่านเมมเบรนที่เกิดขึ้น เนื่องจากน้ำสะอาดจะไม่มีสารแขวนลอยของแข็งทำให้ค่าความต้านทานที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ

ในการทดลองขั้นตอนที่ 2 การทดลองเดินระบบบำบัดน้ำเสียจะทำการแปรผันระยะเวลาในการสูบล้าง/เป่าอากาศของหัวกระจายอากาศในถังปฏิกรณ์แต่ละถังที่เวลา 15/15 นาที 30/30 นาที และ 60/60 นาที โดยกำหนดให้ถังปฏิกรณ์มีปริมาตร 12.5 ลิตร ภาชนะสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์แต่ละถังคงที่ที่ 37.5 กรัม-ซีโอดี/วัน หัวกระจายอากาศมีความยาวหัวละ 10 เซนติเมตร มีพื้นที่หน้าตัดการกรองหัวละ 0.022 ตารางเมตร

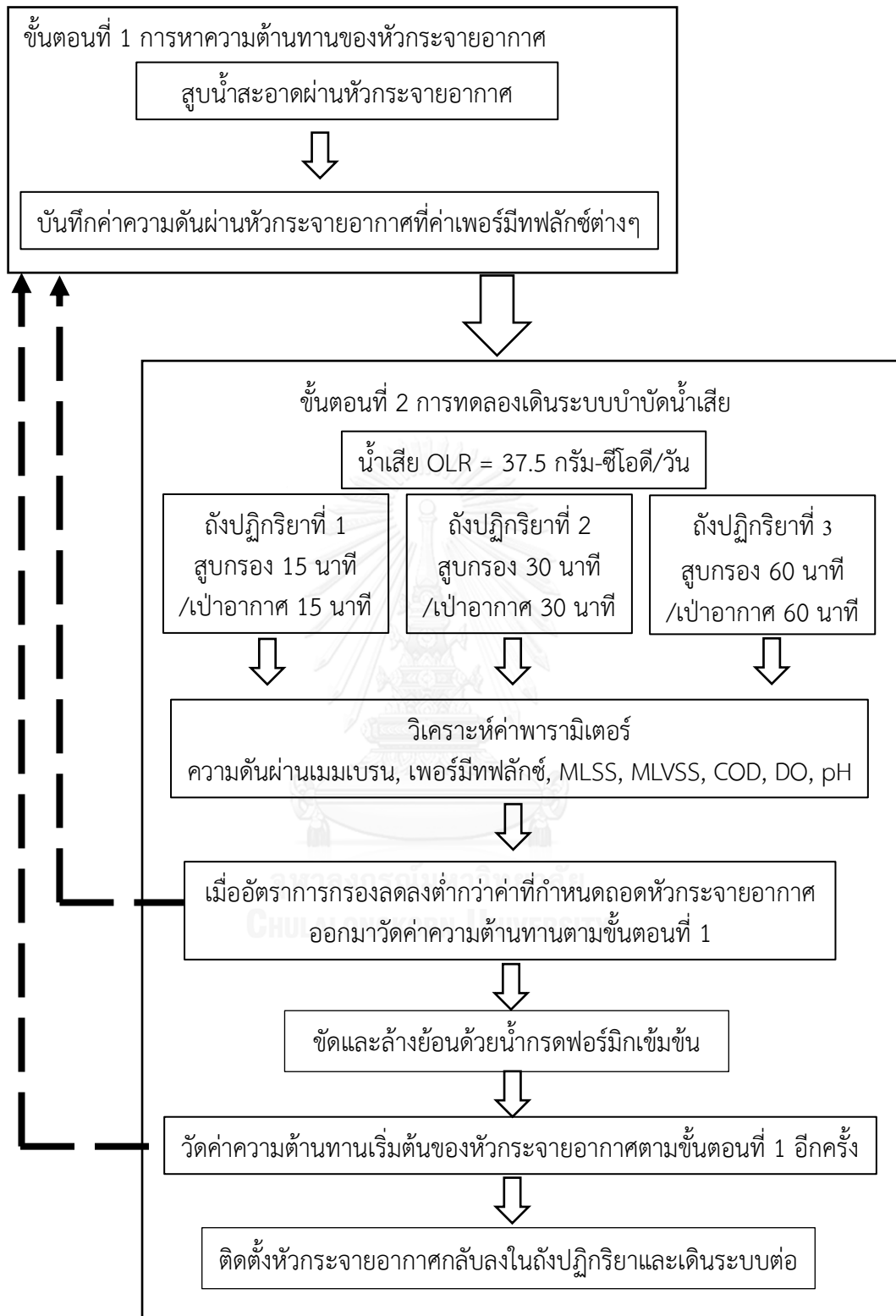
ทำการบันทึกค่าความดันผ่านเมมเบรนและเดินระบบอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เมื่อทำการเดินระบบจนเกิดการอุดตันจะทำให้อัตราการไหลลดลง เมื่ออัตราการไหลลดลงเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ที่ 15 ลิตร/วัน จึงหยุดเดินระบบ โดยอัตราการไหลดังกล่าวพิจารณาจากการเดินระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งเมื่ออัตราการไหลเปลี่ยนแปลงไปมากจะทำให้ควบคุมระบบได้ยากขึ้น เมื่อหยุดการเดินระบบแล้วจึงถอดหัวกระจายอากาศมาทำความสะอาดหัวกระจายอากาศแล้วนำไปวัดค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ แล้วนำกลับมาติดตั้งในถังปฏิกรณ์ดังเดิมและเดินระบบต่อไป แผนผังการดำเนินงานวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองของขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 แสดงได้ดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3. 1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในขั้นตอนที่ 1

	พารามิเตอร์	ค่าที่เลือกใช้
ตัวแปรต้น	ฟลักซ์การกรอง	ครอบคลุมช่วงที่ใช้งาน 30 ลิตร/วัน
ตัวแปรตาม	ความดันผ่านเมมเบรน	
ตัวแปรควบคุม	ของแข็งแขวนลอย	ไม่มี
ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม	อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3. 2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในขั้นตอนที่ 2

	พารามิเตอร์	ค่าที่เลือกใช้
ตัวแปรต้น	ระยะเวลาที่ใช้ในการกรอง/ล้างย้อน	15 นาที/15 นาที 30 นาที/30 นาที 60 นาที/60 นาที
ตัวแปรตาม	ความดันผ่านเมมเบรน อัตราการไหล	15 – 30 ลิตร/วัน
ตัวแปรควบคุม	ความเข้มข้นของตะกอนจุลชีพ ปริมาตรถังปฏิกิริยา อัตราการระเหยอินทรีย์ ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสีย ความดันในการเป่าอากาศ	ประมาณ 10,000 มก./ล. 12.5 ลิตร 37.5 กรัม-ซีไอดี/วัน 10 ชั่วโมง 30 kPa
ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม	อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3. 1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ถังทรงสี่เหลี่ยมจำนวน 3 ถัง ทำจากกระจกใส ขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 34 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ปริมาตรรวม 20 ลิตร

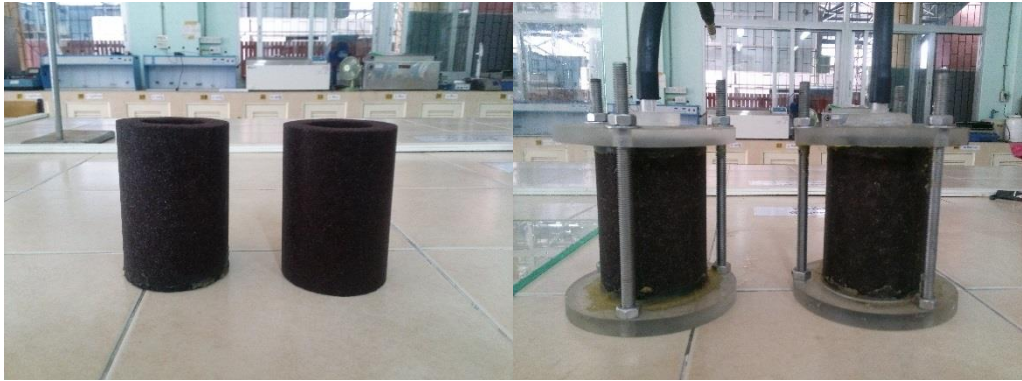


รูปที่ 3. 2 ถังปฏิกิริยา

3.1.2 หัวกระจายอากาศแบบเซรามิก (Ceramic Diffuser) ทรงกระบอก ของบริษัท Schumacher มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ชื่อทางการค้า : Schumacher Brandol Diffuser
- รุ่น (Model) : Brandol 20
- ขนาดรูพรุน (Pore size) : 190 – 280 ไมครอน
- พื้นที่ผิวการกรอง : 0.22 ตารางเมตร/เมตร
- วัสดุเมมเบรน : Quartz Sand
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก : 7 เซนติเมตร
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน : 4 เซนติเมตร
- ความยาว : 75 เซนติเมตร

นำหัวกระจายอากาศมาตัดแบ่งให้มีความยาวท่อนละ 10 เซนติเมตร ติดตั้งฐานรองรับและแผ่นยางรูปวงกลมบริเวณด้านบนและล่างของหัวกระจายอากาศ และต่อท่อสำหรับดูดน้ำและเป่าอากาศที่ด้านบนของหัวกระจายอากาศ ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งหัวกระจายอากาศแต่ละหัวจะมีพื้นที่ผิวการกรองหัวละ 0.022 ตารางเมตร



รูปที่ 3. 3 หัวกระจายอากาศแบบเซรามิก

3.1.3 เครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบ เป็นเครื่องสูบน้ำแบบไดอะแฟรม (Diaphragm Pump) ที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการสูบได้ โดยปรับอัตราการสูบน้ำเสียตามที่ออกแบบไว้ 30 ลิตร/วัน



รูปที่ 3. 4 เครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบชนิดไดอะแฟรม (Diaphragm Pump)

3.1.4 เครื่องสูบน้ำเสียออกจากระบบ เป็นเครื่องสูบน้ำเสียแบบรีดสาย (Peristaltic Pump) ปรับอัตราการสูบของเครื่องสูบน้ำให้ใกล้เคียงกับเครื่องสูบน้ำเสียเข้าระบบที่ 30 ลิตร/วัน



รูปที่ 3. 5 เครื่องสูบน้ำเสียออกจากระบบชนิดรีดสาย (Peristaltic Pump)

3.1.5 ถังพักน้ำเสียเข้าระบบ เป็นถังพลาสติก ภายในถังมีซีตบอกรปริมาณทุกๆ 1 ลิตร สามารถเก็บน้ำเสียได้เพียงพออย่างน้อย 1 วัน

3.1.6 ถังพักน้ำเสียออกจากระบบ เป็นถังพลาสติก ภายในถังมีซีตบอกรปริมาณทุกๆ 1 ลิตร สามารถเก็บน้ำเสียได้เพียงพออย่างน้อย 1 วัน

3.1.7 เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) เพื่อใช้ในการวัดความดันผ่านเมมเบรน



รูปที่ 3. 6 เกจวัดความดัน (Pressure Gauge)

3.1.8 เครื่องเติมอากาศ แรงดันอากาศสูงสุด 8 บาร์ ขนาดมอเตอร์ 0.5 แรงม้า ใช้เพื่อเติมอากาศให้จุลินทรีย์ในระบบ และเป่าอากาศเพื่อล้างย้อนหัวกระจายอากาศหลังจากทำการกรองแล้ว



รูปที่ 3. 7 เครื่องเติมอากาศ

3.1.9 เครื่องหน่วงเวลา ใช้ควบคุมการทำงานของระบบ โดยควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วสำหรับเป่าอากาศและการสูบกรองตะกอนจุลินทรีย์



รูปที่ 3. 8 เครื่องหน่วงเวลา

3.1.10 น้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ (Synthetic wastewater) ที่ใช้ในการทดลองนี้จะใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon) และมีธาตุอาหารต่างๆที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ จากการคำนวณสำหรับภาระสารอินทรีย์ที่ 3.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.วัน จะต้องใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีซีโอดี 1,250 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีส่วนประกอบของธาตุอาหารต่างๆโดยประมาณแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3. 3 ส่วนประกอบของธาตุอาหารเสริมในน้ำเสียสังเคราะห์

ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)
น้ำตาลทราย	1,136
ยูเรีย	170
NaHCO ₃	136
CaCl ₂ ·2H ₂ O	45
FeCl ₃ ·6H ₂ O	11
K ₂ HPO ₄	23
MgSO ₄ ·7H ₂ O	7

3.1.11 เครื่องมือและอุปกรณ์วิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ สำหรับวิเคราะห์ค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาและควบคุมระบบ

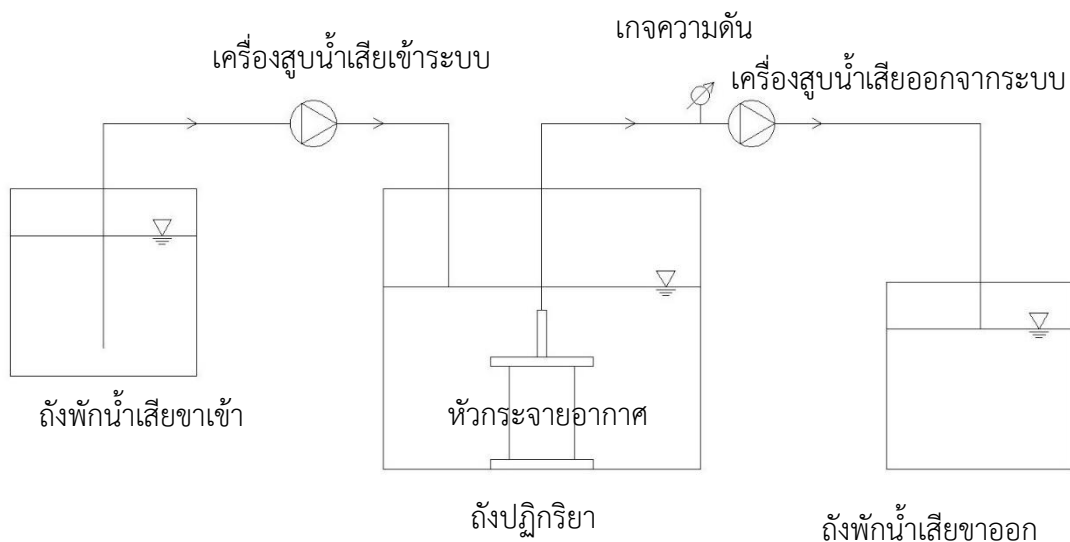
3.3 การดำเนินการทดลอง

การดำเนินการทดลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

3.3.1 การทดลองหาความต้านทานของหวักระจายอากาศแบบเซรามิค

การหาความต้านทานของหวักระจายอากาศแบบเซรามิคทำได้โดยติดตั้งชุดการทดลองดังที่แสดงในรูปที่ 3.9 ควบคุมการสูบน้ำสะอาดผ่านหวักระจายอากาศที่ค่าความดันผ่านเมมเบรนต่างๆ แล้วบันทึกค่าความดันผ่านเมมเบรนที่ควบคุมและค่าเพอร์มิทพลักซ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งระหว่างการทดลองจะต้องเติมน้ำสะอาดกลับเข้าไปในถังปฏิกิริยา เพื่อรักษาระดับน้ำภายในถังให้คงที่ ซึ่งจะทำให้ค่าความดันที่เกิดจากระดับน้ำคงที่

การทดลองหาความต้านทานนี้จะถูกใช้เพื่อหาความต้านทานของหวักระจายอากาศ (R_m) และความต้านทานของหวักระจายอากาศหลังเกิดการอุดตันจากการเดินระบบ ($R_m + R_p$)



รูปที่ 3. 9 การติดตั้งชุดการทดลองเพื่อหาค่าความต้านทานเริ่มต้นของหั่วกระจายอากาศแบบเซรามิก

จากการทดลองสามารถหาค่าความต้านทานของหั่วกระจายอากาศแบบเซรามิกได้จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างเพอร์มิทพลักซ์กับค่าความดันผ่านเมมเบรนได้ดังสมการที่ 3.2

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_m} \quad (3.2)$$

เมื่อ	J	คือ ค่าเพอร์มิทพลักซ์ (l/m^2s)
	ΔP	คือ ค่าความดันผ่านเมมเบรน (kPa)
	μ	คือ ความหนืดของสารละลาย ($kN \cdot s/m^3$)
	R_m	คือ ความต้านทานของหั่วกระจายอากาศ (m^{-1})

ซึ่งความต้านทานรวมประกอบด้วย ความต้านทานเริ่มต้นของหั่วกระจายอากาศ และความต้านทานที่เกิดจากการสะสมตัวของของแข็ง ดังที่แสดงในสมการที่ 3.3

$$R_m = R_{m,0} + R_p \quad (3.3)$$

เมื่อ	$R_{m,0}$	คือ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของหั่วกระจายอากาศ
	R_p	คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากการสะสมตัวของของแข็ง

เนื่องจากการทดลองนี้ใช้น้ำสะอาดในการทดลอง ทำให้ไม่มีการสะสมตัวของของแข็ง ค่า R_p ในสมการจึงสามารถละออกไปได้ ดังนั้นจึงสามารถจัดรูปสมการเพื่อหาค่าความต้านทานเริ่มต้นของหั่วกระจายอากาศได้ดังสมการที่ 3.4

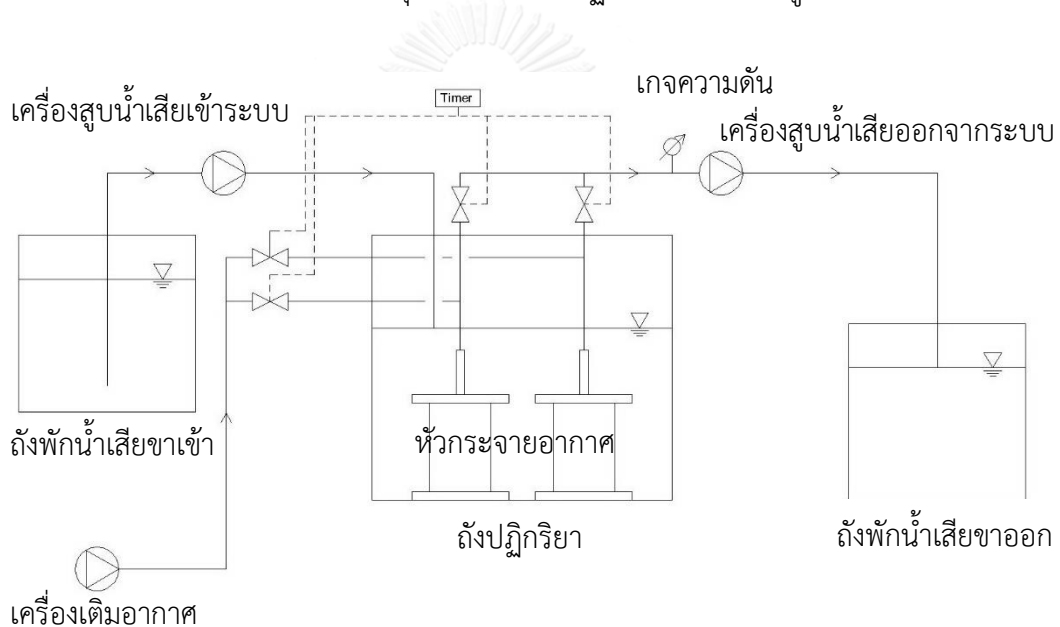
$$\Delta P = \mu R_{m,0} J + \Delta P_0 \quad (3.4)$$

เมื่อ ΔP_0 คือ ความดันผ่านเมมเบรนเริ่มต้นที่ต้องการเพื่อใช้ในการเอาชนะการกีดขวางของอากาศ

จากสมการที่ 3.4 สามารถหาความต้านทานของหัวกระจายอากาศแบบเซรามิกได้จากการเขียนกราฟระหว่างค่าเพอร์มีทฟลักซ์และค่าความดันผ่านเมมเบรน

3.3.2 การทดลองเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบเยื่อกรองชีวภาพโดยการประยุกต์ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิกแทนเมมเบรน

1) การทดลองทำได้โดยติดตั้งอุปกรณ์ลงในถังปฏิกริยาทั้ง 3 ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3. 10 การติดตั้งชุดการทดลองเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบเยื่อกรองชีวภาพโดยการประยุกต์ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิกแทนเมมเบรน

2) ทำการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกริยาด้วยหัวเชื้อจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนของโรงควบคุมคุณภาพน้ำสีพระยา โดยทำการคำนวณปริมาณของตะกอนแขวนลอย (MLSS) ที่ต้องการจากสมการที่ 3.5 แล้วใส่หัวเชื้อเข้าสู่ระบบตามปริมาณตะกอนแขวนลอยที่คำนวณได้

$$\frac{F}{M} = \frac{S}{X\tau} \quad (3.5)$$

เมื่อ	F/M	คือ ค่าอาหารต่อปริมาณจุลินทรีย์ในระบบ (d^{-1})
	S	คือ ซีโอดีที่เข้าสู่ระบบ (mg/l)
	X	คือ ปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบ (mg/l)
	T	คือ ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (d)

จากสมการที่ 3.5 เลือกใช้ค่า $F/M = 0.3 d^{-1}$ น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าซีโอดี 1,250 มิลลิกรัม/ลิตร ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 10 ชั่วโมง จะได้

$$0.3 = \frac{1,250}{X \times 10/24}$$

$$X = 10,000$$

จะได้ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 10,000 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์มีค่าสูงกว่าระบบเอเอสทั่วไปและมีค่าใกล้เคียงกับระบบเมมเบรนไบโอรีแอกเตอร์

3) ทำการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราการสารอินทรีย์ 3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.วัน ลงในถังปฏิกิริยาทั้ง 3 ถัง โดยควบคุมอัตราการไหลให้คงที่เท่ากับ 30 ลิตร/วัน กำหนดระยะเวลาในการกักเก็บของน้ำเสียในถังปฏิกิริยาแต่ละถังเท่ากับ 10 ชั่วโมง ค่าอายุตะกอนเท่ากับ 20 วัน และค่าความดันในการเป่าอากาศเท่ากับ 30 kPa ทำการเดินระบบด้วยการสูบลมหรือน้ำเสียผ่านหัวกระจายอากาศหัวที่ 1 และเป่าอากาศเพื่อเติมอากาศให้ระบบผ่านหัวกระจายอากาศหัวที่ 2 จากนั้นจึงสลับกันทำงานด้วยวาล์วควบคุมอัตโนมัติให้หัวกระจายอากาศหัวที่ 1 ทำหน้าที่เป่าอากาศเพื่อเติมอากาศให้ระบบ และลดการสะสมตัวของของแข็งบริเวณผิวหน้าหัวกระจายอากาศ และใช้หัวกระจายอากาศหัวที่ 2 ในการสูบลมแทน โดยระยะเวลาในการสลับการทำงานของหัวกระจายอากาศแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3. 4 ระยะเวลาในการสลับการทำงานของหัวกระจายอากาศสูบลมและการเป่าอากาศของหัวกระจายอากาศ

ถังปฏิกิริยา	ระยะเวลาในการสูบลม/ระยะเวลาในการเป่าอากาศ (นาที)
1	สูบลม 15 นาที/เป่าอากาศ 15 นาที
2	สูบลม 30 นาที/เป่าอากาศ 30 นาที
3	สูบลม 60 นาที/เป่าอากาศ 60 นาที

4) ทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่องที่อัตราการกรองน้ำใสคงที่ที่ 30 ลิตร/วัน จนเกิดการอุดตันขึ้นจะทำให้อัตราการกรองลดลง จะทำการเพิ่มรอบการทำงานของเครื่องสูบน้ำเสียขาออกเพื่อรักษาอัตราการกรองให้คงที่ เมื่ออัตราการกรองมีค่าลดลงจนต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ที่ 15 ลิตร/วัน จึงหยุดระบบและถอดหัวกระจายอากาศออกมาเพื่อเตรียมนำไปทำความสะอาดต่อไป

5) หลังจากหยุดระบบ ถอดหัวกระจายอากาศออกมา ทำการขัดล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นนำไปเป่าอากาศนาน 20 นาที เพื่อกำจัดชิ้นเค้กออก จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาความต้านทานของหัวกระจายอากาศตามการทดลองที่ 3.2.1 เพื่อหาค่าความต้านทานหลังเกิดการอุดตันจากการเดินระบบ ($R_m + R_p$)

6) ทำความสะอาดหัวกระจายอากาศด้วยการล้างย้อนด้วยกรดฟอร์มิกเข้มข้น 10% นาน 2 ชม. โดยความเข้มข้นของกรดฟอร์มิกที่เลือกใช้ เป็นข้อมูลจากการสอบถามผู้จัดจำหน่าย จากนั้นนำไปเป่าอากาศนาน 20 นาที เพื่อทำความสะอาดการอุดตันภายในรูพรุนของหัวกระจายอากาศ จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาความต้านทานของหัวกระจายอากาศตามการทดลองที่ 3.2.1 อีกครั้งเพื่อหาค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ (R_m) ก่อนติดตั้งกลับลงสู่ถังปฏิบัติการดังเดิม

7) เดินระบบต่อไปจนเกิดการอุดตันดังกล่าวครบ 4 ครั้ง โดยค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศหลังจากทำความสะอาดแล้วแล้วจะนำไปวิเคราะห์หาค่าความอุดตันถาวร ซึ่งใช้ในการประมาณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศแบบเซรามิกที่ใช้แทนหน่วยกรองในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส

ระหว่างทำการทดลองจะวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์และบันทึกข้อมูลดังนี้

- ความดันผ่านเมมเบรน ทำการบันทึก 2 ค่า คือในขณะที่เริ่มทำการสูบกรองและขณะที่การสูบกรองสิ้นสุดก่อนสลับเป็นการเป่าอากาศ เพื่อศึกษากลไกการอุดตันของหัวกระจายอากาศ
- เพอร์มิทพลักซ์ ใช้ในการคำนวณปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ตกค้างบนผิวหน้าของหัวกระจายอากาศ เพื่อศึกษาลักษณะการก่อตัวของชั้นเค้กบริเวณผิวหน้าของหัวกระจายอากาศ
- ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและของแข็งระเหยได้ ทำการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและของแข็งระเหยได้ของระบบและค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของน้ำเสียที่ออกจากระบบ เพื่อคำนวณประสิทธิภาพในการกรองของแข็งของหัวกระจายอากาศ
- ซีไอดี พีเอช และดีไอ วิเคราะห์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบค่าพารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์มีรายละเอียดดังที่แสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3. 5 ค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ วิธีการวิเคราะห์ และความถี่ในการวิเคราะห์

ค่าพารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์
1. ความดันผ่านเมมเบรน	- เกจความดัน	ทุกวัน
2. เพอร์มีทฟลักซ์	- จับเวลาและวัดปริมาตร	ทุกวัน
3. ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	- Total residual dried at 103 -105 °C (AWWA 209 D.)	สัปดาห์ละ 3 ครั้ง
4. ของแข็งระเหยได้	- Total Volatile and Fixed residual at 500°C (AWWA 209 D.)	สัปดาห์ละครั้ง
5. ซีโอดี	- Dichromate Close Reflux Method (AWWA 508 A.)	สัปดาห์ละ 3 ครั้ง
6. พีเอช	- Electronic pH meter with glass electrode method (AWWA 423.)	ทุกวัน
7. ดีโอ	- Membrane Electrode Method (AWWA 421 F.)	ทุกวัน

8) การดูแลรักษาความสะอาดของถังปฏิกรณ์

การดูแลรักษาความสะอาดของถังปฏิกรณ์ รวมทั้งอุปกรณ์ต่างๆให้อยู่ในสภาพที่สะอาด เพื่อป้องกันมิให้เชื้อชนิดอื่นๆ เช่น เชื้อราเกิดขึ้นภายในระบบ โดยทำความสะอาดถังปฏิกรณ์ไม่ให้มีเมือกจุลินทรีย์ (Slime) เกาะบริเวณถังและเปลี่ยนท่อสูบน้ำเสียเมื่อพบว่ามีเมือกจุลินทรีย์เกาะอยู่ซึ่งส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำเสียลดลง

9) การควบคุมอายุตะกอน

ทำได้โดยการระบายน้ำและตะกอนแขวนลอยออกจากถังปฏิกรณ์โดยตรง ปริมาตรของน้ำที่ระบายออกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.6

$$Q_w = \frac{\left(\frac{VX}{\theta_c}\right) - QX_e}{(X - X_e)} \quad (3.6)$$

เมื่อ	Q_w	คือ ปริมาณน้ำและตะกอนแขวนลอยที่ทิ้งออกจากระบบ (l/d)
	Q	คือ อัตราการสูบน้ำเสียเข้าระบบ (l/d)
	θ_c	คือ อายุตะกอน (d)
	X	คือ ความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในระบบ (mg/l)
	X_e	คือ ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่หลุดออกไปกับน้ำทิ้ง (mg/l)
	V	คือ ปริมาตรของถังปฏิกริยา (l)

จากสมการที่ 3.6 เห็นได้ว่า ถ้าความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยที่หลุดไปกับน้ำออกมีค่าน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในระบบสมการที่ 3.6 จะสามารถลดรูปเป็นสมการที่ 3.7

$$Q_w = \frac{V}{\theta_c} \quad (3.7)$$

โดยในการทดลองกำหนดปริมาตรของน้ำเสียในถังปฏิกริยาเท่ากับ 12.5 ลิตร และอายุตะกอนเท่ากับ 20 วัน จึงสามารถคำนวณปริมาตรของน้ำและตะกอนแขวนลอยที่ต้องทิ้งได้ 0.625 ลิตร/วัน

3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองและการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

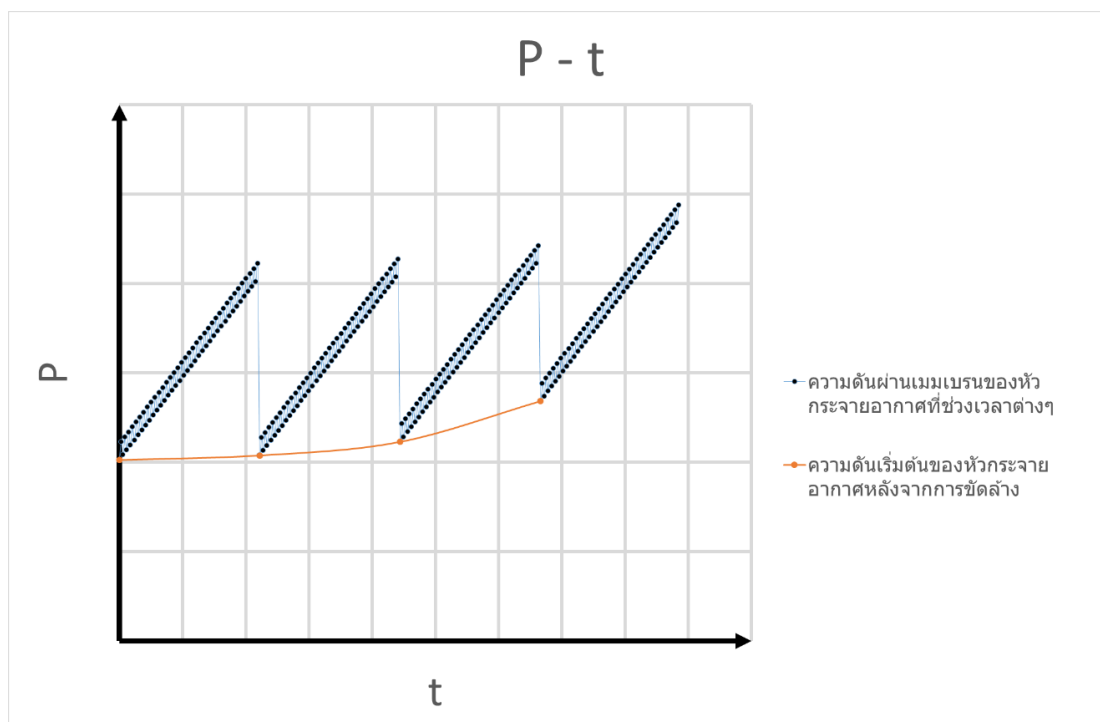
จากการทดลองที่ 3.1 และ 3.2 ผลการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

3.4.1 ระดับการอุดตันถาวร (Degree of fouling)

การอุดตันถาวรคือการอุดตันที่ไม่สามารถฟื้นฟูสภาพได้ด้วยการทำความสะอาดด้วยสารเคมีซึ่งจะทำให้หวักระเจายอากาศมีความต้านทานหลังจากทำความสะอาดเพิ่มขึ้นกว่าความต้านทานเริ่มต้นของหวักระเจายอากาศ Xu Y. และคณะ (1995) (14) ได้ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการประมาณค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นในรูปของระดับการอุดตันถาวร (Degree of fouling) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$R_{m,i} = (1 + r)R_{m,i-1} = \dots = (1 + r)^i R_{m,0} \quad (2.12)$$

ในการทดลองที่ 3.2 เมื่อหวักระเจายอากาศเกิดการอุดตันจนความดันผ่านเมมเบรนมีค่าสูงกว่าที่จะยอมรับได้ หวักระเจายอากาศจะถูกถอดมาทำความสะอาดด้วยสารเคมี และวัดค่าความต้านทานของเมมเบรน โดยผลการทดลองที่คาดว่าจะได้รับแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3. 11 กราฟแสดงความดันผ่านเมมเบรนที่ระยะเวลาต่างๆ (ประมาณการณ)

จากรูปจะสามารถคำนวณค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศหลังจากทำการทำความสะอาดได้ และเมื่อนำค่าดังกล่าวไปแทนในสมการที่ 2.12 ก็จะสามารถคำนวณค่าระดับการอุดตันถาวร (r) ของหัวกระจายอากาศที่เกิดจากการอุดตันของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบเอเอสได้ โดยค่าระดับการอุดตันถาวรนี้สามารถนำไปใช้คำนวณความต้านทานที่เพิ่มขึ้นของหัวกระจายอากาศหลังจากการทำความสะอาดเพื่อพิจารณาการเสื่อมสภาพของหัวกระจายอากาศและจำนวนรอบการใช้งานที่เหมาะสมได้

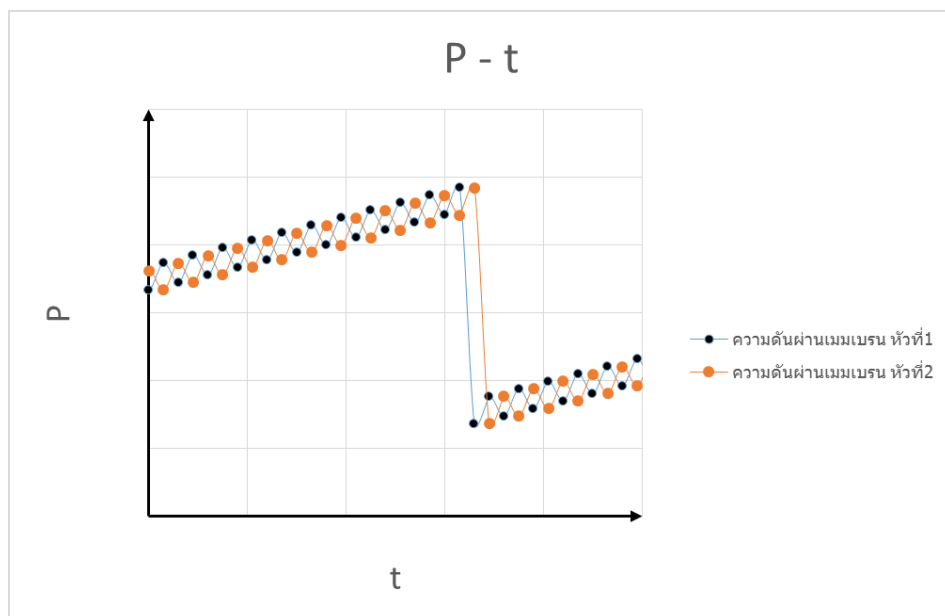
3.4.2 ความต้านทานจำเพาะของชั้นเค้ก (Specific cake resistance)

ความต้านทานของชั้นเค้กเป็นความต้านทานหลักที่ทำให้แรงดันผ่านเมมเบรนในระบบมีค่าสูงขึ้น จากการทดลองที่ 3.2.2 จะมีการวัดค่าความดันผ่านเมมเบรน 2 จุดคือ เมื่อเริ่มทำการสูบล้างและเมื่อทำการกรองผ่านไปตามเวลาที่กำหนดก่อนที่จะเปลี่ยนไปทำหน้าที่เป่าอากาศ ทำให้สามารถหาค่าความต้านทานของชั้นเค้กได้จากผลต่างของค่าความต้านทานทั้งสองจุด รูปที่ 3.11 แสดงความดันผ่านเมมเบรนที่ระยะเวลาต่างๆที่คาดว่าจะได้รับ และจะสามารถหาค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นเค้กได้จากสมการที่ 2.13

$$R_c = \frac{\alpha s V}{\Omega} \quad (2.13)$$

- โดยที่ R_c คือ ค่าความต้านทานของชั้นเค้ก
 α คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นเค้ก (specific cake resistance)
 s คือ ความเข้มข้นของอนุภาคของแข็ง
 V คือ ปริมาตรของของฟิลเตรทที่ไหลผ่านเมมเบรน
 Ω คือ พื้นที่หน้าตัดของเมมเบรน

การหาความต้านทานจำเพาะของชั้นเค้กจะทำให้สามารถทำนายค่าความต้านทานของชั้นเค้กเพื่อที่จะนำไปพิจารณาระยะเวลาที่เหมาะสมในการสุบกรองของระบบได้



รูปที่ 3. 12 กราฟแสดงความดันผ่านเมมเบรนที่ระยะเวลาต่างๆของหัวกระจายอากาศ (ประมาณการณ์)

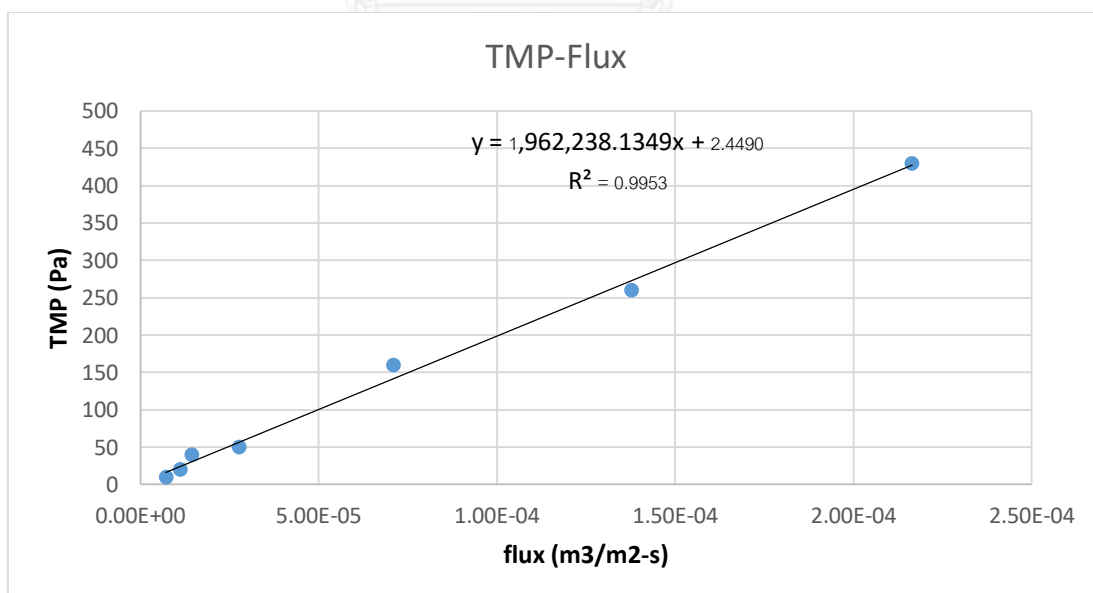
บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลการทดลองในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น

4.1 การทดลองหาความต้านทานของหัวกระจายอากาศแบบเซรามิก

จากการทดลองหาความต้านทานของหัวกระจายอากาศแบบเซรามิกตามขั้นตอนการทดลองที่ 1 หัวข้อที่ 3.3.1 โดยควบคุมการสูบน้ำสะอาดผ่านหัวกระจายอากาศที่ค่าความดันผ่านหัวกระจายอากาศต่างๆ แล้วบันทึกค่าความดันผ่านหัวกระจายอากาศที่ควบคุมและค่าเพอร์มิทฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจากสมการที่ 3.4 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากการทดลองในรูปแบบกราฟเส้นตรง โดยมีค่าเพอร์มิทฟลักซ์เป็นแกนนอน และค่าความดันผ่านหัวกระจายอากาศเป็นแกนตั้ง จะสามารถนำค่าความชันจากกราฟมาคำนวณเป็นค่าความต้านทานได้ รูปที่ 4.1 เป็นตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอร์มิทฟลักซ์ และค่าความดันผ่านหัวกระจายอากาศ จากการทดลองการหาค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศหัวที่ 1 ระยะเวลาสูบล้าง 15 นาที ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.



รูปที่ 4. 1กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอร์มิทฟลักซ์ และค่าความดันผ่านหัวกระจายอากาศ

เนื่องจากการทดลองนี้ใช้หัวกระจายอากาศใหม่ที่ไม่เคยใช้งาน หลังจากทำการทดลองวัดความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศตามขั้นตอนการทดลองที่ 1 แล้วนำหัวกระจายอากาศมาใช้งานในส่วนของระบบเป่าอากาศเพื่อปรับสภาพตะกอนจุลินทรีย์ให้เคยชินกับอาหารสังเคราะห์นาน 1 เดือน โดยในช่วงที่ปรับสภาพตะกอนหัวกระจายอากาศทำหน้าที่เป่าอากาศเพียงอย่างเดียว เมื่อปรับสภาพตะกอนจุลินทรีย์ครบระยะเวลา 1 เดือนแล้ว จึงถอดหัวกระจายอากาศเพื่อทำความสะอาดและทำการวัดความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศอีกครั้ง จากการดำเนินงานดังกล่าวสามารถหาความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ (R_{m0}) และความต้านทานของหัวกระจายอากาศหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือน (R_{m1}) จากการทดลองได้ผลตามตารางที่ 4.1 โดยค่า R_{m1} จะถูกนำไปใช้เป็นค่าความต้านทานเริ่มต้นของระบบ เพื่อนำไปคำนวณค่าระดับการอุดตันถาวร (Degree of Fouling) ต่อไป ทั้งนี้การทำความสะอาดหัวกระจายอากาศครั้งนี้ใช้วิธีที่ออกแบบไว้เดิมคือการทำความสะอาดด้วยการแช่กรด ซึ่งภายหลังเปลี่ยนวิธีการทำความสะอาดเป็นการล้างย้อนด้วยกรด ซึ่งรายละเอียดการล้างทั้ง 2 วิธีจะกล่าวเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 4.2.2

ตารางที่ 4. 1 ความต้านทานต่างๆของหัวกระจายอากาศ

	ถึงปฏิบัติการที่ 1 (15 นาที)		ถึงปฏิบัติการที่ 2 (30 นาที)		ถึงปฏิบัติการที่ 3 (60 นาที)		เฉลี่ย
	หัวที่1	หัวที่2	หัวที่3	หัวที่4	หัวที่5	หัวที่6	
ความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ (R_{m0}) ($\times 10^9 \text{ m}^{-1}$)	1.96	1.99	2.34	2.06	2.04	1.86	2.04
ความต้านทานของหัวกระจายอากาศหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือน (R_{m1}) ($\times 10^9 \text{ m}^{-1}$)	8.77	11.07	7.81	11.56	18.53	29.11	14.47

จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ (R_{m0}) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $2.04 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และความต้านทานของหัวกระจายอากาศหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือน (R_{m1}) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $14.47 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ จากงานวิจัยของอังสนา (2010) ที่ใช้หัวกระจายอากาศที่ผ่านการใช้งานแล้วในการทำการทดลอง ได้ค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศเท่ากับ

$18.0 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับความต้านทานของหัวกระจายอากาศหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือน และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานของเมมเบรนชนิดไมโครฟิลเตรชัน จากงานวิจัยของ Parameshwaran (1999) พบว่าค่าความต้านทานของเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาด 0.2 ไมครอนมีค่า $819 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศมาก เนื่องจากหัวกระจายอากาศมีรูพรุนขนาด 190 – 280 ไมครอน ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเมมเบรนชนิดไมโครฟิลเตรชัน (0.2 ไมครอน)

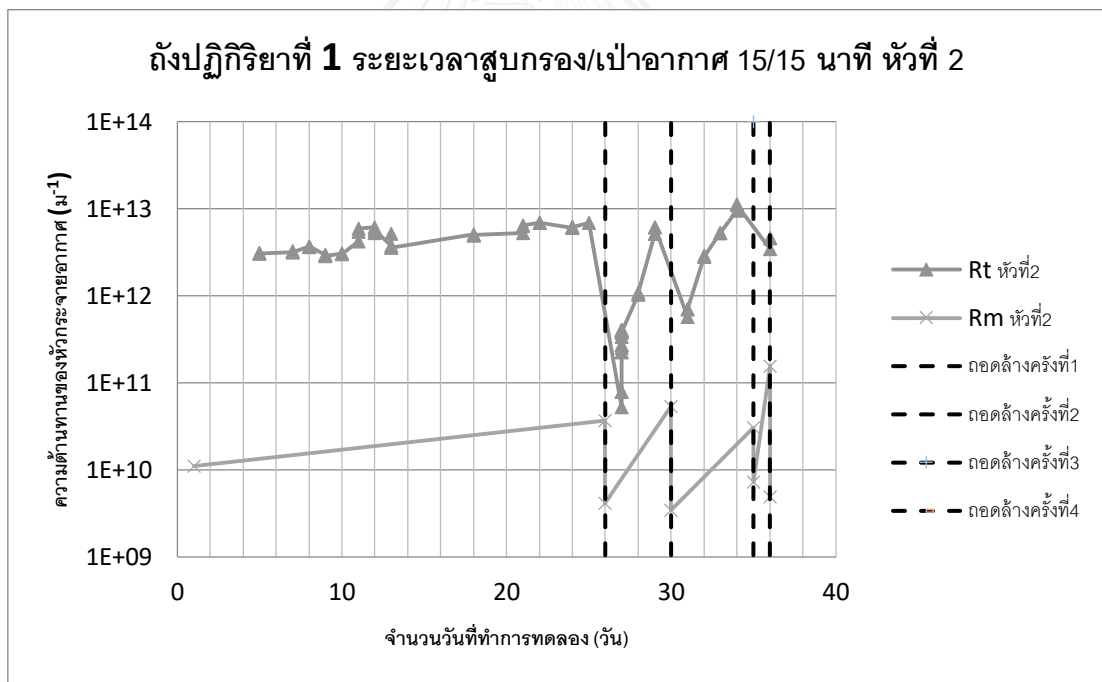
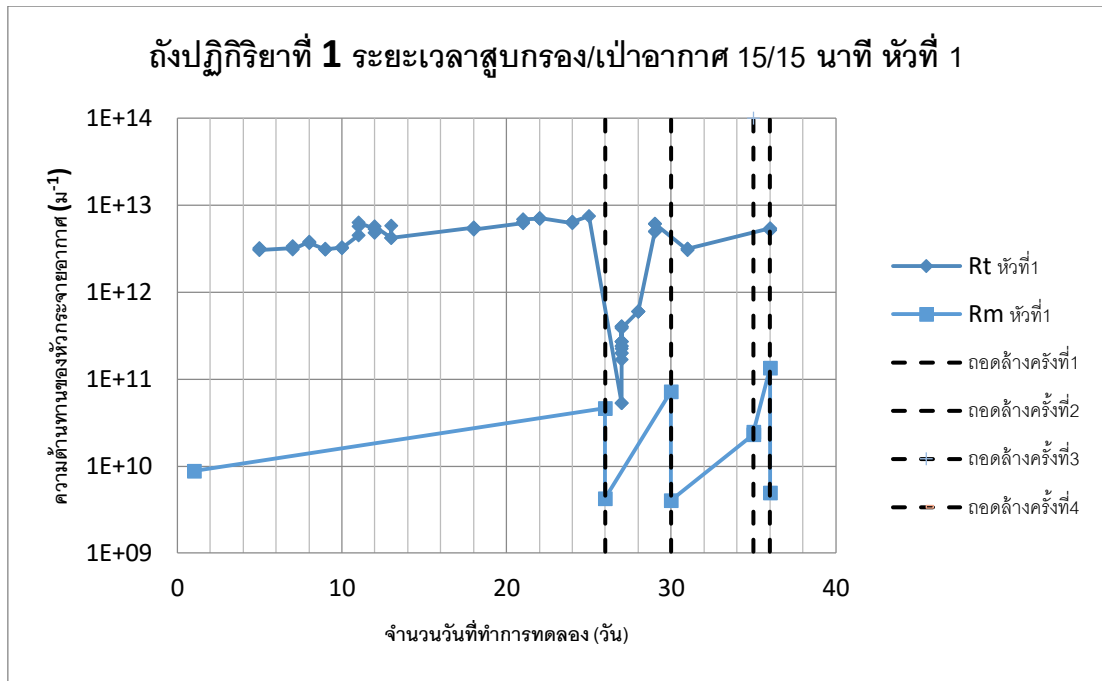
4.2 การทดลองเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบเยื่อกรองชีวภาพโดยการประยุกต์ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคแทนเมมเบรน

จากขั้นตอนการทดลองที่ 2 หัวข้อที่ 3.3.2 การทดลองเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบเยื่อกรองชีวภาพโดยการประยุกต์ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคแทนเมมเบรน ระหว่างทำการทดลองทำการบันทึกค่าความดันผ่านหัวกระจายอากาศและอัตราการกรองน้ำทิ้งเพื่อนำมาคำนวณค่าความต้านทานรวม (R_T) ด้วยสมการที่ 3.4 นอกจากนี้เมื่อทำการทดลองจนเกิดการอุดตัน คือเมื่ออัตราการกรองลดลงต่ำกว่า 15 ลิตร/วัน จึงหยุดระบบและถอดล้างหัวกระจายอากาศเพื่อหาค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศ (R_m) โดยทำการทดลองจนเกิดการอุดตันหลายครั้งเพื่อนำค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศมาคำนวณค่าระดับการอุดตันถาวร ซึ่งระหว่างทำการทดลองมีการวัดค่า MLSS และค่าซีโอดี เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเดินระบบ

จากการทดลองพบว่า ในช่วง 3 – 4 วันแรกไม่สามารถวัดความดันผ่านของหัวกระจายอากาศได้ เนื่องจากค่าความดันต่ำกว่าที่เกจวัดความดันสามารถวัดได้ เมื่อเวลาผ่านไป 5 วัน พบว่าความดันผ่านหัวกระจายอากาศเพิ่มขึ้นทั้ง 3 ถัง โดยระหว่างทำการทดลองพบว่าค่าความดันผ่านหัวกระจายอากาศที่วัดได้ในแต่ละครั้งมีโอกาสทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงจากการวัดครั้งก่อน ซึ่งเกิดจากการเป่าอากาศในระบบไม่สามารถกำจัดสิ่งอุดตันหรือขึ้นเค้กได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ค่าความดันที่วัดมีค่าต่ำในรอบที่การเป่าอากาศทำความสะอาดได้มาก และมีค่าสูงในรอบที่การเป่าอากาศทำความสะอาดได้น้อย นอกจากนี้ค่าความดันผ่านของหัวกระจายอากาศยังสามารถลดลงจากสาเหตุอื่น เช่น การชำระชุดของวาล์วควบคุม ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 4.4 อย่างไรก็ตามค่าความดันจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่เดียวกันอัตราการกรองจะมีแนวโน้มลดลง โดยระหว่างทำการทดลองจะมีการปรับรอบเครื่องสูบน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาอัตราการกรองให้คงที่ ซึ่งผลการเดินระบบบำบัดน้ำเสียของถังปฏิบัติการต่างๆมีดังนี้

4.2.1 ผลการเดินระบบบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกริยาที่ 1 ระยะเวลาสูบกรอง 15 นาที

จากรูปที่ 4.2 ที่ระยะเวลาการสูบกรอง 15 นาที เมื่อเริ่มต้นการทดลองค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ (R_{m1}) โดยหัวที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ $8.77 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และ $11.07 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ ตามลำดับ สามารถวัดความต้านทานของหัวกระจายอากาศได้ในวันที่ 5 หลังจากเริ่มทำการทดลองโดยสามารถวัดค่าความต้านทานผ่านหัวกระจายอากาศของหัวกระจายอากาศแต่ละหัวได้ 0.42 และ 0.41 บาร์ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณเป็นค่าความต้านทานรวมได้เท่ากับ $3,190 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และ $3,131 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ ตามลำดับ ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข. และเมื่อทำการทดลองจนถึงวันที่ 26 จึงเกิดการอุดตันครั้งที่ 1 โดยสามารถวัดค่าความต้านทานผ่านหัวกระจายอากาศของหัวกระจายอากาศแต่ละหัวได้ 0.82 และ 0.75 บาร์ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณเป็นค่าความต้านทานรวมได้เท่ากับ $7,490 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และ $6,854 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ ตามลำดับ หลังจากการหยุดระบบและขัดล้างชิ้นแค๊กออก สามารถวัดค่าความต้านทานค่าความต้านทานหลังเกิดการอุดตันจากการเดินระบบ ($R_{m2} + R_p$) ได้ค่าเท่ากับ $46.47 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และ $36.69 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และหลังจากทำความสะอาดหัวกระจายอากาศด้วยการล้างย้อนด้วยกรดพบว่าค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศมีค่าลดลงจากค่าความต้านทานเริ่มต้นมาก คือมีค่าเท่ากับ 4.22×10^9 และ $4.13 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ เนื่องจากมีการเปลี่ยนวิธีทำความสะอาดหัวกระจายอากาศ ซึ่งการทำความสะอาดด้วยการล้างย้อนด้วยกรดสามารถกำจัดตะกอนจุลินทรีย์ที่อุดตันที่หัวกระจายอากาศได้มากกว่าการแช่กรด เมื่อติดตั้งหัวกระจายอากาศเข้าสู่ระบบและเดินระบบต่อ สามารถเดินระบบได้เป็นระยะเวลา 4 วัน ในวันที่ 30 ของการทดลองจึงเกิดการอุดตันครั้งที่ 2 หลังจากทำความสะอาดและเดินระบบต่อ พบว่าหัวกระจายอากาศหัวที่ 1 เกิดการอุดตันภายใน 1 วันและไม่สามารถสูบกรองได้อีก โดยการอุดตันที่เกิดขึ้นหัวกระจายอากาศหัวที่ 1 จะสามารถใช้เติมอากาศได้ในช่วงการเติมอากาศ แต่ไม่สามารถสูบกรองน้ำเสียได้ในช่วงการกรอง ผู้วิจัยจึงทำการเดินระบบโดยใช้หัวกระจายอากาศหัวที่ 2 เพียงหัวเดียวจนกระทั่งเกิดการอุดตันในวันที่ 35 ของการทดลอง แล้วจึงทำการหยุดระบบและทำการถอดล้างหัวกระจายอากาศทั้ง 2 หัวพร้อมกัน แต่พบว่าหลังทำความสะอาดแล้วไม่สามารถฟื้นฟูสภาพของหัวกระจายอากาศให้กลับมาใช้สูบกรองได้อีกจากการอุดตันภายในรูพรุน จึงทำการหยุดระบบสำหรับการทดลองสูบกรองที่ระยะเวลา 15 นาที นอกจากนี้ระยะเวลาการสูบกรองที่สั้นกว่าจะทำให้พบปัญหาอากาศตกค้างในเส้นท่อน้ำมากกว่าและทำให้ระบบสามารถสูบกรองน้ำได้น้อย ซึ่งจะกล่าวเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 4.4.1



รูปที่ 4. 2 กราฟแสดงความเข้มข้นของห้วงกระจายอากาศที่ระยะเวลาสุบกรอง 15 นาที
(MLSS อยู่ในช่วง 9,089 – 12,689 มก/ล.)

4.2.2 ผลการเดินระบบบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกริยาที่ 2 ระยะเวลาสูบกรอง 30 นาที

จากรูปที่ 4.3 ที่ระยะเวลาการสูบกรอง 30 นาที เมื่อเริ่มต้นการทดลองค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ (R_{m1}) ของหัวที่ 3 และ 4 มีค่าเท่ากับ $7.81 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และ $11.56 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ ตามลำดับ สามารถวัดค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศได้ในวันที่ 5 หลังจากเริ่มทำการทดลองโดยสามารถวัดค่าความต้านทานผ่านหัวกระจายอากาศของหัวกระจายอากาศแต่ละหัวได้ 0.51 และ 0.65 บาร์ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณเป็นค่าความต้านทานรวมได้เท่ากับ $5,600 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และ $7,140 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าความต้านทานรวมมีค่ามากกว่าระยะเวลาสูบกรอง 15 นาที 2 เท่าโดยเฉลี่ย สาเหตุมาจากระยะเวลาสูบกรองที่นานกว่าทำให้เกิดการสะสมตัวของชั้นเค้กที่หนากว่า การทดลองเกิดการอุดตันครั้งที่ 1 เมื่อทำการทดลองมาถึงวันที่ 13 โดยสามารถวัดค่าความต้านทานผ่านหัวกระจายอากาศของหัวกระจายอากาศแต่ละหัวได้ 0.76 และ 0.73 บาร์ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณเป็นค่าความต้านทานรวมได้เท่ากับ $10,000 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และ $9,620 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ ตามลำดับ มากกว่าที่ระยะเวลาการสูบกรอง 3.1 เท่าโดยเฉลี่ย หลังจากการหยุดระบบและขัดล้างชั้นเค้กออก สามารถวัดค่าความต้านทานค่าความต้านทานหลังเกิดการอุดตันจากการเดินระบบ ($R_{m2} + R_p$) ได้ค่าเท่ากับ $63.54 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และ $81.68 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ เนื่องจากการอุดตันที่เกิดขึ้นครั้งแรกในการทำการทดลอง การทำความสะอาดหัวกระจายอากาศจึงใช้วิธีที่วางแผนไว้เดิม คือการแช่กรดโดยมีขั้นตอนดังนี้

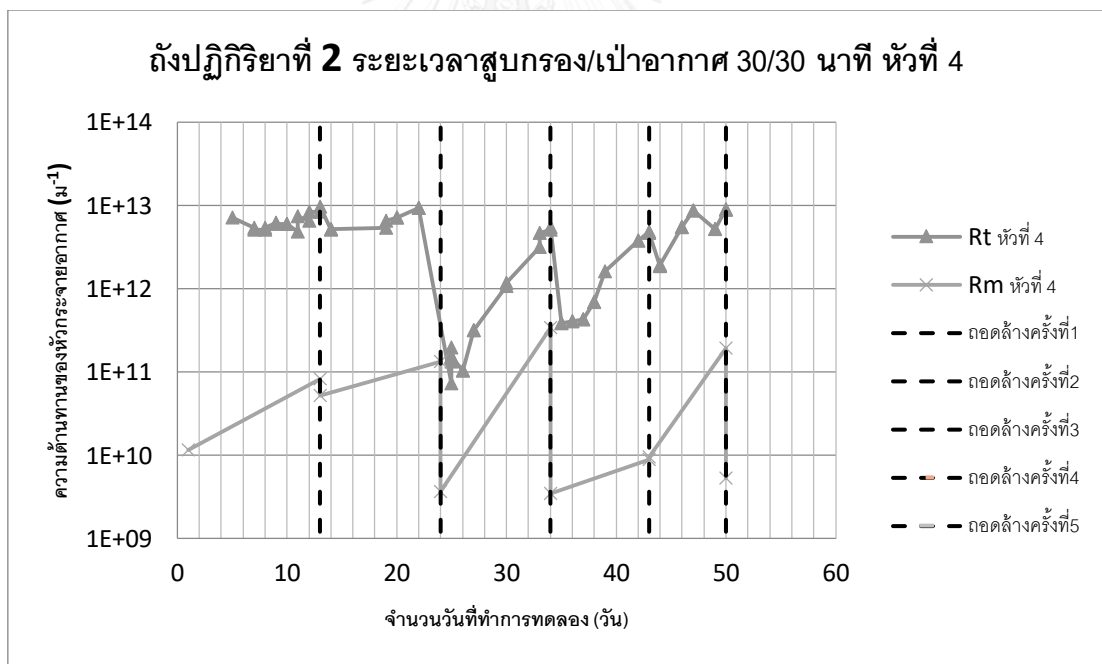
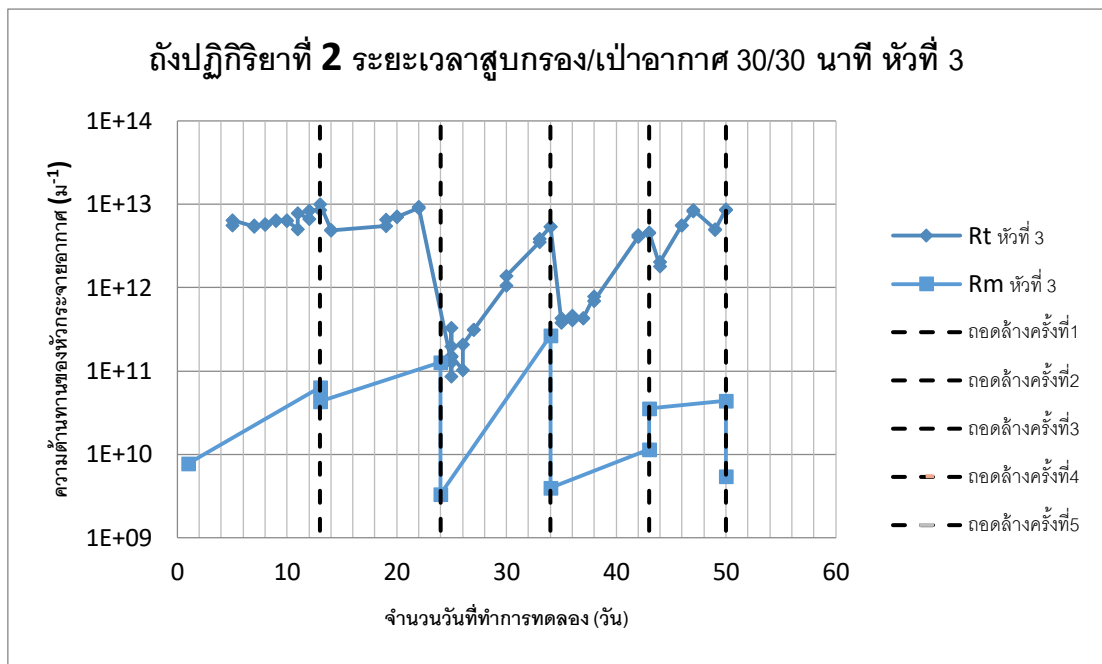
1. ใช้แปรงขัดล้างตะกอนจุลินทรีย์บนผิวหน้าของหัวกระจายอากาศด้วยน้ำสะอาดและเป่าอากาศนาน 20 นาที เพื่อกำจัดชั้นเค้กบนผิวหน้าหัวกระจายอากาศ
2. วัดค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศ ($R_m + R_p$)
3. แช่หัวกระจายอากาศในกรดฟอร์มิกเข้มข้น 10% นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมาเป่าอากาศนาน 20 นาที เพื่อกำจัดความต้านทานจากการอุดตันภายในรูพรุนของหัวกระจายอากาศ (R_p)
4. วัดความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ (R_m) จากนั้นนำกลับไปติดตั้งและเดินระบบต่อไป

หลังจากทำความสะอาดหัวกระจายอากาศพบว่าค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศมีค่าลดลงก่อนล้างเพียงเล็กน้อย คือมีค่าเท่ากับ $43.35 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และ $52.07 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ ซึ่งมีสาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากการอุดตันที่เกิดขึ้นเป็นการอุดตันภายในรูพรุนของหัวกระจายอากาศ เมื่อทำการแช่หัวกระจายอากาศในกรดฟอร์มิก กรดจะซึมเข้าไปภายในรูพรุนได้เพียงเล็กน้อย ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งอุดตันน้อย และเมื่อติดตั้งหัวกระจายอากาศเข้าสู่ระบบและเดินระบบต่อ สามารถเดินระบบได้เป็นระยะเวลา 11 วัน ในวันที่ 24 ของการทดลองจึงเกิดการอุดตันครั้งที่ 2 และเมื่อทำความสะอาดด้วยวิธีแช่กรดแล้ว พบว่าหัวกระจายอากาศไม่สามารถฟื้นฟูสภาพให้กลับมาใช้สูบกรองได้อีก ผู้วิจัยจึงเปลี่ยนวิธีการทำความสะอาดหัวกระจายอากาศเป็นการล้างย้อนด้วยกรดแทนและจะใช้วิธี

ล้างย้อนด้วยกรดในการทำความสะอาดห้วกระจายอากาศในการทดลองส่วนที่เหลือ การทำความสะอาดด้วยการล้างย้อนด้วยกรดมีขั้นตอนดังนี้

1. ใช้แปรงขัดล้างตะกอนจุลินทรีย์บนผิวหน้าของห้วกระจายอากาศด้วยน้ำสะอาดและเป่าอากาศนาน 20 นาที เพื่อกำจัดชั้นเค้กบนผิวหน้าห้วกระจายอากาศ
2. วัดค่าความต้านทานของห้วกระจายอากาศ (R_m+R_p)
3. ล้างย้อนห้วกระจายอากาศด้วยกรดฟอร์มิกเข้มข้น 10% นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมาเป่าอากาศนาน 20 นาที เพื่อกำจัดความต้านทานจากการอุดตันภายในรูพรุนของห้วกระจายอากาศ (R_p)
4. วัดความต้านทานเริ่มต้นของห้วกระจายอากาศ (R_m) จากนั้นนำกลับไปติดตั้งและเดินระบบต่อไป

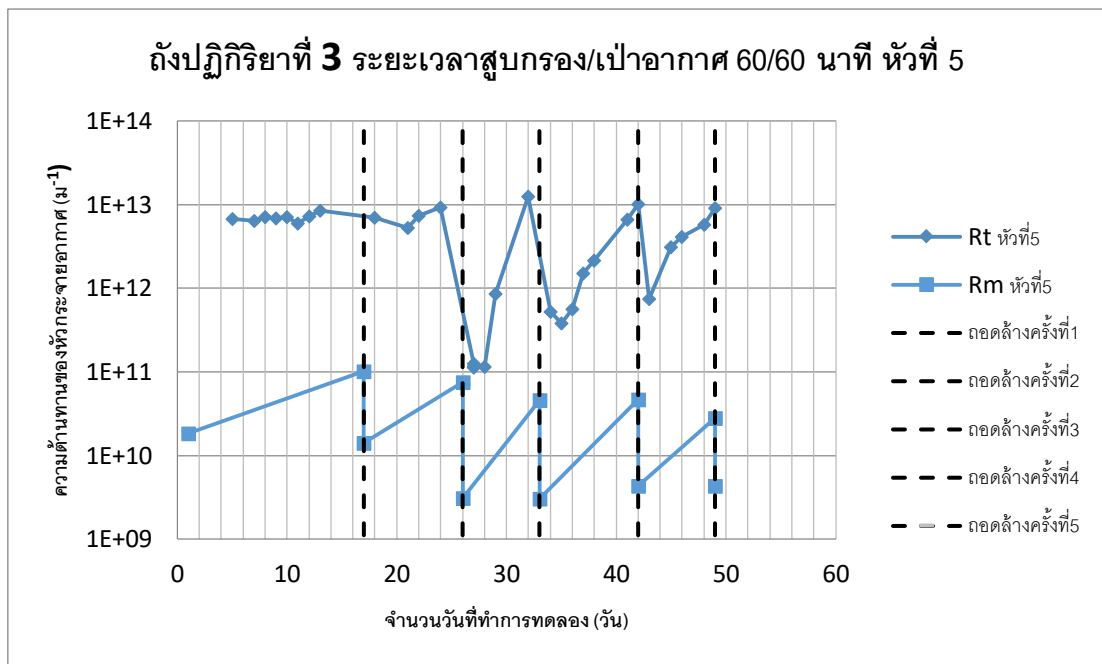
หลังจากทำความสะอาดพบว่าค่าความต้านทานของห้วกระจายอากาศมีค่าลดลงจากเดิมมากคือมีค่าเท่ากับ 3.34×10^9 และ 3.67×10^9 m^{-1} ซึ่งต่ำกว่าความต้านทานเริ่มต้นเช่นเดียวกับการทดลองสุบกรองที่ระยะเวลา 15 นาที เมื่อเดินระบบต่อพบว่า การอุดตันเกิดขึ้นในวันที่ 34, 43, และ 50 ของการทดลองตามลำดับ



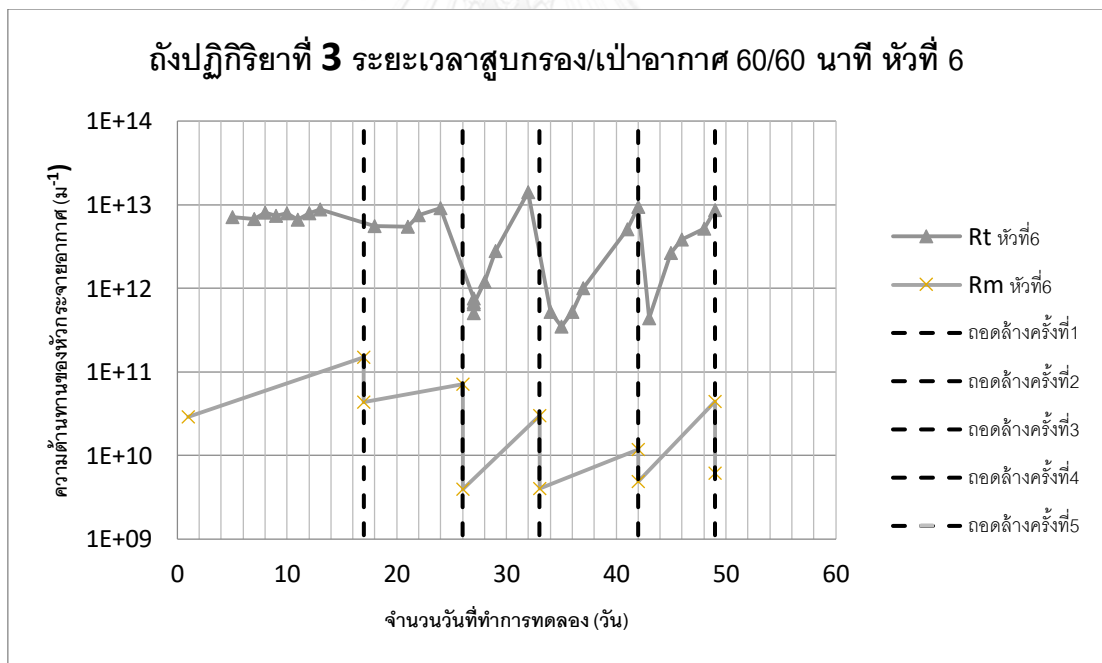
รูปที่ 4. 3 กราฟแสดงความเข้มข้นของหัวกระจายอากาศที่ระยะเวลาสูบกรอง 30 นาที
(MLSS อยู่ในช่วง 9,089 – 12,689 มก/ล.)

4.2.3 ผลการเดินระบบบำบัดน้ำเสียของถังปฏิริยาที่ 3 ระยะเวลาสูบกรอง 60 นาที

สำหรับการทดลองสูบกรองที่ระยะเวลา 60 นาทีความต้านทานจะถูกแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อเริ่มต้นการทดลองค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ (R_{m1}) มีค่าเท่ากับ $18.53 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และ $29.11 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ สามารถวัดความต้านทานของหัวกระจายอากาศได้ในวันที่ 5 หลังจากเริ่มทำการทดลองโดยสามารถวัดค่าความดันผ่านหัวกระจายอากาศของหัวกระจายอากาศแต่ละหัวได้ 0.63 และ 0.66 บาร์ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณเป็นค่าความต้านทานรวมได้เท่ากับ $6730 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และ $7,050 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งความต้านทานรวมที่เกิดขึ้นมีค่ามากที่สุดเนื่องจากมีระยะเวลาการสูบกรองนานที่สุด การอุดตันเกิดขึ้นหลังจากทำการทดลองได้นาน 17, 26, 33, 42 และ 49 วัน ตามลำดับ โดยในการอุดตันครั้งที่ 1 สามารถวัดค่าความดันผ่านหัวกระจายอากาศของหัวกระจายอากาศแต่ละหัวได้ 0.88 และ 0.91 บาร์ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณเป็นค่าความต้านทานรวมได้เท่ากับ $8,460 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และ $8,750 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ ตามลำดับ สำหรับการทำความสะอาดหัวกระจายอากาศในครั้งแรกจะใช้วิธีการแช่กรดและจะเปลี่ยนวิธีทำความสะอาดเป็นการล้างย้อนด้วยกรดตั้งแต่การทำความสะอาดครั้งที่ 2 เป็นต้นไป ทั้งนี้ความต้านทานของหัวกระจายหลังการทำความสะอาดด้วยการล้างย้อนด้วยกรด จะมีค่าต่ำกว่าค่าความต้านทานเริ่มต้น เนื่องจากการเปลี่ยนวิธีการล้างเช่นเดียวกับถังปฏิริยาที่ 2



(ก) หัวที่ 5



(ข) หัวที่ 6

รูปที่ 4. 4 กราฟแสดงความเข้มข้นของห้วงกระจายอากาศที่ระยะเวลาสุบกรอง 60 นาที
(MLSS อยู่ในช่วง 9,089 – 12,689 มก/ล.)

ตารางที่ 4.2 - 4.4 เป็นตารางสรุปความต้านทานก่อนและหลังการล้างของหัวกระจายอากาศ ที่การถอดล้างรอบต่างๆ จากการทดลองพบว่าบางครั้งความต้านทานของหัวกระจายอากาศก่อนทำความสะอาดด้วยกรดมีค่าต่ำกว่าความต้านทานหลังทำความสะอาด ซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนในระหว่างที่วัดความต้านทานของหัวกระจายอากาศ ดังนั้นจึงปรับค่าความต้านทานหลังทำความสะอาดลงให้เท่ากับความต้านทานก่อนทำความสะอาดหัวกระจายอากาศ ซึ่งแสดงว่าการทำความสะอาดครั้งดังกล่าวไม่สามารถกำจัดตะกอนจุลินทรีย์ที่อุดตันอยู่ได้เลย แต่ไม่ได้มีการอุดตันมากขึ้นหลังจากทำความสะอาดแล้ว

ตารางที่ 4.2 ความต้านทานก่อนและหลังการล้างของหัวกระจายอากาศที่ระยะเวลาสูบกรอง 15 นาที

	ถังปฏิกิริยาที่ 1 (15 นาที)						วิธีล้าง
	หัวที่1			หัวที่2			
	ก่อนล้าง ด้วยกรด (Rm+Rp) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	หลังล้าง ด้วยกรด (Rm) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	ผลต่างของ ความต้านทาน (Rp) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	ก่อนล้าง ด้วยกรด (Rm+Rp) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	หลังล้าง ด้วยกรด (Rm) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	ผลต่างของ ความต้านทาน (Rp) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	
ความต้านทาน เริ่มต้น		8.77			11.06		แช่กรด
ถอดล้าง ครั้งที่1	46.47	4.22	42.25	36.68	4.13	32.55	ล้างย้อน ด้วยกรด
ถอดล้าง ครั้งที่2	72.73	4.05	68.32	53.53	3.43	50.10	ล้างย้อน ด้วยกรด
ถอดล้าง ครั้งที่3	23.16	23.16*	0.00	30.18	7.22	22.96	ล้างย้อน ด้วยกรด
ถอดล้าง ครั้งที่4	134.54	4.92	129.62	153.56	4.92	148.64	ล้างย้อน ด้วยกรด

* ค่าความต้านทานที่ถูกปรับแก้

ตารางที่ 4.3 ความต้านทานก่อนและหลังการล้างของหัวกระจายอากาศที่ระยะเวลาสูบกกรอง 30 นาที

	ถึงปฏิบัติการที่ 2 (30 นาที)						วิธีล้าง
	หัวที่3			หัวที่4			
	ก่อนล้าง ด้วยกรด (Rm+Rp) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	หลังล้าง ด้วยกรด (Rm) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	ผลต่างของ ความต้านทาน (Rp) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	ก่อนล้าง ด้วยกรด (Rm+Rp) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	หลังล้าง ด้วยกรด (Rm) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	ผลต่างของ ความต้านทาน (Rp) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	
ความต้านทาน เริ่มต้น		7.81			11.56		แช่กรด
ถอดล้าง ครั้งที่1	63.54	43.35	20.19	81.68	52.07	29.61	แช่กรด
ถอดล้าง ครั้งที่2	126.76	3.34	123.42	132.34	3.67	128.67	ล้างย้อน ด้วยกรด
ถอดล้าง ครั้งที่3	268.90	3.99	264.91	340.02	3.44	336.58	ล้างย้อน ด้วยกรด
ถอดล้าง ครั้งที่4	11.53	11.53*	0.00	8.90	8.90*	0.00	ล้างย้อน ด้วยกรด
ถอดล้าง ครั้งที่5	43.90	5.47	38.43	192.19	5.33	186.86	ล้างย้อน ด้วยกรด

* ค่าความต้านทานที่ถูปรับแก้

ตารางที่ 4.4 ความต้านทานก่อนและหลังการล้างของหัวกระจายอากาศที่ระยะเวลาสูบกกรอง 60 นาที

	ถึงปฏิบัติการที่ 3 (60 นาที)						วิธีล้าง
	หัวที่5			หัวที่6			
	ก่อนล้าง ด้วยกรด (Rm+Rp) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	หลังล้าง ด้วยกรด (Rm) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	ผลต่างของ ความต้านทาน (Rp) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	ก่อนล้าง ด้วยกรด (Rm+Rp) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	หลังล้าง ด้วยกรด (Rm) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	ผลต่างของ ความต้านทาน (Rp) ($\times 10^9$ ม. ⁻¹)	
ความต้านทาน เริ่มต้น		18.53			29.11		แช่กรด
ถอดล้าง ครั้งที่1	101.67	14.02	87.66	149.20	43.15	106.05	แช่กรด
ถอดล้าง ครั้งที่2	75.27	3.12	72.14	71.89	3.94	67.95	ล้างย้อน ด้วยกรด
ถอดล้าง ครั้งที่3	45.90	3.05	42.85	29.87	3.99	25.88	ล้างย้อน ด้วยกรด
ถอดล้าง ครั้งที่4	46.60	4.30	42.30	11.71	4.91	6.80	ล้างย้อน ด้วยกรด
ถอดล้าง ครั้งที่5	28.21	4.33	23.88	44.31	6.10	38.21	ล้างย้อน ด้วยกรด

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองและการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการทดลองที่ 4.1 และ 4.2 จะนำข้อมูลมาวิเคราะห์ที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ประเมินระยะเวลาการใช้งานที่เหมาะสมของหัวกระจายอากาศ

4.3.1 ระดับการอุดตันถาวร (Degree of fouling)

ค่าระดับการอุดตันถาวรเป็นค่าคงที่ที่แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของความต้านทานของหัวกระจายอากาศ ซึ่งเกิดจากการทำความสะอาดที่ไม่สมบูรณ์ในแต่ละรอบของการทำความสะอาด ทำให้หัวกระจายอากาศเกิดการอุดตันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยค่าระดับการอุดตันถาวรจะนำมาใช้เพื่อทำนายอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศ จากสมการที่ 2.12 สามารถคำนวณค่าระดับการอุดตันถาวร (r) ได้โดยใช้ความต้านทานของหัวกระจายอากาศหลังจากการล้างย้อนแต่ละรอบ และคำนวณจำนวนรอบในการทำงาน (i) จากระยะเวลาในการเดินระบบ

$$R_{m,i} = (1 + r)R_{m,i-1} = \dots = (1 + r)^i R_{m,0} \quad (2.12)$$

การคำนวณรอบในการทำงานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1

$$\text{จำนวนรอบในการทำงาน } (i) = \frac{\text{ระยะเวลาในการเดินระบบ}}{\text{ระยะเวลาทำงานของหัวกระจายอากาศหัวกระจายอากาศ 1 รอบ}} \quad (4.1)$$

และในการทำงานของหัวกระจายอากาศ 1 รอบ จะทำงานด้วยการสูบล้างและเป่าอากาศในระยะเวลาที่เท่ากัน ดังนั้นจะสามารถจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$\text{จำนวนรอบในการทำงาน } (i) = \frac{\text{ระยะเวลาในการเดินระบบ}}{2 \times \text{ระยะเวลาในการสูบล้างของหัวกระจายอากาศ}} \quad (4.2)$$

เนื่องจากในการทดลองมีการเปลี่ยนวิธีล้างหัวกระจายอากาศ ในการคำนวณค่าระดับการอุดตันถาวรจึงต้องแบ่งเป็น 2 ส่วนตามวิธีการล้าง สามารถหาค่าระดับการอุดตันถาวรของหัวกระจายอากาศหัวต่างๆได้ดังตารางที่ 4.5 – 4.7 ทั้งนี้ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค.

ตารางที่ 4. 5 ระดับการอุดตันถาวรของถังปฏิกรณ์ที่ 1 ระยะเวลาสูบกรอง/เป่าอากาศ 15 นาที

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ระยะเวลาสูบกรอง/เป่าอากาศ 15 นาที							
	วันที่ ทำการ ทดลอง (วัน)	จำนวน รอบการ ทำงาน (รอบ)	หัวที่1		หัวที่2		หมายเหตุ
			R_m ($\times 10^9 \text{ m}^{-1}$)	Degree of fouling	R_m ($\times 10^9 \text{ m}^{-1}$)	Degree of fouling	
ความต้านทาน เริ่มต้น	1		8.77		11.07		แช่กรด
ถอดล้างครั้งที่1	26	933	4.22		4.13		ล้างย้อน ด้วยกรด
ถอดล้างครั้งที่2	30	1056	4.05	-0.000339	3.43	-0.001515	
ถอดล้างครั้งที่3	35	1438	23.16	0.004577	7.22	0.001951	
ถอดล้างครั้งที่4	36	1455	4.92	-0.087102	4.92	-0.022329	

ตารางที่ 4. 6 ระดับการอุดตันถาวรของถังปฏิกรณ์ที่ 2 ระยะเวลาสูบกรอง/เป่าอากาศ 30 นาที

ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ระยะเวลาสูบกรอง/เป่าอากาศ 30 นาที							
	วันที่ ทำการ ทดลอง (วัน)	จำนวน รอบการ ทำงาน (รอบ)	หัวที่3		หัวที่4		หมายเหตุ
			R_m ($\times 10^9 \text{ m}^{-1}$)	Degree of fouling	R_m ($\times 10^9 \text{ m}^{-1}$)	Degree of fouling	
ความต้านทาน เริ่มต้น	1		7.81		11.56		แช่กรด
ถอดล้างครั้งที่1	13	273	43.35	0.006299	52.07	0.005530	ล้างย้อน ด้วยกรด
ถอดล้างครั้งที่2	24	521	3.34		3.67		
ถอดล้างครั้งที่3	34	740	3.99	0.000804	3.44	-0.000296	
ถอดล้างครั้งที่4	43	862	11.53	0.008739	8.90	0.007817	
ถอดล้างครั้งที่5	50	987	5.47	-0.005939	5.33	-0.004098	

ตารางที่ 4. 7 ระดับการอุดตันถาวรของถังปฏิกรณ์ที่ 3 ระยะเวลาสุบกรอง/เป่าอากาศ 60 นาที

ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ระยะเวลาสุบกรอง/เป่าอากาศ 60 นาที							
	วันที่ ทำการ ทดลอง (วัน)	จำนวน รอบการ ทำงาน (รอบ)	หัวที่5		หัวที่6		หมายเหตุ
			R_m ($\times 10^9 \text{ m}^{-1}$)	Degree of fouling	R_m ($\times 10^9 \text{ m}^{-1}$)	Degree of fouling	
ความต้านทาน เริ่มต้น	1		18.53		29.11		แช่กรด
ถอดล้างครั้งที่1	17	137	14.02	-0.002037	43.15	0.002879	
ถอดล้างครั้งที่2	26	219	3.12		3.94		ล้างย้อน
ถอดล้างครั้งที่3	33	273	3.05	-0.000461	3.99	0.000242	ด้วยกรด
ถอดล้างครั้งที่4	42	326	4.30	0.006529	4.91	0.003911	
ถอดล้างครั้งที่5	49	381	4.33	0.000099	6.10	0.003952	

จากตารางพบว่าค่าระดับการอุดตันถาวรของหัวกระจายอากาศบางส่วนมีค่าติดลบ เนื่องจากการทำความสะอาดด้วยกรดแต่ละครั้งสามารถกำจัดสิ่งอุดตันในหัวกระจายอากาศได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นในการประเมินค่าระดับการอุดตันถาวรจะทำการลบค่าที่ติดลบออก กล่าวคือ ระดับการอุดตันถาวรในครั้งนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่มีการอุดตันเพิ่มขึ้น

ในการเปรียบเทียบความเหมาะสมของระยะเวลาในการสุบกรองนั้น ไม่สามารถใช้ค่าระดับการอุดตันถาวรในการเปรียบเทียบได้โดยตรง เนื่องจากในแต่ละรอบการทำงานมีระยะเวลาสุบกรองไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงควรเปรียบเทียบโดยใช้อายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศ สำหรับการทำนายอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศเป็นการประมาณระยะเวลาที่ค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศหลังการทำความสะอาดด้วยกรด (R_m) เพิ่มขึ้นจนกระทั่งหัวกระจายอากาศไม่สามารถใช้สุบกรองได้ แต่เนื่องจากไม่มีข้อมูลขีดจำกัดของค่าความต้านทานที่ทำให้หัวกระจายอากาศอุดตันจนใช้งานไม่ได้ จึงประมาณโดยใช้ความต้านทานก่อนล้างของหัวกระจายอากาศเฉลี่ยในแต่ละถังปฏิกรณ์เป็นค่าความต้านทานสูงสุดที่ยอมรับได้ เช่น จากตารางที่ 4.2 ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ระยะเวลาสุบกรอง 15 นาที มีค่าความต้านทานก่อนล้างหัวกระจายอากาศเฉลี่ยคือ $68.81 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นความต้านทานที่ทำให้หัวกระจายอากาศไม่สามารถสุบกรองได้แล้ว ดังนั้นหากหลังจากการทำความสะอาดด้วยกรดแล้ว ความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศมีค่าสูงกว่า $68.81 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ หัวกระจายอากาศก็จะไม่สามารถสุบกรองได้อีก สามารถประมาณระยะเวลาในการใช้งานของหัวกระจายอากาศได้ดังตารางที่ 4.8 การคำนวณแสดงในภาคผนวก ค.

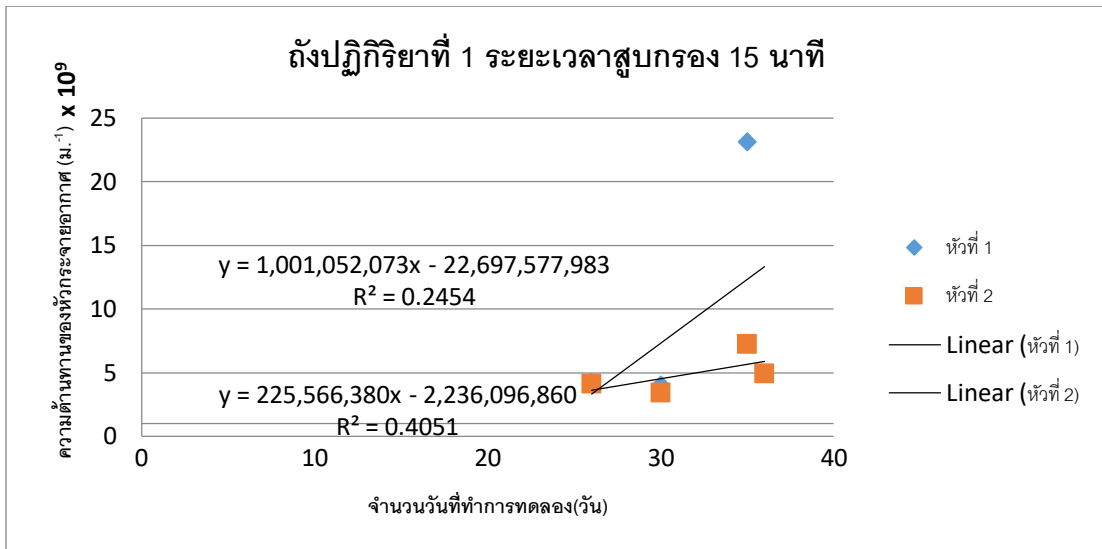
ตารางที่ 4. 8 การประมาณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศด้วยค่าระดับการอุดตันถาวร

	ระดับการอุดตันถาวรเฉลี่ย	ความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ ($\times 10^9 \text{ m}^{-1}$)	ความต้านทานก่อนล้างหัวกระจายอากาศ ($\times 10^9 \text{ m}^{-1}$)	(จำนวนรอบ)	อายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศ (วัน)
ถึงปฏิบัติการที่ 1 (15 นาที)	0.001088	2.04	68.81	3236	68
ถึงปฏิบัติการที่ 2 (30 นาที)	0.002893	2.04	126.98	1430	60
ถึงปฏิบัติการที่ 3 (60 นาที)	0.002455	2.04	60.46	1382	116

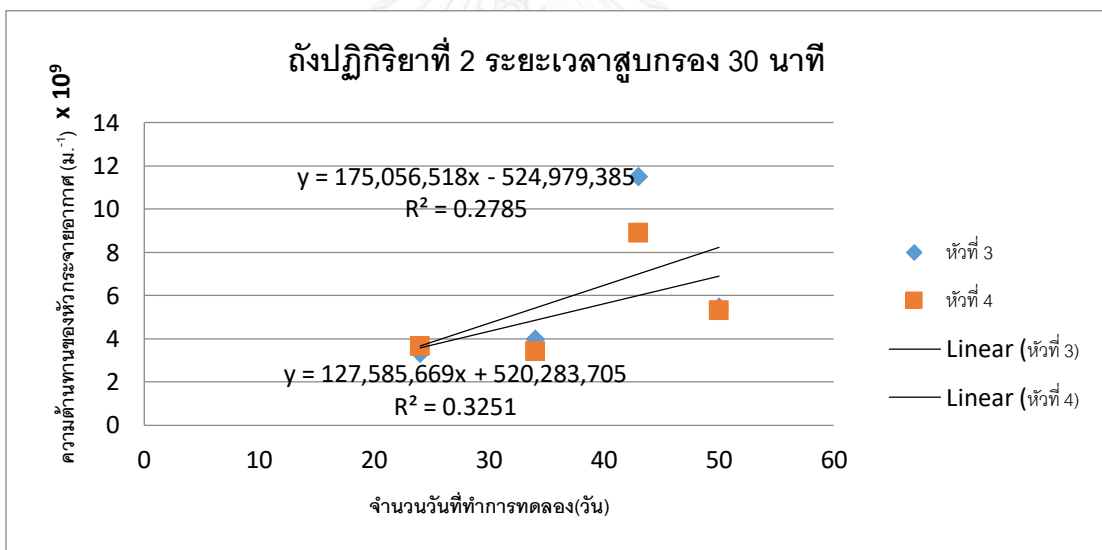
จากตารางที่ 4.8 พบว่าถึงปฏิบัติการที่ 3 ระยะเวลาสูบล้าง 60 นาที มีอายุการใช้งานนานที่สุดคือ 116 วันและถึงปฏิบัติการที่ 2 ระยะเวลาสูบล้าง 30 นาทีมีอายุการใช้งานสั้นที่สุดคือ 60 วันเมื่อเปรียบเทียบระดับการอุดตันถาวรพบว่าถึงปฏิบัติการที่ 2 มีระดับการอุดตันถาวรเฉลี่ยสูงที่สุดคือ 0.002893 ซึ่งจะส่งผลให้ความต้านทานของหัวกระจายอากาศเพิ่มขึ้นมากที่สุดในแต่ละรอบการทำงาน แต่ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาในการทำการทดลองค่อนข้างสั้น รวมทั้งมีการลค่าที่ติดลบออกทำให้อายุการใช้งานที่คำนวณอาจคลาดเคลื่อนได้ ผู้วิจัยจึงทำการประมาณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศด้วยกราฟเส้นตรงเพิ่มเติม

4.3.2 การประมาณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศด้วยสมการเส้นตรง

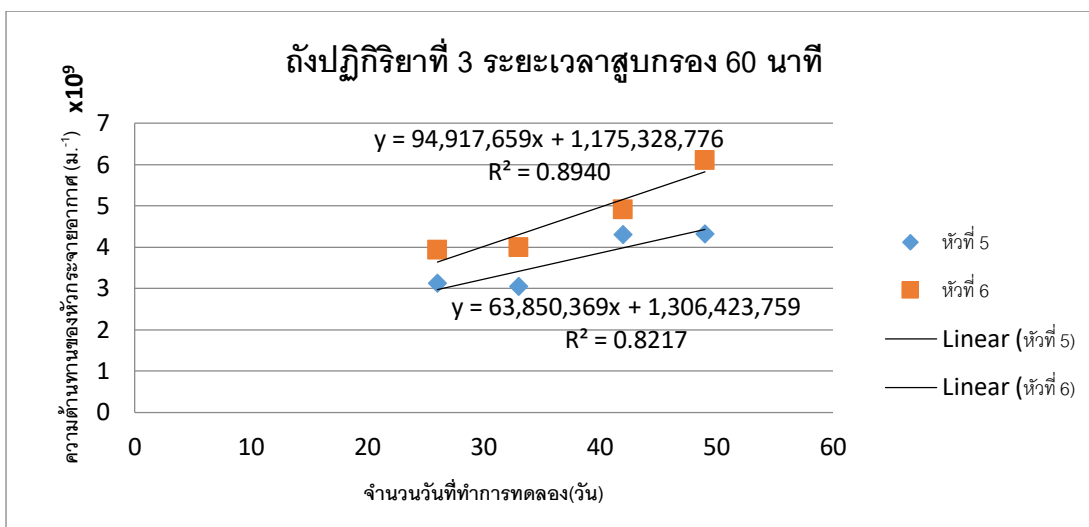
การประมาณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศด้วยสมการเส้นตรงทำได้โดยพล็อตกราฟระหว่างความต้านทานของหัวกระจายอากาศและจำนวนวันที่เดินระบบจนกระทั่งเกิดการอุดตัน ซึ่งความชันของกราฟจะแสดงถึงอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านทานของหัวกระจายอากาศ ดังกราฟรูปที่ 4.5 – 4.7



รูปที่ 4. 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของห้วงกระจายอากาศ และจำนวนวันที่ทำการทดลองของถังปฏิบัติการที่ 1 ระยะเวลาสุบกรอง 15 นาที



รูปที่ 4. 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของห้วงกระจายอากาศ และจำนวนวันที่ทำการทดลองของถังปฏิบัติการที่ 2 ระยะเวลาสุบกรอง 30 นาที



รูปที่ 4. 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ และจำนวนวันที่ทำการทดลองของถึงปฏิบัติการที่ 3 ระยะเวลาสุบกรอง 60 นาที

จากรูปที่ 4.5 – 4.7 การคำนวณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศจะใช้ความชันเฉลี่ยของแต่ละถึงปฏิบัติการ แล้วคำนวณระยะเวลาที่ทำให้ความต้านทานของหัวกระจายอากาศเพิ่มขึ้นจนไม่สามารถสุบกรองได้ ซึ่งได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.9 แสดงรายการคำนวณในภาคผนวก ค.

ตารางที่ 4. 9 การประมาณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศด้วยกราฟเส้นตรง

	ความชันเฉลี่ย	ความต้านทานเริ่มต้น ของหัวกระจายอากาศ ($\times 10^9 \text{ m}^{-1}$)	ความต้านทาน สูงสุด ($\times 10^9 \text{ m}^{-1}$)	อายุการใช้งาน (วัน)
ถึงปฏิบัติการที่ 1 (15 นาที)	61.33×10^7	2.04	68.81	108
ถึงปฏิบัติการที่ 2 (30 นาที)	15.13×10^7	2.04	126.98	823
ถึงปฏิบัติการที่ 3 (60 นาที)	7.94×10^7	2.04	60.46	735

จากตารางที่ 4.9 พบว่าอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศที่คำนวณได้มีความแตกต่างจากการคำนวณด้วยค่าระดับการอุดตันถาวรมาก คือถึงปฏิบัติการที่ 2 ระยะเวลาสุบกรอง 30 นาที มีอายุการใช้งานนานที่สุดคือ 823 วัน และถึงปฏิบัติการที่ 1 ระยะเวลาสุบกรอง 15 นาที มีอายุการใช้งานสั้น

ที่สุดคือ 108 วัน ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวน่าจะมีสาเหตุจากการประมาณอายุการใช้งานด้วยการเส้นตรงนั้นไม่มีการแสดงผลความต้านทานของหัวกระจายอากาศที่มีค่าลดลง

นอกจากการเปรียบเทียบด้วยอายุการใช้งานแล้ว การใช้กราฟเส้นตรงยังสามารถเปรียบเทียบการอุดตันที่เกิดขึ้นจากความชันของกราฟได้โดยตรง ซึ่งพบว่าความชันเฉลี่ยของถึงปฏิกิริยาที่ 3 ระยะเวลาการสูบล้าง 60 นาทีที่มีค่าต่ำที่สุดคือ 7.94×10^7 ซึ่งแสดงว่าที่ระยะเวลาสูบล้าง 60 นาทีจะทำให้หัวกระจายอากาศมีการอุดตันเกิดขึ้นน้อยที่สุด แต่สาเหตุที่อายุการใช้งานที่ระยะเวลาสูบล้าง 30 นาทีนานกว่าเนื่องจากมีความต้านทานสูงสุดในการเดินระบบสูงกว่า

4.3.3 ความต้านทานของชั้นเค้ก (Cake resistance)

ความต้านทานของชั้นเค้กเป็นความต้านทานที่เกิดจากการสะสมตัวของตะกอนจุลินทรีย์บนผิวหน้าของหัวกระจายอากาศ ซึ่งเป็นความต้านทานหลักที่ทำให้ความดันที่ใช้ในการสูบล้างสูงขึ้น โดยชั้นเค้กที่เกิดขึ้นมีความหนาเท่ากันตลอดหัวกระจายอากาศ และชั้นเค้กดังกล่าวจะถูกกำจัดออกด้วยการเป่าอากาศบางส่วน รูปที่ 4.8 เป็นลักษณะชั้นเค้กที่หลงเหลืออยู่หลังจากการเป่าอากาศ



รูปที่ 4. 8 ลักษณะชั้นเค้กของหัวกระจายอากาศหลังทำความสะอาดด้วยการเป่าอากาศ

การหาค่าความต้านทานของชั้นเค้กสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$R_t = R_m + R_p + R_c \quad (3.1)$$

จากสมการสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$R_c = R_t - (R_m + R_p)$$

โดยที่ $(R_m + R_p)$ คือความต้านทานของหัวกระจายอากาศก่อนการทำความสะอาดด้วยกรด จึงสามารถคำนวณค่าความต้านทานของชั้นเค้กได้ โดยจากการคำนวณค่าความต้านทานของหัว

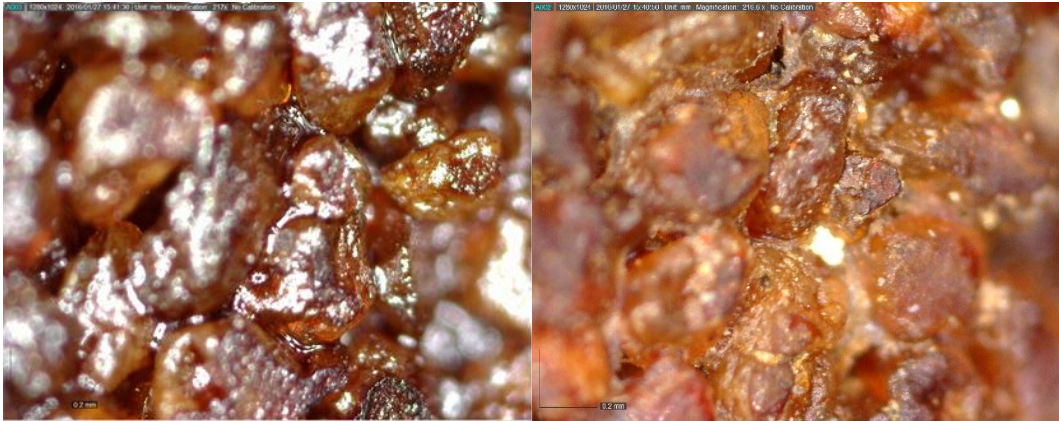
กระจายอากาศสามารถสรุปค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศได้ดังตารางที่ 4.10 โดยรายละเอียดค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศแต่ละรอบแสดงดังภาคผนวก ข.

ตารางที่ 4. 10 ความต้านทานของชั้นเค้กของถังปฏิกริยาต่างๆ

		ความต้านทานของชั้นเค้ก (R_c) (m^{-1})		
		min	max	avg
ถังปฏิกริยาที่1	หัวที่ 1	4.39E+10	7.49E+12	3.55E+12
	หัวที่ 2	4.16E+10	1.12E+13	3.61E+12
ถังปฏิกริยาที่2	หัวที่ 3	1.41E+09	9.95E+12	4.26E+12
	หัวที่ 4	1.59E+10	9.54E+12	4.24E+12
ถังปฏิกริยาที่ 3	หัวที่ 5	3.77E+10	1.24E+13	4.74E+12
	หัวที่ 6	3.17E+11	1.40E+13	4.97E+12

จากตารางที่ 4.10 พบว่าค่าความต้านทานของชั้นเค้กในแต่ละหัวมีค่าสูงสุดและต่ำสุดแตกต่างกันมาก โดยจากข้อมูลสังเกตได้ว่าค่าความต้านทานของชั้นเค้กมีค่าสูงในช่วงเริ่มต้นของการทดลองและจะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ และเมื่อทำความสะอาดหัวกระจายอากาศด้วยกรด ความต้านทานของชั้นเค้กจะกลับมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงท้ายของการทดลองมีการเกิดเค้กขึ้นน้อยกว่าการทดลองในช่วงแรก ดังนั้นกลไกการอุดตันที่เกิดขึ้นของหัวกระจายอากาศในช่วงแรกที่หัวกระจายอากาศยังไม่มีกรอุดตันภายในรูพรุน จะสามารถสูบล้างน้ำเสียได้มากและทำให้เกิดชั้นเค้กได้มากกว่า และเมื่อทำการทดลองจนหัวกระจายอากาศเกิดการอุดตันภายในรูพรุนมากขึ้น จะทำให้สูบล้างได้น้อยลงและเกิดชั้นเค้กน้อยลง รูปที่ 4.9 เป็นภาพถ่ายขนาดกำลังขยาย 200 เท่าของพื้นผิวของหัวกระจายอากาศก่อนและหลังทำการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการอุดตันของตะกอนจุลินทรีย์บริเวณรูพรุนของหัวกระจายอากาศ

จากงานวิจัยของ Andreadkis (8) ร้อยละ 85 ของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศมีขนาดอยู่ในช่วง 10 – 70 ไมโครเมตร ซึ่งเล็กกว่ารูพรุนของหัวกระจายอากาศที่มีขนาดประมาณ 200 ไมโครเมตร จึงทำให้มีตะกอนจุลินทรีย์บางส่วนหลุดเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนของหัวกระจายอากาศได้ และเมื่อพิจารณาร่วมกับระยะเวลาในการเกิดการอุดตันของหัวกระจายอากาศที่เกิดการอุดตันเร็วขึ้นหลังจากมีการทำความสะอาดด้วยกรด การอุดตันภายในรูพรุนที่เกิดขึ้นน่าจะเกิดจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่ภายในรูพรุน โดยเมื่อทำความสะอาดด้วยกรดฟอรั่มิคซึ่งเป็นกรดอินทรีย์มีความเป็นพิษกับจุลินทรีย์น้อย ประกอบกับรูพรุนมีลักษณะคดเคี้ยว ทำให้



(ก) ก่อนการใช้งาน

(ข) หลังการใช้งาน

รูปที่ 4. 9 พื้นผิวของหัวกระจายอากาศก่อนและหลังทำการทดลอง กำลังขยาย 200 เท่า

มีจุลินทรีย์หลงเหลืออยู่ภายในรูพรุนและสามารถเจริญเติบโตขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับตอนเริ่มต้นการทดลองที่เป็นหัวกระจายอากาศใหม่ ซึ่งจุลินทรีย์เติบโตได้ช้ากว่า ดังนั้นหากสามารถเลือกหัวกระจายอากาศที่มีขนาดรูพรุนเล็กลงและมีความคดเคี้ยวน้อยลง ก็จะสามารถยืดอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศออกนอกไปอีก อย่างไรก็ตามการเลือกใช้หัวกระจายอากาศในการทดลองนี้พิจารณาจากประเภทของหัวที่มีขายในท้องตลาดจึงไม่สามารถคัดเลือกขนาดรูพรุนได้

4.4 ปัญหาที่พบบ่อยระหว่างการทดลอง

จากการทดลองเดินระบบบำบัดน้ำเสียที่ประยุกต์ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคแทนที่หน่วยตะกอนทำให้พบปัญหาในการเดินระบบหลายประการ ทั้งในส่วนที่เกิดกับระบบในระดับที่เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการและในส่วนที่อาจส่งผลไปถึงระบบขนาดใหญ่ที่จะถูกพัฒนาต่อไปในอนาคต ซึ่งควรมีการทดลองเพิ่มเติมหรือระบุเป็นข้อจำกัดในการใช้งานระบบต่อไป โดยปัญหาที่พบมีดังต่อไปนี้

4.4.1 อากาศที่ค้างอยู่ในระบบท่อ

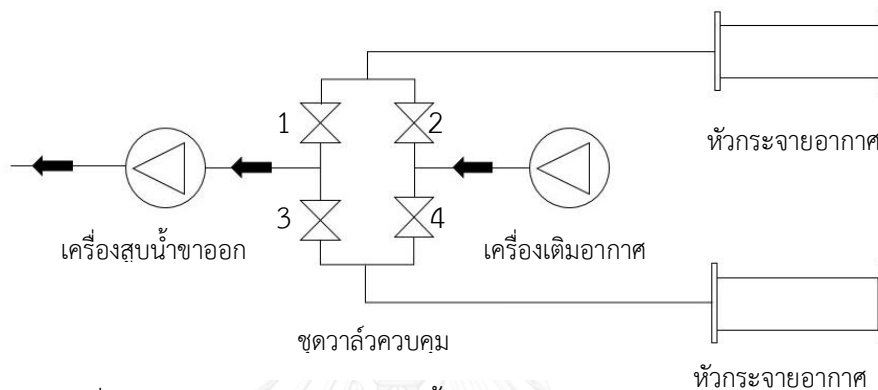
เนื่องจากการประยุกต์ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคแทนที่หน่วยตะกอน หัวกระจายอากาศจะมีหน้าที่หลัก 2 ประการคือ การสูบลมเพื่อแยกน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วออกจากระบบและการเป่าอากาศเพื่อลดการอุดตันของตะกอนจุลินทรีย์และเติมอากาศให้ระบบ ดังนั้นในขณะที่หัวกระจายอากาศสลับการทำงานจากเป่าอากาศเป็นสูบลม จะอากาศค้างอยู่ในช่องว่างภายในหัวกระจายอากาศและในระบบท่อ โดยปริมาณอากาศที่ค้างอยู่จะมีปริมาณเท่ากับช่องว่างภายในหัวกระจายอากาศและในเส้นท่อระหว่างหัวกระจายอากาศถึงวาล์วควบคุมการทำงาน ซึ่งจะส่งผลให้ในทุกรอบที่มีการสลับการทำงานเครื่องสูบน้ำจะต้องสูบลมเอาอากาศที่ค้างอยู่ออกไปก่อน ปริมาณน้ำที่สูบลมออกได้จึงลดลง ดังนั้นถ้าระยะเวลาในการสูบลมต่อ 1 รอบสั้น เครื่องสูบน้ำก็จะต้องมีอัตราการสูบน้ำที่สูงขึ้น นอกจากนี้อากาศที่ค้างในระบบท่อด้านดูดของเครื่องสูบน้ำยังส่งผลถึงการเลือกประเภทของเครื่องสูบน้ำและอายุการใช้งานอีกด้วย เช่น การใช้เครื่องสูบน้ำที่มีสมรรถภาพการดูดของเครื่องสูบน้ำ (NPSH) ไม่เพียงพอในขณะที่อากาศค้างในเส้นท่อจะทำให้สูบน้ำไม่ได้ นอกจากนี้เมื่อแรงดันในท่อด้านดูดของเครื่องสูบน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ (Cavitation) ซึ่งทำให้ใบพัดเกิดความเสียหายและอายุการใช้งานของเครื่องสูบน้ำสั้นลง จึงควรใช้เครื่องสูบน้ำแบบแทนที่บวก (Positive Displacement Pumps) ในการใช้งาน

แนวทางการแก้ไขปัญหา

การเพิ่มระยะเวลาสูบลมของหัวกระจายอากาศต่อรอบให้นานขึ้น จะทำให้จำนวนครั้งที่เครื่องสูบน้ำต้องสูบลมอากาศออกลดลง นอกจากนี้สำหรับระบบขนาดใหญ่ ควรเลือกใช้เครื่องสูบน้ำที่มีสมรรถภาพในการดูด (NPSH) เพียงพอและเป็นชนิดที่ทนการกัดกร่อนจากสภาพน้ำกลายเป็นไอได้ดี

4.4.2 การรั่วของวาล์วควบคุมการไหล

ในการทดลองการทำงานของหัวกระจายอากาศแบบเซรามิคถูกควบคุมโดยวาล์วควบคุมการไหลและเครื่องตั้งเวลา รูปที่ 4.10 เป็นแผนภาพแสดงการติดตั้งวาล์วควบคุมและหัวกระจายอากาศในระบบ จากรูปวาล์วควบคุมทั้ง 4 ตัวจะเปิด-ปิดสลับกันเป็นคู่ คือ หมายเลข 1,4 และ หมายเลข 2,3 เพื่อแยกการไหลของน้ำและอากาศออกจากกัน ดังนั้นหากมีวาล์วที่เกิดรอยรั่วหรือปิดไม่สนิทจะทำให้อากาศที่มีแรงดันไหลเข้าสู่ท่อส่วนที่สูบน้ำ ซึ่งทำให้แรงดันด้านดูดในท่อลดลง อัตราการสูบน้ำลดลง



รูปที่ 4. 10 แผนภาพแสดงการติดตั้งวาล์วควบคุมและหัวกระจายอากาศ

แนวทางการแก้ไขปัญหา

สำหรับระบบขนาดเล็กจำเป็นต้องสังเกตการณ์รั่วของวาล์วและทำการเปลี่ยนวาล์วที่ชำรุดออก เพื่อรักษาประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ สำหรับระบบขนาดใหญ่การเลือกใช้บอลวาล์วหรือวาล์วประตูน้ำที่ใช้ไฟฟ้าในการควบคุมการเปิด-ปิด จะช่วยลดการรั่วของอากาศได้

4.4.3 การอุดตันไม่เท่ากันของหัวกระจายอากาศ

ในการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ การเติมอากาศให้กับถังปฏิกิริยาทั้ง 3 ถังถูกเติมโดยเครื่องเติมอากาศ 1 เครื่อง แล้วควบคุมปริมาณอากาศในแต่ละถังปฏิกิริยาโดยใช้วาล์วควบคุมและวัดความดันอากาศด้วยเกจวัดความดัน ดังนั้นเมื่อเริ่มทำการทดลองและหัวกระจายอากาศเริ่มเกิดการอุดตันขึ้น จะทำให้อากาศไหลออกไปยังหัวกระจายอากาศที่เกิดการอุดตันน้อยมากกว่าหัวกระจายอากาศที่เกิดการอุดตันมาก ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดหัวกระจายอากาศลดลง โดยที่หัวกระจายอากาศในถังปฏิกิริยาเดียวกันก็มีโอกาสที่จะเกิดการอุดตันไม่เท่ากันจึงต้องมีการปรับปริมาณอากาศทุกครั้งที่มีการสลับการทำงานของหัวกระจายอากาศ

แนวทางการแก้ไขปัญหา

ทำการปรับวาล์วควบคุมเพื่อปรับปริมาณอากาศที่เข้าแต่ละหัวให้ใกล้เคียงกันระหว่างทำการทดลองทุกครั้ง สำหรับการทำงานของระบบขนาดใหญ่สามารถใช้ระบบคอมพิวเตอร์ในการควบคุมควบคู่กับเครื่องวัดอัตราการไหล เพื่อปรับปริมาณอากาศเพื่อให้ปริมาณอากาศที่ออกจากหัวกระจายอากาศมีปริมาณเท่ากันได้

4.4.4 การควบคุมอัตราการสูบน้ำเข้าและออกจากระบบ

ปัญหาการควบคุมอัตราการสูบน้ำเข้าและออกจากระบบเป็นผลต่อเนื่องมาจากการอุดตันไม่เท่ากันของหัวกระจายอากาศ คือเมื่อเกิดการอุดตันจะทำให้อัตราการสูบกรองของระบบลดลง ซึ่งจะทำให้ระดับน้ำในถังปฏิกิริยาสูงขึ้นและความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบลดลง รวมไปถึงทำให้น้ำล้นออกจากถังปฏิกิริยาและสูญเสียตะกอนจุลินทรีย์ในระบบอีกด้วย ในทางกลับกันพบว่าระหว่างทำการทดลองเครื่องสูบน้ำเข้าระบบมีปัญหาสูบน้ำไม่ขึ้น เนื่องจากน้ำเสียส่งเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองเน่าเสียภายในถังทำให้ลักษณะของน้ำเสียมีความเหนียวมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ระดับน้ำในถังปฏิกิริยาลดลงและตะกอนจุลินทรีย์เข้มข้นขึ้นและทำให้หัวกระจายอากาศอุดตันมากขึ้น

แนวทางการแก้ไขปัญหา

สำหรับการทำงานในระบบขนาดใหญ่ควรติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลสำหรับน้ำเสียเข้าระบบและออกจากระบบที่มีประสิทธิภาพ และมีการปรับอัตราการไหลของน้ำเสียให้สมดุลกันตลอดเวลา และสำหรับแนวทางการแก้ไขปัญหในระดับห้องปฏิบัติการคือควรติดตั้งท่อระบายน้ำล้นเพิ่มเติมให้ถังปฏิกิริยาโดยต่อปลายท่อเข้ากับถังพัก ซึ่งทำให้สามารถนำตะกอนจุลินทรีย์ที่ล้นออกจากระบบเวียนกลับมาในระบบได้ และติดตั้งถังพักน้ำเสียเข้าให้อยู่ระดับเท่ากับถังปฏิกิริยาหรือสูงกว่าเพื่อลดภาระของเครื่องสูบน้ำเข้าระบบ

4.5 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้จริง

4.5.1 แนวทางในการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสเดิม

การปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งการประยุกต์ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคแทนที่หน่วยตกตะกอน จะทำให้ระบบสามารถเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ให้มีความเข้มข้นสูงและสามารถรับภาระสารอินทรีย์ได้มากขึ้น โดยใช้พื้นที่ส่วนบ่อเดิมอากาศเดิม และยกเลิกการใช้ถังตกตะกอนจะมีพื้นที่ในการขยายระบบเพิ่มเติม มีแนวทางดังนี้

- สำหรับระบบเอเอสที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคในการเติมอากาศอยู่แล้ว สามารถต่อชุดวาล์วควบคุมและเครื่องสูบน้ำเสียออกเข้ากับแนวท่ออากาศเดิมได้ จากนั้นสามารถยกเลิกถังตกตะกอนแล้วเดินระบบต่อได้ทันที โดยการพิจารณาแบ่งแนวท่อในการสูบลมและเป่าอากาศจะต้องคำนึงถึงการกวนผสมในระบบและปริมาณการเติมอากาศให้ระบบ เนื่องจากแนวท่อครึ่งหนึ่งจะนำไปในการสูบลม

- สำหรับระบบเอเอสที่ใช้เครื่องเติมอากาศแบบใต้น้ำหรือเครื่องเติมอากาศแบบผิวหน้าจะต้องยกเลิกเครื่องเติมอากาศเดิม เพื่อวางแนวท่อสำหรับสูบลมและเติมอากาศเพิ่มเติม ซึ่งการวางแนวท่อใหม่จะทำให้สามารถออกแบบแนวท่อให้เหมาะสมในการใช้งาน และสามารถออกแบบโดยคำนึงถึงการถอดล้างในการทำความสะอาดด้วยสารเคมีอีกด้วย

4.5.2 แนวทางในการเลือกเครื่องสูบน้ำเสียออก

การประยุกต์ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคแทนที่หน่วยตกตะกอน จะทำให้มีอากาศตกค้างในระบบท่อจากการสลับการทำงานของหัวกระจายอากาศจากการเป่าอากาศเป็นสูบลม ดังนั้นการเลือกใช้เครื่องสูบน้ำเสียออก จึงควรเลือกใช้เครื่องสูบน้ำที่มีสมรรถภาพการดูดของเครื่องสูบ (NPSH) สูง นอกจากนี้เมื่อแรงดันในท่อด้านดูดของเครื่องสูบน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดปรากฏการณ์น้ำเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ (Cavitation) ซึ่งทำให้เครื่องสูบน้ำเกิดความเสียหายและอายุการใช้งานสั้นลง การเลือกใช้เครื่องสูบน้ำควรใช้เครื่องสูบน้ำแบบแทนที่บวก (Positive Displacement Pumps) ในการใช้งาน นอกจากนี้การติดตั้งเครื่องสูบน้ำควรติดตั้งให้เครื่องสูบน้ำอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำเพื่อลดการตกค้างของอากาศในเส้นท่อ

4.5.3 แนวทางในการเลือกชนิดวาล์วควบคุม

ในการควบคุมการสลับการทำงานของหัวกระจายอากาศ วาล์วจะถูกควบคุมการเปิด-ปิดด้วยไฟฟ้า นอกจากนี้วาล์วจะต้องรับแรงดันระหว่างน้ำและอากาศจึงต้องปิดสนิทเพื่อป้องกันอากาศรั่วเข้าระบบท่อสูบน้ำ จึงควรเลือกใช้วาล์วประเภทบอลวาล์วหรือวาล์วประตูน้ำที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการเปิด-ปิด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการอุดตันที่เกิดขึ้นในการประยุกต์ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคแทนที่หน่วยตกตะกอนในระบบเอเอส โดยทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่องที่ระยะเวลาการสูบกรองต่างๆ และศึกษาถึงระดับการอุดตันที่เกิดขึ้น

5.1.1 ระยะเวลาในการกรองและล้างย้อนของการใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคแทนหน่วยตกตะกอนในระบบเอเอส

ในการทดลองเดินระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเซรามิคแทนที่หน่วยตกตะกอนพบว่า ระยะเวลาในการสูบกรอง/เป่าอากาศที่ทำให้การอุดตันเกิดขึ้นน้อยที่สุดคือ 60 นาที คือมีอายุการใช้งานนานที่สุดที่ 122 วัน เมื่อคำนวณด้วยระดับการอุดตันถาวรและมีความชันของกราฟซึ่งแสดงถึงอัตราการเพิ่มของค่าความต้านทานน้อยที่สุดที่ 7.94×10^7 เมื่อคำนวณด้วยวิธีกราฟเส้นตรง

5.1.2 กลไกการอุดตันของตะกอนจุลินทรีย์บริเวณหัวกระจายอากาศเซรามิค

บริเวณหัวกระจายอากาศมีการอุดตันเกิดขึ้น 2 ประเภท คือ การการอุดตันภายในรูพรุนและการอุดตันแบบชั้นเค้ก ซึ่งการอุดตันทั้ง 2 ประเภทเกิดขึ้นพร้อมกัน โดยที่ในช่วงแรกๆที่เริ่มใช้งานการหัวกระจายอากาศมีความต้านทานต่ำทำให้สามารถสูบกรองน้ำเสียได้มากและเกิดการก่อตัวของชั้นเค้กมาก ความต้านทานหลักที่เกิดขึ้นที่หัวกระจายอากาศจึงเป็นความต้านทานของชั้นเค้ก และเมื่อเวลาผ่านไปการอุดตันภายในรูพรุนมากขึ้นทำให้อัตราการสูบกรองน้ำเสียลดลงและเกิดชั้นเค้กน้อยลงด้วย ดังนั้นความต้านทานหลักที่เกิดขึ้นที่หัวกระจายอากาศในการทดลองช่วงหลังจึงเป็นความต้านทานจากการอุดตันภายในรูพรุน

5.1.3 การประเมินระยะเวลาในการอุดตันด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

ในการประเมินระยะเวลาการอุดตันด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ใช้เพื่อคำนวณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศ สามารถคำนวณได้ 2 วิธี ดังนี้

1. การคำนวณด้วยระดับการอุดต้นถาวร

การคำนวณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศทำได้โดยคำนวณจำนวนรอบ (i) การทำงานของ หัวกระจายอากาศได้จากสมการ

$$R_{m,i} = (1 + r)^i R_{m,0}$$

โดยที่

- $R_{m,0}$ คือ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ
(มีค่าเท่ากับ 1.72×10^9 ม.⁻¹ สำหรับหัวกระจายอากาศใหม่)
- $R_{m,1}$ คือ ค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศสูงสุดที่ยอมรับได้
- i คือ จำนวนรอบ
- r คือ ค่าระดับการอุดต้นถาวร (r) จะมีค่าแตกต่างกันตามระยะเวลาสูบกรองที่เลือกใช้ ซึ่งมีค่าแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าระดับการอุดต้นถาวรที่ระยะเวลาการสูบกรองต่างๆ

ระยะเวลาการสูบกรอง	ระดับการอุดต้นถาวรเฉลี่ย (r)
15 นาที	0.001088
30 นาที	0.002893
60 นาที	0.002455

เมื่อคำนวณจำนวนรอบการทำงานของหัวกระจายอากาศแล้ว สามารถคำนวณระยะเวลาในการเดินระบบหรืออายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศได้จากสมการ

$$\text{จำนวนรอบในการทำงาน } (i) = \frac{\text{ระยะเวลาในการเดินระบบ}}{2 \times \text{ระยะเวลาในการสูบกรองของหัวกระจายอากาศ}}$$

2. การคำนวณด้วยกราฟเส้นตรง

การคำนวณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศสามารถคำนวณได้โดยตรงจากสมการ

$$R_{m,i} - R_{m,0} = kD$$

โดยที่

- $R_{m,0}$ คือ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ
(มีค่าเท่ากับ $1.72 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ สำหรับหัวกระจายอากาศใหม่)
- $R_{m,1}$ คือ ค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศสูงสุดที่ยอมรับได้
- D คือ อายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศ (วัน)
- k คือ ค่าคงที่จากความชันของกราฟ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันตามระยะเวลาการสุบกรองที่เลือกใช้ ซึ่งมีค่าแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5. 2 ค่า k ที่ระยะเวลาการสุบกรองต่างๆ

ระยะเวลาการสุบกรอง	k
15 นาที	6.13E+08
30 นาที	1.51E+08
60 นาที	7.94E+07

จากการคำนวณพบว่าการคำนวณทั้งสองวิธีคำนวณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศได้แตกต่างกันมาก จึงควรทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อความแม่นยำที่มากขึ้น

5.2 แนวทางการวิจัยในอนาคต

1. เนื่องจากในงานวิจัยนี้ระยะเวลาสุบกรอง/เป่าอากาศที่เหมาะสมที่สุดคือ 60/60 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่นานที่สุดในการดำเนินงานวิจัย การเพิ่มระยะเวลาในการสุบกรอง/เป่าอากาศให้นานขึ้น สามารถนำมาเปรียบเทียบอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศและระดับการอุดตันถาวรที่เหมาะสมที่สุดได้
2. เพิ่มการทดลองด้วยวิธีเดินระบบอื่นๆ เช่น เปลี่ยนภาระสารอินทรีย์หรืออายุตะกอน เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบ และเปรียบเทียบระดับการอุดตันถาวรที่เกิดขึ้น
3. การทดลองขยายขนาดของระบบเพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดจากระบบท่อและวาล์ว และเป็นระบบตัวอย่างในการนำไปใช้งานจริง

รายการอ้างอิง

1. อังสนา ส. การประยุกต์หัวกระจายอากาศแบบเซรามิกเพื่อใช้แทนที่หน่วยตกตะกอนในระบบเอเอส. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2010.
2. มั่นสิน ต. วิศวกรรมการประปา: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 1999. 321 p.
3. พิสุทธิ พ. หน่วยกระบวนการสำหรับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2014.
4. สวัสดิ์ จ. กระบวนการแยกเชิงกลในอุตสาหกรรม: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2003. 208 p.
5. Brião VB. PORE BLOCKING MECHANISM FOR THE RECOVERY OF MILK SOLIDS FROM DAIRY WASTEWATER BY ULTRAFILTRATION. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2012;29:393 - 407.
6. Metcalf, Eddy I, Tchobanoglous G, Burton F, Stensel HD. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse: McGraw-Hill Education; 2002.
7. Qasim SR. Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operation, Second Edition: Taylor & Francis; 1998.
8. Andreadakis AD. Physical and chemical properties of activated sludge floc. Water Research. 1993;27(12):1707-14.
9. Massé A, Spérandio M, Cabassud C. Comparison of sludge characteristics and performance of a submerged membrane bioreactor and an activated sludge process at high solids retention time. Water Research. 2006;40(12):2405-15.
10. Fang HHP, Shi X. Pore fouling of microfiltration membranes by activated sludge. Journal of Membrane Science. 2005;264(1-2):161-6.
11. Pliankarom S. Application of the air backflushing technique in a membrane bioreactor for septic wastewater treatment: Asian Institute of Technology; 1996.
12. Parameshwaran K. Membrane as solid/liquid separator and air diffuser in a bioreactor. Journal of environmental engineering. 1999;125(9):825-34.
13. Mei X, Quek PJ, Wang Z, Ng HY. Alkali-assisted membrane cleaning for fouling control of anaerobic ceramic membrane bioreactor. Bioresource Technology. 2017;240:25-32.

14. Xu Y, Dodds J, Leclerc D. Optimization of a discontinuous microfiltration-backwash process. *The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*. 1995;57(3):247-51.
15. Ghadimkhani A, Zhang W, Marhaba T. Ceramic membrane defouling (cleaning) by air Nano Bubbles. *Chemosphere*. 2016;146:379-84.
16. Khan SJ, Visvanathan C, Jegatheesan V. Prediction of membrane fouling in MBR systems using empirically estimated specific cake resistance. *Bioresource Technology*. 2009;100(23):6133-6.
17. Remy M, van der Marel P, Zwijnenburg A, Rulkens W, Temmink H. Low dose powdered activated carbon addition at high sludge retention times to reduce fouling in membrane bioreactors. *Water Research*. 2009;43(2):345-50.
18. Ahmed Z, Cho J, Lim B-R, Song K-G, Ahn K-H. Effects of sludge retention time on membrane fouling and microbial community structure in a membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*. 2007;287(2):211-8.
19. Le-Clech P, Chen V, Fane TAG. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*. 2006;284(1-2):17-53.
20. Zhang J, Chua HC, Zhou J, Fane AG. Factors affecting the membrane performance in submerged membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*. 2006;284(1):54-66.
21. Hong S, Krishna P, Hobbs C, Kim D, Cho J. Variations in backwash efficiency during colloidal filtration of hollow-fiber microfiltration membranes. *Desalination*. 2005;173(3):257-68.
22. Liu R, Huang X, Chen L, Wen X, Qian Y. Operational performance of a submerged membrane bioreactor for reclamation of bath wastewater. *Process Biochemistry*. 2005;40(1):125-30.



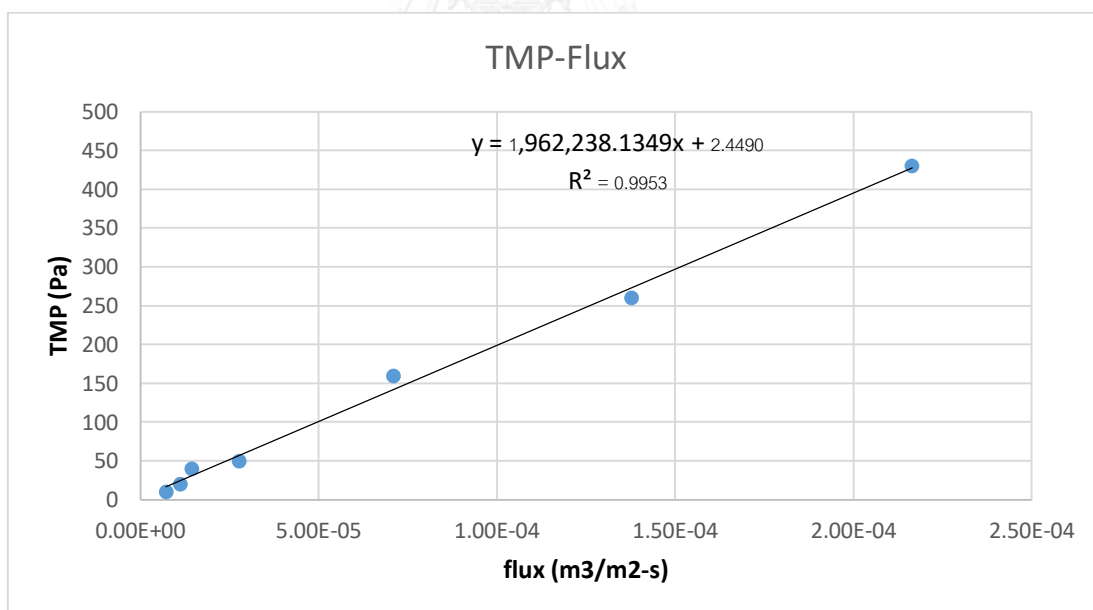


ภาคผนวก ก การคำนวณความต้านทานของหัวกระจายอากาศแบบเซรามิค

1) การคำนวณค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศ

ตารางที่ ก.1 ผลค่าความดันผ่านเมมเบรนและค่าเพอร์มิทฟลักซ์ในการหาค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศหัวที่ 1 ระยะเวลาสูบล้าง 15 นาที

flux m ³ /m ² .s	TMP Pa
7.2E-06	10
1.1E-05	20
1.4E-05	40
2.8E-05	50
7.1E-05	160
0.00014	260
0.00022	430

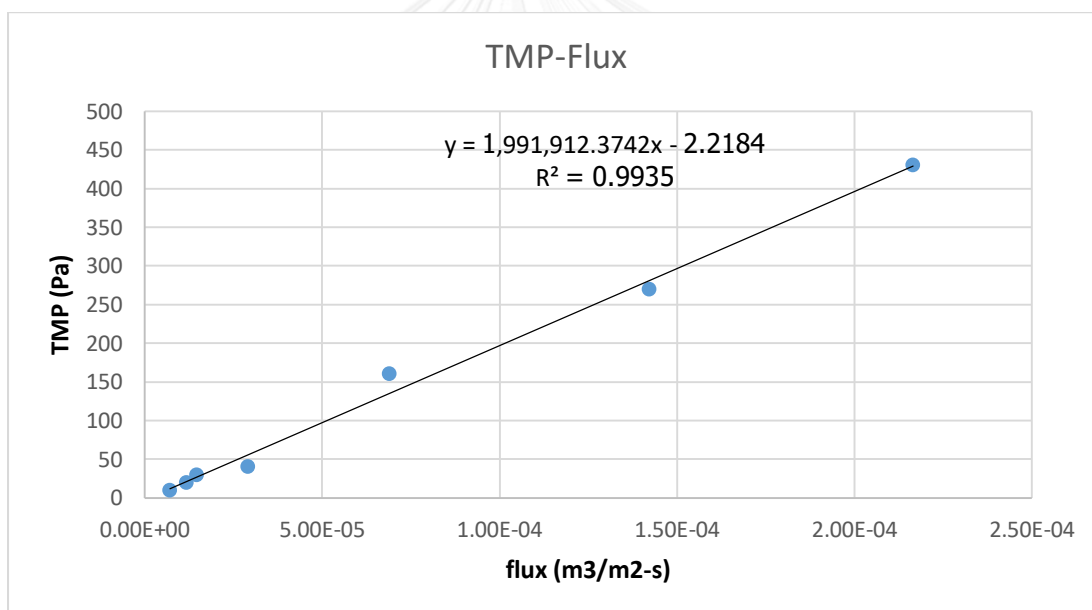


รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ของค่าเพอร์มิทฟลักซ์และค่าความดันผ่านเมมเบรนในการคำนวณค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศหัวที่ 1 ระยะเวลาสูบล้าง 15 นาที

จากกราฟ slope = $\mu \times R_m$
 จะได้ $R_m = 1,962,238 / (1.002 \times 10^{-3})$
 $R_m = 1.96 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$

ตารางที่ ก.2 ผลค่าความดันผ่านเมมเบรนและค่าเพอร์มิทฟลักซ์ในการหาค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศหัวที่ 2 ระยะเวลาสูบลอง 15 นาที

flux m ³ /m ² .s	TMP Pa
7E-06	10
1.2E-05	20
1.5E-05	30
2.9E-05	40
6.9E-05	160
0.00014	270
0.00022	430

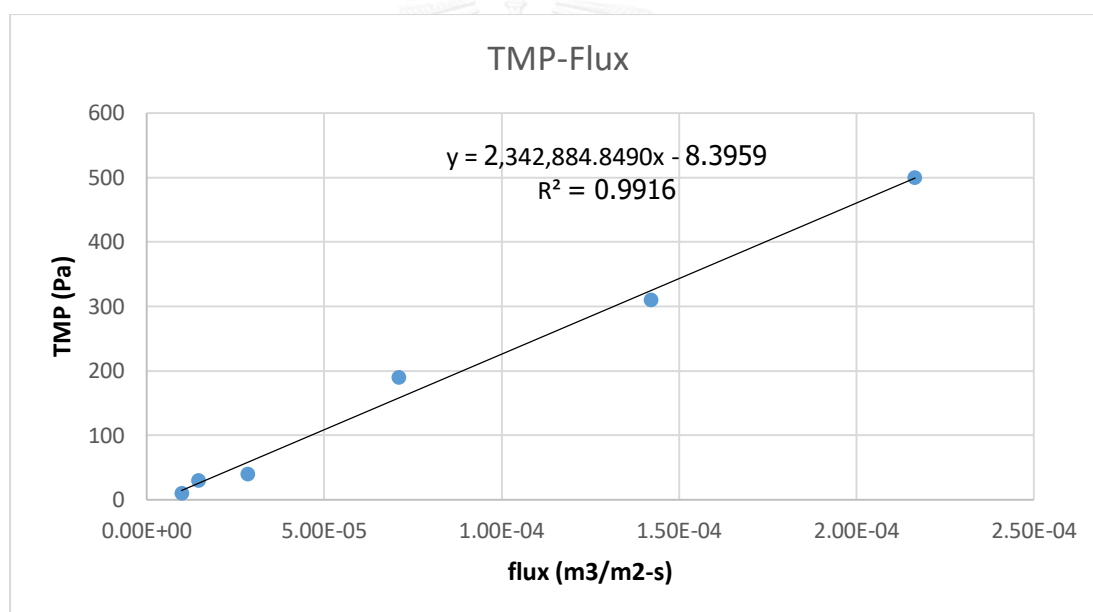


รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ของค่าเพอร์มิทฟลักซ์และค่าความดันผ่านเมมเบรนในการคำนวณค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศหัวที่ 2 ระยะเวลาสูบลอง 15 นาที

จากกราฟ slope = $\mu \times R_m$
 จะได้ $R_m = 1,991,912 / (1.002 \times 10^{-3})$
 $R_m = 1.99 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$

ตารางที่ ก.3 ผลค่าความดันผ่านเมมเบรนและค่าเพอร์มิทฟลักซ์ในการหาค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศหัวที่ 3 ระยะเวลาสุบกรอง 30 นาที

flux m ³ /m ² .s	TMP Pa
9.9E-06	10
1.5E-05	30
2.8E-05	40
7.1E-05	190
0.00014	310
0.00022	500



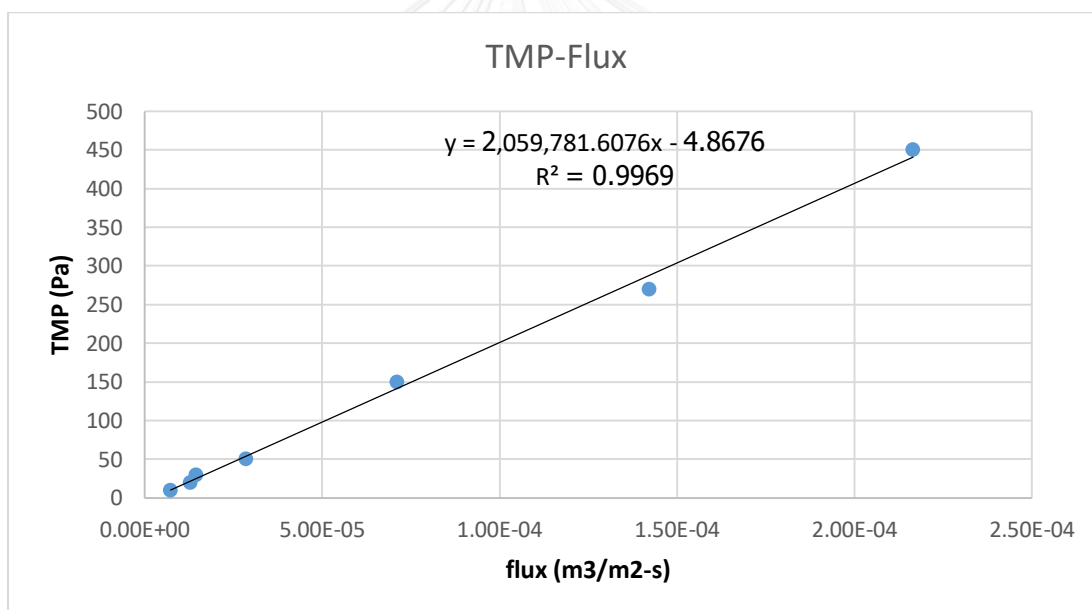
รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ของค่าเพอร์มิทฟลักซ์และค่าความดันผ่านเมมเบรนในการคำนวณค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศหัวที่ 3 ระยะเวลาสุบกรอง 30 นาที

จากกราฟ จะได้

$$\begin{aligned} \text{slope} &= \mu \times R_m \\ R_m &= 2,342,884 / (1.002 \times 10^{-3}) \\ R_m &= 2.34 \times 10^9 \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

ตารางที่ ก.4 ผลค่าความดันผ่านเมมเบรนและค่าเพอร์มิทฟลักซ์ในการหาค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศหัวที่ 4 ระยะเวลาสูบลอง 30 นาที

flux m ³ /m ² .s	TMP Pa
7.3E-06	10
1.3E-05	20
1.4E-05	30
2.8E-05	50
7.1E-05	150
0.00014	270
0.00022	450



รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ของค่าเพอร์มิทฟลักซ์และค่าความดันผ่านเมมเบรนในการคำนวณค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศหัวที่ 4 ระยะเวลาสูบลอง 30 นาที

จากกราฟ จะได้

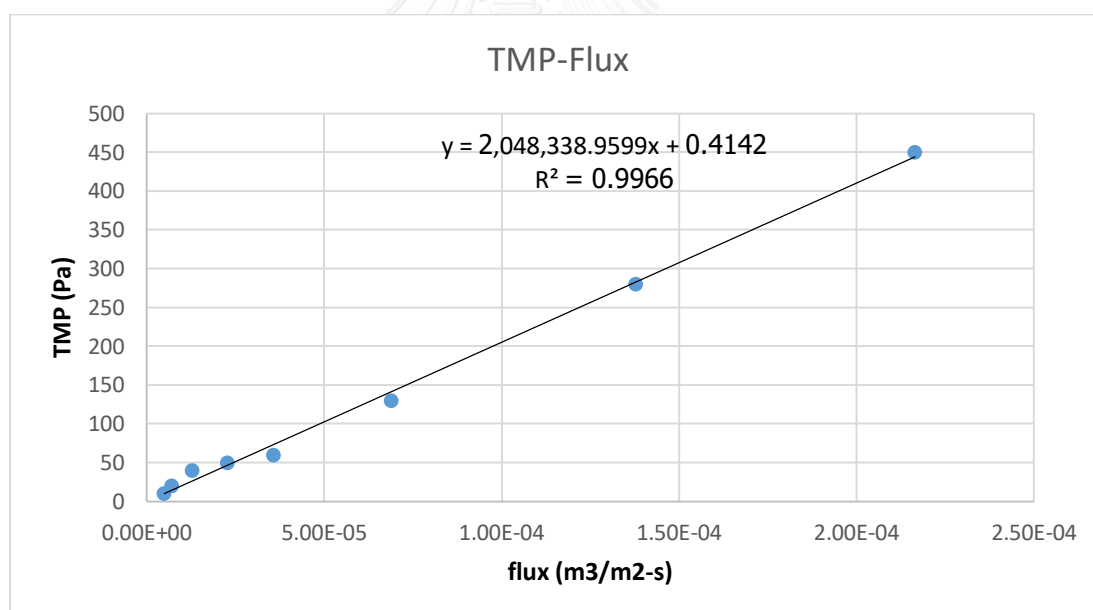
$$\text{slope} = \mu \times R_m$$

$$R_m = 2,059,781 / (1.002 \times 10^{-3})$$

$$R_m = 2.06 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$$

ตารางที่ ก.5 ผลค่าความดันผ่านเมมเบรนและค่าเพอร์มิทฟลักซ์ในการหาค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศหัวที่ 5 ระยะเวลาสูบกรอง 60 นาที

flux m ³ /m ² .s	TMP Pa
4.9E-06	10
7.1E-06	20
1.3E-05	40
2.3E-05	50
3.6E-05	60
6.9E-05	130
0.00014	280
0.00022	450

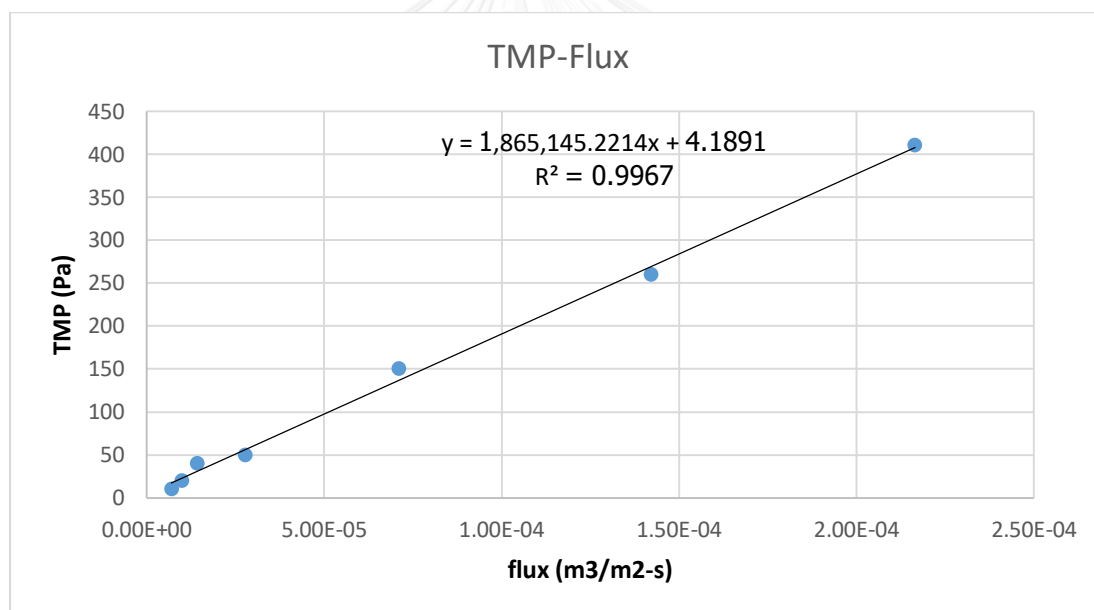


รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ของค่าเพอร์มิทฟลักซ์และค่าความดันผ่านเมมเบรนในการคำนวณค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศหัวที่ 5 ระยะเวลาสูบกรอง 60 นาที

จากกราฟ slope = $\mu \times R_m$
 จะได้ $R_m = 2,048,338 / (1.002 \times 10^{-3})$
 $R_m = 2.04 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$

ตารางที่ ก.6 ผลค่าความดันผ่านเมมเบรนและค่าเพอร์มิทฟลักซ์ในการหาค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศหัวที่ 6 ระยะเวลาสุบกรอง 60 นาที

flux m ³ /m ² .s	TMP Pa
7E-06	10
9.8E-06	20
1.4E-05	40
2.8E-05	50
7.1E-05	150
0.00014	260
0.00022	410



รูปที่ ก.6 ความสัมพันธ์ของค่าเพอร์มิทฟลักซ์และค่าความดันผ่านเมมเบรนในการคำนวณค่าความต้านทานเริ่มต้นของหัวกระจายอากาศหัวที่ 6 ระยะเวลาสุบกรอง 60 นาที

จากกราฟ จะได้

$$\text{slope} = \mu \times R_m$$

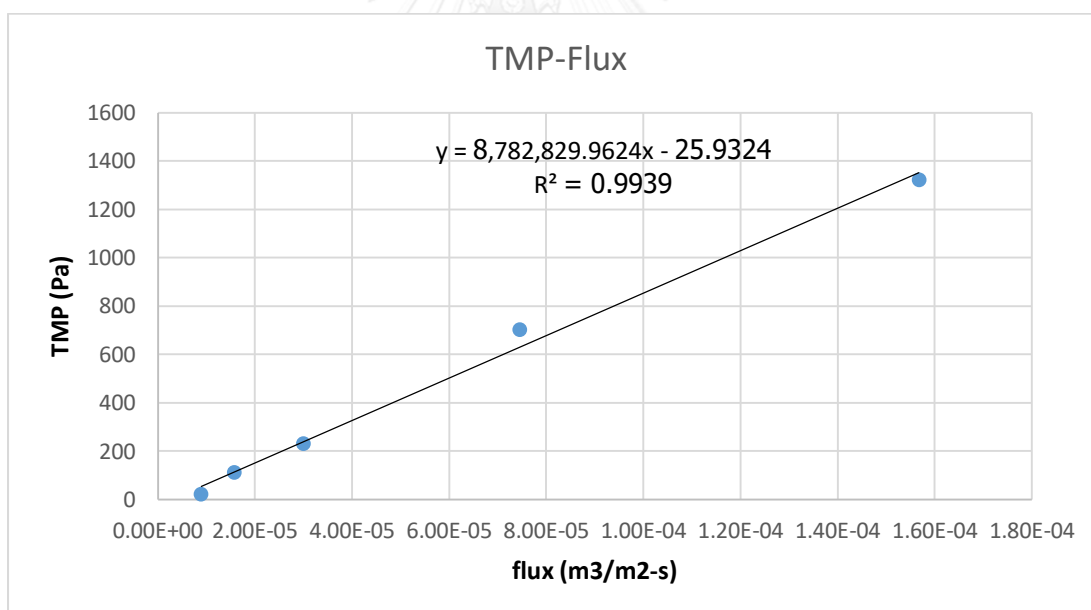
$$R_m = 1,865,145 / (1.002 \times 10^{-3})$$

$$R_m = 1.86 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$$

2) การคำนวณค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือน

ตารางที่ ก.7 ผลค่าความดันผ่านเมมเบรนและค่าเพอร์มิทพลักซ์ในการหาค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือนของหัวกระจายอากาศหัวที่ 1 ระยะเวลาสูบลอง 15 นาที

flux m ³ /m ² .s	TMP Pa
8.9E-06	20
1.6E-05	110
3E-05	230
7.5E-05	700
0.00016	1320

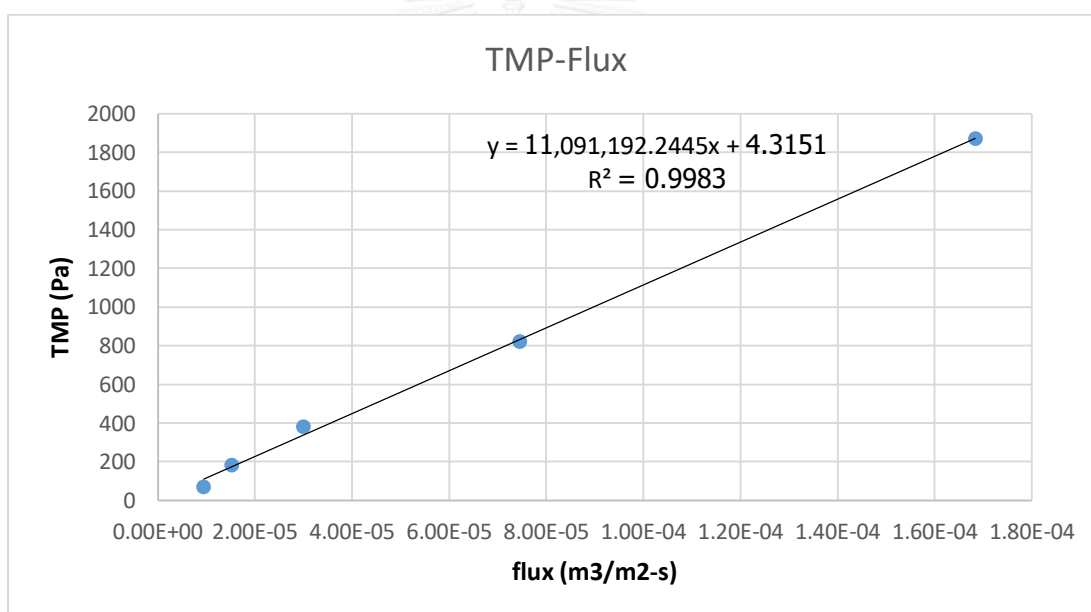


รูปที่ ก.7 ความสัมพันธ์ของค่าเพอร์มิทพลักซ์และค่าความดันผ่านเมมเบรนในการคำนวณค่าความต้านทานหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือนของหัวกระจายอากาศหัวที่ 1 ระยะเวลาสูบลอง 15 นาที

จากกราฟ slope = $\mu \times R_m$
จะได้ $R_m = 8,782,829 / (1.002 \times 10^{-3})$
 $R_m = 8.77 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$

ตารางที่ ก.8 ผลค่าความดันผ่านเมมเบรนและค่าเพอร์มิทฟลักซ์ในการหาค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือนของหัวกระจายอากาศหัวที่ 2 ระยะเวลาสูบกรอง 15 นาที

flux m ³ /m ² .s	TMP Pa
9.5E-06	70
1.5E-05	180
3E-05	380
7.5E-05	820
0.00017	1870

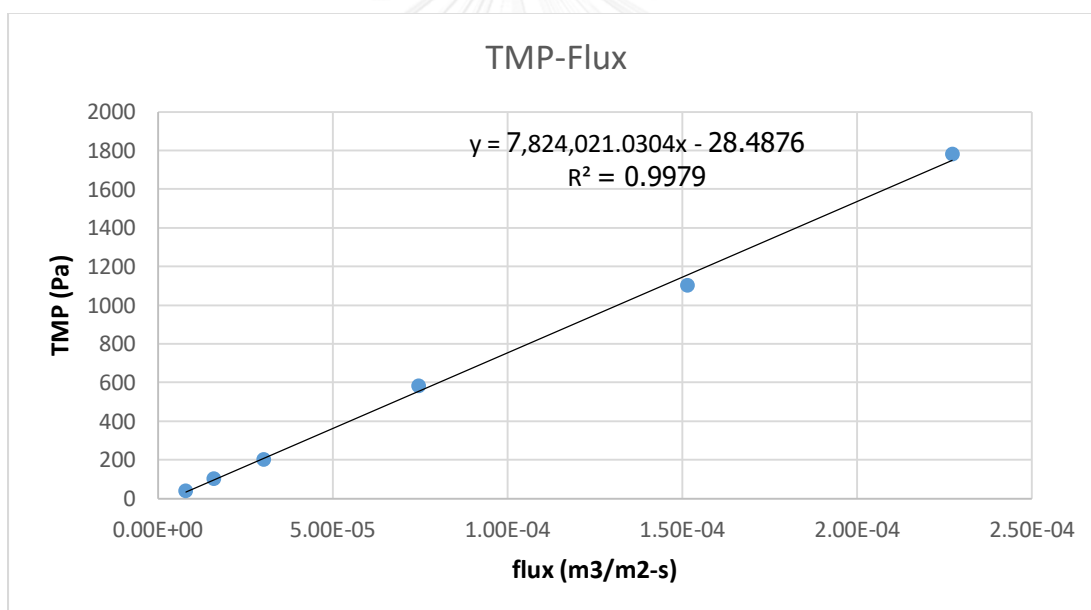


รูปที่ ก.8 ความสัมพันธ์ของค่าเพอร์มิทฟลักซ์และค่าความดันผ่านเมมเบรนในการคำนวณค่าความต้านทานหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือนของหัวกระจายอากาศหัวที่ 2 ระยะเวลาสูบกรอง 15 นาที

จากกราฟ slope = $\mu \times R_m$
 จะได้ $R_m = 11,091,192 / (1.002 \times 10^{-3})$
 $R_m = 1.11 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$

ตารางที่ ก.9 ผลค่าความดันผ่านเมมเบรนและค่าเพอร์มิทพลักซ์ในการหาค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือนของหัวกระจายอากาศหัวที่ 3 ระยะเวลาสุบกรอง 30 นาที

flux m ³ /m ² .s	TMP Pa
8E-06	40
1.6E-05	100
3E-05	200
7.5E-05	580
0.00015	1100
0.00023	1780

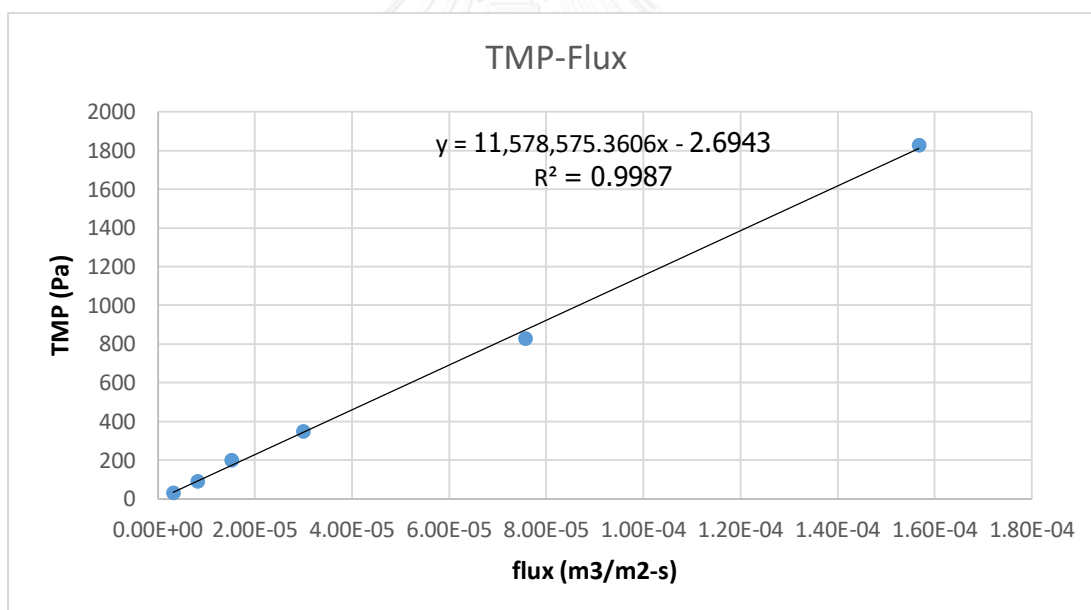


รูปที่ ก.9 ความสัมพันธ์ของค่าเพอร์มิทพลักซ์และค่าความดันผ่านเมมเบรนในการคำนวณค่าความต้านทานหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือนของหัวกระจายอากาศหัวที่ 3 ระยะเวลาสุบกรอง 30 นาที

จากกราฟ slope = $\mu \times R_m$
จะได้ $R_m = 7,824,021 / (1.002 \times 10^{-3})$
 $R_m = 7.81 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$

ตารางที่ ก.10 ผลค่าความดันผ่านเมมเบรนและค่าเพอร์มิทฟลักซ์ในการหาค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือนของหัวกระจายอากาศหัวที่ 4 ระยะเวลาสุบกรอง 30 นาที

flux m ³ /m ² .s	TMP Pa
3.2E-06	30
8.3E-06	90
1.5E-05	200
3E-05	350
7.6E-05	830
0.00016	1830



รูปที่ ก.10 ความสัมพันธ์ของค่าเพอร์มิทฟลักซ์และค่าความดันผ่านเมมเบรนในการคำนวณค่าความต้านทานหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือนของหัวกระจายอากาศหัวที่ 4 ระยะเวลาสุบกรอง 30 นาที

จากกราฟ จะได้

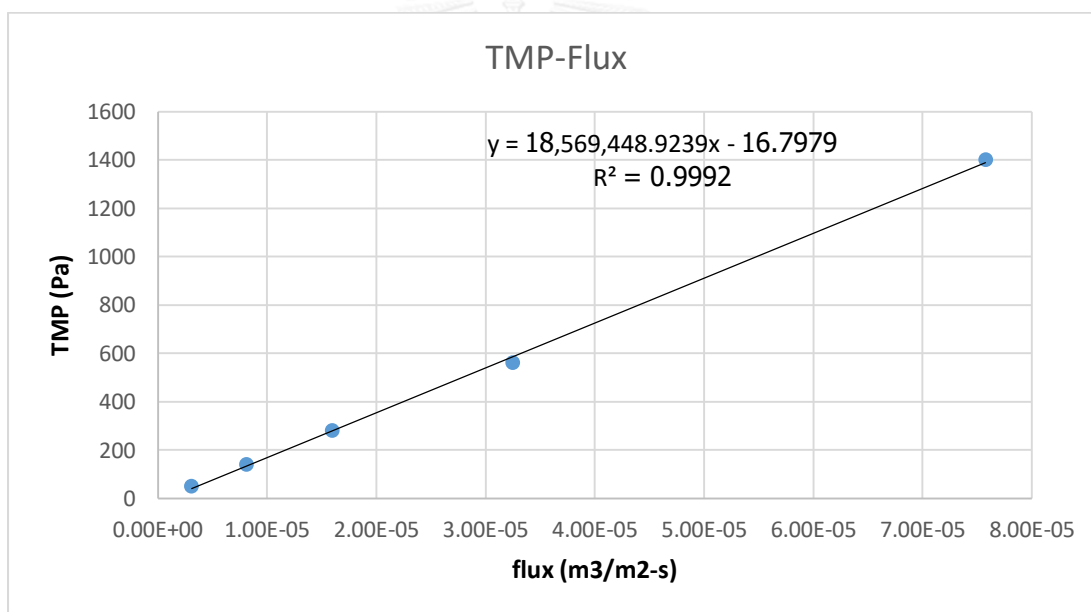
$$\text{slope} = \mu \times R_m$$

$$R_m = 11,578,575 / (1.002 \times 10^{-3})$$

$$R_m = 1.16 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$$

ตารางที่ ก.11 ผลค่าความดันผ่านเมมเบรนและค่าเพอร์มิทฟลักซ์ในการหาค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือนของหัวกระจายอากาศหัวที่ 5 ระยะเวลาสูบกรอง 60 นาที

flux m ³ /m ² .s	TMP Pa
3.1E-06	50
8.1E-06	140
1.6E-05	280
3.2E-05	560
7.6E-05	1400

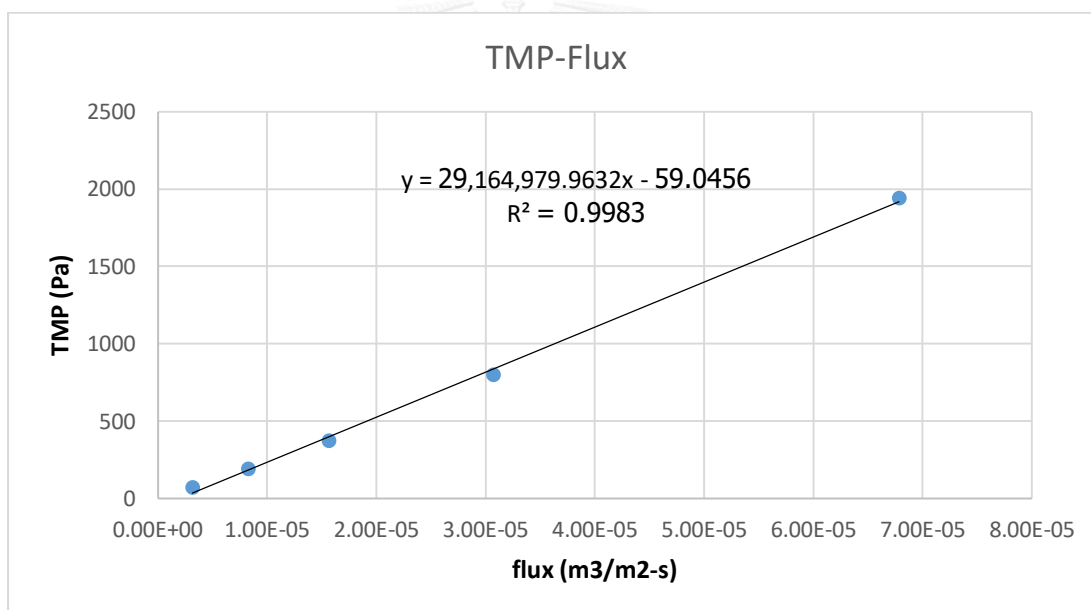


รูปที่ ก.11 ความสัมพันธ์ของค่าเพอร์มิทฟลักซ์และค่าความดันผ่านเมมเบรนในการคำนวณค่าความต้านทานหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือนของหัวกระจายอากาศหัวที่ 5 ระยะเวลาสูบกรอง 60 นาที

จากกราฟ slope = $\mu \times R_m$
 จะได้ $R_m = 18,569,448 / (1.002 \times 10^{-3})$
 $R_m = 1.85 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$

ตารางที่ ก.12 ผลค่าความดันผ่านเมมเบรนและค่าเพอร์มิทฟลักซ์ในการหาค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือนของหัวกระจายอากาศหัวที่ 6 ระยะเวลาสูบกรอง 60 นาที

flux m ³ /m ² .s	TMP Pa
3.2E-06	70
8.3E-06	190
1.6E-05	370
3.1E-05	800
6.8E-05	1940



รูปที่ ก.12 ความสัมพันธ์ของค่าเพอร์มิทฟลักซ์และค่าความดันผ่านเมมเบรนในการคำนวณค่าความต้านทานหลังจากใช้เต็มอากาศในระบบนาน 1 เดือนของหัวกระจายอากาศหัวที่ 6 ระยะเวลาสูบกรอง 60 นาที

จากกราฟ จะได้

$$\text{slope} = \mu \times R_m$$

$$R_m = 29,164,979 / (1.002 \times 10^{-3})$$

$$R_m = 2.91 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$$

3) สรุปค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศระหว่างทำการทดลอง

ตารางที่ ก.13 ความต้านทานก่อนและหลังการล้างของหัวกระจายอากาศที่ระยะเวลาสูบลอง 15 นาที

วันที่	จำนวนวันที่ทำการทดลอง	ถึงปฏิบัติการที่ 1 (15 นาที)					
		หัวที่1			หัวที่2		
		ก่อนล้างด้วยกรด (Rm+Rp)	หลังล้างด้วยกรด (Rm)	ผลต่างของความต้านทาน (Rp)	ก่อนล้างด้วยกรด (Rm+Rp)	หลังล้างด้วยกรด (Rm)	ผลต่างของความต้านทาน (Rp)
28/3/2016	1		8.77E+09			1.11E+10	
25/6/2016	26	4.65E+10	4.22E+09	4.22E+10	3.67E+10	4.13E+09	3.26E+10
12/9/2016	30	7.24E+10	4.05E+09	6.83E+10	5.35E+10	3.43E+09	5.01E+10
16/9/2016	35	2.32E+10	2.32E+10*	0.00	3.02E+10	7.22E+09	2.30E+10
26/9/2016	36	1.35E+11	4.92E+09	1.30E+11	1.54E+11	4.92E+09	1.49E+11

* ค่าความต้านทานที่ถูกปรับแก้

ตารางที่ ก.14 ความต้านทานก่อนและหลังการล้างของหัวกระจายอากาศที่ระยะเวลาสูบลอง 30 นาที

วันที่	จำนวนวันที่ทำการทดลอง	ถึงปฏิบัติการที่ 2 (30 นาที)					
		หัวที่3			หัวที่4		
		ก่อนล้างด้วยกรด (Rm+Rp)	หลังล้างด้วยกรด (Rm)	ผลต่างของความต้านทาน (Rp)	ก่อนล้างด้วยกรด (Rm+Rp)	หลังล้างด้วยกรด (Rm)	ผลต่างของความต้านทาน (Rp)
28/3/2016	1		7.81E+09			1.16E+10	
10/4/2016	13	6.35E+10	4.34E+10	2.02E+10	8.17E+10	5.21E+10	2.96E+10
26/4/2016	24	1.27E+11	3.34E+09	1.23E+11	1.32E+11	3.67E+09	1.29E+11
4/7/2016	34	2.69E+11	3.99E+09	2.65E+11	3.40E+11	3.44E+09	3.37E+11
20/9/2016	43	1.15E+10	1.15E+10*	0.00	8.90E+09	8.90E+09*	0.00
2/10/2016	50	4.39E+10	5.47E+09	3.84E+10	1.92E+11	5.33E+09	1.87E+11

* ค่าความต้านทานที่ถูกปรับแก้

ตารางที่ ก.15 ความต้านทานก่อนและหลังการล้างของหัวกระจายอากาศที่ระยะเวลาสูบลบ 60 นาที

วันที่	จำนวนวันที่ทำการทดลอง	ถึงปฏิบัติการที่ 3 (60 นาที)					
		หัวที่5			หัวที่6		
		ก่อนล้างด้วยกรด (Rm+Rp)	หลังล้างด้วยกรด (Rm)	ผลต่างของความต้านทาน (Rp)	ก่อนล้างด้วยกรด (Rm+Rp)	หลังล้างด้วยกรด (Rm)	ผลต่างของความต้านทาน (Rp)
28/3/2016	1		1.85E+10			2.91E+10	
15/4/2016	14	1.02E+11	1.40E+10	8.77E+10	1.49E+11	4.32E+10	1.06E+11
26/4/2016	26	7.53E+10	3.12E+09	7.21E+10	7.19E+10	3.94E+09	6.80E+10
1/7/2016	33	4.59E+10	3.05E+09	4.28E+10	2.99E+10	3.99E+09	2.59E+10
20/9/2016	42	4.66E+10	4.30E+09	4.23E+10	1.17E+10	4.91E+09	6.80E+09
2/10/2016	49	2.82E+10	4.33E+09	2.39E+10	4.43E+10	6.10E+09	3.82E+10



ภาคผนวก ข

ผลการทำงานของหัวกระจายอากาศแบบเซรามิคและการคำนวณความต้านทานรวม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข.1 ผลการทำงานของหวักระจ่ายอากาศหัวที่ 1 ระยะเวลาสุบกรอง 15 นาที

วันที่	MLSS mg/l	อัตราการไหล l/d	จำนวนรอบ สะสม	เวลาสูบ อากาศออก วันที่	เวลาสูบน้ำ ออก วันที่	เวลาการ กรองทั้งหมด วันที่	Flux m ³ /m ² .s	TMPmax Pa	Rt m-1	Rc m-1	ปริมาตร ของน้ำออก m ³	α m/g
28/3/2016							0	0			0	
1/4/2016	9983	24.96	194	489	411	900	1.31E-05	42000	3.19E+12	3.18E+12	0.00026	2.70E+10
1/4/2016	9983	24.96	195	476	410	886	1.31E-05	41000	3.12E+12	3.11E+12	0.000256	2.68E+10
1/4/2016	9983	24.96	196	499	435	934	1.31E-05	40000	3.04E+12	3.03E+12	0.0002698	2.48E+10
3/4/2016	10411	26.8	289	370	525	895	1.41E-05	45000	3.19E+12	3.18E+12	0.0002776	2.42E+10
3/4/2016	10411	26.8	290	369	534	903	1.41E-05	48000	3.40E+12	3.39E+12	0.0002801	2.56E+10
3/4/2016	10411	26.8	291	380	510	890	1.41E-05	44000	3.11E+12	3.11E+12	0.0002761	2.38E+10
4/4/2016	10411	24.27	336	428	474	902	1.28E-05	49000	3.83E+12	3.82E+12	0.0002533	3.19E+10
4/4/2016	10411	24.27	337	412	481	893	1.28E-05	48000	3.75E+12	3.74E+12	0.0002508	3.15E+10
4/4/2016	10411	24.27	338	389	519	908	1.28E-05	47000	3.67E+12	3.67E+12	0.000255	3.04E+10
5/4/2016	10411	31.89	385	329	564	893	1.68E-05	52000	3.09E+12	3.08E+12	0.0003296	1.98E+10
5/4/2016	10411	31.89	386	327	575	902	1.68E-05	53000	3.15E+12	3.14E+12	0.0003329	2.00E+10
5/4/2016	10411	31.89	388	317	604	921	1.68E-05	52000	3.09E+12	3.08E+12	0.0003399	1.92E+10
6/4/2016	10411	30.4	432	346	575	921	1.60E-05	52000	3.24E+12	3.24E+12	0.0003241	2.11E+10
6/4/2016	10411	30.4	433	347	542	889	1.60E-05	52000	3.24E+12	3.24E+12	0.0003128	2.19E+10
6/4/2016	10411	30.4	435	356	538	894	1.60E-05	51000	3.18E+12	3.17E+12	0.0003146	2.13E+10
8/4/2016	10411	22.8	437	545	368	913	1.20E-05	54000	4.49E+12	4.48E+12	0.0002409	3.93E+10
8/4/2016	10411	18	438	566	346	912	9.47E-06	54000	5.69E+12	5.68E+12	0.00019	6.32E+10

ตารางที่ ข.1 ผลการทำงานของหวักระจ่ายอากาศหัวที่ 1 ระยะเวลาลูกบกรอง 15 นาที

วันที่	MLSS	อัตราการไหล	จำนวนรอบสะสม	เวลาสูบลูกบกรองอากาศออก	เวลาสูบน้ำออก	เวลาการกรองทั้งหมด	Flux	TMPmax	Rt	Rc	ปริมาตรของน้ำออก	α
	mg/l	l/d		วันที่	วันที่	วันที่	m ³ /m ² .s	Pa	m-1	m-1	m ³	m/g
8/4/2016	10411	18	439	506	433	939	9.47E-06	60000	6.32E+12	6.31E+12	0.0001956	6.82E+10
9/4/2016	10411	21.76	491	410	496	906	1.14E-05	61000	5.32E+12	5.31E+12	0.0002281	4.92E+10
9/4/2016	10411	23.7	492	517	373	890	1.25E-05	60000	4.80E+12	4.79E+12	0.0002441	4.15E+10
9/4/2016	10411	23.7	493	436	498	934	1.25E-05	71000	5.68E+12	5.67E+12	0.0002562	4.68E+10
10/4/2016	10411	28.93	534	431	482	913	1.52E-05	64000	4.20E+12	4.19E+12	0.0003057	2.89E+10
10/4/2016	10411	21.6	535	495	444	939	1.14E-05	66000	5.80E+12	5.79E+12	0.0002348	5.21E+10
10/4/2016	10411	30	536	494	426	920	1.58E-05	66000	4.17E+12	4.16E+12	0.0003194	2.76E+10
16/4/2016	12689	24.6	642	365	541	906	1.29E-05	71000	5.48E+12	5.47E+12	0.000258	3.67E+10
16/4/2016	12689	24.6	643	365	565	930	1.29E-05	72000	5.55E+12	5.54E+12	0.0002648	3.63E+10
16/4/2016	12689	24.6	644	360	555	915	1.29E-05	68000	5.24E+12	5.23E+12	0.0002605	3.48E+10
21/4/2016	10311	19.5	722	406	503	909	1.03E-05	64000	6.23E+12	6.22E+12	0.0002052	6.47E+10
21/4/2016	10311	19.5	723	401	486	887	1.03E-05	66000	6.42E+12	6.41E+12	0.0002002	6.83E+10
21/4/2016	10311	19.5	724	456	473	929	1.03E-05	71000	6.91E+12	6.90E+12	0.0002097	7.02E+10
22/4/2016	10311	22.4	769	298	600	898	1.18E-05	83000	7.03E+12	7.02E+12	0.0002328	6.43E+10
22/4/2016	10311	22.4	770	321	583	904	1.18E-05	83000	7.03E+12	7.02E+12	0.0002344	6.39E+10
22/4/2016	10311	22.4	771	323	557	880	1.18E-05	84000	7.11E+12	7.11E+12	0.0002281	6.65E+10
24/4/2016	10311	23.2	865	250	652	902	1.22E-05	76000	6.21E+12	6.21E+12	0.0002422	5.47E+10
24/4/2016	10311	23.2	866	294	654	948	1.22E-05	79000	6.46E+12	6.45E+12	0.0002546	5.41E+10

ตารางที่ ข.1 ผลการทำงานของหวั่งกระจายอากาศหวั่งที่ 1 ระยะเวลาลูกบรกรอง 15 นาที

วันที่	MLSS	อัตราการไหล	จำนวนรอบสะสม	เวลาสูบลูกบรกรองอากาศออก	เวลาสูบน้ำออก	เวลาการกรองทั้งหมด	Flux	TMPmax	Rt	Rc	ปริมาตรของน้ำออก	α
	mg/l	l/d		วันที่	วันที่	วันที่	m ³ /m ² .s	Pa	m-1	m-1	m ³	m/g
24/4/2016	10311	23.2	867	294	636	930	1.22E-05	79000	6.46E+12	6.45E+12	0.0002497	5.51E+10
25/4/2016	10311	20.76	915	295	634	929	1.09E-05	82000	7.49E+12	7.49E+12	0.0002232	7.16E+10
25/6/2016	10561	72	933	155	168	323	3.79E-05	0	0	0	0.0002692	
25/6/2016	10561	72	934	183	681	864	3.79E-05	2000	5.27E+10	4.39E+10	0.00072	127096906
25/6/2016	10561	72	935	187	704	891	3.79E-05	2000	5.27E+10	4.39E+10	0.0007425	123245484
25/6/2016	10561	33.6	936	367	513	880	1.77E-05	3000	1.69E+11	1.61E+11	0.0003422	977638020
25/6/2016	10561	33.6	937	366	547	913	1.77E-05	4000	2.26E+11	2.17E+11	0.0003551	1.27E+09
25/6/2016	10561	28.2	938	361	542	903	1.48E-05	4000	2.69E+11	2.23E+11	0.0002947	1.57E+09
25/6/2016	10561	28.2	939	371	525	896	1.48E-05	4000	2.69E+11	2.23E+11	0.0002924	1.59E+09
25/6/2016	10561	28.2	940	374	491	865	1.48E-05	4000	2.69E+11	2.23E+11	0.0002823	1.64E+09
25/6/2016	10561	28.2	941	369	484	853	1.48E-05	6000	4.04E+11	3.57E+11	0.0002784	2.67E+09
25/6/2016	10561	37.8	942	321	557	878	1.99E-05	4000	2.01E+11	1.54E+11	0.0003841	836630405
25/6/2016	10561	37.8	943	297	622	919	1.99E-05	4000	2.01E+11	1.54E+11	0.0004021	799305218
25/6/2016	10561	37.8	944	303	622	925	1.99E-05	8000	4.01E+11	3.55E+11	0.0004047	1.83E+09
25/6/2016	10561	37.8	945	302	601	903	1.99E-05	8000	4.01E+11	3.55E+11	0.0003951	1.87E+09
25/6/2016	10561	39.6	946	336	538	874	2.08E-05	5000	2.40E+11	1.93E+11	0.0004006	1.00E+09
25/6/2016	10561	39.6	947	329	571	900	2.08E-05	5000	2.40E+11	1.93E+11	0.0004125	974916251
25/6/2016	10561	39.6	948	297	593	890	2.08E-05	8000	3.83E+11	3.37E+11	0.0004079	1.72E+09

ตารางที่ ข.1 ผลการทำงานของหวักระเจายอากาศหัวที่ 1 ระยะเวลาลูกบกรอง 15 นาที

วันที่	MLSS mg/l	อัตราการใช้ โพลีเมอร์	จำนวนรอบ ผสม	เวลาสูบ อากาศออก	เวลาสูบน้ำ ออก	เวลาการ กรองทั้งหมด	Flux m ³ /m ² .s	TMPmax Pa	Rt m-1	Rc m-1	ปริมาตร ของน้ำออก	α m/g
		l/d		วันที่	วันที่	วันที่					m ³	
26/6/2016	10561	34.8	981	335	563	898	1.83E-05	11000	6.00E+11	5.53E+11	0.0003617	3.19E+09
26/6/2016	10561	34.8	982	321	556	877	1.83E-05	11000	6.00E+11	5.53E+11	0.0003532	3.26E+09
26/6/2016	10561	34.8	983	314	573	887	1.83E-05	11000	6.00E+11	5.53E+11	0.0003573	3.23E+09
27/6/2016	10561	16.8	1038	479	402	881	8.84E-06	44000	4.97E+12	4.92E+12	0.0001713	5.99E+10
27/6/2016	10561	16.8	1039	492	427	919	8.84E-06	44000	4.97E+12	4.92E+12	0.0001787	5.74E+10
27/6/2016	10561	16.8	1040	325	594	919	8.84E-06	54000	6.10E+12	6.05E+12	0.0001787	7.05E+10
27/6/2016	10561	16.8	1041	320	553	873	8.84E-06	54000	6.10E+12	6.05E+12	0.0001698	7.43E+10
12/9/2016	9867	30	1301	454	463	917	1.58E-05	48000	3.04E+12	2.96E+12	0.0003184	2.08E+10
12/9/2016	9867	30	1302	515	393	908	1.58E-05	50000	3.16E+12	3.09E+12	0.0003153	2.19E+10
12/9/2016	9867	30	1303	572	343	915	1.58E-05	50000	3.16E+12	3.09E+12	0.0003177	2.17E+10
16/9/2016	9867	0	1438	0	0	0	0	0	#DIV/0!		0	
26/9/2016	12467	13.2	1440	731	194	925	6.94E-06	38000	5.46E+12	5.33E+12	0.0001413	6.65E+10
26/9/2016	12467	13.2	1441	715	207	922	6.94E-06	36000	5.17E+12	5.04E+12	0.0001409	6.31E+10
26/9/2016	12467	13.2	1442	747	153	900	6.94E-06	37000	5.32E+12	5.18E+12	0.0001375	6.65E+10

ตารางที่ ข.2 ผลการทำงานของหวักระจ่ายอากาศหัวที่ 2 ระยะเวลาลูกบวกรอง 15 นาที

วันที่	MLSS mg/l	อัตราการไหล l/d	จำนวนรอบ สะสม	เวลาสูบลบ อากาศออก วันที่	เวลาสูบน้ำ ออก วันที่	เวลาการ กรองทั้งหมด วันที่	Flux m ³ /m ² .s	TMPmax Pa	Rt m-1	Rc m-1	ปริมาตร ของน้ำออก m ³	α m/g
28/3/2016							0	0			0	
1/4/2016	9983	24.96	194	354	554	908	1.31E-05	41200	3.13E+12	3.12E+12	0.000262	2.62E+10
1/4/2016	9983	24.96	195	368	541	909	1.31E-05	40000	3.04E+12	3.03E+12	0.000263	2.54E+10
1/4/2016	9983	24.96	196	361	481	842	1.31E-05	40000	3.04E+12	3.03E+12	0.000243	2.75E+10
3/4/2016	10411	26.8	289	333	553	886	1.41E-05	45000	3.19E+12	3.17E+12	0.000275	2.44E+10
3/4/2016	10411	26.8	290	320	581	901	1.41E-05	46000	3.26E+12	3.24E+12	0.000279	2.45E+10
3/4/2016	10411	26.8	291	332	571	903	1.41E-05	45000	3.19E+12	3.17E+12	0.00028	2.39E+10
4/4/2016	10411	24.27	337	402	483	885	1.28E-05	47000	3.67E+12	3.66E+12	0.000249	3.11E+10
4/4/2016	10411	24.27	338	382	522	904	1.28E-05	46000	3.60E+12	3.58E+12	0.000254	2.98E+10
4/4/2016	10411	24.27	339	367	532	899	1.28E-05	47000	3.67E+12	3.66E+12	0.000252	3.07E+10
5/4/2016	10411	31.89	386	292	614	906	1.68E-05	50000	2.98E+12	2.96E+12	0.000334	1.87E+10
5/4/2016	10411	31.89	387	291	613	904	1.68E-05	50000	2.98E+12	2.96E+12	0.000334	1.88E+10
5/4/2016	10411	31.89	388	289	598	887	1.68E-05	48000	2.86E+12	2.84E+12	0.000327	1.84E+10
6/4/2016	10411	30.4	432	300	572	872	1.60E-05	49000	3.06E+12	3.05E+12	0.000307	2.10E+10
6/4/2016	10411	30.4	433	299	586	885	1.60E-05	49000	3.06E+12	3.05E+12	0.000311	2.07E+10
6/4/2016	10411	30.4	435	305	600	905	1.60E-05	48000	3.00E+12	2.98E+12	0.000318	1.98E+10
8/4/2016	10411	22.8	436	429	452	881	1.20E-05	51000	4.24E+12	4.23E+12	0.000232	3.85E+10
8/4/2016	10411	18	437	428	452	880	9.47E-06	52000	5.48E+12	5.47E+12	0.000183	6.30E+10

ตารางที่ ข.2 ผลการทำงานของหวักระจ่ายอากาศหัวที่ 2 ระยะเวลาลูกบวกรอง 15 นาที

วันที่	MLSS	อัตราการไหล	จำนวนรอบสะสม	เวลาสูบลูกบวกรองอากาศออก	เวลาสูบน้ำออก	เวลาการกรองทั้งหมด	Flux	TMPmax	Rt	Rc	ปริมาตรของน้ำออก	α
	mg/l	l/d		วันที่	วันที่	วันที่	m ³ /m ² .s	Pa	m-1	m-1	m ³	m/g
8/4/2016	10411	18	438	400	474	874	9.47E-06	56000	5.90E+12	5.89E+12	0.000182	6.84E+10
9/4/2016	10411	21.76	490	301	598	899	1.15E-05	70000	6.10E+12	6.09E+12	0.000226	5.69E+10
9/4/2016	10411	23.7	491	362	538	900	1.25E-05	66000	5.28E+12	5.27E+12	0.000247	4.51E+10
9/4/2016	10411	23.7	492	386	491	877	1.25E-05	71000	5.68E+12	5.67E+12	0.000241	4.98E+10
10/4/2016	10411	28.93	533	246	633	879	1.52E-05	57000	3.74E+12	3.73E+12	0.000294	2.68E+10
10/4/2016	10411	21.6	534	335	538	873	1.14E-05	59000	5.18E+12	5.17E+12	0.000218	5.01E+10
10/4/2016	10411	30	535	373	509	882	1.58E-05	56000	3.54E+12	3.53E+12	0.000306	2.44E+10
16/4/2016	12689	24.6	641	328	559	887	1.29E-05	66000	5.09E+12	5.08E+12	0.000253	3.49E+10
16/4/2016	12689	24.6	642	338	542	880	1.29E-05	64000	4.94E+12	4.92E+12	0.000251	3.41E+10
16/4/2016	12689	24.6	643	333	552	885	1.29E-05	65000	5.01E+12	5.00E+12	0.000252	3.44E+10
21/4/2016	10311	19.5	721	474	403	877	1.03E-05	54000	5.25E+12	5.24E+12	0.000198	5.65E+10
21/4/2016	10311	19.5	723	422	476	898	1.03E-05	65000	6.32E+12	6.31E+12	0.000203	6.65E+10
21/4/2016	10311	19.5	724	425	455	880	1.03E-05	66000	6.42E+12	6.41E+12	0.000199	6.89E+10
22/4/2016	10311	22.4	769	324	558	882	1.18E-05	82000	6.94E+12	6.93E+12	0.000229	6.47E+10
22/4/2016	10311	22.4	770	360	539	899	1.18E-05	82000	6.94E+12	6.93E+12	0.000233	6.35E+10
22/4/2016	10311	22.4	771	375	533	908	1.18E-05	82000	6.94E+12	6.93E+12	0.000235	6.28E+10
24/4/2016	10311	23.2	865	302	560	862	1.22E-05	74000	6.05E+12	6.04E+12	0.000231	5.57E+10
24/4/2016	10311	23.2	866	316	566	882	1.22E-05	76000	6.21E+12	6.20E+12	0.000237	5.59E+10

ตารางที่ ข.2 ผลการทำงานของหิ้งกระจายอากาศหัวที่ 2 ระยะเวลาลูกบอลลอย 15 นาที

วันที่	MLSS	อัตราการไหล	จำนวนรอบสะสม	เวลาสูบลูกบอลลอย	เวลาสูบน้ำออก	เวลาการกรองทั้งหมด	Flux	TMPmax	Rt	Rc	ปริมาตรของน้ำออก	α
	mg/l	l/d		วันที่	วันที่	วันที่	m ³ /m ² .s	Pa	m-1	m-1	m ³	m/g
24/4/2016	10311	23.2	867	307	566	873	1.22E-05	75000	6.13E+12	6.12E+12	0.000234	5.57E+10
25/4/2016	10311	20.76	915	355	515	870	1.09E-05	75000	6.85E+12	6.84E+12	0.000209	6.99E+10
25/6/2016	10561	72	933	182	704	886	3.79E-05	2000	5.27E+10	4.16E+10	0.000738	1.17E+08
25/6/2016	10561	72	934	172	747	919	3.79E-05	3000	7.90E+10	6.80E+10	0.000766	1.85E+08
25/6/2016	10561	72	935	368	548	916	3.79E-05	3000	7.90E+10	6.80E+10	0.000763	1.85E+08
25/6/2016	10561	33.6	936	373	526	899	1.77E-05	4000	2.26E+11	2.15E+11	0.00035	1.28E+09
25/6/2016	10561	33.6	937	380	535	915	1.77E-05	4000	2.26E+11	2.15E+11	0.000356	1.26E+09
25/6/2016	10561	28.2	938	378	523	901	1.48E-05	4000	2.69E+11	2.32E+11	0.000294	1.65E+09
25/6/2016	10561	28.2	939	382	521	903	1.48E-05	4000	2.69E+11	2.32E+11	0.000295	1.64E+09
25/6/2016	10561	28.2	940	378	534	912	1.48E-05	5000	3.36E+11	3.00E+11	0.000298	2.10E+09
25/6/2016	10561	28.2	941	378	528	906	1.48E-05	6000	4.04E+11	3.67E+11	0.000296	2.58E+09
25/6/2016	10561	37.8	942	310	592	902	1.99E-05	5000	2.51E+11	2.14E+11	0.000395	1.13E+09
25/6/2016	10561	37.8	943	314	580	894	1.99E-05	8000	4.02E+11	3.65E+11	0.000391	1.94E+09
25/6/2016	10561	37.8	944	356	531	887	1.99E-05	8000	4.02E+11	3.65E+11	0.000388	1.96E+09
25/6/2016	10561	37.8	945	310	587	897	1.99E-05	8000	4.02E+11	3.65E+11	0.000392	1.94E+09
25/6/2016	10561	39.6	946	316	599	915	2.08E-05	8000	3.83E+11	3.47E+11	0.000419	1.72E+09
25/6/2016	10561	39.6	947	313	600	913	2.08E-05	8000	3.83E+11	3.47E+11	0.000418	1.73E+09
25/6/2016	10561	39.6	948	315	554	869	2.08E-05	8000	3.83E+11	3.47E+11	0.000398	1.81E+09

ตารางที่ ข.2 ผลการทำงานของหวักระจ่ายอากาศหัวที่ 2 ระยะเวลาลูกบกรอง 15 นาที

วันที่	MLSS mg/l	อัตราการไหล l/d	จำนวนรอบ สะสม	เวลาสูบลูก อากาศออก วัน/ที่	เวลาสูบน้ำ ออก วัน/ที่	เวลาการ กรองทั้งหมด วัน/ที่	Flux m ³ /m ² .s	TMPmax Pa	Rt m-1	Rc m-1	ปริมาตร ของน้ำออก m ³	α m/g
26/6/2016	10561	34.8	981	361	545	906	1.83E-05	19000	1.04E+12	9.99E+11	0.000365	5.70E+09
26/6/2016	10561	34.8	982	356	567	923	1.83E-05	19000	1.04E+12	9.99E+11	0.000372	5.60E+09
26/6/2016	10561	34.8	983	347	568	915	1.83E-05	20000	1.09E+12	1.05E+12	0.000369	5.95E+09
27/6/2016	10561	16.8	1037	553	343	896	8.84E-06	46000	5.19E+12	5.16E+12	0.000174	6.17E+10
27/6/2016	10561	16.8	1038	581	317	898	8.84E-06	46000	5.19E+12	5.16E+12	0.000175	6.15E+10
27/6/2016	10561	16.8	1039	361	534	895	8.84E-06	54000	6.10E+12	6.06E+12	0.000174	7.25E+10
27/6/2016	10561	16.8	1040	366	554	920	8.84E-06	54000	6.10E+12	6.06E+12	0.000179	7.06E+10
12/9/2016	9867	30	1301	255	605	860	1.58E-05	9000	5.69E+11	5.16E+11	0.000299	3.85E+09
12/9/2016	9867	30	1302	270	599	869	1.58E-05	11000	6.96E+11	6.42E+11	0.000302	4.74E+09
12/9/2016	9867	30	1303	272	613	885	1.58E-05	11000	6.96E+11	6.42E+11	0.000307	4.66E+09
16/9/2016	9867	0	1439	0	0	0	0	0	#DIV/0!		0	
26/9/2016	12467	13.2	1440	439	441	880	6.94E-06	24000	3.45E+12	3.30E+12	0.000134	4.33E+10
26/9/2016	12467	13.2	1441	532	363	895	6.94E-06	32000	4.60E+12	4.45E+12	0.000137	5.74E+10
26/9/2016	12467	13.2	1442	567	319	886	6.94E-06	32000	4.60E+12	4.45E+12	0.000135	5.80E+10

ตารางที่ ข.3 ผลการทำงานของหวักระจ่ายอากาศหัวที่ 3 ระยะเวลาลูกบวกรอง 30 นาที

วันที่	MLSS mg/l	อัตราการไหล	จำนวนรอบ สะสม	เวลาสูบลูก อากาศออก	วันที่	เวลาสูบลูก ออก	วันที่	เวลาการ กรองทั้งหมด	Flux m ³ /m ² .s	TMPmax Pa	Rt m-1	Rc m-1	ปริมาตร ของน้ำออก	α m/g
		l/d		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่					m ³	
28/3/2016									0	0			0	
1/4/2016	9983	17.28	97	373	1447	1820	1820	1820	9.09E-06	51000	5.60E+12	5.59E+12	0.000364	3.38E+10
1/4/2016	9983	17.28	98	441	1381	1822	1822	1822	9.09E-06	59000	6.48E+12	6.47E+12	0.000364	3.91E+10
3/4/2016	10411	21.6	145	488	1333	1821	1821	1821	1.14E-05	62000	5.45E+12	5.44E+12	0.000455	2.52E+10
3/4/2016	10411	21.6	146	443	1381	1824	1824	1824	1.14E-05	64000	5.62E+12	5.61E+12	0.000456	2.60E+10
4/4/2016	10411	22.67	169	487	1335	1822	1822	1822	1.19E-05	68000	5.69E+12	5.68E+12	0.000478	2.51E+10
4/4/2016	10411	22.67	170	483	1365	1848	1848	1848	1.19E-05	70000	5.86E+12	5.85E+12	0.000485	2.55E+10
5/4/2016	10411	20.91	193	545	1278	1823	1823	1823	1.10E-05	71000	6.44E+12	6.43E+12	0.000441	3.08E+10
5/4/2016	10411	20.91	194	502	1332	1834	1834	1834	1.10E-05	70000	6.35E+12	6.34E+12	0.000444	3.02E+10
6/4/2016	10411	24.8	216	410	1419	1829	1829	1829	1.30E-05	84000	6.43E+12	6.42E+12	0.000525	2.58E+10
6/4/2016	10411	24.8	217	436	1396	1832	1832	1832	1.30E-05	83000	6.35E+12	6.34E+12	0.000526	2.55E+10
8/4/2016	10411	31.2	203	537	1258	1795	1795	1795	1.64E-05	83000	5.05E+12	5.04E+12	0.000648	1.64E+10
8/4/2016	10411	20.4	204	589	1201	1790	1790	1790	1.07E-05	84000	7.81E+12	7.80E+12	0.000423	3.90E+10
9/4/2016	10411	22.79	230	460	1368	1828	1828	1828	1.20E-05	80000	6.66E+12	6.65E+12	0.000482	2.91E+10
9/4/2016	10411	18	231	558	1281	1839	1839	1839	9.47E-06	80000	8.43E+12	8.42E+12	0.000383	4.65E+10
10/4/2016	10411	17.1	252	722	1057	1779	1779	1779	8.99E-06	77000	8.54E+12	8.48E+12	0.000352	5.09E+10
10/4/2016	10411	14.4	253	786	1031	1817	1817	1817	7.58E-06	76000	1.00E+13	9.95E+12	0.000303	6.94E+10
16/4/2016	12689	28.2	272	385	1369	1754	1754	1754	1.48E-05	74000	4.98E+12	4.91E+12	0.000572	1.49E+10

ตารางที่ ข.3 ผลการทำงานของหวักระจ่ายอากาศหัวที่ 3 ระยะเวลาลูกบวกรอง 30 นาที

วันที่	MLSS mg/l	อัตราการไหล l/d	จำนวนรอบ สะสม	เวลาสูบลูก อากาศออก วินาที	เวลาสูบน้ำ ออก วินาที	เวลาการ กรองทั้งหมด วินาที	Flux m ³ /m ² .s	TMPmax Pa	Rt m-1	Rc m-1	ปริมาตร ของน้ำออก m ³	α m/g
16/4/2016	12689	28.2	273	431	1361	1792	1.48E-05	72000	4.84E+12	4.78E+12	0.000585	1.42E+10
21/4/2016	10311	26.62	395	608	1199	1807	1.40E-05	78000	5.56E+12	5.49E+12	0.000557	2.11E+10
21/4/2016	10311	21.6	396	460	1307	1767	1.14E-05	75000	6.59E+12	6.52E+12	0.000442	3.15E+10
22/4/2016	10311	22	419	459	1349	1808	1.16E-05	84000	7.24E+12	7.18E+12	0.00046	3.33E+10
22/4/2016	10311	22	420	479	1287	1766	1.16E-05	82000	7.07E+12	7.01E+12	0.00045	3.32E+10
24/4/2016	10311	16	467	438	1349	1787	8.42E-06	77000	9.13E+12	9.07E+12	0.000331	5.85E+10
24/4/2016	10311	16	468	476	1266	1742	8.42E-06	79000	9.37E+12	9.30E+12	0.000323	6.15E+10
25/6/2016	10561	78	501	155	822	977	4.10E-05	0	0	0	0.000882	
25/6/2016	10561	44.4	501	191	1601	1792	2.34E-05	3000	1.28E+11	1.41E+09	0.000921	3200589
25/6/2016	10561	44.4	502	378	1459	1837	2.34E-05	2000	8.55E+10		0.000944	
25/6/2016	10561	28.8	503	380	1437	1817	1.52E-05	3000	1.98E+11	7.08E+10	0.000606	2.44E+08
25/6/2016	10561	28.8	504	500	1294	1794	1.52E-05	5000	3.29E+11	2.03E+11	0.000598	7.06E+08
25/6/2016	10561	38.4	505	410	1384	1794	2.02E-05	3000	1.48E+11	2.14E+10	0.000797	56020462
25/6/2016	10561	38.4	506	400	1392	1792	2.02E-05	3000	1.48E+11	2.14E+10	0.000796	56082985
25/6/2016	10561	37.2	507	406	1418	1824	1.96E-05	3000	1.53E+11	2.62E+10	0.000785	69557538
26/6/2016	10561	36.6	524	396	1398	1794	1.93E-05	2000	1.04E+11		0.00076	
26/6/2016	10561	36.6	525	397	1442	1839	1.93E-05	4000	2.07E+11	8.06E+10	0.000779	2.15E+08
27/6/2016	10561	36	553	392	1402	1794	1.89E-05	6000	3.16E+11	1.89E+11	0.000748	5.28E+08

ตารางที่ ข.3 ผลการทำงานของหวักระจ่ายอากาศหัวที่ 3 ระยะเวลาลูกบวกรอง 30 นาที

วันที่	MLSS mg/l	อัตราการไหล l/d	จำนวนรอบ สะสม	เวลาสูบลูก อากาศออก วินาที	เวลาสูบน้ำ ออก วินาที	เวลาการ กรองทั้งหมด วินาที	Flux m ³ /m ² .s	TMPmax Pa	Rt m-1	Rc m-1	ปริมาตร ของน้ำออก m ³	α m/g
27/6/2016	10561	36	554	400	1388	1788	1.89E-05	6000	3.16E+11	1.89E+11	0.000745	5.30E+08
30/6/2016	10561	35.4	624	416	1372	1788	1.86E-05	20000	1.07E+12	9.45E+11	0.000733	2.69E+09
30/6/2016	10561	35.4	625	422	1347	1769	1.86E-05	26000	1.39E+12	1.27E+12	0.000725	3.64E+09
3/7/2016	10561	25.14	695	778	1050	1828	1.32E-05	47000	3.55E+12	3.42E+12	0.000532	1.34E+10
3/7/2016	10561	20.4	696	661	1119	1780	1.07E-05	42000	3.91E+12	3.78E+12	0.00042	1.87E+10
4/7/2016	10561	18.78	719	919	885	1804	9.88E-06	54000	5.45E+12	5.33E+12	0.000392	2.83E+10
4/7/2016	10561	18.78	720	936	827	1763	9.88E-06	54000	5.45E+12	5.33E+12	0.000383	2.90E+10
12/9/2016	9867	39.6	723	401	1419	1820	2.08E-05	8000	3.83E+11	1.14E+11	0.000834	3.06E+08
12/9/2016	9867	39.6	724	400	1362	1762	2.08E-05	9000	4.31E+11	1.62E+11	0.000808	4.48E+08
13/9/2016	9867	37.2	745	387	1442	1829	1.96E-05	8000	4.08E+11	1.39E+11	0.000787	3.94E+08
13/9/2016	9867	37.2	746	396	1443	1839	1.96E-05	9000	4.59E+11	1.90E+11	0.000792	5.35E+08
14/9/2016	9867	39.6	770	407	1431	1838	2.08E-05	9000	4.31E+11	1.62E+11	0.000842	4.29E+08
14/9/2016	9867	39.6	771	384	1432	1816	2.08E-05	9000	4.31E+11	1.62E+11	0.000832	4.35E+08
15/9/2016	9867	38.4	791	428	1360	1788	2.02E-05	16000	7.90E+11	5.22E+11	0.000795	1.46E+09
15/9/2016	9867	38.4	792	399	1395	1794	2.02E-05	14000	6.92E+11	4.23E+11	0.000797	1.18E+09
19/9/2016	9089	22.2	818	675	1153	1828	1.17E-05	48000	4.10E+12	3.83E+12	0.00047	1.98E+10
19/9/2016	9089	22.2	819	598	1184	1782	1.17E-05	50000	4.27E+12	4.00E+12	0.000458	2.12E+10
20/9/2016	9089	27.69	841	465	1345	1810	1.46E-05	66000	4.52E+12	4.51E+12	0.00058	1.88E+10

ตารางที่ ข.3 ผลการทำงานของหวักระจ่ายอากาศหัวที่ 3 ระยะเวลาสุบกรอง 30 นาที

วันที่	MLSS mg/l	อัตราการไหล l/d	จำนวนรอบ สะสม	เวลาสูบ อากาศออก วินาที	เวลาสูบน้ำ ออก วินาที	เวลาการ กรองทั้งหมด วินาที	Flux m ³ /m ² .s	TMPmax Pa	Rt m-1	Rc m-1	ปริมาตร ของน้ำออก m ³	α m/g
20/9/2016	9089	27.69	842	470	1319	1789	1.46E-05	68000	4.66E+12	4.65E+12	0.000573	1.96E+10
26/9/2016	12467	29.4	843	507	1354	1861	1.55E-05	28000	1.81E+12	1.80E+12	0.000633	5.00E+09
26/9/2016	12467	29.4	844	546	1283	1829	1.55E-05	32000	2.06E+12	2.05E+12	0.000622	5.82E+09
28/9/2016	12467	21.6	888	735	1117	1852	1.14E-05	64000	5.62E+12	5.61E+12	0.000463	2.14E+10
28/9/2016	12467	21.6	889	685	1117	1802	1.14E-05	64000	5.62E+12	5.61E+12	0.000451	2.20E+10
29/9/2016	12467	15	912	797	965	1762	7.89E-06	66000	8.35E+12	8.34E+12	0.000306	4.81E+10
29/9/2016	12467	15	913	797	1016	1813	7.89E-06	68000	8.60E+12	8.59E+12	0.000315	4.82E+10
1/10/2016	12467	27	940	520	1304	1824	1.42E-05	72000	5.06E+12	5.05E+12	0.00057	1.56E+10
1/10/2016	12467	27	941	504	1262	1766	1.42E-05	71000	4.99E+12	4.98E+12	0.000552	1.59E+10
2/10/2016	12467	16.8	966	748	1060	1808	8.84E-06	77000	8.69E+12	8.65E+12	0.000352	4.34E+10
2/10/2016	12467	16.8	967	751	1019	1770	8.84E-06	76000	8.58E+12	8.54E+12	0.000344	4.38E+10

ตารางที่ ข.4 ผลการทำงานของหวักระจ่ายอากาศหัวที่ 4 ระยะเวลาสุบกรอง 30 นาที

วันที่	MLSS mg/l	อัตราการไหล l/d	จำนวนรอบ สะสม	เวลาสูบ อากาศออก วินาที	เวลาสูบน้ำ ออก วินาที	เวลาการ กรองทั้งหมด วินาที	Flux m3/m2.s	TMPmax Pa	Rt m-1	Rc m-1	ปริมาตร ของน้ำออก m3	α m/g
28/3/2016							0	0			0	
1/4/2016	9983	17.28	97	375	1389	1764	9.09E-06	65000	7.14E+12	7.12E+12	0.000353	4.45E+10
1/4/2016	9983	17.28	82	0	0	0	9.09E-06	0	0	0	0	
3/4/2016	10411	21.6	145	394	1373	1767	1.14E-05	61000	5.36E+12	5.36E+12	0.000442	2.56E+10
3/4/2016	10411	21.6	146	385	1387	1772	1.14E-05	58000	5.09E+12	5.09E+12	0.000443	2.43E+10
4/4/2016	10411	22.67	168	396	1409	1805	1.19E-05	61000	5.11E+12	5.11E+12	0.000474	2.28E+10
4/4/2016	10411	22.67	169	404	1361	1765	1.19E-05	64000	5.36E+12	5.36E+12	0.000463	2.44E+10
5/4/2016	10411	20.91	193	402	1363	1765	1.10E-05	68000	6.17E+12	6.17E+12	0.000427	3.05E+10
5/4/2016	10411	20.91	194	405	1375	1780	1.10E-05	66000	5.99E+12	5.99E+12	0.000431	2.94E+10
6/4/2016	10411	24.8	216	311	1491	1802	1.30E-05	78000	5.97E+12	5.97E+12	0.000517	2.44E+10
6/4/2016	10411	24.8	217	327	1432	1759	1.30E-05	78000	5.97E+12	5.97E+12	0.000505	2.50E+10
8/4/2016	10411	31.2	203	395	1397	1792	1.64E-05	80000	4.86E+12	4.86E+12	0.000647	1.59E+10
8/4/2016	10411	20.4	204	467	1365	1832	1.07E-05	80000	7.44E+12	7.44E+12	0.000433	3.63E+10
9/4/2016	10411	22.79	230	401	1351	1752	1.20E-05	79000	6.58E+12	6.58E+12	0.000462	3.01E+10
9/4/2016	10411	18	231	448	1323	1771	9.47E-06	79000	8.33E+12	8.33E+12	0.000369	4.77E+10
10/4/2016	10411	17.1	252	422	1425	1847	8.99E-06	76000	8.43E+12	8.35E+12	0.000365	4.83E+10
10/4/2016	10411	14.4	253	466	1319	1785	7.58E-06	73000	9.62E+12	9.54E+12	0.000298	6.77E+10
16/4/2016	12689	28.2	272	447	1394	1841	1.48E-05	76000	5.11E+12	5.03E+12	0.000601	1.45E+10

ตารางที่ ข.4 ผลการทำงานของหวักรกระจายอากาศหัวที่ 4 ระยะเวลาสุบกรอง 30 นาที

วันที่	MLSS mg/l	อัตราการใช้ l/d	จำนวนรอบ สะสม	เวลาสูบ อากาศออก วัน/ที่	เวลาสูบน้ำ ออก วัน/ที่	เวลาการ กรองทั้งหมด วัน/ที่	Flux m ³ /m ² .s	TMPmax Pa	Rt m-1	Rc m-1	ปริมาตร ของน้ำออก m ³	α m/g
16/4/2016	12689	28.2	273	475	1325	1800	1.48E-05	77000	5.18E+12	5.10E+12	0.000588	1.50E+10
21/4/2016	10311	26.62	395	552	1250	1802	1.40E-05	76000	5.42E+12	5.33E+12	0.000555	2.05E+10
21/4/2016	10311	21.6	396	646	1149	1795	1.14E-05	74000	6.50E+12	6.42E+12	0.000449	3.05E+10
22/4/2016	10311	22	419	529	1269	1798	1.16E-05	83000	7.16E+12	7.08E+12	0.000458	3.30E+10
22/4/2016	10311	22	420	547	1254	1801	1.16E-05	82000	7.07E+12	6.99E+12	0.000459	3.25E+10
24/4/2016	10311	16	466	617	1188	1805	8.42E-06	79000	9.37E+12	9.28E+12	0.000334	5.93E+10
24/4/2016	10311	16	467	593	1236	1829	8.42E-06	79000	9.37E+12	9.28E+12	0.000339	5.85E+10
25/6/2016	10561	78	500	149	1618	1767	4.10E-05	3000	7.30E+10		0.001595	
25/6/2016	10561	44.4	501	332	1477	1809	2.34E-05	0	0		0.00093	
25/6/2016	10561	44.4	489	0	0	0	2.34E-05	0	0		0	
25/6/2016	10561	28.8	502	346	1443	1789	1.52E-05	2000	1.32E+11		0.000596	
25/6/2016	10561	28.8	489	0	0	0	1.52E-05	0	0		0	
25/6/2016	10561	38.4	505	311	1510	1821	2.02E-05	3000	1.48E+11	1.59E+10	0.000809	40833894
25/6/2016	10561	38.4	489	0	0	0	2.02E-05	0	0		0	
25/6/2016	10561	37.2	507	358	1459	1817	1.96E-05	3000	1.53E+11	2.06E+10	0.000782	54973839
26/6/2016	10561	36.6	524	367	1396	1763	1.93E-05	2000	1.04E+11		0.000747	
26/6/2016	10561	36.6	525	366	1393	1759	1.93E-05	2000	1.04E+11		0.000745	
27/6/2016	10561	36	552	384	1425	1809	1.89E-05	6000	3.16E+11	1.84E+11	0.000754	5.08E+08

ตารางที่ ข.4 ผลการทำงานของหวักระจ่ายอากาศหัวที่ 4 ระยะเวลาลูกบวกรอง 30 นาที

วันที่	MLSS mg/l	อัตราการไหล l/d	จำนวนรอบ สะสม	เวลาสูบลูก อากาศออก วัน/ที่	เวลาสูบน้ำ ออก วัน/ที่	เวลาการ กรองทั้งหมด วัน/ที่	Flux m ³ /m ² .s	TMPmax Pa	Rt m-1	Rc m-1	ปริมาตร ของน้ำออก m ³	α m/g
27/6/2016	10561	36	553	405	1409	1814	1.89E-05	6000	3.16E+11	1.84E+11	0.000756	5.07E+08
30/6/2016	10561	35.4	623	391	1401	1792	1.86E-05	20000	1.07E+12	9.39E+11	0.000734	2.67E+09
30/6/2016	10561	35.4	624	409	1424	1833	1.86E-05	22000	1.18E+12	1.05E+12	0.000751	2.90E+09
3/7/2016	10561	25.14	694	617	1142	1759	1.32E-05	42000	3.17E+12	3.04E+12	0.000512	1.24E+10
3/7/2016	10561	20.4	695	593	1220	1813	1.07E-05	50000	4.65E+12	4.52E+12	0.000428	2.20E+10
4/7/2016	10561	18.78	718	816	984	1800	9.88E-06	50000	5.05E+12	4.92E+12	0.000391	2.62E+10
4/7/2016	10561	18.78	719	898	925	1823	9.88E-06	54000	5.45E+12	5.32E+12	0.000396	2.80E+10
12/9/2016	9867	39.6	722	367	1445	1812	2.08E-05	8000	3.83E+11	4.32E+10	0.000831	1.16E+08
12/9/2016	9867	39.6	723	367	1426	1793	2.08E-05	8000	3.83E+11	4.32E+10	0.000822	1.17E+08
13/9/2016	9867	37.2	744	373	1432	1805	1.96E-05	8000	4.08E+11	6.79E+10	0.000777	1.95E+08
13/9/2016	9867	37.2	745	395	1369	1764	1.96E-05	8000	4.08E+11	6.79E+10	0.00076	1.99E+08
14/9/2016	9867	39.6	769	406	1355	1761	2.08E-05	9000	4.31E+11	9.11E+10	0.000807	2.52E+08
14/9/2016	9867	39.6	770	396	1415	1811	2.08E-05	9000	4.31E+11	9.11E+10	0.00083	2.45E+08
15/9/2016	9867	38.4	789	365	1453	1818	2.02E-05	14000	6.92E+11	3.52E+11	0.000808	9.70E+08
15/9/2016	9867	38.4	790	370	1440.6	1810.6	2.02E-05	14000	6.92E+11	3.52E+11	0.000805	9.74E+08
19/9/2016	9089	22.2	816	545	1261	1806	1.17E-05	44000	3.76E+12	3.42E+12	0.000464	1.78E+10
19/9/2016	9089	22.2	817	531	1268	1799	1.17E-05	44000	3.76E+12	3.42E+12	0.000462	1.79E+10
20/9/2016	9089	27.69	840	469	1314	1783	1.46E-05	70000	4.80E+12	4.79E+12	0.000571	2.03E+10

ตารางที่ ข.4 ผลการทำงานของหวักระจ่ายอากาศหัวที่ 4 ระยะเวลาลูกบวกรอง 30 นาที

วันที่	MLSS mg/l	อัตราการไหล l/d	จำนวนรอบ สะสม	เวลาสูบ อากาศออก วันที่	เวลาสูบน้ำ ออก วันที่	เวลาการ กรองทั้งหมด วันที่	Flux m ³ /m ² .s	TMPmax Pa	Rt m-1	Rc m-1	ปริมาตร ของน้ำออก m ³	α m/g
20/9/2016	9089	27.69	841	499	1271	1770	1.46E-05	68000	4.66E+12	4.65E+12	0.000567	1.98E+10
26/9/2016	12467	29.4	843	469	1305	1774	1.55E-05	29000	1.87E+12	1.86E+12	0.000604	5.44E+09
26/9/2016	12467	29.4	844	479	1254	1733	1.55E-05	30000	1.94E+12	1.93E+12	0.00059	5.77E+09
28/9/2016	12467	21.6	887	579	1232	1811	1.14E-05	62000	5.45E+12	5.44E+12	0.000453	2.12E+10
28/9/2016	12467	21.6	888	636	1163	1799	1.14E-05	62000	5.45E+12	5.44E+12	0.00045	2.13E+10
29/9/2016	12467	15	912	806	981	1787	7.89E-06	68000	8.60E+12	8.59E+12	0.00031	4.89E+10
29/9/2016	12467	15	913	778	1006	1784	7.89E-06	68000	8.60E+12	8.59E+12	0.00031	4.89E+10
1/10/2016	12467	27	939	537	1214	1751	1.42E-05	74000	5.20E+12	5.19E+12	0.000547	1.67E+10
1/10/2016	12467	27	940	552	1264	1816	1.42E-05	74000	5.20E+12	5.19E+12	0.000568	1.61E+10
2/10/2016	12467	16.8	965	777	1014	1791	8.84E-06	80000	9.03E+12	8.84E+12	0.000348	4.48E+10
2/10/2016	12467	16.8	966	780	1018	1798	8.84E-06	78000	8.81E+12	8.62E+12	0.00035	4.35E+10

ตารางที่ ข.5 ผลการทำงานของหวั่งกระจายอากาศหัวที่ 5 ระยะเวลาลูกบกรอง 60 นาที

วันที่	MLSS mg/l	อัตราการใช้ โอดี	จำนวนรอบ สะสม	เวลาสูบลูก อากาศออก	เวลาสูบลูก ออก	เวลาการ กรองทั้งหมด	Flux m ³ /m ² .s	TMPmax Pa	Rt m-1	Rc m-1	ปริมาตร ของน้ำออก	α m/g
		l/d		วันที่	วันที่	วันที่					m ³	
28/3/2016							0	0			0	
1/4/2016	9983	17.76	49	577	3047	3624	9.34E-06	63000	6.73E+12	6.71E+12	0.000745	1.99E+10
3/4/2016	10411	21.2	72	436	3180	3616	1.12E-05	72000	6.44E+12	6.42E+12	0.000887	1.53E+10
4/4/2016	10411	19.2	84	496	3114	3610	1.01E-05	72000	7.11E+12	7.10E+12	0.000802	1.87E+10
5/4/2016	10411	20.57	96	541	3117	3658	1.08E-05	75000	6.92E+12	6.90E+12	0.000871	1.67E+10
6/4/2016	10411	19.2	108	528	3084	3612	1.01E-05	72000	7.11E+12	7.10E+12	0.000803	1.87E+10
8/4/2016	10411	24	102	491	3130	3621	1.26E-05	76000	6.01E+12	5.99E+12	0.001006	1.26E+10
9/4/2016	10411	19.68	115	506	3088	3594	1.04E-05	76000	7.32E+12	7.31E+12	0.000819	1.89E+10
10/4/2016	10411	19.73	126	663	2949	3612	1.04E-05	88000	8.46E+12	8.44E+12	0.000825	2.16E+10
16/4/2016	12689	23.4	146	391	3224	3615	1.23E-05	86000	6.97E+12	6.87E+12	0.000979	1.22E+10
21/4/2016	10311	22.8	166	438	3150	3588	1.20E-05	64000	5.32E+12	5.22E+12	0.000947	1.18E+10
22/4/2016	10311	22.4	178	320	3297	3617	1.18E-05	88000	7.45E+12	7.35E+12	0.000938	1.67E+10
24/4/2016	10311	18	202	343	3263	3606	9.47E-06	88000	9.27E+12	9.17E+12	0.000751	2.61E+10
25/6/2016	10561	30	220	567	3052	3619	1.58E-05	2000	1.26E+11	5.12E+10	0.001257	84876691
25/6/2016	10561	33.6	221	516	3116	3632	1.77E-05	2000	1.13E+11	3.77E+10	0.001412	55527514
25/6/2016	10561	32.4	222	530	3100	3630	1.70E-05	2000	1.17E+11	4.18E+10	0.001361	64015681
26/6/2016	10561	33	231	495	3137	3632	1.74E-05	2000	1.15E+11	3.97E+10	0.001387	59620036
27/6/2016	10561	30.6	245	398	3231	3629	1.61E-05	14000	8.68E+11	7.93E+11	0.001285	1.28E+09

ตารางที่ ข.5 ผลการทำงานของหวั่งกระจายอากาศหัวที่ 5 ระยะเวลาลูกบกรอง 60 นาที

วันที่	MLSS	อัตราการไหล	จำนวนรอบ สะสม	เวลาสูบลูก อากาศออก	เวลาสูบน้ำ ออก	เวลาการ กรองทั้งหมด	Flux	TMPmax	Rt	Rc	ปริมาตร ของน้ำออก	α
	mg/l	l/d		วินาที	วินาที	วินาที	m ³ /m ² .s	Pa	m-1	m-1	m ³	m/g
30/6/2016	10561	9.6	280	1106	2578	3684	5.05E-06	63000	1.24E+13	1.24E+13	0.000409	6.30E+10
12/9/2016	9867	28.8	274	576	3051	3627	1.52E-05	8000	5.27E+11	4.81E+11	0.001209	8.87E+08
13/9/2016	9867	49.2	285	393	3236	3629	2.59E-05	10000	3.86E+11	3.40E+11	0.002067	3.67E+08
14/9/2016	9867	40.2	298	410	3214	3624	2.11E-05	12000	5.66E+11	5.20E+11	0.001686	6.88E+08
15/9/2016	9867	32.4	308	433	3197	3630	1.70E-05	26000	1.52E+12	1.48E+12	0.001361	2.42E+09
16/9/2016	9867	37.33	321	509	3103	3612	1.96E-05	42000	2.13E+12	2.09E+12	0.001561	2.98E+09
19/9/2016	9089	13.8	321	913	2711	3624	7.26E-06	48000	6.60E+12	6.55E+12	0.000579	2.74E+10
20/9/2016	9089	13.29	333	1310	2316	3626	6.99E-06	71000	1.01E+13	1.01E+13	0.000558	4.38E+10
26/9/2016	12467	43.2	327	451	3181	3632	2.27E-05	17000	7.47E+11	7.00E+11	0.001816	6.80E+08
28/9/2016	12467	30.6	350	643	3039	3682	1.61E-05	50000	3.10E+12	3.05E+12	0.001304	4.13E+09
29/9/2016	12467	24.6	363	684	2948	3632	1.29E-05	54000	4.16E+12	4.12E+12	0.001034	7.03E+09
1/10/2016	12467	20.4	376	901	2735	3636	1.07E-05	62000	5.77E+12	5.72E+12	0.000859	1.18E+10
2/10/2016	12467	13.2	389	1047	2589	3636	6.94E-06	64000	9.20E+12	9.17E+12	0.000556	2.91E+10

ตารางที่ ข.6 ผลการทำงานของหวักระจ่ายอากาศหัวที่ 6 ระยะเวลาสุบกรอง 60 นาที

วันที่	MLSS mg/l	อัตราการไหล l/d	จำนวนรอบ สะสม	เวลาสูบ อากาศออก วินาที	เวลาสูบน้ำ ออก วินาที	เวลาการ กรองทั้งหมด วินาที	Flux m ³ /m ² .s	TMPmax Pa	Rt m-1	Rc m-1	ปริมาตร ของน้ำออก m ³	α m/g
28/3/2016							0	0			0	
1/4/2016	9983	17.76	48	789	2824	3613	9.34E-06	66000	7.05E+12	7.02E+12	0.000743	2.08E+10
3/4/2016	10411	21.2	73	811	2802	3613	1.12E-05	76000	6.80E+12	6.77E+12	0.000887	1.61E+10
4/4/2016	10411	19.2	85	890	2753	3643	1.01E-05	81000	8.00E+12	7.97E+12	0.00081	2.08E+10
5/4/2016	10411	20.57	97	851	2761	3612	1.08E-05	80000	7.38E+12	7.35E+12	0.00086	1.81E+10
6/4/2016	10411	19.2	108	867	2746	3613	1.01E-05	80000	7.90E+12	7.88E+12	0.000803	2.07E+10
8/4/2016	10411	24	101	827	2783	3610	1.26E-05	84000	6.64E+12	6.61E+12	0.001003	1.39E+10
9/4/2016	10411	19.68	115	1010	2604	3614	1.04E-05	82000	7.90E+12	7.87E+12	0.000823	2.02E+10
10/4/2016	10411	19.73	125	690	2922	3612	1.04E-05	91000	8.75E+12	8.72E+12	0.000825	2.23E+10
16/4/2016	12689	23.4	145	527	3066	3593	1.23E-05	69000	5.59E+12	5.44E+12	0.000973	9.70E+09
21/4/2016	10311	22.8	166	565	3057	3622	1.20E-05	66000	5.49E+12	5.34E+12	0.000956	1.19E+10
22/4/2016	10311	22.4	177	371	3242	3613	1.18E-05	88000	7.45E+12	7.30E+12	0.000937	1.66E+10
24/4/2016	10311	18	201	541	3265	3806	9.47E-06	86000	9.06E+12	8.91E+12	0.000793	2.40E+10
25/6/2016	10561	30	219	433	3182	3615	1.58E-05	8000	5.06E+11	4.34E+11	0.001255	7.20E+08
25/6/2016	10561	33.6	220	573	3040	3613	1.77E-05	12000	6.78E+11	6.06E+11	0.001405	8.98E+08
25/6/2016	10561	32.4	221	570	3045	3615	1.70E-05	11000	6.44E+11	5.72E+11	0.001356	8.79E+08
26/6/2016	10561	33	230	611	3006	3617	1.74E-05	21000	1.21E+12	1.14E+12	0.001381	1.71E+09
27/6/2016	10561	30.6	244	1336	2277	3613	1.61E-05	45000	2.79E+12	2.72E+12	0.00128	4.42E+09

ตารางที่ ข.6 ผลการทำงานของหวั่งกระจายอากาศหวั่งที่ 6 ระยะเวลาดูดกรอง 60 นาที

วันที่	MLSS	อัตราการไหล	จำนวนรอบสะสม	เวลาสูบล้ออากาศออก	เวลาสูบล้อออก	เวลาการกรองทั้งหมด	Flux	TMPmax	Rt	Rc	ปริมาตรของน้ำออก	α
	mg/l	l/d		วันที่	วันที่	วันที่	m ³ /m ² .s	Pa	m-1	m-1	m ³	m/g
30/6/2016	10561	9.6	280	1607	2007	3614	5.05E-06	71000	1.40E+13	1.40E+13	0.000402	7.24E+10
12/9/2016	9867	28.8	275	634	2986	3620	1.52E-05	8000	5.27E+11	4.97E+11	0.001207	9.19E+08
13/9/2016	9867	49.2	286	384	3217	3601	2.59E-05	9000	3.47E+11	3.17E+11	0.002051	3.45E+08
14/9/2016	9867	40.2	298	397	3181	3578	2.11E-05	11000	5.19E+11	4.89E+11	0.001665	6.55E+08
15/9/2016	9867	32.4	308	759	2849	3608	1.70E-05	17000	9.95E+11	9.65E+11	0.001353	1.59E+09
16/9/2016	9867	37.33	322	0	0	0	1.96E-05	0	0	0	0	
19/9/2016	9089	13.8	323	998	2623	3621	7.26E-06	37000	5.09E+12	5.06E+12	0.000578	2.12E+10
20/9/2016	9089	13.29	334	804	2803	3607	6.99E-06	66000	9.42E+12	9.41E+12	0.000555	4.10E+10
26/9/2016	12467	43.2	328	450	3150	3600	2.27E-05	10000	4.39E+11	4.27E+11	0.0018	4.19E+08
28/9/2016	12467	30.6	350	443	3089	3532	1.61E-05	43000	2.67E+12	2.65E+12	0.001251	3.74E+09
29/9/2016	12467	24.6	362	552	3052	3604	1.29E-05	50000	3.86E+12	3.84E+12	0.001026	6.61E+09
1/10/2016	12467	20.4	375	618	3007	3625	1.07E-05	56000	5.21E+12	5.20E+12	0.000856	1.07E+10
2/10/2016	12467	13.2	388	936	2670	3606	6.94E-06	60000	8.62E+12	8.58E+12	0.000551	2.75E+10

จากผลการทำงานของหัวกระจายอากาศ สามารถคำนวณค่าความต้านทานต่างๆของหัวกระจายอากาศได้ดังต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 1

จากตารางที่ ข.1 ผลการทำงานของหัวกระจายอากาศหัวที่ 1 ระยะเวลาสูบลมกรอง 15 นาที วันที่ 4 เมษายน 2559 บันทึกผลการทำงานของหัวกระจายอากาศได้ดังนี้

MLSS	9983	มิลลิกรัม/ลิตร
อัตราการไหล	24.96	ลิตร/วัน
จำนวนรอบ	194	รอบ
เวลาในการสูบลมอากาศ	489	วินาที
เวลาในการสูบน้ำ	411	วินาที
เวลาในการกรองรวม	900	วินาที
ความดันผ่านหัวกระจายอากาศสูงสุด	42000	ปาสคาล

จากผลการทำงานของหัวกระจายอากาศสามารถคำนวณค่าต่างๆได้ดังนี้

$$1. \quad J = Q/A$$

หัวกระจายอากาศมีพื้นที่หน้าตัด 0.22 ตร.ม./ม. และมีความยาว 0.10 ม. ดังนั้น

$$J = 24.96 / (0.22 \times 0.10 \times 24 \times 3600 \times 1000)$$

$$J = 1.31 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-s}$$

จะได้ค่าฟลักซ์การกรองเท่ากับ $1.31 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-s}$

$$2. \quad R_t = \Delta P / \mu J$$

$$R_t = 42000 / (1.002 \times 10^{-3} \times 1.31 \times 10^{-5})$$

$$R_t = 3.19 \times 10^{12}$$

จะได้ค่าความต้านทานรวมเท่ากับ $3.19 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$

$$3. \quad R_t = R_m + R_p + R_c$$

$$R_c = R_t - (R_m + R_p)$$

จากตารางที่ ก.13 ช่วงเวลาการเดินระบบอยู่ในช่วงก่อนการทำความสะอาดด้วยสารเคมีครั้งที่ 1 ดังนั้นมีค่า $R_m = 8.77 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และ $R_p = 0 \text{ m}^{-1}$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } R_c &= 3.19 \times 10^{12} - 8.77 \times 10^9 \\ &= 3.18 \times 10^{12} \end{aligned}$$

จะได้ค่าความต้านทานของชั้นเค้กเท่ากับ $3.18 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$

$$\begin{aligned} 4. \quad \text{ปริมาตรน้ำออก} &= \text{อัตราการไหลน้ำออก} \times \text{ระยะเวลาสูบกรอง} \\ &= (24.96 \times 900) / (24 \times 3600 \times 1000) \\ &= 0.00026 \end{aligned}$$

จะได้ปริมาตรน้ำออกเท่ากับ 0.00026 m^3

$$\begin{aligned} 5. \quad R_c &= \alpha s V / A \\ \alpha &= R_c A / s V \\ &= 3.18 \times 10^{12} \times (0.22 \times 0.10) / (9983 \times 0.00026) \\ &= 2.70 \times 10^{10} \end{aligned}$$

จะได้ค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นเค้กเท่ากับ 2.70×10^{10}



ภาคผนวก ค

การคำนวณระดับการดูดซับถาวรและการประมาณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตัวอย่างที่ 1 การคำนวณระดับการอุดต้นถาวร จากตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศหลังการถอดล้างครั้งที่ 2 มีค่าเท่ากับ $4.05 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ มีจำนวนรอบการทำงานสะสมเท่ากับ 1056 รอบ และค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศหลังการถอดล้างครั้งที่ 3 มีค่าเท่ากับ $2.32 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ มีจำนวนรอบการทำงานสะสมเท่ากับ 1438 รอบ สามารถคำนวณค่าระดับการอุดต้นถาวรได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad R_{m,i} &= (1+r)^i R_{m,0} \\ 2.32 \times 10^{10} &= (1+r)^{(1438-1056)} \times 4.05 \times 10^9 \\ r &= 0.004577 \end{aligned}$$

จะได้ค่าระดับการอุดต้นถาวรเท่ากับ 0.004577

ตัวอย่างที่ 2 การประมาณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศด้วยค่าระดับการอุดต้นถาวร จากตารางที่ 4.8 ถึงปฏิกิริยาที่ 3 ระยะเวลาสูบกรอง 60 นาที มีระดับการอุดต้นถาวรเฉลี่ยเท่ากับ 0.002455 หัวกระจายอากาศมีค่าความต้านทานเริ่มต้นเท่ากับ $1.72 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และมีความต้านทานก่อนล้างหัวกระจายอากาศ ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของความต้านทานสูงสุดที่ยอมรับได้เท่ากับ $6.05 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ สามารถคำนวณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad R_{m,i} &= (1+r)^i R_{m,0} \\ 6.05 \times 10^{10} &= (1+0.002455)^i \times 1.72 \times 10^9 \\ \text{จะได้} \quad i &= 1453 \text{ รอบ} \\ \text{จำนวนรอบในการทำงาน} &= \frac{\text{ระยะเวลาในการเดินระบบ}}{(2 \times \text{ระยะเวลาในการสูบกรอง})} \\ 1453 &= \frac{\text{ระยะเวลาในการเดินระบบ}}{2 \times 60} \end{aligned}$$

$$\text{ระยะเวลาในการเดินระบบ} = 174,360 \text{ ชั่วโมง} = 122 \text{ วัน}$$

จะได้อายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศเท่ากับ 122 วัน

ตัวอย่างที่ 3 การประมาณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศด้วยกราฟเส้นตรง จากตารางที่ 4.9 ถึงปฏิกิริยาที่ 3 ระยะเวลาสุบกรอง 60 นาที มีความชันเฉลี่ย 7.94×10^7 หัวกระจายอากาศมีค่าความต้านทานเริ่มต้นเท่ากับ $1.72 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ และมีความต้านทานก่อนล้างหัวกระจายอากาศ ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของความต้านทานสูงสุดที่ยอมรับได้เท่ากับ $6.05 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ สามารถคำนวณอายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศได้ดังนี้

$$\text{จากสมการเส้นตรง} \quad k \quad = \quad (Y - Y_0)/(X - X_0)$$

เมื่อ $Y =$ ค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศ

$X =$ จำนวนวันที่ทำการทดลอง

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{อายุการใช้งานของหัวกระจายอากาศ} &= (6.05 \times 10^{10} - 7.94 \times 10^9)/(7.94 \times 10^7) \\ &= 740 \quad \text{วัน} \end{aligned}$$



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอียรสิทธิ กิตติจิตต์ เกิดเมื่อวันที่ 12 สิงหาคม พ.ศ.2530 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

