

ประสิทธิภาพและจลนพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำที่ใช้พีวีเอ
เจลเป็นตัวกลาง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Performance and kinetic of non-recirculation anaerobic fluidized bed with PVA-gel as
media



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

Department of Environmental Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ประสิทธิภาพและจลนพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ
ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลาง

โดย

นายธนพงศ์ อุปลัมภานนท์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิ้มปียากร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ)

ธนพงศ์ อุปลัมภานนท์ : ประสิทธิภาพและจลนพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่
 เวียนน้ำที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลาง. (Performance and kinetic of non-recirculation anaerobic
 fluidized bed with PVA-gel as media) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี, อ.ที่ปรึกษาร่วม
 : ผศ. ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชีวภาพไร้อากาศฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำที่ใช้พีวีเอเจลเป็น
 ตัวกลางในระบบ ทำการทดลองระดับปฏิบัติการด้วยถังปฏิกรณ์ขนาด 4.58 ล. ความสูง 2 ม. จำนวน 4 ชุดการทดลอง
 รองรับค่าอัตราการระสารถือแตกต่างกัน 5, 15, 25 และ 40 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน และแปรค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4,
 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. ทั้งนี้เม็ดพีวีเอเจลในถังปฏิกรณ์ถูกปรับลดขนาดให้อยู่ในช่วง 500-1,000 ไมครอนเพื่อให้เหมาะสม
 กับระบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยทั้งลักษณะโครงสร้างภายในและความถ่วงจำเพาะยังคงใกล้เคียงกับตัวกลางต้นแบบ เริ่มต้น
 เติบโตการทดลองทั้ง 4 ชุดด้วยอัตราการระสารถือ 5 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4 ชม. พบว่าทุก
 ถังปฏิกรณ์ใช้เวลา 89 วันในการเข้าสู่สภาวะสมดุล มีร้อยละการบำบัดสารอินทรีย์มากกว่า 80 เมื่อแปรค่าอัตราการ
 สารอินทรีย์เข้าระบบและลดระยะเวลาพักเก็บน้ำในถังปฏิกรณ์เป็น 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. ตามลำดับ ทุกชุดการทดลอง
 ยังคงร้อยละการบำบัดสารอินทรีย์มากกว่า 80 ยืนยันถึงประสิทธิภาพของระบบฟลูอิดไดซ์เบดไร้อากาศแบบไม่เวียนน้ำที่
 ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลางสามารถทำงานได้ดีแม้ลดระยะเวลาพักเก็บน้ำลงถึง 4 เท่า และอัตราการระสารถือสูงถึง 40
 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน โดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 93.80 ล.ก๊าซชีวภาพ/วัน คิดเป็นความสามารถในการ
 แปลงสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 0.55 ± 0.10 ล.ก๊าซชีวภาพ/กก.ซีไอดีบำบัด โดยมีค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง
 เท่ากับ 41.72 วัน^{-1} ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4 และ 2.93 ชม. ความเข้มข้นครึ่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.09 ก./ล. และอัตราการ
 บำบัดสูงสุด 42.11 ก./ล.-วัน ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 2.2 และ 1.1 ชม. เมื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากร
 จุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ พบว่า *Methanosarcinar* จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นกรดอินทรีย์ที่สะสมในระบบ
 ตรงกันข้ามกับ *Methanosaeta* ที่จะลดลงเมื่อกรดเพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าพีวีเอเจลสามารถใช้เป็นตัวกลางในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำได้ดี ทุกสภาวะของการเติบโตระบบสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เมื่อคำนวณค่าจลนพลศาสตร์จากความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ที่สภาวะเหล่านั้นร่วมกับ
 ลักษณะการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ จะได้สมการคำนวณที่ประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียที่มีรูปแบบใกล้เคียงกันได้

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
 ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ นิสิต
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6070204921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Anaerobic treatment, Fluidized bed, Polyvinyl alcohol gel; PVA-gel, Performance, Kinetic

Tanapong Ouppatampanon : Performance and kinetic of non-recirculation anaerobic fluidized bed with PVA-gel as media. Advisor: Assoc. Prof. WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. CHAIYAPORN PUPRASERT, Ph.D.

This research focus on the performance of non-recirculation anaerobic fluidized bed reactor with PVA as media. The experiment setup in 4 laboratory-scale reactors with dimension of 4.58 liter and 2-meter height. Each reactor was operated under different organic loading rate of 5, 15, 25, 40 kg.COD/m³-d and hydraulic retention time of 4.4, 2.93, 2.2, 1.1 hour. The PVA media inside a bioreactor was resized to 500 microns in order to compatible with a fluidized bed configuration without losing their porous and specific gravity. At startup period, all 4 reactors used 89 days for reaching steady-state with organic removal over 80 percent. Likewise, the AnFBR has same organic removal over 80 percent where OLR was changed to 5, 15, 25 and 40 kg.COD/m³-d with HRT 4.4, 2.93, 2.2 and 1.1 hour were applied. It can be proved that AnFBRs work well even HRT is 4 times reduction. The highest biogas production was 93.80 L/d with an average COD to biogas conversion rate was 0.55±0.10 L/gCOD treated. The 1st-order constant at 4.4 and 2.93 hrs was 41.72 day⁻¹ whereas 2.2 and 1.1 hrs the reaction was fit to the Monod's Kinetic with k_X and K_s was 42.11 g/L-d and 0.09 g/L, respectively. Moreover, the increment of VFA concentration has raised the amount of *Methanosarcinar*, conversely to *Methanosaeta*. As summary, PVA-gel was working well as media in non-recirculation anaerobic fluidized bed by removal efficiency was over 80 percent under varied operated conditions. Including that the design equation calculated from combining results of residence time distribution (RTD) and removal efficiency under various operating conditions can be adapted to similarly reactor type.

Field of Study: Environmental Engineering

Academic Year: 2019

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟุ้งรัมย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ สำหรับการเป็นที่ปรึกษาในเรื่องงานวิจัย เพื่อให้งานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมถึงข้อเสนอแนะต่างๆ ที่สามารถนำไปปรับใช้ได้นอกจากงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนัย ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิ้มปิยากร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.กิตติคุณ ตระยานนท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำในงานวิจัย และนอกเหนือจากงานวิจัย

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวัสดุวิศวกรรมนาโนเพื่อสิ่งแวดล้อม หน่วยวิจัยเกษตรนาโนและสิ่งแวดล้อม ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำงานวิจัย เอื้อเพื่อเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี ตลอดจนให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ด้านต่างๆ งานวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนการวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนวิจัยเพิ่มเติมจากศูนย์เครือข่ายการวิจัยและพัฒนาด้าน นาโนเทคโนโลยี เครือข่ายวิจัยร่วมระหว่างจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ

ขอขอบคุณ ดร.พัชรียา รุ่งกิจพัฒนานุกูล และ ดร.กริชชาติ ว่องไวลิขิต ที่สละเวลาสำหรับการให้คำแนะนำในการทำงานวิจัย และข้อมูลต่างๆ อันเป็นประโยชน์ที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ที่ให้คำปรึกษาทั้งในเรื่องที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมถึงคำแนะนำต่างๆ ตลอดช่วงทำวิจัย ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณบริษัท คูราเรย์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวกลางพีวีเอเจลมาใช้ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท รอยัล ฟู้ด จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์หัวเชื้อจุลินทรีย์ของระบบยูเอเอสบี

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณครอบครัวที่สนับสนุนในการเรียนระดับมหาบัณฑิต ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจที่สำคัญให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ธนพงศ์ อุปถัมภานนท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
การบำบัดน้ำเสีย.....	4
กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis).....	5
กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis).....	5
กระบวนการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis).....	6
กระบวนการสร้างมีเทน.....	7
อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมี (Stoichiometry of biological reactions).....	9
ธาตุอาหาร.....	12
สภาวะเป็นพิษจากซัลเฟต.....	14
อุณหภูมิต.....	15

ค่าความเป็นกรด-เบส (พีเอช).....	15
ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ	17
ค่าอัตราการระสารถีอินทรีย์ (Organic loading rate).....	17
อัตราส่วนระหว่างกรดต่อสภาพต่าง.....	18
ระยะเวลาที่เก็บน้ำ	19
การคงสภาพไร้อากาศ.....	20
การเลือกรูปแบบถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสม.....	20
การทดสอบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์.....	21
ระบบบำบัดน้ำเสียที่บรรจุตัวกลาง.....	23
ค่าจลนพลศาสตร์	23
ระบบบำบัดฟลูอิดไดซ์เบด.....	25
สภาวะฟลูอิดไดซ์ชัน.....	26
ความเร็วไหลขึ้นของระบบฟลูอิดไดซ์เบด.....	27
ตัวกลางพีวีเอเจล.....	29
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
ระบบบำบัดไร้อากาศฟลูอิดไดซ์เบด.....	31
ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลางในระบบ.....	32
การศึกษาจลนพลศาสตร์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ	34
การศึกษาลักษณะของตัวกลางในระบบบำบัดน้ำเสีย	34
ประเด็นจากการทบทวนทฤษฎีและงานวิจัย.....	35
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย.....	36
วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง.....	40
อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ	44
วิธีการทดลอง.....	46

การทดสอบลักษณะการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์	46
การเริ่มต้นเดินระบบ	46
การแปรค่าอัตราภาระสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ (OLR).....	47
การแปรค่าระยะเวลาเก็บน้ำ (HRT).....	47
การตรวจสอบกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในระบบ	49
การเปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์กับโมเดลต่างๆ	49
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบตัวกลางและพารามิเตอร์ทางชีวภาพ.....	50
ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	50
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย	52
การทดลองช่วงก่อนเริ่มต้นเดินระบบ.....	54
การลดขนาดตัวกลาง.....	54
การทดลองลักษณะการไหลของน้ำ.....	57
ค่าพารามิเตอร์ในช่วงสมดุล	58
ผลกระทบระยะยาวของการเดินระบบบำบัดไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำ....	68
ความสามารถของระบบในการบำบัดสารอินทรีย์.....	69
ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียขาออก	70
ค่าความเป็นกรด-เบส (พีเอช).....	72
ปริมาณความเข้มข้นกรดอินทรีย์และอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่าง	74
การเกิดก๊าซชีวภาพ	77
ความสามารถของระบบตามความสูงถังปฏิกรณ์	79
ค่าจลนพลศาสตร์ของระบบ.....	82
ผลกระทบระยะสั้นของการเดินระบบบำบัดไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำ.....	85
การรักษาเสถียรภาพของระบบบำบัดไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำ.....	88
กลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในระบบ	89

การเปลี่ยนแปลงของตัวกลางพีวีเอเจลในการทดลอง.....	93
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	99
การทดสอบตัวกลาง.....	99
การทดสอบลักษณะการไหลของน้ำ.....	99
ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ.....	99
ค่าคงที่ทางคณิตศาสตร์	100
ผลกระทบต่อการเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำในระยะยาว	101
ผลกระทบต่อการเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำในระยะสั้น.....	101
สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมและการนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้	101
ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	102
ภาคผนวก ก.....	103
รายการคำนวณและเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	103
การคำนวณความเร็วขั้นต่ำสำหรับสภาวะฟลูอิดไดซ์ชัน	103
การคำนวณปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทางทฤษฎี.....	104
ภาคผนวก ข.....	105
วิธีวิเคราะห์คูลน้ำ	105
ความเข้มข้นซีไอดีด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด.....	105
ความเข้มข้นกรดและต่างด้วยวิธีไตเตรต	107
ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยด้วยวิธีอบแห้ง 103-105 องศาเซลเซียส.....	107
ภาคผนวก ค.....	109
ผลการทดสอบร้อยละชนิดของก๊าซชีวภาพ	109
ภาคผนวก ง.....	110
ข้อมูลผลการทดลอง	110
ไบโอฟิล์มบนพื้นผิวของตัวกลางที่สภาวะสมดุล.....	110

ผลการวิเคราะห์ประชากรจุลินทรีย์ในระบบ	111
ผลการทดสอบพารามิเตอร์ต่างๆ ตามระดับความสูงถึงปฏิกรณ์.....	112
ผลการติดตามพารามิเตอร์ต่างๆ ของชุดการทดลองทั้ง 4	131
บรรณานุกรม.....	153
ประวัติผู้เขียน.....	158



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หัวข้อ	หน้าที่
ตารางที่ 2.1 สารตั้งต้นประเภทต่างๆ ของกระบวนการสร้างมีเทน	8
ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนการใช้อิเล็กทรอนิกส์ในระบบบำบัดทางชีวภาพแบบใช้อากาศและไร้อากาศ ...	10
ตารางที่ 2.3 สมการครึ่งปฏิกิริยาของกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ.....	10
ตารางที่ 2.4 ปริมาณธาตุอาหารที่เหมาะสมในการเดินระบบบำบัดชีวภาพแบบไร้อากาศ.....	13
ตารางที่ 2.5 ค่าพลังงานของปฏิกิริยาในสถานะที่มีและไม่มีซิลเฟต.....	14
ตารางที่ 2.6 อัตราการระเหยอินทรีย์ที่แนะนำสำหรับระบบบำบัดไร้อากาศชนิดต่างๆ.....	18
ตารางที่ 2.7 ระยะเวลาที่เก็บน้ำที่เหมาะสมกับระบบชนิดต่างๆ	19
ตารางที่ 2.8 ค่าไออาร์พีของปฏิกิริยาการบำบัดน้ำเสียชนิดต่างๆ	20
ตารางที่ 2.9 ความเร็วขั้นต่ำสำหรับสภาวะฟลูอิดไดเซชันของตัวกลางชนิดต่างๆ.....	30
ตารางที่ 2.10 ลักษณะจำเพาะของตัวกลางพีวีเอเจล.....	30
ตารางที่ 2.11 ลักษณะจำเพาะของตัวกลางพีวีเอเจลเทียบกับตัวกลางอื่นๆ	30
ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำที่วิเคราะห์ตลอดการทดลอง.....	48
ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ต่างๆ และวิธีการที่เลือกใช้ทดสอบตัวกลาง.....	50
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรต่างๆ และค่าที่ใช้ในการทดลอง.....	51
ตารางที่ 4.1 ค่าความถ่วงจำเพาะของตัวกลางพีวีเอเจลต้นแบบและตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง.....	56
ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณโมเดลต่างๆ ในการทดสอบลักษณะการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ ..	58
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำของชุดการทดลองที่ 1	62
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำของชุดการทดลองที่ 2	64
ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำของชุดการทดลองที่ 3	66
ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำของชุดการทดลองที่ 4	68
ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นของกรด ต่าง และอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างของชุดการทดลองที่ 1.....	75

ตารางที่ 4.8 ความเข้มข้นของกรด ต่าง และอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างของชุดการทดลองที่ 2.....	76
ตารางที่ 4.9 ความเข้มข้นของกรด ต่าง และอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างของชุดการทดลองที่ 3.....	76
ตารางที่ 4.10 ความเข้มข้นของกรด ต่างและอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างของชุดการทดลองที่ 4.....	76
ตารางที่ 4.11 ความเข้มข้นค่าสภาพต่างในน้ำเข้าและออกจากถังปฏิกรณ์ (ชุดการทดลองที่ 2 และ 4).	79
ตารางที่ ง.1 ผลการวิเคราะห์ประชากรจุลินทรีย์ในระบบแยกกลุ่มอื่นๆ และเมทาโนเจน.....	111
ตารางที่ ง.2 กลุ่มจุลินทรีย์แยกชนิดเมทาโนเจนในระบบ	111
ตารางที่ ง.3 ความเข้มข้นซีโอดีตามระดับความสูงถึงปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 1 ณ สภาวะการเดินระบบต่างๆ.....	112
ตารางที่ ง.4 ความเข้มข้นซีโอดีตามระดับความสูงถึงปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 2 ณ สภาวะการเดินระบบต่างๆ.....	113
ตารางที่ ง.5 ความเข้มข้นซีโอดีตามระดับความสูงถึงปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 3 ณ สภาวะการเดินระบบต่างๆ.....	113
ตารางที่ ง.6 ความเข้มข้นซีโอดีตามระดับความสูงถึงปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 4 ณ สภาวะการเดินระบบต่างๆ.....	114
ตารางที่ ง.7 ผลการทดลองลักษณะการไหลของน้ำที่ 4.4 ชม.....	114
ตารางที่ ง.8 ซีโอดีเข้า-ออก ของชุดการทดลองที่ 1 ตลอดการทดลอง.....	128
ตารางที่ ง.9 ผลการติดตามพารามิเตอร์อื่นๆ ของชุดการทดลองที่ 1	131
ตารางที่ ง.10 ซีโอดีเข้า-ออก ของชุดการทดลองที่ 2 ตลอดการทดลอง.....	134
ตารางที่ ง.11 ผลการติดตามพารามิเตอร์อื่นๆ ของชุดการทดลองที่ 2.....	137
ตารางที่ ง.12 ซีโอดีเข้า-ออก ของชุดการทดลองที่ 3 ตลอดการทดลอง.....	141
ตารางที่ ง.13 ผลการติดตามพารามิเตอร์อื่นๆ ของชุดการทดลองที่ 3.....	144
ตารางที่ ง.14 ซีโอดีเข้า-ออก ของชุดการทดลองที่ 4 ตลอดการทดลอง.....	147
ตารางที่ ง.15 ผลการติดตามพารามิเตอร์อื่นๆ ของชุดการทดลองที่ 4.....	150

สารบัญรูป

หัวข้อ	หน้าที่
รูปที่ 2.1 ประเภทของการบำบัดน้ำเสียจำแนกตามสารรับอิเล็กทรอนิกส์.....	4
รูปที่ 2.2 อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	15
รูปที่ 2.3 การทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนที่ค่าพีเอชต่างๆ	16
รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ของโมเดลแยกชิ้นส่วน	22
รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบฟลูอิดไดซ์เบด	26
รูปที่ 2.6 ค่าคงที่ m ที่เลขเรย์โนลด์ค่าต่างๆ.....	28
รูปที่ 2.7 โครงสร้างภายในตัวกลางพีวีเอเจล	29
รูปที่ 3.1 แผนการทดลองของงานวิจัย.....	37
รูปที่ 3.2 ตัวกลางพีวีเอเจลต้นแบบและตัวกลางภายหลังการลดขนาดที่ใช้ในการทดลอง	40
รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์การเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำ (1 ชุดการทดลอง)	41
รูปที่ 3.4 ขนาดและรายละเอียดส่วนประกอบต่างๆ ของถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด.....	42
รูปที่ 3.5 เครื่องสูบน้ำชนิดรีดสายยาง	43
รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพ.....	44
รูปที่ 4.1 เงื่อนไขการแปรค่าสภาวะการเดินระบบบำบัดไร้อากาศฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำ สำหรับงานวิจัยนี้.....	53
รูปที่ 4.2 ลักษณะภายนอกตัวกลางต้นแบบและตัวกลางที่ปรับสภาพ	54
รูปที่ 4.3 พื้นผิวภายนอกและโครงสร้างภายในพีวีเอเจลที่กำลังขยาย 2,000 และ 10,000 เท่า.....	55
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นของตัวกลางพีวีเอเจล	56
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเดินระบบชุดการทดลองที่ 1	60
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเดินระบบชุดการทดลองที่ 2	63
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเดินระบบชุดการทดลองที่ 3	65
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเดินระบบชุดการทดลองที่ 4	67

รูปที่ 4.9 ร้อยละการบำบัดสารอินทรีย์ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ	70
รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ	71
รูปที่ 4.11 ค่าพีเอชของถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดไร้อากาศที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ	74
รูปที่ 4.12 กรดอินทรีย์ในน้ำขาออกที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ.....	77
รูปที่ 4.13 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงตามสภาวะการเดินระบบที่แตกต่างกัน.....	79
รูปที่ 4.14 ความเข้มข้นซีโอดีและของแข็งแขวนลอยของชุดการทดลองที่ 1 ตามระดับความสูงถังปฏิกรณ์ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ	81
รูปที่ 4.15 ความเข้มข้นซีโอดีและของแข็งแขวนลอยของชุดการทดลองที่ 4 ตามระดับความสูงถังปฏิกรณ์ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ	82
รูปที่ 4.16 ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเมื่อใช้ค่าที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 4.4 และ 2.93 ชม.	83
รูปที่ 4.17 ปฏิกริยาโมนอทเมื่อใช้ค่าที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 2.2 และ 1.1 ชม.....	83
รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์และพารามิเตอร์ต่างๆ ในถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดไร้อากาศเมื่อทำการแปรค่าอัตราการระเหยสารอินทรีย์ (วันที่ 121-151).....	87
รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์และพารามิเตอร์ต่างๆ ในถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดไร้อากาศเมื่อทำการแปรค่าระยะเวลาที่เก็บน้ำครั้งที่ 3 (วันที่ 267-281).....	87
รูปที่ 4.20 ร้อยละเมทานोजนแต่ละชนิดที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 4.4 ชม.	92
รูปที่ 4.21 ร้อยละเมทานोजนแต่ละชนิดของชุดการทดลองที่ 4 เมื่อแปรระยะเวลาที่เก็บน้ำ.....	92
รูปที่ 4.22 การตรวจสอบตัวกลางพีวีเอเจลของชุดการทดลองที่ 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	94
รูปที่ 4.23 การตรวจสอบตัวกลางพีวีเอเจลของชุดการทดลองที่ 4 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	95
รูปที่ ง.1 ตัวอย่างตัวกลางในระบบ ณ วันที่ 118	110

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการขยายตัวของอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปัญหาต่างๆ ด้านสิ่งแวดล้อมตามมา ไม่ว่าจะเป็นมลพิษอากาศ ขยะมูลฝอย ขยะอันตราย และมลพิษทางน้ำ เป็นต้น ปัญหาดังกล่าวส่งผลต่อระบบนิเวศทางธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหากไม่ได้รับการจัดการอย่างถูกต้อง โดยมลพิษที่เกิดจากกิจกรรมทางอุตสาหกรรมถึงแม้จะมีปริมาณที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับมลพิษจากกิจกรรมในชุมชน แต่กลับมีระดับความเข้มข้นของมลพิษในสัดส่วนที่สูงกว่ากิจกรรมจากชุมชนอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้มลพิษจากอุตสาหกรรมที่เป็นปัญหาหลักคือ น้ำเสียปริมาณมากที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนต่างๆ ในการประกอบกิจการของโรงงาน จึงเป็นความท้าทายของวิศวกรสิ่งแวดล้อมที่ต้องใช้องค์ความรู้ในการบริหารจัดการให้เหมาะสม และบำบัดน้ำเสียดังกล่าวให้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยตามหลักวิชาการ อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียในปัจจุบันได้รับการพัฒนามากขึ้นจนสามารถบำบัดน้ำเสียประเภทต่างๆ ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กฎหมายกำหนดได้

ระบบบำบัดไร้อากาศนั้นเป็นรูปแบบของการบำบัดน้ำเสียที่สามารถกำจัดปริมาณสารอินทรีย์ความเข้มข้นสูงในน้ำเสียได้ รวมถึงมีอัตราการใช้พลังงานของระบบต่ำเนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีการเติมอากาศเหมือนระบบใช้อากาศทั่วไป และในขณะเดียวกันยังมีความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้ ทั้งนี้ระบบบำบัดไร้อากาศนั้นแบ่งออกเป็นหลายประเภทขึ้นอยู่กับการออกแบบชุดถังปฏิกรณ์ โดยระบบบำบัดชนิดฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed reactor: FBR) เป็นรูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากถูกออกแบบให้มีลักษณะการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์แบบปั่นป่วน หรือเรียกว่าสภาวะฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งจะสามารถเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างน้ำเสียและเชื้อจุลินทรีย์ที่ช่วยในการบำบัดได้มากขึ้น (Metcalf และ Eddy, 2014) ทำให้กระบวนการบำบัดน้ำเสียจึงเกิดขึ้นได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ในการเดินระบบได้ด้วยการ

เลือกใช้ตัวกลางให้เหมาะสมเพื่อเป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ โดยตัวกลางสำหรับการเกิดสภาวะฟลูอิดไดเซชันควรมีขนาดเล็ก มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ และไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบ

งานวิจัยนี้สนใจทำการทดลองเพื่อประเมินความสามารถและอัตราการบำบัดน้ำเสียของระบบไร้อากาศ ฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำ โดยเลือกใช้เม็ดพีวีเอเจลเป็นตัวกลาง เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ และมีโครงสร้างภายในเป็นโพรงทำให้มีพื้นที่ผิวที่จุลินทรีย์ยึดเกาะได้มาก ทั้งภายในและภายนอกตัวกลาง ซึ่งรายงานจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียที่บรรจุพีวีเอเจลเป็นตัวกลางจะใช้ระยะเวลาในการก่อรูปเม็ดจุลินทรีย์น้อยกว่าระบบที่ไม่ใช้พีวีเอเจล Zhang และคณะ (2009) โดยทำการทดลองในสภาวะที่กำหนดค่าอัตราการระสาดอินทรีย์และระยะเวลากักเก็บน้ำเสียที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดสารอินทรีย์เมื่อมีระยะเวลากักเก็บน้ำต่ำและอัตราการระสาดอินทรีย์สูง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลาง ในสภาวะที่แปรค่าอัตราการระสาดอินทรีย์และระยะเวลากักเก็บน้ำแตกต่างกัน
2. เพื่อศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการเดินระบบของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบไม่เวียนน้ำที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลาง เพื่อให้ได้ค่าคงที่ที่สามารถใช้เป็นค่าแนะนำในการเดินระบบรูปแบบดังกล่าวได้

ขอบเขตของงานวิจัย

1. น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนโดยปรับเปลี่ยนให้มีค่าความเข้มข้นสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน
2. ทำการทดลองที่อุณหภูมิตั้ง ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. ตัวกลางที่ใช้ในการทดลองเป็นพลาสติกสังเคราะห์ชนิดพีวีเอเจลจากบริษัท คูราเรย์ จำกัด โดยทำการปั่นและกรองให้มีขนาดอยู่ในช่วง 500-1000 ไมครอน
4. หัวเชื้อที่ใช้ในการเริ่มต้นระบบเป็นเม็ดจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์แบบไร้อากาศยูเอเอสบี (UASB) ของบริษัท รอยัล ฟู้ด จำกัด
5. ถังปฏิกรณ์ทำจากวัสดุอะคริลิกใสเพื่อให้สามารถตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงภายในของระบบได้อย่างชัดเจน
6. ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ตามวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2005)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

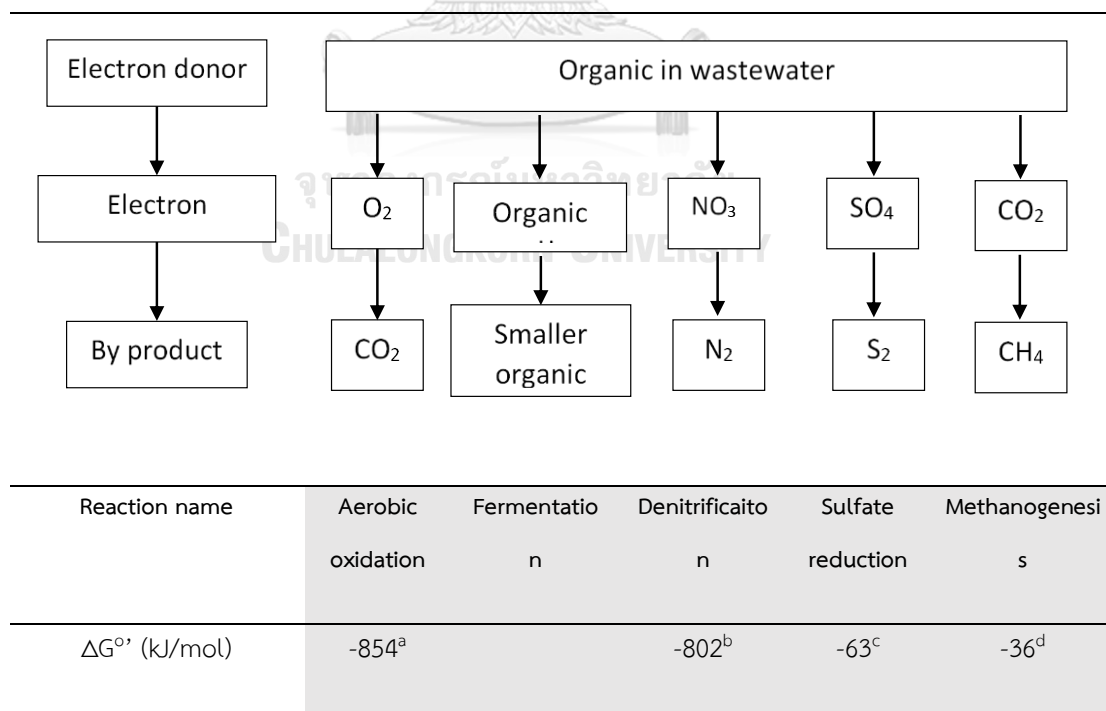
1. เข้าใจถึงหลักการทำงานและการควบคุมระบบบำบัดแบบไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดมากยิ่งขึ้น สามารถนำความรู้ที่ได้จากการทำวิจัยไปใช้ในการออกแบบ และเป็นแนวทางในการเดินระบบบำบัดชนิดเบดขยายตัวที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลางได้อย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ
2. ทราบถึงผลกระทบของภาระสารอินทรีย์และระยะเวลาที่เก็บน้ำต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอตของระบบบำบัดไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลาง
3. ทราบถึงขีดจำกัดด้านภาระสารอินทรีย์ของการเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลางในสถานะที่ไม่มีการหมุนเวียนน้ำเสียภายในระบบ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำด้วยกระบวนการทางชีวภาพนั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทหลักคือ กระบวนการแบบใช้อากาศ และกระบวนการแบบไร้อากาศ โดยทั้งสองประเภทนั้นอาศัยปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนประจุอินทรีย์ระหว่างสารรับอิเล็กตรอนและสารให้อิเล็กตรอนของจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ และได้เป็นสารผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารตั้งต้น นอกจากนี้ค่าพลังงานสำหรับการเกิดปฏิกิริยายังต่างกันขึ้นกับสารรับอิเล็กตรอน จากตารางดังแสดงในรูปที่ 2.1 ประเภทของการบำบัดน้ำเสียจำแนกตามสารรับอิเล็กตรอนจะเห็นได้ว่า ค่าพลังงานของสมการสำหรับกระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศนั้นมีค่าน้อยที่สุด ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วที่สุดในขณะที่ปฏิกิริยาของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศนั้นอาศัยจุลินทรีย์หลากหลายชนิดทำงานร่วมกัน และมีค่าพลังงานการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.1 ประเภทของการบำบัดน้ำเสียจำแนกตามสารรับอิเล็กตรอน

ในการบำบัดแบบไร้อากาศนั้นกระบวนการที่เกิดขึ้นจะใช้สารรีดิวซ์อิเล็กตรอนชนิดอื่นๆ ที่ไม่ใช่ ออกซิเจน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไนเตรต ซัลเฟต หรือโลหะหนักประเภทอื่นๆ เป็นต้น โดยสารรีดิวซ์อิเล็กตรอนต่างชนิดกันจะก่อให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่แตกต่างกัน และมีชื่อเรียกตามสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น (รูปที่ 2.1 ประเภทของการบำบัดน้ำเสียจำแนกตามสารรีดิวซ์อิเล็กตรอนทั้งนี้ในแต่ละปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่าพลังงานที่จุลินทรีย์ได้รับแตกต่างกัน ทำให้ปฏิกิริยารีดอกซ์บางชนิดมักจะเกิดภายหลังหากในระบบมีสารตั้งต้นของปฏิกิริยาที่ให้พลังงานมากกว่า อาทิเช่น ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน จะเกิดขึ้นก่อนปฏิกิริยาเมทาโนเจเนซิส และจะเกิดภายหลังปฏิกิริยาแอโรบิกออกซิเดชัน ส่งผลให้ในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศนั้นวิศวกรผู้เดินและควบคุมระบบจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานเหล่านี้เพื่อควบคุมไม่ให้ระบบล้มเหลว โดยการบำบัดแบบไร้อากาศนั้นประกอบไปด้วย 4 กระบวนการย่อยดังนี้

กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

เป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่จำพวกโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต ให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง อาทิ กลูโคส กรดไขมัน และกรดอะมิโน เป็นต้น โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นจากกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ประเภท Obligate anaerobes ซึ่งประกอบด้วยจุลินทรีย์ในกลุ่ม Clostridium เป็นประชากรหลัก มีกระบวนการเมตาบอลิซึมที่หลากหลายส่งผลให้เกิดผลผลิตจากปฏิกิริยาได้หลายชนิด เช่น กรดอะซิติก กรดบิวทิริก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีจุลินทรีย์กลุ่ม Propionibacterium ซึ่งผลิตกรดพรอปิโอนิกและกรดอะซิติกด้วย อย่างไรก็ตามกลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรไลซิสนี้เป็นเพียงการแปรรูปสารอินทรีย์ต่างๆ ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ให้เล็กลง ทั้งนี้กระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่หลากหลาย เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ การสัมผัสกันระหว่างสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ เป็นต้น

กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis)

เป็นขั้นตอนที่ใช้สารผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไฮโดรไลซิสมาสีสร้างเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid) เช่น กรดอะซิติก กรดพรอปิโอนิก กรดบิวทิริก เป็นต้น ซึ่งหากมีปริมาณสูงและสะสมในระบบมากจะส่งผลให้ค่าพีเอชของระบบลดลงและเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์สร้างมีเทน

นอกจากนี้ในกระบวนการสร้างกรดยังทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนได้จากปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นจากจุลินทรีย์ ซึ่งหากในระบบมีการสะสมตัวของก๊าซดังกล่าวจะมีผลทำให้ความดันพหุไฮโดรเจนในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันได้สองกรณี โดยที่สภาวะความดันพหุไฮโดรเจนในระบบต่ำ น้ำตาลจะถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติกดังสมการที่ (2.1) และมีไฮโดรเจนเกิดขึ้น 4 โมล แต่ที่สภาวะความดันพหุไฮโดรเจนในระบบสูง น้ำตาลจะถูกย่อยเป็นกรดอะซิติก กรดพรอพิโอนิก กรดบิวไทรริกและมีไฮโดรเจนเกิดขึ้น 1 โมล ดังสมการที่ (2.2) กล่าวคือระบบจะปรับสมดุลไฮโดรเจนจากกระบวนการดังกล่าวโดยใช้สารตั้งต้นชนิดเดียวกัน

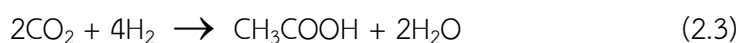


กระบวนการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

ภายหลังการสร้างกรดหลากหลายชนิดจากกระบวนการที่ผ่านมา จะมีกรดเพียงบางชนิดที่จุลินทรีย์สร้างมีเทนสามารถใช้เป็นสารอาหารได้ จึงต้องมีขั้นตอนที่จะเปลี่ยนกรดเหล่านั้นให้อยู่ในรูปของกรดอินทรีย์สายสั้นที่มีจำนวนคาร์บอนน้อย ได้แก่ กรดอะซิติก และไฮโดรเจน โดยสามารถแบ่งชนิดของจุลินทรีย์ในขั้นตอนนี้ได้เป็น 2 กลุ่มคือ จุลินทรีย์ผลิตอะซิเตทอย่างเดี่ยว และจุลินทรีย์ที่ผลิตอะซิเตทและไฮโดรเจน

จุลินทรีย์ผลิตอะซิเตทอย่างเดี่ยว (Homoacetogenic bacteria)

จุลินทรีย์กลุ่มนี้ได้แก่ *Acetobacterium woodii* และ *Clostridium aceticum* โดยการย่อยสารอินทรีย์ของแบคทีเรียดังกล่าวจะเกิดขึ้นในระบบที่มีความดันไฮโดรเจนต่ำ โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนในการผลิตกรดอะซิติก ภายใต้การเจริญเติบโตแบบออโทโทรฟิก (Autotrophic) ดังสมการที่ (2.3) และเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นกรดอะซิติกภายใต้การเติบโตของเฮเทอโรโทรฟิก (Heterotrophic) ดังสมการที่ (2.4)



จุลินทรีย์ผลิตอะซิเตทและไฮโดรเจน (H₂-Producing acetogenic bacteria)

การทำงานของจุลินทรีย์ชนิดนี้เกิดขึ้นภายใต้สภาวะความดันไฮโดรเจนต่ำ ซึ่งจะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ดังสมการที่ (2.5) และ (2.6) โดยได้กรดอะซิติกและไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้หากในระบบมีการสะสมปริมาณไฮโดรเจนมากขึ้นจนความดันไฮโดรเจนเปลี่ยนไปจะมีผลให้กลไกถูกยับยั้งดังนั้นในการดำรงชีพของจุลินทรีย์ดังกล่าวจะต้องอาศัยการอยู่ร่วมกับจุลินทรีย์สร้างมีเทนที่มีความสามารถในการบริโภคไฮโดรเจน เพื่อช่วยปรับความดันไฮโดรเจนในระบบให้ลดลงถึงระดับที่จุลินทรีย์สร้างกรดนี้สามารถดำรงชีพได้



กระบวนการสร้างมีเทน

จัดเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนจะเปลี่ยนกรดอะซิติกและไฮโดรเจนให้อยู่ในรูปก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจุลินทรีย์กลุ่มนี้ไม่สามารถทนต่อออกซิเจนได้ หากในระบบมีออกซิเจนแม้เพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้จุลินทรีย์ชนิดนี้หยุดการทำงานได้ ทั้งนี้ในระบบไร้อากาศจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนจะอาศัยร่วมกับจุลินทรีย์สร้างกรดโดยใช้สารผลิตภัณฑ์จากจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด ในขณะที่เดียวกันจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดจะอาศัยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนช่วยปรับสมดุลไฮโดรเจนให้อยู่ในระดับที่สามารถดำรงชีพได้ โดยสามารถจำแนกจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนออกเป็น 2 ชนิดตามสารตั้งต้น ได้แก่

- เมทาโนเจนที่ใช้อะซิเตท (Acetoclastic methanogens) จุลินทรีย์กลุ่มนี้ใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งพลังงานเพื่อสร้างมีเทนดังสมการที่ (2.7) โดยมีเทนในระบบไร้อากาศจะเกิดขึ้นจากกระบวนการของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ประมาณร้อยละ 70



- เมทาโนเจนที่ใช้ไฮโดรเจน (Hydrogenotrophic methanogens) จุลินทรีย์กลุ่มนี้สร้างมีเทนจากการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ดังสมการที่ (2.8)



อย่างไรก็ตามเมทาโนเจนเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่ใช้สารอาหารได้อย่างจำกัด โดยสารตั้งต้นที่จุลินทรีย์กลุ่มนี้ใช้ในการผลิตมีเทนได้มีเพียงรายละเอียดดังตารางที่ 2.1 นอกจากนี้สารตั้งต้นดังกล่าวมีรายงานว่าเมทาโนเจนสามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นสารอาหารเพียงอย่างเดียวในการสร้างมีเทนได้ เพราะกรดฟอร์มิกสามารถแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการที่ (2.9)



ตารางที่ 2.1 สารตั้งต้นประเภทต่างๆ ของกระบวนการสร้างมีเทน

สารตั้งต้นประเภทคาร์บอนไดออกไซด์	ΔG° (kJ/reaction)
คาร์บอนไดออกไซด์, (CO_2)	
$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	-131
ฟอร์มेट, (HCOO^-)	
$4\text{HCOO}^- + 4\text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-145
คาร์บอนมอนอกไซด์, (CO)	
$4\text{CO} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2$	-210
สารตั้งต้นประเภทเมทิล	
Methanol, (CH_3OH)	
$4\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-319
Methylamine, (CH_3NH_2)	
$4\text{CH}_3\text{NH}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 4\text{NH}_3$	-230
Dimethylamine, ($(\text{CH}_3)_2\text{NH}$)	
$(\text{CH}_3)_2\text{NH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{NH}_3$	-230
Trimethylamine, ($(\text{CH}_3)_3\text{N}$)	
$4(\text{CH}_3)_3\text{N} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 9\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 4\text{NH}_3$	-666
อะซิเตท	
$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	-31

(ที่มา : Metcalf และ Eddy (2014))

จะเห็นได้ว่ากระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศนั้นประกอบไปด้วยขั้นตอนที่ซับซ้อนและอาศัยการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลากหลายชนิดพร้อมกัน โดยจุลินทรีย์กลุ่มหลักที่ทำงานร่วมกันในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศคือ จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดและจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ทั้งนี้ทั้งสองกลุ่มมีสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานและปัจจัยหลักในการเดินระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งประกอบไปด้วย

อัตราการผลิตปฏิกิริยาทางชีวเคมี (Stoichiometry of biological reactions)

ปฏิกิริยาชีวเคมีซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ จากกิจกรรมของจุลินทรีย์ประกอบด้วย 3 ส่วนย่อย ได้แก่ สมการครึ่งปฏิกิริยาของการสร้างเซลล์ สมการครึ่งปฏิกิริยาการให้อิเล็กตรอน และสมการครึ่งปฏิกิริยาของสารรับอิเล็กตรอน โดยสามารถเขียนรวมเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (2.10) ทั้งนี้สมการครึ่งปฏิกิริยาต่างๆ จากกระบวนการย่อยสลายที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 2.3

$$R = f_e R_a + f_s R_s - R_d \quad (3.10)$$

เมื่อ;	R	= ผลรวมของสมการ
	f_e	= อัตราส่วนของอิเล็กตรอนสำหรับเป็นแหล่งพลังงาน
	R_a	= สมการครึ่งปฏิกิริยาของสารรับอิเล็กตรอน
	f_s	= ค่าคงที่อิเล็กตรอนสำหรับการสร้างเซลล์
	R_s	= สมการครึ่งปฏิกิริยาการสร้างเซลล์
	R_d	= สมการครึ่งปฏิกิริยาของสารให้อิเล็กตรอน

$$\text{โดยที่} \quad f_s + f_e = 1 \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 2.10 ค่า f_s และ f_e เป็นค่าคงที่ร้อยละปริมาณอิเล็กตรอนสำหรับกระบวนการสร้างเซลล์และใช้เป็นแหล่งพลังงานตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับแต่ละกระบวนการ ทั้งนี้ปฏิกิริยาการย่อยสลายสำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพที่จำแนกออกได้เป็นระบบบำบัดแบบใช้อากาศและไร้อากาศ จะมีอัตราส่วนการใช้อิเล็กตรอนแตกต่างกันดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนการใช้อิเล็กตรอนในระบบบำบัดทางชีวภาพแบบใช้อากาศและไร้อากาศ

ค่าคงที่	ระบบบำบัดแบบใช้อากาศ	ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ
f_e	0.5	0.9
f_s	0.5	0.1

(ที่มา: Metcalf&Eddy (2014))

ตารางที่ 2.3 สมการครึ่งปฏิกิริยาของกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ

Reaction number	Half-reaction	ΔG° (W), ^b kJ per electron equivalent
Reaction for bacteria cell synthesis (R_s)		
Ammonia as nitrogen source		
1	$(1/5)CO_2 + (1/20)HCO_3^- + (1/20)NH_4^+ + H^+ + e^- = (1/20)C_5H_7O_2N + (9/20)H_2O$	
Nitrate as nitrogen source		
2	$(1/28)NO_3^- + (5/28)CO_2 + (29/28)H^+ + e^- = (1/28)C_5H_7O_2N + (11/28)H_2O$	
Reactions for electron acceptors (R_a)		
Nitrite		
3	$(1/3)NO_3^{2-} + (4/3)H^+ + e^- = (1/6)N_2 + (2/3)H_2O$	-93.23
Oxygen		
4	$(1/4)O_2 + H^+ + e^- = (1/2)H_2O$	-78.14
Nitrate		
5	$(1/5)NO_3^- + (6/5)H^+ + e^- = (1/10)N_2 + (3/5)H_2O$	-71.67
Sulfite		
6	$(1/6)SO_3^{2-} + (5/4)H^+ + e^- = (1/12)H_2S + (1/12)HS^- + (1/2)H_2O$	13.60
Sulfate		

Reaction number	Half-reaction	ΔG° (W), ^b kJ per electron equivalent
7	$(1/8)\text{SO}_4^{2-} + (19/16)\text{H}^+ + \text{e}^- = (1/16)\text{H}_2\text{S} + (1/16)\text{HS}^- + (1/2)\text{H}_2\text{O}$	21.27
	Carbon dioxide	
8	$(1/8)\text{CO}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^- = (1/8)\text{CH}_4 + (1/4)\text{H}_2\text{O}$	24.11
Reactions for electron donors (R_d)		
Organic donors (heterotrophic reactions)		
Domestic wastewater		
9	$(9/50)\text{CO}_2 + (1/50)\text{NH}_4^+ + (1/50)\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{e}^- = (1/50)\text{C}_{10}\text{H}_{19}\text{O}_3\text{N} + (9/25)\text{H}_2\text{O}$	31.80
10	Protein (amino acids, proteins, nitrogenous organics) $(8/33)\text{CO}_2 + (2/33)\text{NH}_4^+ + (31/33)\text{H}^+ + \text{e}^- = (1/66)\text{C}_{16}\text{H}_{24}\text{O}_5\text{N}_4 + (27/66)\text{H}_2\text{O}$	32.22
11	Formate $(1/2)\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{e}^- = (1/2)\text{HCOO}^- + (1/2)\text{H}_2\text{O}$	48.07
12	Glucose $(1/4)\text{CO}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^- = (1/24)\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + (1/4)\text{H}_2\text{O}$	41.96
13	Carbohydrate (cellulose, starch, sugars) $(1/4)\text{CO}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^- = (1/4)\text{CH}_2\text{O} + (1/4)\text{H}_2\text{O}$	41.84
14	Methanol $(1/6)\text{CO}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^- = (1/6)\text{CH}_3\text{OH} + (1/6)\text{H}_2\text{O}$	37.51
15	Pyruvate $(1/5)\text{CO}_2 + (1/10)\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{e}^- = (1/10)\text{CH}_3\text{COCOO}^- + (2/5)\text{H}_2\text{O}$	35.78
16	Ethanol $(1/6)\text{CO}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^- = (1/12)\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + (1/4)\text{H}_2\text{O}$	31.79

Reaction number	Half-reaction	ΔG° (W), ^b kJ per electron equivalent
	Propionate	
17	$(1/7)\text{CO}_2 + (1/14)\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{e}^- = (1/14)\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + (5/14)\text{H}_2\text{O}$	27.91
	Acetate	
18	$(1/8)\text{CO}_2 + (1/8)\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{e}^- = (1/8)\text{CH}_3\text{COO}^- + (3/8)\text{H}_2\text{O}$	27.68
	Grease (fats and oils)	
19	$(4/23)\text{CO}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^- = (1/46)\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O} + (15/46)\text{H}_2\text{O}$	27.61

(ที่มา: (Metcalf และ Eddy, 2014))

ธาตุอาหาร

การเติมธาตุอาหารให้กับระบบบำบัดชีวภาพนั้นได้รับการยืนยันแล้วว่าส่งผลต่อความสามารถในการบำบัดของระบบ Speece (2008) เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์นั้นมีองค์ประกอบทางเคมีที่เกิดจากสารเคมีหรือธาตุอาหารหลากหลายชนิดผสมกัน และมีความเข้มข้นในอัตราส่วนแต่ละธาตุที่ไม่เท่ากัน ซึ่งในระบบบำบัดชีวภาพแบบใช้อากาศและไร้อากาศนั้นจะมีองค์ประกอบของธาตุอาหารที่ควรมีอยู่ในน้ำที่ต่างกัน โดยสารอาหารของจุลินทรีย์สำหรับระบบบำบัดชีวภาพแบบไร้อากาศนั้นมีองค์ประกอบต่างๆ และมีค่าความเข้มข้นในปริมาณตามที่แนะนำแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณธาตุอาหารที่เหมาะสมในการเดินระบบบำบัดชีวภาพแบบไร้อากาศ

Element	Requirement (mg/g COD)	Desired excess concentration (mg/L)	Typical form for addition
Macronutrients			
Nitrogen	5-15	50	$\text{NH}_3, \text{NH}_4\text{Cl}, \text{NH}_4\text{HCO}_3$
Phosphorus	0.8-2.5	10	NaH_2PO_4
Sulfur	1-3	5	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Micronutrients			
Iron	0.03	10	$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Cobalt	0.003	0.02	$\text{CoCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Nickel	0.004	0.02	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Zinc	0.02	0.02	ZnCl_2
Copper	0.004	0.02	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Manganese	0.004	0.02	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Molybdenum	0.004	0.05	$\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Selenium	0.004	0.08	Na_2SeO_3
Tungsten	0.004	0.02	$\text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Boron	0.004	0.02	H_3BO_3
Common Cations			
Sodium		100-200	$\text{NaCl}, \text{NaHCO}_3$
Potassium		200-400	KCl
Calcium		100-200	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Magnesium		75-250	MgCl_2

(ที่มา: Speece (2008))

สภาวะเป็นพิษจากซัลเฟต

นอกเหนือจากความเข้มข้นแนะนำของธาตุอาหาร การเดินระบบบำบัดชีวภาพแบบไร้อากาศ จะได้สารผลิตภัณฑ์จากจุลินทรีย์กลุ่มใช้ซัลเฟตคือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งสารดังกล่าวมีสภาวะเป็นพิษ และหากมีปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้จุลินทรีย์กลุ่มใช้ซัลเฟตแย่งสารอาหารจากจุลินทรีย์กลุ่มสร้าง มีเทนดังสมการที่ 2.11 และรบกวนกระบวนการของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดดังตารางที่ 2.5



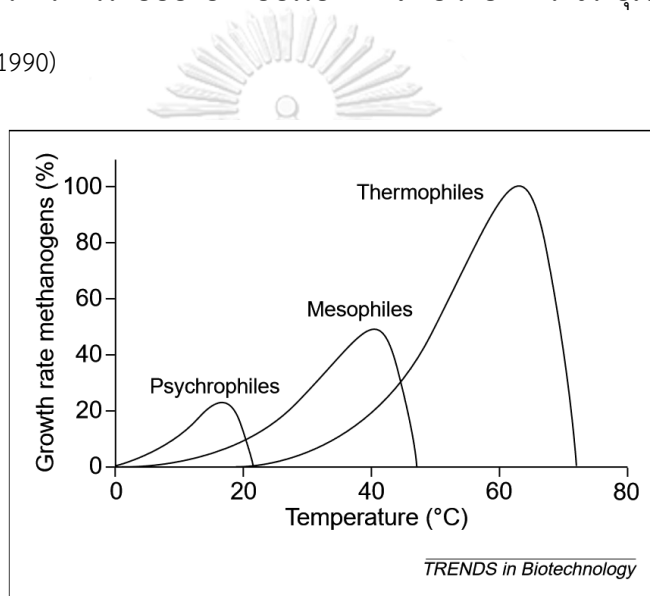
ตารางที่ 2.5 ค่าพลังงานของปฏิกิริยาในสภาวะที่มีและไม่มีซัลเฟต

Reactions	$\Delta G'$ kJ reaction ⁻¹	
	37 °C	10 °C
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 3\text{H}_2$	+71.8	+82.4
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 0.75\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + 0.75\text{HS}^- + 0.25\text{H}^+$	-39.4	.35-4
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 1.75\text{SO}_4^{2-} \rightarrow 3\text{HCO}_3^- + 1.75\text{HS}^- + 0.25\text{H}^+$	-88.9	-80.7
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	+44.8	+52.7
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^- + 0.5\text{SO}_4^{2-} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + 0.5\text{HS}^- + 0.5\text{H}^+$	-29.3	-25.9
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^- + 2.5\text{SO}_4^{2-} \rightarrow 4\text{HCO}_3^- + 2.5\text{HS}^- + 0.5\text{H}^+$	-128.3	-116.4
$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{HS}^-$	-49.5	-45.3
$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^-$	-32.5	-29.2
$4\text{H}_2 + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ \rightarrow \text{HS}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	-148.2	-157.1
$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$	-131.3	-140.9
$4\text{H}_2 + 2\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	-98.7	-111.8

(ที่มา: (Lettinga และคณะ, 2001))

อุณหภูมิ

เนื่องจากระบบบำบัดทางชีวภาพนั้นเป็นการใช้ประโยชน์จากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการย่อยสารอินทรีย์ โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ไพโคฟิลิก เมโซฟิลิก และเทอร์โมฟิลิก มีช่วงอุณหภูมิเท่ากับ 10-30°C, 20-50°C และ 35-75°C ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละช่วงอุณหภูมินั้นจะมีเชื้อจุลินทรีย์ที่แตกต่างชนิด และมีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่างกันไป โดยรูปที่ 2.2 แสดงอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ส่งผลให้ในการเดินระบบบำบัดแบบไร้อากาศจำเป็นต้องคำนึงช่วงอุณหภูมิในการเดินระบบเป็นสำคัญ Wiegell (1990)

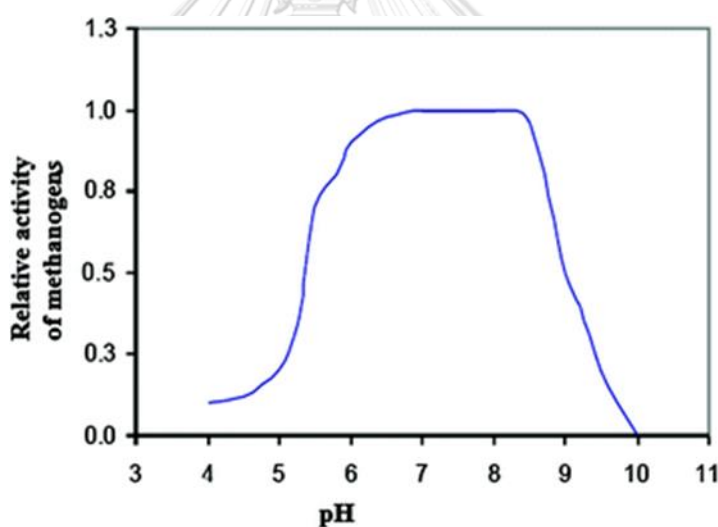


รูปที่ 2.2 อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ณ อุณหภูมิที่ต่างกัน

ค่าความเป็นกรด-เบส (พีเอช)

ค่าพีเอชจัดเป็นปัจจัยสำคัญในการเดินระบบชีวภาพ เนื่องจากจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการเจริญเติบโตในช่วงค่าพีเอชที่ต่างกัน โดยพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์สร้างมีเทนคือ 6.8 – 8.2 โดยสามารถดำรงชีวิตได้ในช่วง 6 - 9 (ดังรูปที่ 2.3) ในขณะที่จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดนั้นจะมีช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานที่ต่างกัน ทั้งนี้จากงานวิจัยของ Zhang และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของค่าพีเอช ต่อกระบวนการไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดของถังหมักไร้อากาศชนิดแยกถังกรดจากของเสียในห้องครัว ทำการทดลองที่ค่าพีเอช 5, 7, 9 และ 11 ผลการทดลองพบว่าพีเอช 7 คือค่าที่ระบบมีอัตราการเกิดกระบวนการทั้งสองสูงสุด เกิด

กรดแลคติกน้อยซึ่งเหมาะสมต่อกระบวนการสร้างมีเทน และโปรตีนส่วนใหญ่ในถังปฏิกรณ์ถูกย่อยสลายเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) ซึ่งสามารถเป็นบัพเฟอร์ให้แก่ระบบ ทั้งยังสามารถลดการสะสมของโซเดียมไอออน (Na^+) ภายในระบบได้ ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อกระบวนการสร้างกรดคือช่วงพีเอช 5 - 9 จึงสามารถกล่าวได้ว่าในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศนั้นอาศัยการควบคุมและรักษาค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนสามารถทำงานได้ด้วยการเติมสารบัพเฟอร์เพื่อควบคุมค่าพีเอชและรักษาระดับของค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยสารบัพเฟอร์ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือโซเดียมไบคาร์บอเนต และแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งปริมาณการเติมสารบัพเฟอร์นั้นมีค่าแนะนำอยู่ในช่วง 2,000 - 4,000 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ตามคำแนะนำจาก (Speece, 2008) อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวนี้เป็นเพียงการแนะนำ หากค่าพีเอชของระบบยังคงมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องการเพิ่มปริมาณสารบัพเฟอร์สูงขึ้นนั้นก็จะเป็นแนวทางที่ควรปฏิบัติเพื่อรักษาสภาพพีเอชภายในระบบ



รูปที่ 2.3 การทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนที่ค่าพีเอชต่างๆ

ในการเดินระบบบำบัดทางชีวภาพการรักษาสภาพต่างๆ ทางกายภาพภายในระบบให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานของจุลินทรีย์นั้นเป็นเรื่องสำคัญ เพื่อตั้งประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ออกมาให้ได้สูงสุด แต่ถึงกระนั้นการรักษาสภาพที่เหมาะสมเพียงอย่างเดียวก็ไม่สามารถทำให้ระบบบำบัดทางชีวภาพทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การสัมผัสกันระหว่างเชื้อจุลินทรีย์และสารอินทรีย์หรือน้ำเสียนั้นเป็นอีกปัจจัยหลักที่ส่งผลให้เกิดกระบวนการทางชีวภาพได้ดียิ่งขึ้น ยิ่ง

สารอินทรีย์สัมผัสกับเชื้อจุลินทรีย์ได้มากเท่าไร โอกาสที่เชื้อจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านั้นจะยิ่งสูงขึ้น โดยการเพิ่มโอกาสสัมผัสกันระหว่างสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์นั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี สำหรับวิธีที่ง่ายและนิยมปฏิบัติคือ การเพิ่มการกวนผสมภายในถังปฏิกรณ์ การเลือกรูปแบบของถังปฏิกรณ์ให้เหมาะสม และการบรรจุตัวกลางลงในระบบเพื่อเป็นที่ยึดเกาะให้เชื้อจุลินทรีย์

ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ

จากที่กล่าวไว้ว่าการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดไร้อากาศนั้นมีอัตราที่ต่ำกว่าจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบใช้อากาศ จึงทำให้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ของระบบบำบัดไร้อากาศนั้นเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ ทั้งนี้แนวทางในการกักเก็บเชื้อจุลินทรีย์ไว้ในระบบนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี โดยวิธีที่นิยมคือ การใช้ตัวกลางเป็นที่ยึดเกาะให้กับจุลินทรีย์ การใช้จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยในการสร้างเม็ตะคอนจุลินทรีย์ความเข้มข้นสูงในระบบ ยูเอเอสบี และการกรองเฉพาะส่วนใสออกของระบบเมมเบรน อย่างไรก็ตามผู้เดินระบบจำเป็นต้องรักษาระดับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในระบบให้อยู่ในจุดที่สมดุล เพราะหากมีจุลินทรีย์เยอะเกินกว่าอาหารนั้นจะทำให้จุลินทรีย์เกิดการกินกันเองและส่งผลให้ชนิดของจุลินทรีย์ในระบบเปลี่ยนแปลงไป ในทางตรงข้ามหากมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ไม่เพียงพอต่อสารอาหารที่เข้าสู่ระบบอาจก่อให้เกิดสภาวะรับสารอาหารเฉียบพลัน

ค่าอัตราการสารอินทรีย์ (Organic loading rate)

จากหัวข้อก่อนหน้านี้ได้อธิบายถึงความสำคัญของการรักษาปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบในกรณีที่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพมีปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบมากเกินไปที่ปริมาณที่เชื้อจุลินทรีย์จะรองรับได้ จนก่อให้เกิดสภาวะล้นเหลว ซึ่งการเดินระบบบำบัดแบบไร้อากาศนั้นมีค่าอัตราการสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละรูปแบบระบบต่างๆ ที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 2.6 ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่าจุลินทรีย์ของระบบบำบัดแบบไร้อากาศนั้นมีความสามารถในการทนต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงแบบเฉียบพลัน (Shock load) ได้มากกว่าจุลินทรีย์ของระบบแบบใช้อากาศ ทำให้เมื่อระบบบำบัดแบบไร้อากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ อย่างกระทันหัน จะยังคงไม่สามารถตีความได้ว่า

ระบบเกิดการล้มเหลว มีจำเป็นต้องติดตามพารามิเตอร์อื่นๆ เพิ่มเติมร่วมด้วยเพื่อใช้ประกอบการพิจารณาประสิทธิภาพของการเดินระบบ

ตารางที่ 2.6 อัตราภาระสารอินทรีย์ที่แนะนำสำหรับระบบบำบัดไร้อากาศชนิดต่างๆ

Process	OLR (kgCOD/m ³ -d)
Low loaded anaerobic lagoon system	<2
Up-flow anaerobic sludge blanket	5-20
Expanded granule sludge blanket	35 at 10°C
Fluidized bed	20-40
Anaerobic contact process	2-5
Anaerobic filter	5-20
Anaerobic membrane process	5-15
Anaerobic baffled reactor	5-10
Anaerobic migrating blanket reactor	1-3
Anaerobic sequencing batch reactor	1.2-2.4 at 25 °C 0.9-2.4 at 5 °C
Continuously stirred tank reactor	<4
Plug flow anaerobic system	<4

(ที่มา: Metcalf และ Eddy (2014))

อัตราส่วนระหว่างกรดต่อสภาพต่าง

ในการเดินระบบบำบัดแบบไร้อากาศนั้นเกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์หลักทั้ง 2 ประเภทคือ จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดและจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ซึ่งจุลินทรีย์ทั้ง 2 กลุ่มมีอัตราการย่อยสลายที่ไม่เท่ากัน โดยหากไม่สามารถรักษาสสมดุลของอัตราการย่อยสลายระหว่างจุลินทรีย์สองกลุ่มได้ จะส่งผลให้เกิดการสะสมกรดอินทรีย์อยู่ในระบบและทำให้ค่าพีเอชลดลง ซึ่งสามารถควบคุมค่าพีเอชผ่านการเติมสารบัฟเฟอร์ตั้งอภิยาไว้ก่อนหน้า ทั้งนี้ค่าปริมาณกรดที่สะสมอยู่ในระบบนั้นไม่ได้ถูกสารบัฟเฟอร์ย่อยสลาย หากแต่เป็นการปรับสมดุลของค่าพีเอชเท่านั้น จึงต้องทำการติดตามค่าปริมาณกรดที่สะสม

ในระบบอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อผู้เดินระบบจึงมีการแนะนำค่าอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างที่เหมาะสมต่อการเดินระบบบำบัดชีวภาพไร้อากาศว่าควรต่ำกว่าหรือเท่ากับ 0.4 Pishgar และคณะ (2014) ที่ถือเป็นสภาวะที่ระบบสามารถเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีแบบไร้อากาศได้อย่างครบถ้วน

ระยะเวลาพักเก็บน้ำ

สำหรับการเดินระบบทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นระบบชีวภาพหรือระบบทางเคมี ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นต่อสารทำปฏิกิริยา (เชื้อจุลินทรีย์สำหรับระบบชีวภาพ) เป็นสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึง เนื่องจากการใช้ระยะเวลาพักเก็บน้ำมากเกินไปจะส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงานและทรัพยากรในการเดินระบบ ในทางกลับกันหากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามีค่ามากกว่าระยะเวลาในการพักเก็บน้ำของระบบจะมีแนวโน้มที่ปฏิกิริยาจะเกิดได้ไม่สมบูรณ์หรืออาจเกิดการล้มเหลวได้ รวมถึงเมื่อเป็นระบบที่ใช้การทำงานแบบสัมพันธ์กันระหว่างปฏิกิริยาหลากหลายชนิด เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพแบบไร้อากาศที่อาศัยการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดและจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ระยะเวลาพักเก็บน้ำที่เหมาะสมกับปฏิกิริยาของระบบ และรูปแบบของระบบ โดยค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบบำบัดแบบไร้อากาศชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ระยะเวลาพักเก็บน้ำที่เหมาะสมกับระบบชนิดต่างๆ

Configuration type	HRT (hr)
Upflow anaerobic sludge blanket (UASB)	4-8
Anaerobic filter	24-72
Anaerobic migrating blanket reactor	4-12
Anaerobic sequencing batch reactor	0.5 (Settling)

(ที่มา: (Metcalf และ Eddy, 2014))

การคงสภาพไร้อากาศ

ในการเดินระบบไร้อากาศนั้นการคงสภาพไร้อากาศอย่างสมบูรณ์เป็นไปได้ยาก จึงต้องอาศัยพารามิเตอร์โออาร์พี (ORP: Oxidation Reduction Potential) เป็นตัวแปรเพื่อบ่งบอกถึงความสามารถในการออกซิเดชัน ซึ่งสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียนั้นสามารถบ่งบอกได้ถึงสภาวะปฏิกิริยาในระบบว่าอยู่ในสภาวะที่มีอากาศเหลือมากน้อยเท่าใด โดยค่าโออาร์พีสำหรับปฏิกิริยาต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.8 ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นช่วงค่าแนะนำสำหรับปฏิกิริยาชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.8 ค่าโออาร์พีของปฏิกิริยาการบำบัดน้ำเสียชนิดต่างๆ

Reaction name	Condition	ORP (mV)
Oxidation	Aerobic	above +100
Denitrification	Anaerobic	0 to +100
Fermentation	Anaerobic	0 to -100
Acid formation	Anaerobic	-100 to -200
Sulfate reduction	Anaerobic	below -200
Methane formation	Anaerobic	below -200

(ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2542))

การเลือกรูปแบบถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสม

ดังที่กล่าวไว้ว่าการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันของเชื้อจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ในน้ำเสียสามารถดำเนินการได้ด้วยการเพิ่มการผสมภายในถังปฏิกรณ์ และการเลือกรูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสม การกวนผสมนั้นโดยส่วนใหญ่นิยมใช้ใบพัดกวนเพื่อก่อให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนขึ้นในถังปฏิกรณ์ อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ใบพัดมีโอกาสสูงที่น้ำเสียจะเกิดการปะทะและออกซิเจนจากอากาศจะละลายลงสู่น้ำเสีย สำหรับการเดินระบบแบบไร้อากาศนั้นถือว่าเป็นปัจจัยเสี่ยงที่อาจทำให้จุลินทรีย์กลุ่มไร้อากาศหยุดปฏิกิริยาทางชีวภาพ ดังนั้นสำหรับการเดินระบบแบบไร้อากาศจึงมักเลือกใช้รูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่ก่อให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนขึ้น ซึ่งถังปฏิกรณ์ที่นิยมใช้ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศมีหลากหลายประเภท เช่น ระบบยูเอเอสบี ระบบฟลูอิดไดซ์เบด ระบบเมมเบรนไร้อากาศ

และระบบอจีเอสปี เป็นต้น อย่างไรก็ตามระบบถังปฏิกรณ์รูปแบบไหลขึ้น (Upflow bioreactor) นั้น จะเป็นการบังคับให้น้ำเสียไหลผ่านจุลินทรีย์จากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน เพื่อเพิ่มโอกาสสัมผัสของ จุลินทรีย์และน้ำเสีย อีกทั้งยังสามารถเพิ่มอัตราการไหลขึ้นการเพิ่มระบบเวียนน้ำที่แลกเปลี่ยนด้วยอัตรา การกินพลังงานที่สูงขึ้น ทั้งนี้ลักษณะการไหลของน้ำที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์นั้น สามารถตรวจสอบ ได้จากการวิเคราะห์ค่าการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ (Residence time distribution: RTD)

การทดสอบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการทดสอบลักษณะการไหลของน้ำในพื้นที่ต่างๆ ด้วยการปล่อยสาร ติดตามลงสู่ทางน้ำขาเข้า และตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของสารติดตามเมื่อระยะเวลาผ่านไป (Levenspiel, 1999) โดยค่าความเข้มข้นของสารติดตามที่เปลี่ยนไปนั้นสามารถนำมาคำนวณตาม สมการที่ 2.12 ถึง 2.18 เพื่อหาค่าพื้นที่อ้อมของพื้นที่ทดลอง และหาอัตราส่วนระหว่างถังชนิดกวน สมบูรณ์ (Continuous stirred tank reactor: CSTR) และถังไหลต่อเนื่อง (Plug flow reactor: PFR) ได้จากสมการที่ 2.18

สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบและลักษณะการไหลของของเหลวในถังปฏิกรณ์

$$E = \frac{C_i}{\sum C_i \Delta t} \quad (2.12)$$

$$t_m = \frac{\sum t_i C_i}{\sum C_i} \quad (2.13)$$

$$\sigma^2 \cong \frac{\sum (t_i - t_m)^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - t_m^2 \quad (2.14)$$

$$\theta = \frac{t_i}{t_m} \quad (2.15)$$

เมื่อ E คือ (Exit age time distribution)

C_i คือ ค่าความเข้มข้นของสารติดตามที่ตรวจวัดได้

- t_i คือ ระยะเวลาที่ใช้ต่อการตรวจวัด 1 ค่า
 t_m คือ ระยะเวลาที่เก็บเฉลี่ยที่ของไหลใช้ในระบบ
 σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลา และ
 θ คือ อัตราส่วนระหว่างเวลาที่ทำกรตรวจวัดและระยะเวลาที่เก็บ

จริงในระบบ

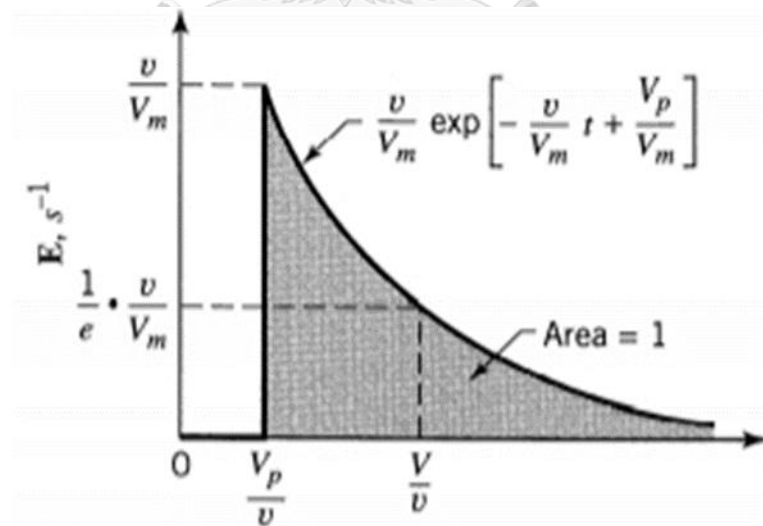
สมการสำหรับคำนวณโมเดลถึงกวนสมบูรณ์ต่ออนุกรม

$$E_\theta = t_m E \quad (2.16)$$

$$E_\theta = (N t_m) E = N \frac{(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} e^{-N\theta} \quad (2.17)$$

$$\Delta\sigma^2 = \frac{(\Delta t_m)^2}{N} \quad (2.18)$$

และเมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า E จากสมการที่ 2.12 กับระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างจะสามารถหาอัตราส่วนได้ปริมาตรถึงกวนสมบูรณ์และถึงไหลต่อเนื่องได้จากรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ของโมเดลแยกชิ้นส่วน (ถึงไหลต่อเนื่องและถึงกวนสมบูรณ์ต่ออนุกรม)

ระบบบำบัดน้ำเสียที่บรรจุตัวกลาง

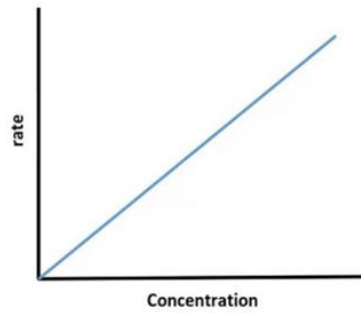
ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพนั้นการรักษาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ให้คงอยู่ในระบบเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อความสามารถของระบบนั้นๆ หากผู้เดินระบบไม่สามารถรักษาและกักเชื้อจุลินทรีย์ไว้ในระบบให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลให้ระบบนั้นล้มเหลวได้ จึงได้มีการพัฒนาตัวกลางเพื่อใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โดยตัวกลางที่ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียนั้นจะทำหน้าที่เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยให้กับเชื้อจุลินทรีย์และเพิ่มปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบให้สูงขึ้น Salama และคณะ (2014) ซึ่งทำให้การใช้ตัวกลางในระบบบำบัดแบบไร้อากาศนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพราะระบบบำบัดแบบไร้อากาศนั้นมีอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ต่ำเมื่อเทียบกับระบบบำบัดใช้อากาศ Metcalf และ Eddy (2014) โดยในอดีตตัวกลางที่นิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพคือ ทรายและถ่านกัมมันต์ เนื่องจากมีความสามารถในการทนความร้อนได้มากกว่า 70°C (ในกรณีที่ใช้ Thermophilic reactor) นอกจากนี้ยังสามารถทนสารเคมีชนิดต่างๆ ได้ อีกทั้งหากเป็นการเดินระบบประเภทไหลขึ้นนั้นการใช้ตัวกลางในระบบเป็นการเพิ่มการปั่นป่วนของการไหลภายในถังปฏิกรณ์ เนื่องจากระบบมีโมเลกุลของของแข็งที่ปิดกั้นทางไหลของน้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตามการนำตัวกลางมาปรับใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียนั้นมีค่าใช้จ่ายสำหรับการจัดซื้อตัวกลาง และไม่ใช่ว่าทุกชนิดถึงปฏิกรณ์ที่จะสามารถบรรจุตัวกลางได้

ค่าจลนพลศาสตร์

ค่าจลนพลศาสตร์เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งที่ไว้ใช้อธิบายถึงอัตราของปฏิกิริยาต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาชีวภาพ โดยสำหรับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ค่าจลนพลศาสตร์สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบ ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถบ่งชี้ได้ถึงความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา หรือปฏิกิริยาจำเพาะชนิดต่างๆ ค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแต่ละปฏิกิริยาจะมีค่าไม่เท่ากันขึ้นกับรูปแบบของปฏิกิริยานั้น ทั้งนี้แม้จะเป็นปฏิกิริยาชนิดเดียวกันค่าจลนพลศาสตร์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ชนิดของน้ำเสีย รูปแบบของถังปฏิกรณ์ สภาวะการเดินระบบที่ปรับใช้ เป็นต้น สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพนั้นค่าจลนพลศาสตร์จะขึ้นกับความสามารถของ

เชื้อจุลินทรีย์เป็นหลัก และมีปัจจัยทางด้านถังปฏิกรณ์เป็นรอง ทั้งนี้สมการหลักที่ใช้ในการคำนวณค่าจลนพลศาสตร์แบ่งออกได้ดังนี้

สมการอันดับหนึ่ง



รูปที่ 2.5 กราฟสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

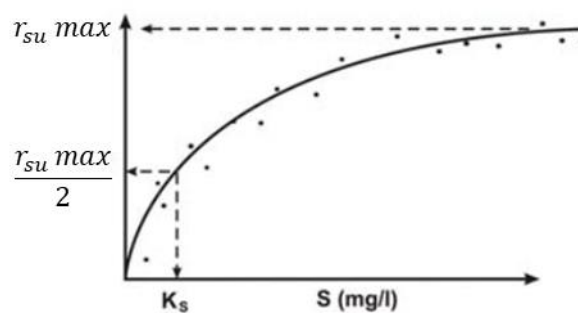
$$r = -kC_A \quad (2.19)$$

เมื่อ r = อัตราการบำบัดสารอินทรีย์ (ก.ซีไอดี/วัน)

K = ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (วัน⁻¹)

C_A = ความเข้มข้นสารอินทรีย์ขาออก (มก./ล.)

สมการปฏิกิริยาทางชีวภาพที่ดัดแปลงจากสมการของโมนอท



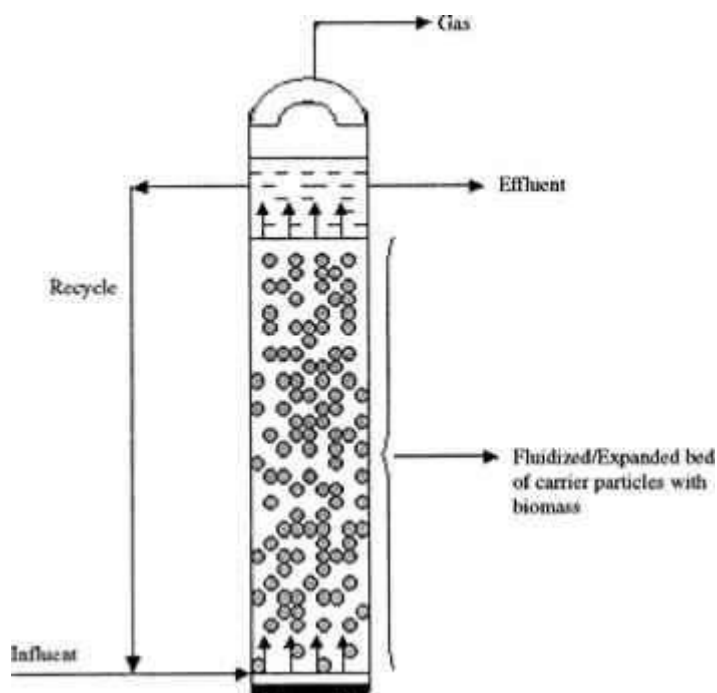
รูปที่ 2.6 กราฟสมการปฏิกิริยาของโมนอท

$$r_{su} = \frac{kXS}{K_S + S} \quad (2.20)$$

เมื่อ	r_{su}	=	อัตราการบำบัดสารอินทรีย์ (มก./ล.-วัน)
	kX	=	อัตราการบำบัดสารอินทรีย์สูงสุด (มก./ล.-วัน)
	K_S	=	ความเข้มข้นครึ่งปฏิกิริยา (มก./ล.)
	S	=	ความเข้มข้นสารอินทรีย์ขาออก (มก./ล.)

ระบบบำบัดฟลูอิดไดซ์เบด

ระบบบำบัดไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed reactor) เป็นรูปแบบถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางและมีลักษณะการทำงานโดยจ่ายน้ำเสียเข้าสู่ระบบทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ เพื่อให้เกิดการกวนผสมของน้ำเสียที่จ่ายเข้าระบบและจุลินทรีย์บนตัวกลางในสภาวะกึ่งของเหลว ระบบนี้ถูกจัดอยู่ในประเภทฟิล์มตรึง (Fixed film) โดยค่าอัตราการไหลขึ้นของระบบต้องมีค่าสูงเพียงพอที่จะส่งผลให้ชั้นตัวกลางภายในถังปฏิกรณ์ยกตัว รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบต่างๆ และการหมุนเวียนน้ำในระบบฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งจากลักษณะการทำงานดังกล่าวจะส่งผลให้ระบบนี้สามารถสร้างสภาวะการกวนผสมที่เหมาะสม ทำให้เชื้อจุลินทรีย์มีโอกาสที่จะสัมผัสและเริ่มกระบวนการบำบัด และสามารถรองรับภาระสารอินทรีย์เข้าระบบได้มากกว่ารูปแบบถังปฏิกรณ์บำบัดไร้อากาศอื่นๆ อย่างไรก็ตามการเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบดอย่างมีประสิทธิภาพจะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ ลักษณะการเคลื่อนที่ของชั้นเบดภายในระบบที่เรียกว่า สภาวะฟลูอิดไดซ์เซชัน และชนิดของตัวกลางที่บรรจุอยู่ในถังปฏิกรณ์ โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบฟลูอิดไดเซซัน

(ที่มา: <https://www.climate-policy-watcher.org/industrial-wastes/figure-8-diagrammatic-representation-of-anaerobic-filter-process-from-ref-77.html>) (เข้าถึงข้อมูล 26/9/61)

สภาวะฟลูอิดไดเซซัน

ฟลูอิดไดเซซันเป็นสภาวะการเคลื่อนไหวของอนุภาคของแข็งภายในระบบ ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่ในสภาวะแขวนลอยอยู่ในของเหลว ดังนั้นระบบฟลูอิดไดเซซันต้องถูกออกแบบให้มีความเร็วน้ำไหลขึ้นที่สูงเพียงพอเพื่อยกชั้นตัวกลางให้อยู่สภาวะฟลูอิดไดเซซัน โดยมีอัตราการขยายตัวของชั้นตัวกลางที่เหมาะสมภายในระบบในช่วงร้อยละ 20-300 (Metcalf&Eddy, 2014) และหากต้องการให้เกิดการกวนผสมควรใช้การขยายตัวเท่ากับร้อยละ 150 (ศาสนนันท์, 2538) ทั้งนี้ค่าดังกล่าวจะแปรผันไปตามลักษณะจำเพาะของตัวกลางที่บรรจุอยู่ในถังปฏิกรณ์โดยต้องคำนวณค่าความเร็วไหลขึ้น (Upflow velocity) ของระบบให้เหมาะสมจากสมการความดันลดของ Ergun สำหรับการคำนวณระบบเบดเคลื่อนตัว (Moving bed) ในการเดินระบบเพื่อให้เกิดสภาวะฟลูอิดไดเซซันไม่ว่าจะเป็นระบบชนิดใด การรักษาสภาวะดังกล่าวถือเป็นเรื่องสำคัญเพราะจุดเด่นของสภาวะดังกล่าวคือการกวนผสมที่มีมากกว่าระบบอื่นๆ โดยทั่วไปในขั้นตอนการออกแบบระบบชนิดเบดเคลื่อน

ตัวนั้นจะมีการเพิ่มอัตราไหลขึ้นภายในระบบให้สูงขึ้นเพื่อคงสถานะฟลูอิดไดเซชันด้วยวิธีการเวียนน้ำกลับเข้าสู่ระบบ ซึ่งแลกมาด้วยการใช้พลังงานที่สูงขึ้นเนื่องจากจำเป็นต้องติดตั้งชุดเครื่องสูบน้ำเวียนเพิ่ม อย่างไรก็ตามในแง่ของประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำการทดลองของ (ศิริกุลวัฒนา, 2555) ได้ทำการทดลองเดินระบบฟลูอิดไดซ์แบบไม่เวียนน้ำโดยยังควบคุมการเกิดสถานะฟลูอิดไดเซชันภายในระบบ พบว่าความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีนั้นมีค่ามากกว่าร้อยละ 80 ที่อัตราการสารอินทรีย์ 5, 15 และ 30 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน

ความเร็วไหลขึ้นของระบบฟลูอิดไดซ์เบด

ค่าความถ่วงจำเพาะของตัวกลางเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียประเภทตัวกลางเคลื่อนที่ เนื่องจากระบบนี้ถูกออกแบบให้น้ำเสียไหลในทิศทางจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนผ่านจุลินทรีย์ที่เติบโตอยู่บนตัวกลาง ดังนั้นความเร็วในการไหลขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่าความถ่วงจำเพาะของตัวกลาง หากตัวกลางมีค่าความถ่วงจำเพาะมากจะต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อให้ตัวกลางเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลงเมื่อเทียบกับตัวกลางที่มีค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำ การคำนวณค่าความเร็วในการไหลขึ้นของระบบเพื่อให้ตัวกลางเกิดการเคลื่อนไหวในลักษณะสถานะฟลูอิดไดซ์เซชัน สามารถหาได้จากสมการที่ (2.30) ส่วนความสูงในการขยายตัวของชั้นตัวกลางจะคำนวณได้จากสมการที่ (2.31)

$$\frac{\rho \bar{V}_{0M}^2}{\varphi_s D_p \varepsilon_M^3} \left(\frac{150\mu(1-\varepsilon_M)}{\varphi_s \bar{V}_{0M} \rho D_p} + 1.75 \right) = g(\rho_p - \rho) \quad (2.30)$$

เมื่อ;	\bar{V}_{0M}	=	ความเร็วต่ำสุดในการเกิดสถานะฟลูอิดไดเซชัน (ชม./วินาที)
	μ	=	ความหนืดจำเพาะของของเหลว
	φ_s	=	ค่าความเป็นทรงกลม
	D_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลาง (ชม.)
	ε_M	=	ความเป็นรูพรุนต่ำสุดที่ก่อให้เกิดสถานะฟลูอิดไดเซชัน
	ρ_p	=	ความหนาแน่นของอนุภาค (ก./ลบ.ชม.)
	ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล (ก./ลบ.ชม.)

$$L = L_M \frac{1-\varepsilon_M}{1-\varepsilon} \quad (2.31)$$

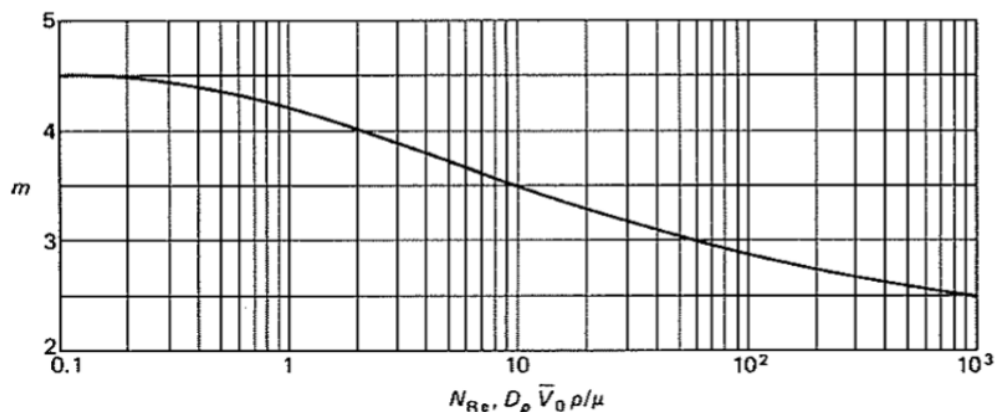
$$\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_M}\right)^m = \frac{\bar{V}_0}{\bar{V}_{0M}} \quad (2.32)$$

- เมื่อ; L = ความสูงของชั้นเบดที่ความเร็วสุดท้าย (ซม.)
 L_M = ความสูงของชั้นเบดเมื่อเริ่มสภาวะฟลูอิดไดเซชัน (ซม.)
 ε = ค่าความเป็นรูพรุนของสภาวะฟลูอิดไดเซชันที่ความเร็วสุดท้าย
 \bar{V}_0 = ความเร็วสุดท้ายของสภาวะฟลูอิดไดเซชัน (ซม./วินาที)

$$N_{Re} = \frac{\rho V D_p}{\mu} \quad (2.33)$$

- เมื่อ N_{Re} = Reynold's number

ค่าคงที่ m ใช้ในการคำนวณอัตราการขยายตัวของชั้นตัวกลางเมื่อเกิดสภาวะฟลูอิดไดเซชัน สามารถหาได้จากรูปที่ 2.8 โดยการแทนค่า Reynold's number ของระบบ



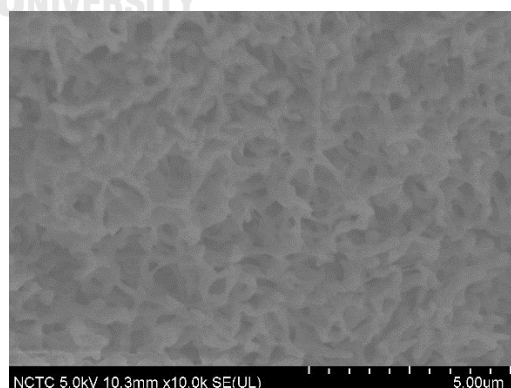
รูปที่ 2.8 ค่าคงที่ m ที่เลขเรย์โนลด์ค่าต่างๆ

จากสมการที่ 2.30 จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ทางด้านลักษณะจำเพาะของตัวกลางนั้นส่งผลอย่างยิ่งต่อค่าความเร็วไหลขึ้นสำหรับการเกิดสภาวะฟลูอิดไดเซชัน ทำให้การเลือกใช้ตัวกลางชนิดที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าความเร็วไหลขึ้นขึ้นต้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งตัวกลางชนิดต่างๆ ที่นิยมใช้ในการเดินระบบบำบัดทางชีวภาพ ทั้งนี้เทคโนโลยีในปัจจุบันได้มีการดัดแปลงนำพลาสติกจำพวกโพลีเมอร์มาใช้เป็นตัวกลางในระบบบำบัดทางชีวภาพไม่ว่าจะเป็น PBS, PHBA, PHBV, PVA และ HDPE เป็น

ตัน ซึ่งตัวกลางจำพวกพลาสติกนี้จะมีข้อได้เปรียบมากกว่าตัวกลางประเภททรายและถ่านกัมมันต์ทางด้านน้ำหนักและค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่า

ตัวกลางพีวีเอเจล

วัสดุพลาสติกสังเคราะห์โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ของทางบริษัท คูราเรย์ จำกัด ถูกดัดแปลงและผลิตสำหรับการใช้งานเป็นตัวกลางในระบบบำบัดทางชีวภาพโดยตรง โดยตัวกลางดังกล่าวจะมีลักษณะจำเพาะดังตารางที่ 2.10 อีกทั้งยังมีข้อดีของถ่านกัมมันต์ที่ภายในโครงสร้างของตัวกลางจะมีความเป็นรูพรุน รูปที่ 2.9 และมีพื้นผิวที่จุลินทรีย์สามารถเข้ามายึดเกาะได้ อีกทั้งยังมีข้อดีจากวัสดุประเภทโพลีเมอร์ที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำเมื่อเทียบกับตัวกลางชนิดอื่นๆ ส่งผลให้ตัวกลางพีวีเอเจลนั้นมีความเหมาะสมที่จะมาประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดชนิดไร้อากาศจากความสามารถในการกักเชื้อจุลินทรีย์ไว้ในพื้นผิว และสามารถใช้ได้ดีในระบบประเภทไหลขึ้นเพราะมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำเมื่อนำมาคำนวณตามสมการความดันลดในสมการที่ 2.30 เปรียบเทียบระหว่างตัวกลางประเภททราย ถ่านกัมมันต์ ยาง และพีวีเอเจล ดังตารางที่ 2.9 เห็นได้อย่างชัดเจนว่าตัวกลางพีวีเอเจลนั้นมีความต้องการค่าอัตราไหลขึ้นที่ต่ำกว่าตัวกลางชนิดอื่นๆ เพื่อให้เกิดสภาวะฟลูอิดไดเซชัน รวมไปถึงในตารางที่ 2.11 แสดงผลการทดลองจากงานวิจัยก่อนหน้าที่ทำการทดลองเดินระบบบำบัดชีวภาพรูปแบบต่างๆ ที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลาง ได้ผลว่าระบบนั้นมีเชื้อจุลินทรีย์เกาะบนตัวกลางมากกว่าชนิดอื่น



รูปที่ 2.9 โครงสร้างภายในตัวกลางพีวีเอเจล

ตารางที่ 2.9 ความเร็วชั้นต่ำสำหรับสภาวะฟลูอิดไดเซชันของตัวกลางชนิดต่างๆ

	Clay	AC	ทราย	เม็ดยาง	PVA	PVA (ในงานวิจัยนี้)
ขนาดตัวกลาง (มม.)	2.3	0.5-5	2	0.043	2-3	0.5-1.0
ความถ่วงจำเพาะ (ก./ซม. ³)	1.55-1.70	2.0-2.1	2.56	1.2	1.025	1.025
ความเร็วไหลขึ้น (ม./ชม.)	57.18	8.02	11.77	1.56	3.02	0.20

ตารางที่ 2.10 ลักษณะจำเพาะของตัวกลางพีวีเอเจล

Parameters	Value
Shape	Spherical beads
Specific Gravity	1.025±0.01
Bead diameter (mm.)	4.5±1.0
Solubility	Insoluble in water
Settle bead count (L)	20,000
Melting point °C	230
Toxicity	Non to microorganism

ตารางที่ 2.11 ลักษณะจำเพาะของตัวกลางพีวีเอเจลเทียบกับตัวกลางอื่นๆ

Inert material	Clay	Foam	GAC	PAC	PVA-gel beads
Media size (mm)	2.3	5.0	0.4	0.2	2-3
Density (g/cm ³)	1.55-1.70	0.05			1.03
Biomass attachment (g/cm ³ inert material)	0.05-0.08	0.08-0.25	0.7	0.5	0.9
Predominant MO.		<i>Methanosaeta</i>	<i>Methanosaeta</i>	<i>Methanosaeta</i>	<i>Methanosarcina</i>

(ที่มา: (Zhang และคณะ, 2009))

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบบำบัดไร้อากาศฟลูอิดไดซ์เบด

(ศิริกุลวัฒนา, 2555) ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นต่ำด้วยถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดในสถานะไม่มีการหมุนเวียนน้ำภายใน เมื่อเดินระบบที่ภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 30 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน (คิดเป็นซีโอดี 1,045 มก./ล.) ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 0.84 ชม. พบว่าสามารถกำจัดซีโอดีได้สูงถึงร้อยละ 96.49 และที่ภาระสารอินทรีย์ 15 และ 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน สามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 88.44 และ 91.02 ตามลำดับ โดยสรุปได้ว่าถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำมีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีใกล้เคียงกับถังปฏิกรณ์แบบเวียนน้ำ

(รุ่งกิจพัฒนานุกุล, 2553) ทำการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบบำบัดไร้อากาศฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้เม็ดยางเป็นตัวกลาง กำหนดภาระสารอินทรีย์ของระบบเท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 78.38 94.80 97.70 และ 94.60 ตามลำดับ อีกทั้งมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ 0.62 ล./กก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด และมีร้อยละมีเทนถึง 55.30 ที่ค่าภาระสารอินทรีย์ 15 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

(Zhang และคณะ, 2009) ทำการทดลองใช้พีวีเอเจลที่มีหัวเชื่อมจุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำหมักข้าวโพดด้วยระบบไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบด ถึงปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองถูกออกแบบให้มีพื้นที่หน้าตัด ความสูง และปริมาตรใช้งานเท่ากับ 36 ตร.ซม. 110 ซม. และ 3.9 ล. ตามลำดับ ลักษณะน้ำเสียเป็นน้ำหมักข้าวโพดที่มีอัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 100:7:2.5 พบว่าเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล สามารถกำจัดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 96 ที่ค่าภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 25 ก./ล.-วัน และระยะเวลาพักเก็บน้ำเท่ากับ 10 ชม. อย่างไรก็ตามในการทดลองได้มีการเปลี่ยนค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำจาก 10 ชม. เป็น 6 ชม. ทำให้ค่าภาระสารอินทรีย์เปลี่ยนจาก 29.78 เป็น 51.79 ก./ล.-วัน ส่งผลให้เกิดการสะสมของกรดและมีค่าพีเอชลดต่ำลง จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำของระบบไร้อากาศควรมีค่ามากกว่า 6 ชม.

(Pishgar และคณะ, 2014) ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราภาระสารอินทรีย์และระยะเวลาพักเก็บน้ำต่อน้ำเสียฟีนอลในระบบบำบัดไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบด (Immobilized) โดย

จากผลการทดลองที่ค่าระยะเวลาเก็บน้ำ 16 ชม. มีค่าความเข้มข้นฟีนอลอยู่ในช่วง 98 ถึง 630 มก./ล. สามารถบำบัดซีโอทีได้ร้อยละ 96 และ 88 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นฟีนอลเข้าเท่ากับ 995 มก./ล. ระบบสามารถบำบัดสารอินทรีย์ในรูปฟีนอลและซีโอทีได้เท่ากับร้อยละ 84 และ 79 ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อเปลี่ยนค่าระยะเวลาเก็บน้ำจาก 3 วัน เป็น 0.15 วัน ระบบสามารถส่งเสริมสภาพในการบำบัดฟีนอลและซีโอทีเท่ากับร้อยละ 97 และ 90.5 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อลดค่าระยะเวลาเก็บน้ำจนถึง 0.1 วันระบบไม่สามารถส่งเสริมสภาพและล้มเหลวในที่สุด (อัตราการบำบัดสารอินทรีย์เท่ากับ 18.34 ก.ซีโอที/ล.-วัน)

(Siqueira และคณะ, 2013) ศึกษาอิทธิพลของภาระสารอินทรีย์ต่อระบบบำบัดน้ำเสียและอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากไวน์ในระบบบำบัดไร้อากาศประเภทฟลูอิดไดซ์เบด โดยตั้งปฏิกรณ์ถูกออกแบบให้มีความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 190 และ 5.3 ซม. ตามลำดับ มีระยะเวลาเก็บน้ำเท่ากับ 24 ชม. ควบคุมความเข้มข้นของซีโอทีเข้าอยู่ในช่วง 2,273 ถึง 20,073 มก./ล. พบว่าระบบสามารถบำบัดน้ำเสียดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ว่าน้ำเสียจะมีองค์ประกอบที่หลากหลายสามารถกำจัดซีโอทีได้ช่วงร้อยละ 51 ถึง 70 ที่ค่าอัตราการบำบัดสารอินทรีย์ 13.93 ± 2.18 กก.ซีโอที/ลบ.ม.-วัน และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 5.37 ลบ.ม.มีเทน/ลบ.ม.-วัน สำหรับค่าภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 25.32 กก.ซีโอที/ลบ.ม.-วัน

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลางในระบบ

(Khanh และคณะ, 2011) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อระบบบิวเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นต่ำเมื่อใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลาง ผลการทดลองพบว่าความสามารถในการกำจัดซีโอทีลดลงร้อยละ 50 ทุกๆ อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป 10 °ซ

(Chaikasem และคณะ, 2014) ทดลองใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลางสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดไร้อากาศเทอโมฟิลิกแบบแยกถังกรดที่มีถังมีเทนและเมมเบรนต่อ โดยระบบถูกออกแบบให้รองรับภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 6 และ 8 กก.ซีโอที/ลบ.ม.-วัน ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถกำจัดซีโอทีได้ร้อยละ 89 - 92 และมีปริมาณการผลิตมีเทน 1.5 - 1.9 ล.มีเทน/ล.ถังปฏิกรณ์-วัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากการทดลองว่าพีวีเอเจลสามารถใช้เป็นตัวกลางในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(Hoa และคณะ, 2006) ทำการทดลองเดินระบบบำบัดไนโตรเจน (Anammox) ที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลางในระบบฟลูอิดไดซ์เบด เดินระบบที่ความเข้มข้นแอมโมเนียไนโตรเจนและไนโตรเจนไดออกไซด์เท่ากันเท่ากับ 300 มก. ไนโตรเจน/ล. ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บเท่ากับ 16 ถึง 9 ชม. สำหรับการทดลองช่วงที่ 1 และ 9 ถึง 4 ชม. สำหรับการทดลองช่วงที่ 2 โดยสำหรับการทดลองช่วงที่ 1 ระบบมีความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนและไนโตรเจนไดออกไซด์ร้อยละ 81 และ 92 ตามลำดับ สำหรับการทดลองช่วงที่ 2 สามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ร้อยละ 77 และไนโตรเจนไดออกไซด์ร้อยละ 89 และพบว่าพีวีเอเจลเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดงซึ่งเป็นสีของแบคทีเรียกลุ่มอนาม็อก

(Ali และคณะ, 2015) ศึกษาการเริ่มเดินระบบอนาม็อกแบบรวดเร็วโดยใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลางในระบบแบบไหลขึ้น โดยหลังทำการทดลองขนาดเล็ก 35 วัน พบว่ามีค่าความเข้มข้นสารแขวนลอยเท่ากับ 0.33 ก./ล. และมีอัตราการกำจัดไนโตรเจนเท่ากับ 10.8 กก.ไนโตรเจน/ลบ.ม.-วัน ในขณะที่ระบบที่ไม่ใช้ตัวกลางมีความเข้มข้นจุลินทรีย์เท่ากับ 2.5 ก./ล. และอัตราการกำจัดไนโตรเจนเท่ากับ 3.5 กก.ไนโตรเจน/ลบ.ม.-วัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบที่ใช้ตัวกลางมีความต้องการปริมาณเชื้อจุลินทรีย์น้อยกว่าระบบที่ไม่ใช้ตัวกลาง และมีความสามารถในการกำจัดมากกว่าระบบที่ไม่ใช้ตัวกลาง

(Kumar Singh และคณะ, 2016) ทดลองใช้พีวีเอเจลในระบบบำบัดชีวภาพสำหรับน้ำเสียชุมชนจริงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเดิมให้ทำงานลักษณะกึ่งระบบเบดเคลื่อนตัว จากผลการเดินระบบระยะเวลา 4 เดือนพบว่าระบบมีความสามารถในการกำจัดซีโอดี บีโอดี และแอมโมเนียไนโตรเจนสูงขึ้นร้อยละ 91 92 และ 90 ตามลำดับ รวมถึงค่าดัชนีปริมาณตะกอนอยู่ในช่วง 25 - 72 มล./ก. ซึ่งเมื่อคำนวณปริมาณจุลินทรีย์ต่อความเข้มข้นซีโอดีที่ถูกกำจัดได้เท่ากับ 0.18 กก.สารแขวนลอย/กก.ซีโอดี ที่ถูกกำจัด และสามารถบ่งบอกได้ว่าตัวกลาง พีวีเอเจลสามารถใช้งานได้ในระบบขนาดใหญ่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยการดัดแปลงระบบให้กลายเป็นกึ่งระบบเบดเคลื่อนตัว

การศึกษาจลนพลศาสตร์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

(İşik และ Sponza, 2005) ทดลองเดินระบบยูเอเอสบีโดยใช้น้ำเสียจากสิ่งทอ โดยเดินระบบในช่วงระยะเวลาที่เก็บน้ำ 100 ถึง 6 ชม. และเปรียบเทียบค่าความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ (ร้อยละ 90 และ 95 ตามลำดับ) ที่สมการจลนพลศาสตร์ของ Monod, Contois, Grau, Stover-Kincannon และปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยจากผลการทดลองได้ว่ามีรูปแบบจลนพลศาสตร์ใกล้เคียงกับ Grau, Stover-Kincannon และ Contois

(Sharma และ Pooja, 2016) ทดลองศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของถังหมักไร้อากาศจากสมการปฏิกิริยาของ Monod และ Contois ด้วยการแปรค่าอัตราภาระสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบในช่วง 0.951 ถึง 2.4589 ก./ล.-วัน โดยได้ค่าอัตราบำบัดจำเพาะสูงสุดเท่ากับ (μ_m) 0.153 และ 0.140 วัน⁻¹ และมีค่าคงที่ปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 3.06 และ 0.421 วัน⁻¹ เมื่อใช้สมการปฏิกิริยา Monod และ Contois ตามลำดับ

(Emembolu และคณะ, 2017) ทำการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์จากปฏิกิริยา Monod ของถังหมักไร้อากาศจากน้ำเสียร้านอาหารได้ค่าความเข้มข้นครึ่งปฏิกิริยา (K_s) เท่ากับ 108.96 มก./ล. และอัตราการบำบัดจำเพาะสูงสุด (μ_m) เท่ากับ 0.0789 วัน⁻¹

การศึกษาลักษณะของตัวกลางในระบบบำบัดน้ำเสีย

(Fia และคณะ, 2010) ทำการทดลองเปรียบเทียบลักษณะของฟิล์มชีวภาพในระบบบำบัดไร้อากาศที่ใช้น้ำเสียจากกากกาแฟในช่วงความเข้มข้น 812 ถึง 5,320 มก.ซีโอดี/ล. โดยผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นน้ำเสียต่ำกลุ่มประชากรจุลินทรีย์จะมีหลากหลายชนิด รวมถึงชนิดของตัวกลางที่ใช้ในระบบ ส่งผลถึงชนิดของจุลินทรีย์ที่เกาะบนตัวกลาง

(Langer และคณะ, 2014) ทดลองศึกษาการก่อตัวของฟิล์มชีวภาพบนตัวกลางตลอดการเดินถังหมักไร้อากาศ โดยใช้โพลีโฟฟอสเฟตเป็นตัวกลาง และศึกษาจากการนับจำนวนประชากรและกล้องอิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ได้ผลการทดลองที่สามารถสรุปได้ว่าค่าอัตราภาระสารอินทรีย์ที่ปรับใช้กับถังหมักไร้อากาศนั้นส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างของฟิล์มชีวภาพ ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวจะขึ้นกับจำนวนประชากรจุลินทรีย์ในระบบที่จะเพิ่มขึ้นตามอัตราภาระสารอินทรีย์ที่ให้กับถังปฏิกรณ์ และฟิล์ม

ชีวภาพที่มีเชื้อจุลินทรีย์หนาแน่นจะมีความสามารถในการย่อยสลายสูงกว่าฟิล์มที่มีเชื้อจุลินทรีย์ต่ำ ซึ่งส่งผลดีต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

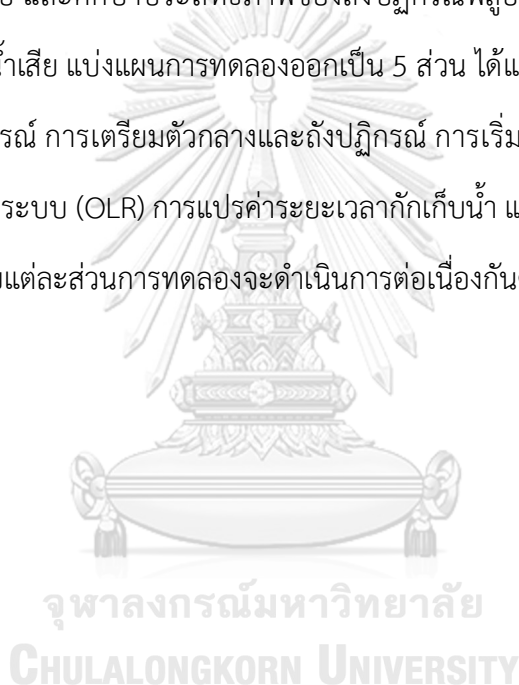
ประเด็นจากการทบทวนทฤษฎีและงานวิจัย

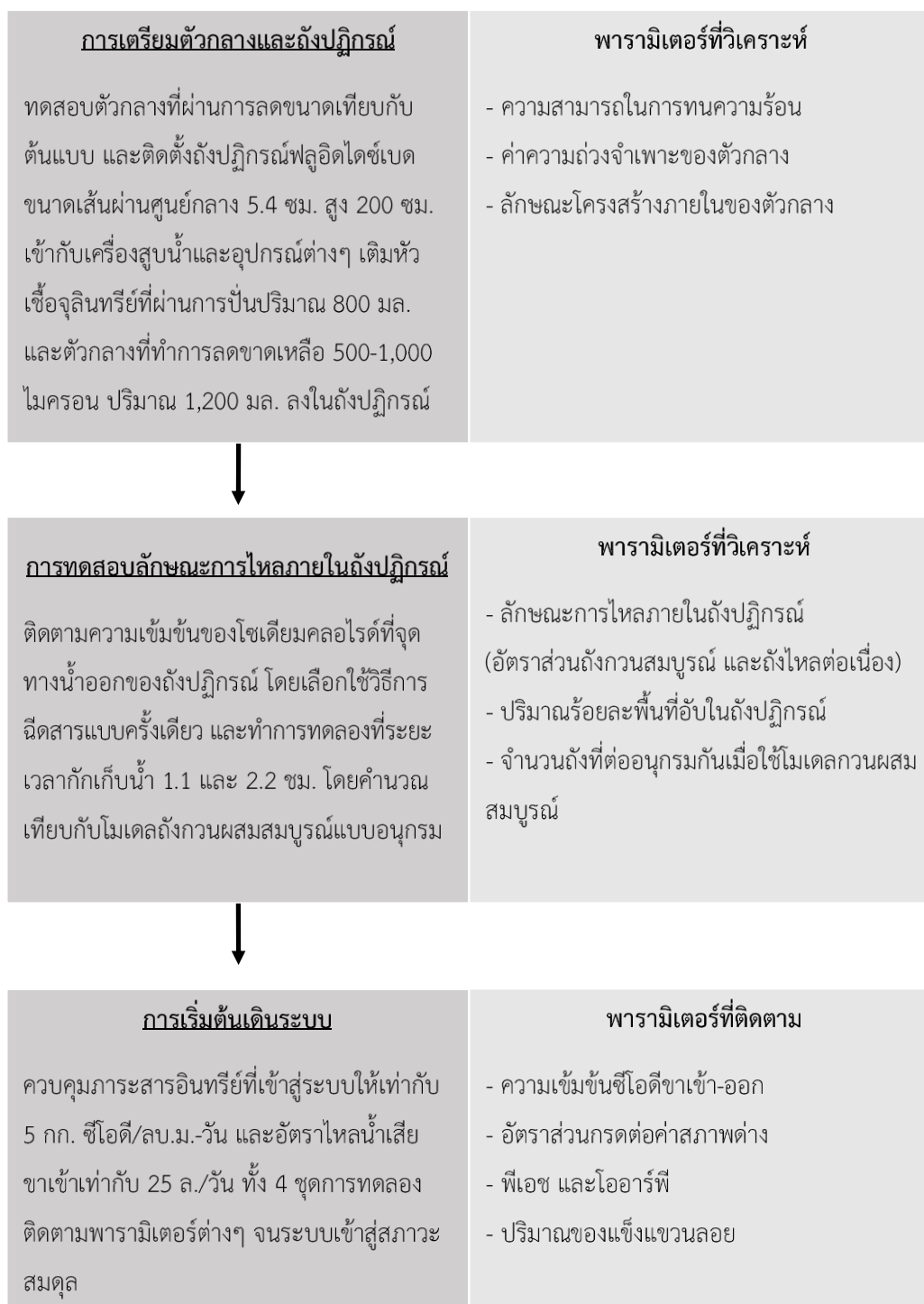
1. ในการเดินระบบบำบัดชีวภาพแบบไร้อากาศนั้นการรักษาสภาวะภายในระบบให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศเป็นสิ่งที่สำคัญ ผ่านการควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.8 - 8.2 และอัตราส่วนกรดต่อด่างน้อยกว่าเท่ากับ 0.4
2. ค่าระยะเวลาที่กักเก็บน้ำและอัตราภาระสารอินทรีย์นั้นมีแนวโน้มที่จะมีผลต่อความสามารถของระบบบำบัดทางชีวภาพอย่างปฏิเสธไม่ได้ โดยค่าระยะเวลาที่กักเก็บน้ำที่ไม่เพียงพอจะส่งผลให้กระบวนการทางชีวภาพไม่ครบกระบวนการ ในขณะที่ถ้าหากมีค่าอัตราภาระสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบมากเกินไปจะส่งผลให้ระบบเข้าสู่สภาวะล้มเหลวเนื่องจากสารอาหารมีมากเกินไปกว่าที่อัตราบำบัดของจุลินทรีย์ หรือระยะเวลาที่กักเก็บน้ำไม่เพียงพอ
3. การเกิดสภาวะฟลูอิดไดเซชันนั้นถือเป็นจุดเด่นของระบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ทำให้ระบบชนิดดังกล่าวมีความสามารถในการกวนผสมมากกว่าระบบชนิดอื่นๆ โดยสภาวะฟลูอิดไดเซชันจะใช้ค่าความเร็วไหลย้อนขึ้นต่ำ มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับค่าลักษณะทางกายภาพของตัวกลางเป็นหลักเมื่อคำนวณจากสมการความดันลดของ Urgan (สมการที่ 2.30)
4. ตัวกลางพีวีเอเจลนั้นมีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นตัวกลางในการเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบด เนื่องจากมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำ อีกทั้งยังมีลักษณะโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนที่จุลินทรีย์สามารถเข้าไปอยู่อาศัยทำให้ตัวกลางชนิดนี้แตกต่างกับตัวกลางชนิดอื่น
5. การเวียนน้ำหรือไม่เวียนน้ำภายในระบบนั้นไม่ส่งผลต่อความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบ หากยังสามารถควบคุมให้ภายในระบบเกิดสภาวะฟลูอิดไดเซชันที่ดีได้
6. การเปลี่ยนชนิดของน้ำเสียจะส่งผลให้ค่าจลนพลศาสตร์เปลี่ยนไป แม้จะใช้ถังปฏิกรณ์รูปแบบเดียวกันและสมการปฏิกิริยาที่ใช้ในการคำนวณค่าทางคณิตศาสตร์สมการเดียวกัน

บทที่ 3

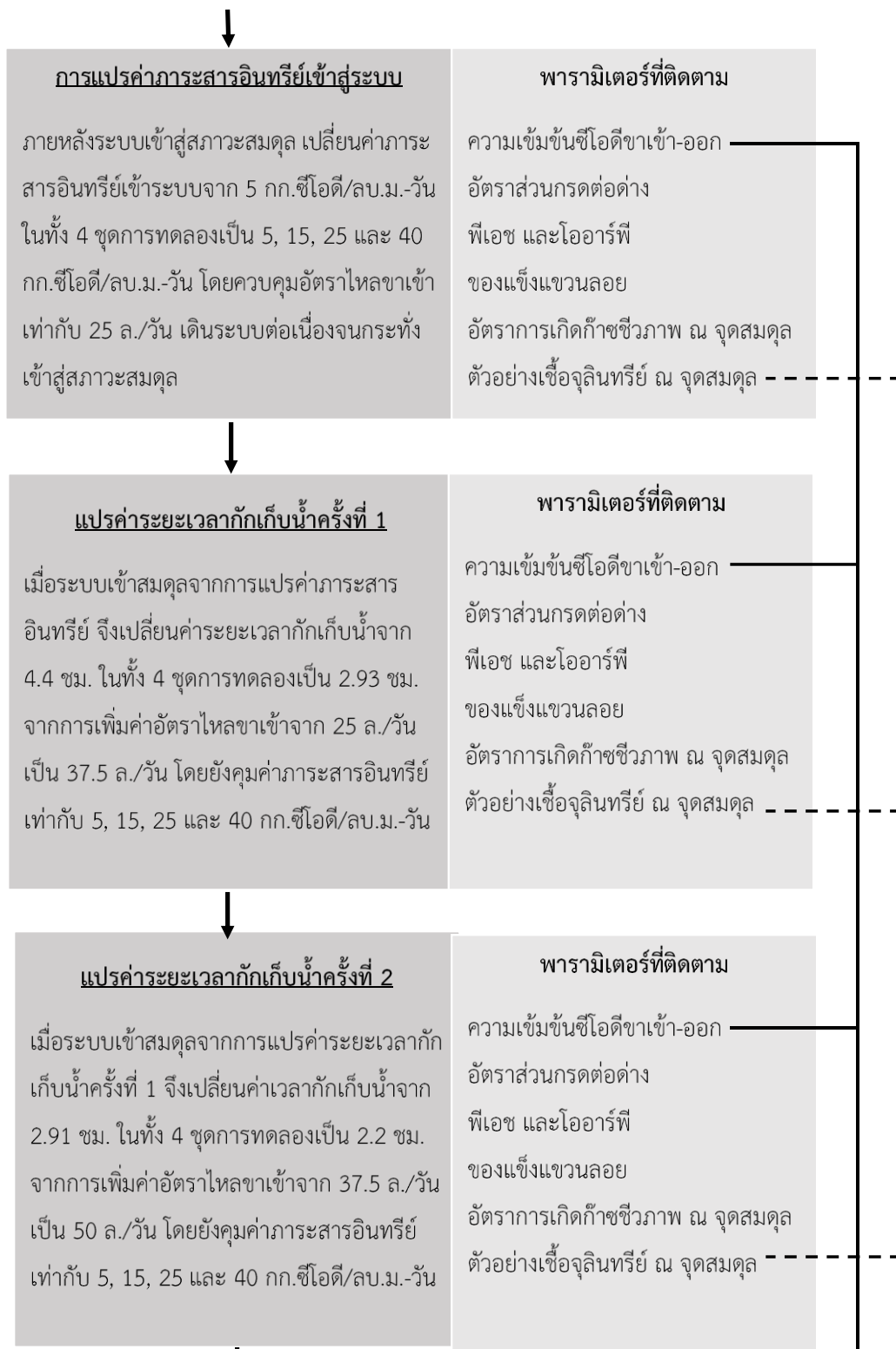
แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองระดับปฏิบัติการ โดยติดตั้งถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์แบบไม่เวียนน้ำ จำนวน 4 ชุดไว้ ณ ห้องปฏิบัติการบัณฑิตศึกษา ชั้น 1 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แต่ละชุดการทดลองประกอบไปด้วย ถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์แบบ เครื่องสูบน้ำ และอุปกรณ์เก็บก๊าซชีวภาพ ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อติดตามความเป็นไปของระบบ และศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์แบบไม่เวียนน้ำในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย แบ่งแผนการทดลองออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ การทดสอบลักษณะการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ การเตรียมตัวกลางและถังปฏิกรณ์ การเริ่มต้นเดินระบบ การแปรค่าอัตราภาระสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ (OLR) การแปรค่าระยะเวลาเก็บน้ำ และการตรวจสอบกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในระบบ โดยแต่ละส่วนการทดลองจะดำเนินการต่อกันดังรูปที่ 3.1 มีรายละเอียดดังนี้

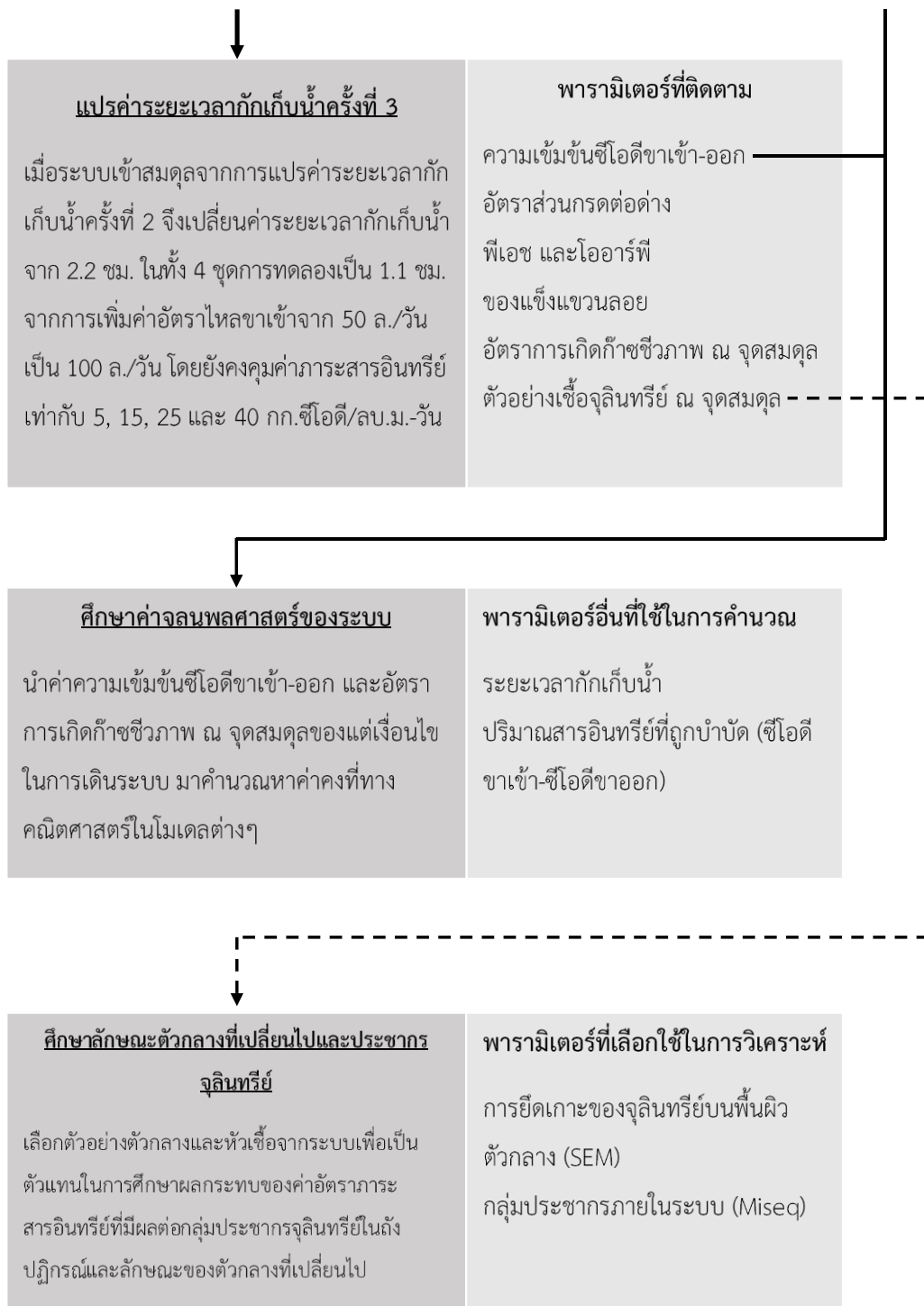




รูปที่ 3.1 แผนการทดลองของงานวิจัย



รูปที่ 3.1 (ต่อ) แผนการทดลองของงานวิจัย



รูปที่ 3.1 (ต่อ) แผนการทดลองของงานวิจัย

วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

ตัวกลางพีวีเอเจล

ตัวกลางพีวีเอเจลต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นพลาสติกสังเคราะห์ชนิดพีวีเอเจลจากบริษัท คูราเรย์ จำกัด มีรูปร่างกลม เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 2 - 3 มม. (รูปที่ 3.2) และมีลักษณะจำเพาะทางกายภาพดังข้อมูลแสดงในตารางที่ 2.10 ทั้งนี้พีวีเอเจลต้นแบบนี้มีขนาดใหญ่เกินกว่าจะใช้สำหรับการเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบดในระดับปฏิบัติการได้โดยตรง จึงต้องทำการลดขนาดตัวกลางพีวีเอเจลต้นแบบให้เล็กลงก่อน ด้วยการบดและกรองแบบเปียกผ่านตะแกรงกรองให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 500-1,000 ไมครอน (Jr. และคณะ, 1980) ซึ่งขนาดดังกล่าวเป็นค่าที่แนะนำสำหรับการเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบด จากนั้นจึงตรวจสอบลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงของตัวกลางต้นแบบ และตัวกลางที่ผ่านการลดขนาด โดยเลือกวิเคราะห์ค่าความถ่วงจำเพาะที่เปลี่ยนไป ซึ่งเป็นปัจจัยหลักสำหรับการคำนวณอัตราไหลย้อนขึ้นต่ำของระบบชนิดฟลูอิดไดซ์เบด



(ก) ตัวกลางต้นแบบ

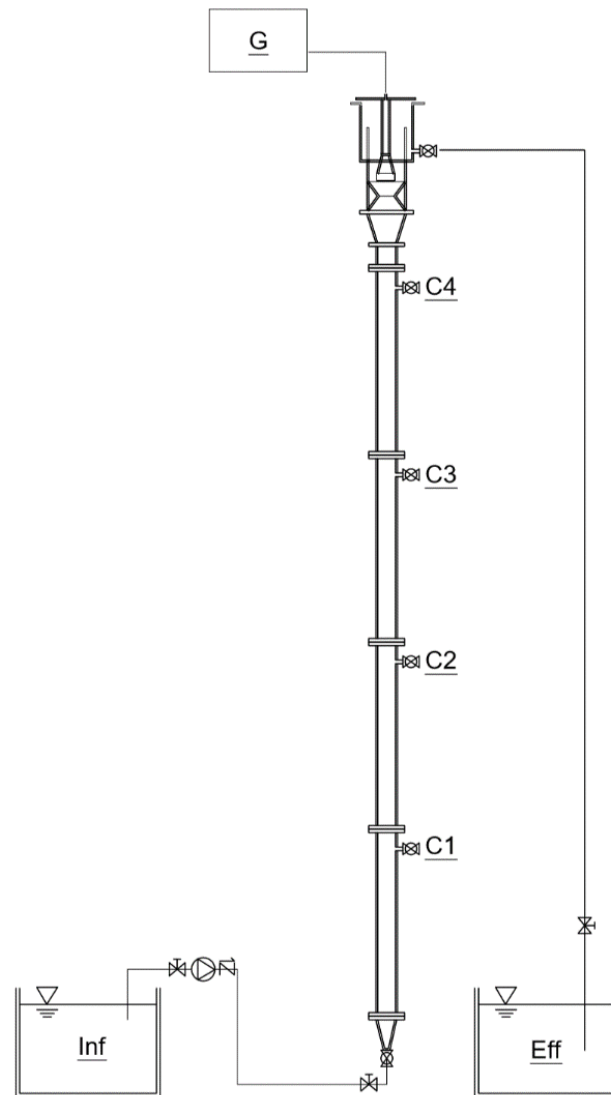


(ข) ตัวกลางที่ผ่านการลดขนาด

รูปที่ 3.2 ตัวกลางพีวีเอเจลต้นแบบและตัวกลางภายหลังการลดขนาดที่ใช้ในการทดลอง

ชุดอุปกรณ์การเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำ

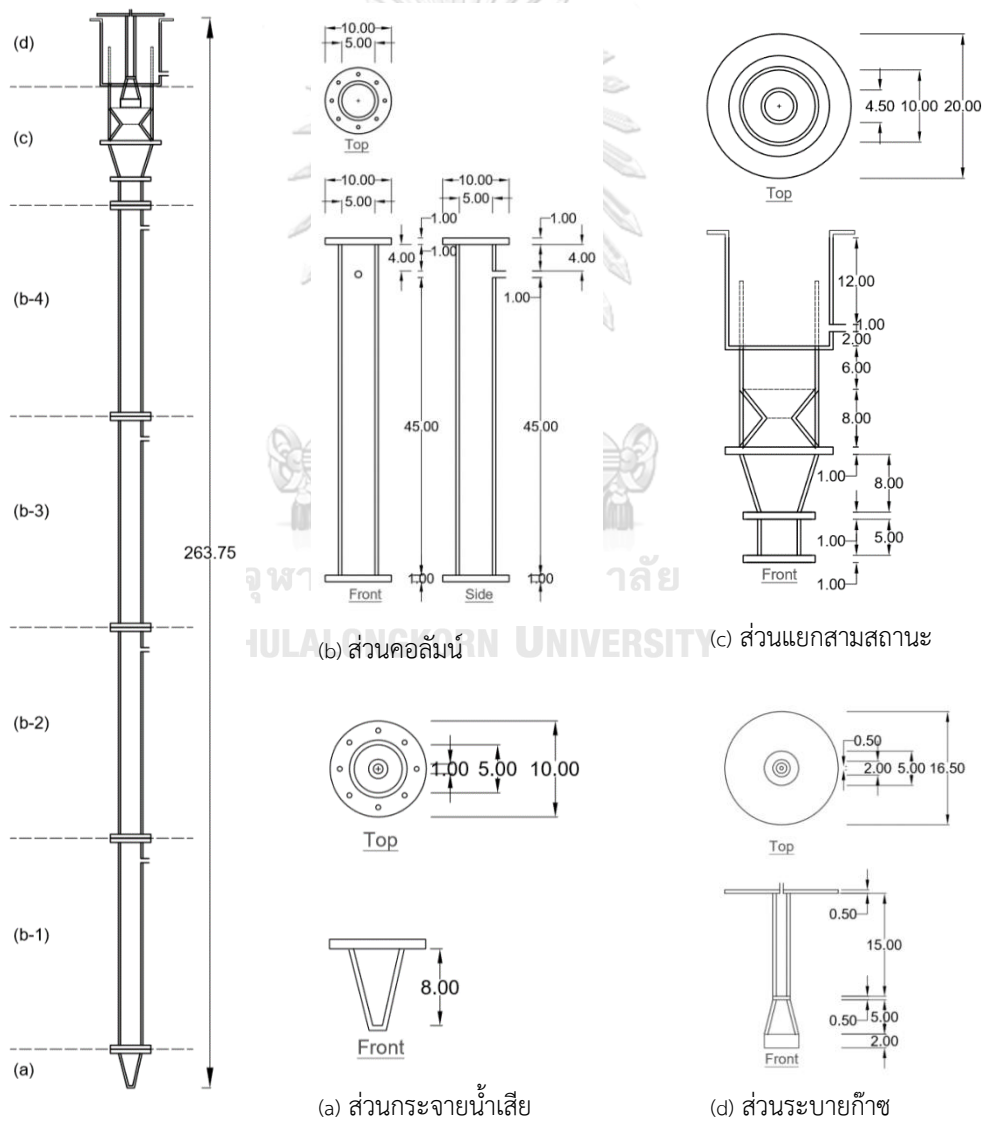
งานวิจัยนี้ใช้ชุดอุปกรณ์การเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำจำนวน 4 ชุด ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก ได้แก่ ถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด ถังพักน้ำเข้า อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพ และเครื่องสูบน้ำเข้า โดยองค์ประกอบระบบทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์การเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำ (1 ชุดการทดลอง)

ถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด

ถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในการทดลองถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก มีขนาดและรายละเอียดดังรูปที่ 3.4 ได้แก่ (a) ส่วนกระจายน้ำ (b) ส่วนทำปฏิกิริยา (c) ส่วนแยกสารสามสถานะ และ (d) อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพ ทุกส่วนของถังปฏิกรณ์ผลิตจากอะคริลิกใสเพื่อให้สามารถมองเห็นลักษณะการเคลื่อนไหวของตัวกลางภายในถังปฏิกรณ์ได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้ส่วนทำปฏิกิริยาประกอบขึ้นจากท่ออะคริลิกทรงกระบอกทั้งหมด 4 ชั้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.4 ซม. สูง 50.0 ซม. และมีบอลลูนที่ระดับความสูง 45.0 ซม.



รูปที่ 3.4 ขนาดและรายละเอียดส่วนประกอบต่างๆ ของถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด

เครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดรีดสายยาง (Peristaltic pump) ของบริษัท Watson Marlow รุ่น 505S ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เครื่องสูบน้ำชนิดนี้มีความสามารถในการจ่ายน้ำเสียให้กับระบบที่ต้องการอัตราไหลต่ำภายใต้แรงดันสูงได้ โดยในการทดลองมีการกำหนดค่าอัตราไหลอยู่ในช่วง 25-100 ล./วัน



รูปที่ 3.5 เครื่องสูบน้ำชนิดรีดสายยาง

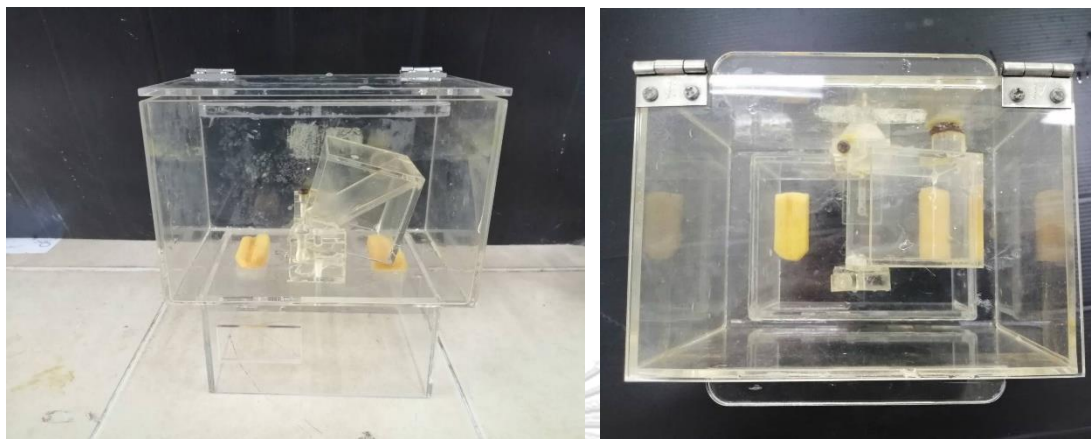
ถังพักน้ำเสียเข้าระบบ

เป็นถังพลาสติกสีเข้มขนาดปริมาตร 100 ล. ใช้สำหรับบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อรอจ่ายเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด โดยภายในถังพักน้ำเสียจะมีการกำหนดระดับและขีดระบุปริมาตรน้ำที่บรรจุภายในถังทุกๆ 10 ล.

อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพ

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดได้รับแนวคิดและออกแบบตามคุณศักดิ์ชัย (โอภาสวัตชัย, 2526) แสดงดังรูปที่ 3.6 ใช้หลักการการยกตัวของก๊าซที่เกิดขึ้นซึ่งถูกกักเก็บไว้ เมื่อก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นเต็มกล่องจะดันให้แกนสแตนเลสของกล่องเก็บก๊าซพลิกตัว และใช้ซี่แม่เหล็กในการนับจำนวน โดยน้ำที่บรรจุในชุด

อุปกรณ์นี้จะเป็นน้ำประปาที่ปรับค่าพีเอช (pH) ให้ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 2 เพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายกลับลงในน้ำจนอาจทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ตรวจวัดผิดเพี้ยนได้



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพ

น้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากน้ำตาลกลูโคส ($C_6H_{12}O_6$ anhydrous AR-Grade >99.5%) เพื่อเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน โดยกำหนดสัดส่วนและความเข้มข้นธาตุอาหารหลักและรองที่ผสมลงในน้ำเสียตามคำแนะนำสำหรับการเดินระบบไร้อากาศ (รุ่งกิจ วัฒนานุกุล, 2553) ซึ่งดัดแปลงมาจาก (Speece, 2008) ทั้งนี้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ใช้และปริมาณสาร A และ B ที่เป็นตัวแทนของธาตุอาหารหลักและรอง แสดงวิธีการคำนวณจากค่าความเข้มข้นธาตุอาหารแนะนำได้ดังตารางที่ 3.1

อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4)
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$)
3. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)
4. สารละลาย FAS มาตรฐาน
5. เฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์
6. กระดาษกรอง GF/C 0.45 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 ซม.

7. อลูมิเนียมฟอสเฟต

8. เครื่องแก้วต่างๆ

ตารางที่ 3.1 ปริมาณธาตุอาหารที่ปรับใช้ในแต่ละช่วงการทดลองต่อการเตรียมน้ำเสีย 1 ครั้ง

ธาตุอาหาร	อัตราส่วนความเข้มข้น (เท่า)	ความเข้มข้น (มก./ล.)
NH_4Cl	100	40
K_2HPO_4	100	40
KH_2PO_4	100	20
$\text{MgCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	100	40
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	100	50
$\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	100	40
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	100	10
$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	10,000	5
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	10,000	5
H_3BO_3	10,000	5
ZnCl_2	10,000	5
$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	10,000	5
$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	10,000	5

วิธีการทดลอง

การทดสอบลักษณะการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์

ตรวจสอบลักษณะการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำด้วยเทคนิค Residence time distribution (RTD) วิธีนี้จะอาศัยการคำนวณปริมาณความเข้มข้นของสารติดตามในน้ำขาออกจากถังปฏิกรณ์เทียบกับปริมาณสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ในการทดลองเลือกใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นสารติดตามด้วยวิธีการฉีดยาแบบครั้งเดียว (Pulse injection) และติดตามสารดังกล่าวในถังปฏิกรณ์ผ่านค่าการนำประจุไฟฟ้า (Conductivity) โดยทำการคำนวณเปรียบเทียบกับโมเดลต้นแบบทางทฤษฎีทั้ง 2 โมเดล คือ โมเดลถังปฏิกรณ์กวนผสมสมบูรณ์แบบอนุกรม (CSTR in series) และโมเดลแยกชิ้นส่วน (Compartment models) ทั้งนี้ในการทดลองกำหนดค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำสำหรับการคำนวณโมเดลทั้งสามเท่ากับ 1, 1.6 และ 4.4 ชม. เพื่อวิเคราะห์ค่าพื้นที่อับเฉื่อย (Average deadzone) และรูปแบบโครงสร้างของถังปฏิกรณ์ (Reactor's compartment)

การเริ่มต้นเดินระบบ

ถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดทั้ง 4 ชุดการทดลองได้ถูกติดตั้งและแยกการทำงานออกจากกัน โดยแต่ละถังปฏิกรณ์จะเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดไร้อากาศยูเอเอสบี (UASB) ที่มีค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยระเหยได้ประมาณ 10,000 มก./ล. ปริมาณ 800 มล. และตัวกลางที่ผ่านการลดขนาดปริมาณ 1,200 มล. คิดเป็นร้อยละของถังปฏิกรณ์ส่วนทำปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 17.5 และ 26.2 ตามลำดับ จากนั้นจึงเริ่มเดินระบบพร้อมกันภายใต้สภาวะการระบบทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 5 กก./ลบ.ม.-วัน และระยะเวลาพักเก็บน้ำเท่ากับ 4.4 ชม. (เท่ากับระยะเวลาพักเก็บน้ำที่ใช้ในช่วงการแปรค่าอัตราสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ) ซึ่งค่าการสารอินทรีย์สามารถคิดเป็นค่าความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 916 มก./ล. ทำการเติมธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองตามปริมาณที่ระบุดังตารางที่ 3.1 ตลอดจนรักษาอัตราส่วนระหว่างไบคาร์บอเนตและกรดไขมันระเหยง่าย (VFA/Alk ratio) เพื่อให้ระบบไร้อากาศยังคงสถานะสมดุลได้ดี (กรมควบคุมมลพิษ, 2542) ติดตามสภาวะการทำงานรบบและความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ด้วยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าซีโอดี ค่าความเป็นด่าง ปริมาณกรดไขมันระเหย พีเอช ไออาร์พี และปริมาณของแข็งแขวนลอย จนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลจึงทำการเปลี่ยนค่าการสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ

การแปรค่าอัตราการสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ (OLR)

หลังจากถึงปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดทั้ง 4 ชุดการทดลองเข้าสู่สภาวะสมดุลที่อัตราการสารอินทรีย์ 5 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และระยะเวลาพักเก็บน้ำเท่ากับ 4.4 ชม. หรืออัตราน้ำไหลขึ้นเท่ากับ (Upflow velocity) 0.45 ม./ชม. จึงแปรเปลี่ยนค่าอัตราการสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ปฏิกรณ์ที่ 1, 2, 3 และ 4 แตกต่างกันไปเท่ากับ 5, 15, 25 และ 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ หรือคิดเป็นค่าความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 916, 2,748, 4,580 และ 7,580 มก./ล. ตามลำดับ เดินระบบต่อเนื่องภายใต้สภาวะดังกล่าวจนเข้าสู่สภาวะคงตัวอีกครั้ง และติดตามวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นเดียวกับช่วงการเริ่มต้นเดินระบบ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ เพิ่มเติมตามระดับความสูงของถังปฏิกรณ์ ได้แก่ ความเข้มข้นซีโอดี พีเอช โออาร์พี และปริมาณของแข็งแขวนลอย ทั้งนี้เพื่อควบคุมให้สภาวะการทำงานของระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบไร้อากาศยังคงอยู่ในสภาวะคงตัว ไม่เกิดการล้มเหลว จำเป็นต้องใส่ใจกับการควบคุมค่าความเข้มข้นของโซเดียมไบคาร์บอเนต เพื่อรักษาสมดุลของสัดส่วนระหว่างกรดอินทรีย์ต่อค่าสภาพต่าง (VFA/Alk) ของน้ำในระบบให้ต่ำกว่า 0.4 ตลอดเวลา ทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ความเข้มข้นซีโอดี พีเอช โออาร์พี และของแข็งแขวนลอยที่เปลี่ยนไปตามความสูงของถังปฏิกรณ์ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล รวมถึงการเก็บตัวอย่างเชื้อจุลินทรีย์เพื่อใช้ในการตรวจสอบกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในระบบ

การแปรค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำ (HRT)

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลหลังจากการแปรค่าอัตราการสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบเป็น 5, 15, 25 และ 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4 ชม. จึงทำการเดินระบบต่อเนื่องและลดค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำครั้งที่ 1 ในถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 ชุดการทดลองจาก 4.4 ชม. ลงเป็น 2.93 ชม. ด้วยการควบคุมอัตราไหลเข้าของระบบจาก 25 ล./วัน เป็น 50 ล./วัน ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นเดิมตลอดการทดลอง เมื่อระบบทั้ง 4 เข้าสู่สภาวะสมดุลจึงทำการทดลองซ้ำเดิม แต่ลดค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำครั้งที่ 2 จาก 2.93 ชม. ลงเป็น 2.2 ชม. และลดค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำครั้งที่ 3 จาก 2.2 ชม. เป็น 1.1 ชม. ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเนื่องจากระบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่มีระบบหมุนเวียนน้ำ จึงต้องใช้ในการปรับค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำด้วยการแปรค่าอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบเท่ากับ 25, 37.5, 50 และ 100 ล./วัน และแปรเปลี่ยนความเข้มข้นสารอินทรีย์ในรูป

ของซีโอดีเพื่อควบคุมอัตราการระเหยอินทรีย์ของระบบให้เท่ากับ 5, 15, 25 และ 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ดังข้อมูลแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ความเข้มข้นซีโอดีที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ

อัตราการระเหยอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ความเข้มข้นซีโอดี (มก./ล.)			
	ระยะเวลาเก็บน้ำ 4.4 ชม.		ระยะเวลาเก็บน้ำ 2.2 ชม.	
	ระยะเวลาเก็บน้ำ 4.4 ชม.	ระยะเวลาเก็บน้ำ 2.93 ชม.	ระยะเวลาเก็บน้ำ 2.2 ชม.	ระยะเวลาเก็บน้ำ 1.1 ชม.
5	916	610	458	229
15	2,748	1,832	1,374	687
25	4,580	3,053	2,290	1,145
40	7,328	4,885	3,664	1,832

ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อติดตามประสิทธิภาพและความเป็นไปของระบบฟลูอิดไดซ์เบดไร้อากาศแบบไม่เวียนน้ำ ซึ่งได้แก่ ค่าซีโอดี ค่าความเป็นด่าง ปริมาณกรดไขมันระเหย พีเอช โออาร์พี และปริมาณของแข็งแขวนลอย โดยตารางที่ 3.3 แสดงตำแหน่ง ความถี่ และวิธีการที่ใช้ในการตรวจวัดพารามิเตอร์นั้นๆ

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำที่วิเคราะห์ตลอดการทดลอง

พารามิเตอร์	จุดเก็บตัวอย่าง	ความถี่	วิธีวิเคราะห์
COD	Inf และ Eff	3 วัน/ตัวอย่าง	Dicromate close reflux method (AWWA 508 A.)
	Inf, C1, C2, C3, C4 และ Eff	1 ตัวอย่าง/สมดุ	
Volatile fatty acid	Inf และ Eff	3 วัน/ตัวอย่าง	Direct Titration
Suspended solid	Inf และ Eff	3 วัน/ตัวอย่าง	Total residual dried at 103-105°C (AWWA 209 D.)
	Inf, C1, C2, C3, C4 และ Eff	1 ตัวอย่าง/สมดุ	

พารามิเตอร์	จุดเก็บตัวอย่าง	ความถี่	วิธีวิเคราะห์
Alkalinity	Inf และ Eff	3 วัน/ตัวอย่าง	Direct Titration
	Inf, C1, C2, C3, C4 และ Eff	7 วัน/ตัวอย่าง	
pH	Inf และ Eff	3 วัน/ตัวอย่าง	pH meter
	Inf, C1, C2, C3, C4 และ Eff	เมื่อสมดุล	
ORP	Inf และ Eff	3 วัน/ตัวอย่าง	ORP meter
	Inf, C1, C2, C3, C4 และ Eff	1 ตัวอย่าง/สมดุล	
ปริมาณก๊าซชีวภาพ	G	1 ตัวอย่าง/สมดุล	Gas counter
องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	G	1 ตัวอย่าง/สมดุล	Gas Chromatography

การตรวจสอบกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในระบบ

การทดสอบในขั้นตอนนี้จะดำเนินการเมื่อสิ้นสุดการเดินระบบและเสร็จสิ้นการทดลองทั้งหมด โดยนำค่าประสิทธิภาพของระบบที่สภาวะต่างๆ มาเปรียบเทียบและพิจารณาค่าความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ ตลอดจนระยะเวลาในการปรับตัวของเชื้อจุลินทรีย์ต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะต่างๆ เพื่อเลือกวิเคราะห์ตัวอย่างเหล่านั้นและใช้เป็นกลุ่มตัวแทนของระบบในการตรวจสอบกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ ทั้งนี้ตัวอย่างเชื้อจุลินทรีย์ที่จะใช้ในการทดลองส่วนนี้เป็นเชื้อจุลินทรีย์ที่เก็บตัวอย่างจากระบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในการทดลองจริง และทำการเก็บรักษาตัวอย่างไว้ภายใต้สภาวะ -20°C เพื่อคงสภาพความมีชีวิตของหัวเชื้อให้ใกล้เคียงกับสภาพเดิมมากที่สุด

การเปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์กับโมเดลต่างๆ

เลือกใช้โมเดลที่เข้ากับลักษณะการไหลภายในถังปฏิกรณ์จากการทดสอบลักษณะการไหลของน้ำ ทำการคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาและตัวแปรอื่นๆ ด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (สมการที่ 2.19) โมเดล Monod (สมการที่ 2.20)

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบตัวกลางและพารามิเตอร์ทางชีวภาพ

เพื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนไปของตัวกลางที่ใช้ในการทดลองกับตัวกลางต้นแบบ จะทำการเปรียบเทียบกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ในระบบ และตรวจสอบการยึดเกาะของเชื้อบนตัวกลาง โดยมีพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ในการทดสอบและวิธีการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.4 ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ต่างๆ และวิธีการที่เลือกใช้ทดสอบตัวกลาง

พารามิเตอร์	วิธีที่ใช้ทดสอบ
น้ำหนักที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	Thermogravimetric Analysis (TGA)
ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของตัวกลาง	Scanning electron microscope (SEM)
ประชากรจุลินทรีย์	16s RNA Miseq
ลักษณะการเกาะติดบนตัวกลาง	Scanning electron microscope (SEM)

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองได้แบ่งพารามิเตอร์ออกตามตัวแปรต่างๆ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณและการอภิปรายผล โดยแบ่งตัวแปรออกเป็น 3 ประเภท ตัวแปรอิสระ ตัวแปรควบคุม ตัวแปรตาม และปัจจัยภายนอก ทั้งนี้ตารางที่ 3.3 แสดงถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ถูกจำแนกประเภทตามชนิดของตัวแปรและค่าที่ใช้ในการทดลอง

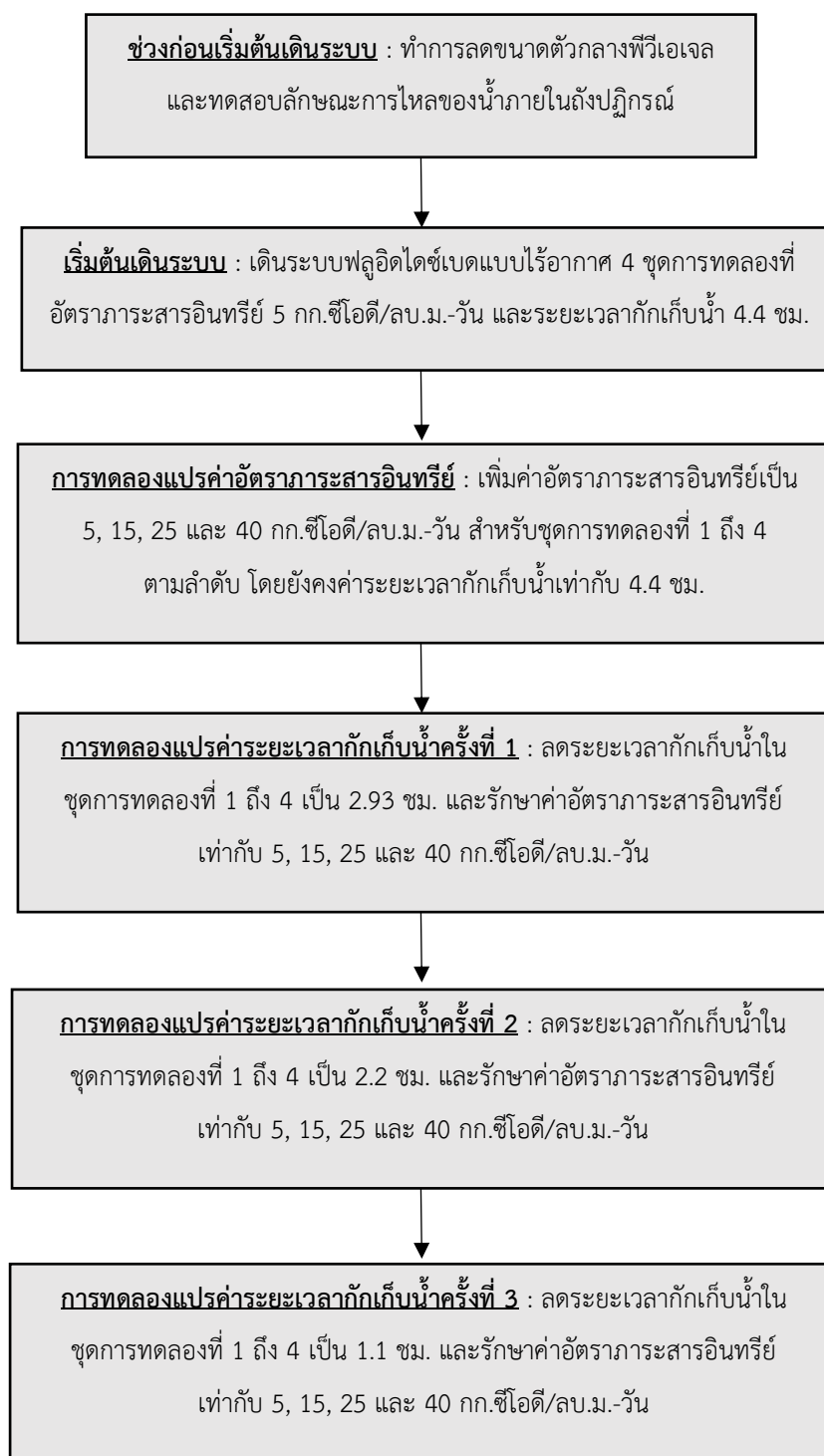
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต่างๆ และค่าที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ความเข้มข้นซีโอดี (มก./ล.)	229, 458, 611, 687, 916, 1,145, 1,374, 1,832, 2,290, 2,748, 3,053, 3,664, 4,580, 4,885, 7,328
อัตราการไหลของน้ำเข้า (ล./วัน)	25, 37.5, 50 และ 100
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
สภาพความเป็นด่าง	รักษาอัตราส่วน VFA/Alkalinity น้อยกว่า 0.4
ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	5, 15, 25 และ 40
ระยะเวลาพักเก็บน้ำ (ชม.)	1.1, 2.2, 2.93 และ 4.4
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์
คุณภาพน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์ ช่วงสมดุล	พีเอช กรดไขมันระเหย สภาพความเป็นด่าง ซีโอดี โออาร์พี ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และปริมาณก๊าซชีวภาพ
ปัจจัยภายนอก	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

เนื้อหาในส่วนนี้จะอธิบายผลและการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการทดลอง ทั้งในช่วงก่อนการเริ่มต้นเดินระบบ ได้แก่ การลดขนาดตัวกลางพีวีเอเจล การทดสอบลักษณะการไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์ และการรายงานพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำในช่วงระบบบำบัดไร้อากาศฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำเข้าสู่สภาวะสมดุลจากการทดลองแปรค่าอัตราการสารอินทรีย์และระยะเวลาพักเก็บน้ำ และผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบจากการเดินถึงปฏิกรณ์ต่อเนื่องทั้งระยะสั้นและระยะยาว ตลอดจนศึกษาจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการนำพารามิเตอร์ในช่วงระบบคงที่มาใช้ในการคำนวณค่าคงที่ทางคณิตศาสตร์จากสมการปฏิกริยาอันดับหนึ่งและปฏิกริยาทางชีวภาพ รูปที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขของการแปรค่าสภาวะการเดินระบบบำบัดไร้อากาศฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำสำหรับงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาผลของอัตราการสารอินทรีย์และระยะเวลากักเก็บน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์



รูปที่ 4.1 เงื่อนไขการแปรค่าสภาวะการเดินระบบบำบัดไร้อากาศฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำ
สำหรับงานวิจัยนี้

การทดลองช่วงก่อนเริ่มต้นเดินระบบ

การลดขนาดตัวกลาง

ดังอธิบายไว้ในหัวข้อ *การเตรียมตัวกลางและถังปฏิกรณ์* ถึงความจำเป็นในการลดขนาดตัวกลางเพื่อปรับใช้กับถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดในระดับปฏิบัติการ โดยภาคผนวก ก. แสดงรายการคำนวณค่าอัตราการไหลย้อนขึ้นต่ำเพื่อให้เกิดสถานะฟลูอิดไดเซชันของตัวกลางพีวีเอเจลต้นแบบและตัวกลางที่ผ่านการลดขนาด ซึ่งค่าจากการคำนวณนั้นแสดงให้เห็นว่า ตัวกลางภายหลังลดขนาดจะใช้เวลาไหลย้อนขึ้นต่ำที่น้อยกว่าตัวกลางต้นแบบอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้การลดขนาดอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆ ทางกายภาพของตัวกลางจากเริ่มต้น ทั้งโครงสร้างภายใน และค่าความถ่วงจำเพาะที่มีผลต่อการเดินระบบประเภทตัวกลางเคลื่อนตัว (ดังอธิบายไว้ในทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเรื่องความเร็วไหลขึ้น) โดยรูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของตัวกลางพีวีเอเจลต้นแบบและตัวกลางที่ผ่านการลดขนาด พบว่าโครงสร้างภายในของตัวกลางยังคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลงแม้จะถูกปั่นลดขนาดให้เล็กลง หากแต่ลักษณะรูปร่างภายนอกของตัวกลางนั้นจะเปลี่ยนจากเม็ดกลมรีของตัวกลางต้นแบบที่ได้รับมาจากผู้ผลิต เป็นเม็ดขนาดเล็กที่มีรูปร่างภายนอกไม่แน่นอนจากแรงเฉือนของใบมีดในขั้นตอนการปั่นลดขนาดและการกรองแบบเปียก อย่างไรก็ตามด้วยรูปแบบของถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดที่เมื่อทำการเดินระบบไปแล้วรูปร่างของตัวกลางจะถูกปกคลุมด้วยฟิล์มชีวภาพและถูกแรงเฉือนจากความเร็วน้ำไหลขึ้นจนทำให้มีลักษณะทรงกลมขอบมนในที่สุด

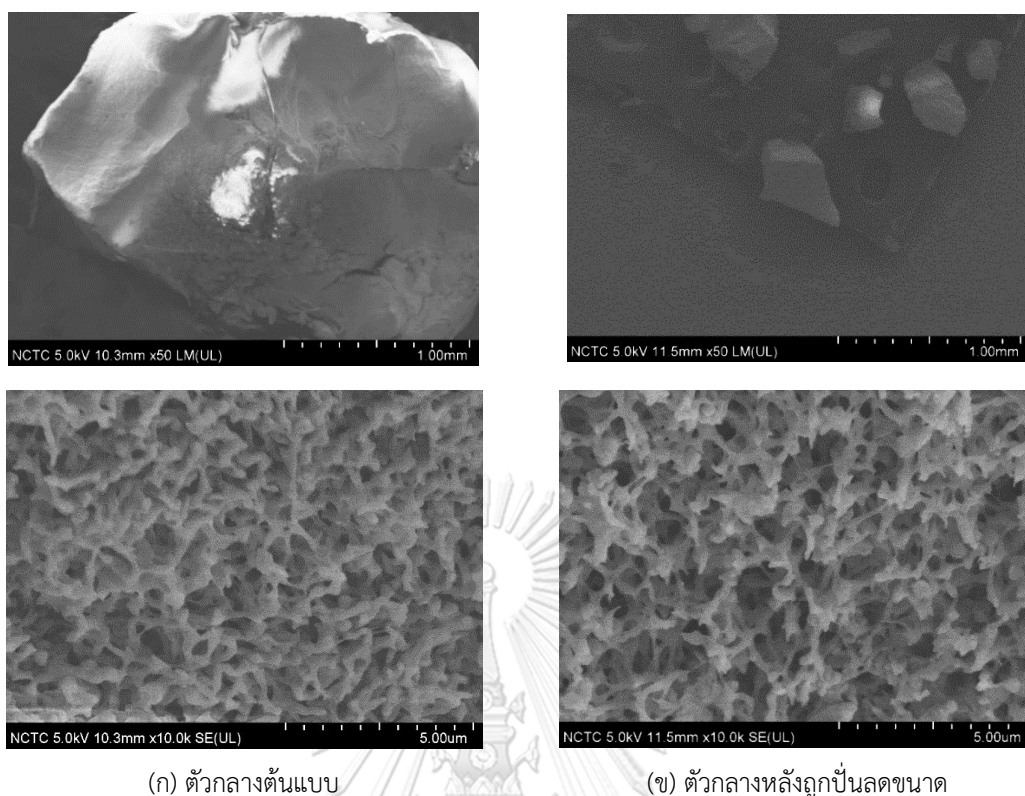


(ก) ตัวกลางต้นแบบ



(ข) ตัวกลางหลังถูกปั่นลดขนาด

รูปที่ 4.2 ลักษณะภายนอกตัวกลางต้นแบบและตัวกลางที่ปรับสภาพ



(ก) ตัวกลางต้นแบบ

(ข) ตัวกลางหลังถูกปั่นลดขนาด

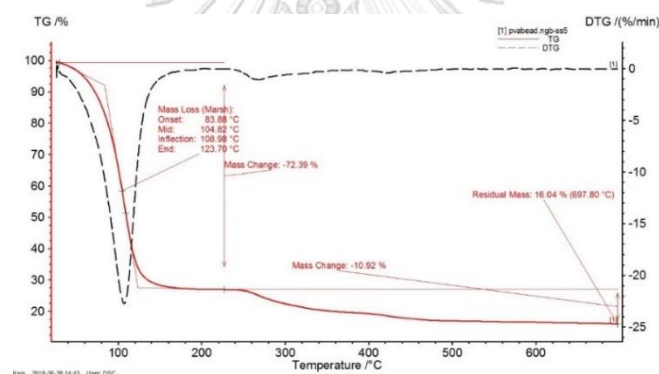
รูปที่ 4.3 พื้นผิวภายนอกและโครงสร้างภายในฟิวเอเจลที่กำลังขยาย 2,000 และ 10,000 เท่า

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของตัวกลางฟิวเอเจลต้นแบบและตัวกลางที่ผ่านการลดขนาด ผลการทดลองยืนยันว่าค่าความถ่วงจำเพาะดังกล่าวไม่มีการเปลี่ยนแปลงแม้ตัวกลางจะถูกปั่นลดขนาดให้เล็กลง ตัวกลางต้นแบบมีค่าความถ่วงจำเพาะที่รายงานจากบริษัทผู้ผลิตเท่ากับ 1.025 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่วิเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการและไม่แตกต่างกับตัวกลางที่ผ่านการลดขนาด โดยมีค่าความคาดเคลื่อนเท่ากับร้อยละ 0.33 ซึ่งไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญสำหรับการคำนวณความเร็วไหลย้อนภายในถังปฏิกรณ์และในการเดินระบบ นอกจากนี้ผลการทดสอบความสามารถในการทนต่อความร้อนของตัวกลางทั้งสอง เมื่อนำตัวกลางดังกล่าวไปทดสอบความเสถียรของวัสดุด้วยเทคนิค TGA (Thermogravimetric Analysis) เพื่อหาร้อยละน้ำหนักของตัวกลางที่เปลี่ยนไปเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้น พบว่ารูปกราฟที่แสดงค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นของทั้งตัวกลางต้นแบบและตัวกลางภายหลังลดขนาดมีลักษณะใกล้เคียงกัน (ดังรูปที่ 4.4) โดยน้ำหนักส่วนน้ำและเนื้อของตัวกลางจะถูกเผาที่อุณหภูมิเริ่มต้นจนถึง 200°C ทั้งนี้ค่าน้ำหนักคงเหลือของตัวกลางที่ใช้ในการทดลองนั้นเกิดขึ้นในขั้นตอนการลดขนาดตัวกลาง จึงสามารถสรุปได้ว่าการลดขนาดตัวกลางฟิวเอ

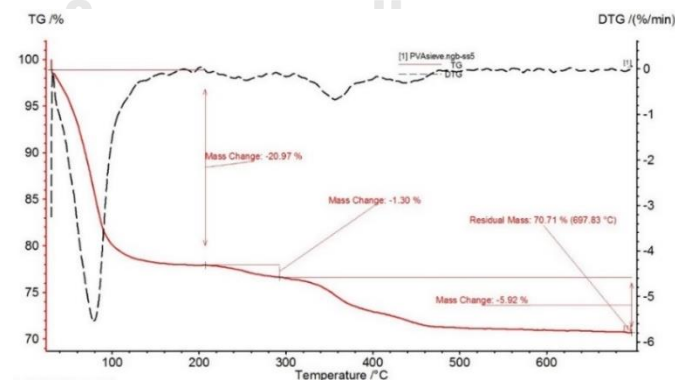
เจลให้เล็กลงเพื่อใช้ในการเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบตระดับห้องปฏิบัติการนั้น ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในและค่าความถ่วงจำเพาะของตัวกลาง หากแต่ลักษณะรูปร่างภายนอกเท่านั้นที่มีการเปลี่ยนไปจากทรงรีเป็นรูปทรงที่ไม่แน่นอน

ตารางที่ 4.1 ค่าความถ่วงจำเพาะของตัวกลางพีวีเอเจลต้นแบบและตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

	ความถ่วงจำเพาะ (ก. /ลบ. ซม.)	ผลต่าง (ก./ลบ. ซม.)	คาดเคลื่อน (%)
ค่าจากทางบริษัท	1.025	-	-
ตัวกลางต้นแบบ	1.0199	0.0051	0.5
ตัวกลางหลังลดขนาด	1.0217	0.0033	0.33



(ก) ตัวกลางต้นแบบ



(ข) ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นของตัวกลางพีวีเอเจล

การทดลองลักษณะการไหลของน้ำ

ทำการทดสอบลักษณะการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบตระดับปฏิบัติการที่ใช้ในการทดลอง โดยศึกษาผ่านโมเดลทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ โมเดลถังกวนสมบูรณแบบอนุกรม โมเดลแยกชิ้นส่วน และโมเดลการกระจายตัวของน้ำ ได้ผลการคำนวณสรุปโมเดลต่างๆ ดังตารางที่ 4.2 จากการคำนวณพบว่าถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบตที่ใช้นั้นมีลักษณะการไหลภายในของน้ำในรูปแบบของถังกวนผสมสมบูรณต่ออนุกรมกัน 1.9, 1.9 และ 1.6 ถังที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 1, 1.6 และ 4.4 ชม. ตามลำดับ ทั้งนี้ลักษณะการไหลดังกล่าวนี้ไม่สอดคล้องกับการออกแบบระบบฟลูอิดไดซ์เบตตามทฤษฎี เนื่องจากในการออกแบบระบบฟลูอิดไดซ์เบตนี้ได้เลือกใช้ค่าคงที่อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดต่อความสูงเท่ากับ 1:200 ซึ่งเป็นค่าแนะนำสำหรับการออกแบบระบบแบบถังไหลต่อเนื่อง (PFR) อีกทั้งในการทดลองของพัชรียา รุ่งกิจวัฒนากุล (2553) ที่ใช้ถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบตในการเดินระบบเช่นเดียวกันแต่ได้ลักษณะการไหลภายในของน้ำเป็นรูปแบบของถังไหลต่อเนื่อง ทั้งนี้ด้วยขนาดของชุดการทดลองที่ใช้ในการวิจัยนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า จึงส่งผลให้ค่าแรงเสียดทานจากผนังของถังปฏิกรณ์มีค่าต่ำกว่างานวิจัยตัวอย่าง โดยทางทฤษฎีเมื่อค่าแรงเสียดทานดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ลักษณะการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นโคนและเกิดการปั่นป่วนภายในมากกว่า ซึ่งเป็นไปตามหลักการของถังปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่องที่เกิดจากถังกวนสมบูรณต่ออนุกรมกันมากกว่า 20 ถังขึ้นไป (Levenspiel, 1999) อย่างไรก็ตามถึงแม้ระบบที่ใช้ในการทดลองนี้จะมีลักษณะการไหลภายในของน้ำแบบถังกวนสมบูรณประมาณ 2 ถังต่ออนุกรมกัน แต่จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเดินระบบถังปฏิกรณ์หรือไม่-อย่างไร ได้ทำการอธิบายไว้ในหัวข้อ ผลกระทบต่อการเดินระบบระยะยาวและผลกระทบระยะสั้น โดยหากเปรียบเทียบโมเดลถังกวนสมบูรณแบบอนุกรมกับโมเดลแยกชิ้นส่วน จะพบว่าค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาตรส่วนถังไหลต่อเนื่องนั้นเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 16.1 ปริมาตรส่วนถังกวนสมบูรณมีมากถึงร้อยละ 66.6 และปริมาตรพื้นที่อับเฉาเฉลี่ยร้อยละ 17.3 อันเป็นไปในทางเดียวกันกับโมเดลถังกวนสมบูรณที่มีจำนวน 2 ถังต่ออนุกรมกัน

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณโมเดลต่างๆ ในการทดสอบลักษณะการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์

ระยะเวลา กักเก็บน้ำ (ชม.)	โมเดลในการทดสอบการไหลของน้ำ				
	โมเดล การกระจายตัวของน้ำ	โมเดล ถึงกวนสมบูรณ์	โมเดล แยกชิ้นส่วน		
	ค่าการกระจายตัวของ น้ำ	จำนวนถังอนุกรม (ถึง)	ปริมาตรถัง ไหลต่อเนื่อง (ร้อยละ)	ปริมาตรถัง กวนสมบูรณ์ (ร้อยละ)	ปริมาตร พื้นที่อับ (ร้อยละ)
1	0.161	1.9	10.8	73.3	15.9
1.6	0.159	1.9	18.5	58.1	23.4
4.4	0.179	1.6	19.1	68.5	12.4
เฉลี่ย	0.166	1.8	16.1	66.6	17.3

ค่าพารามิเตอร์ในช่วงสมดุล

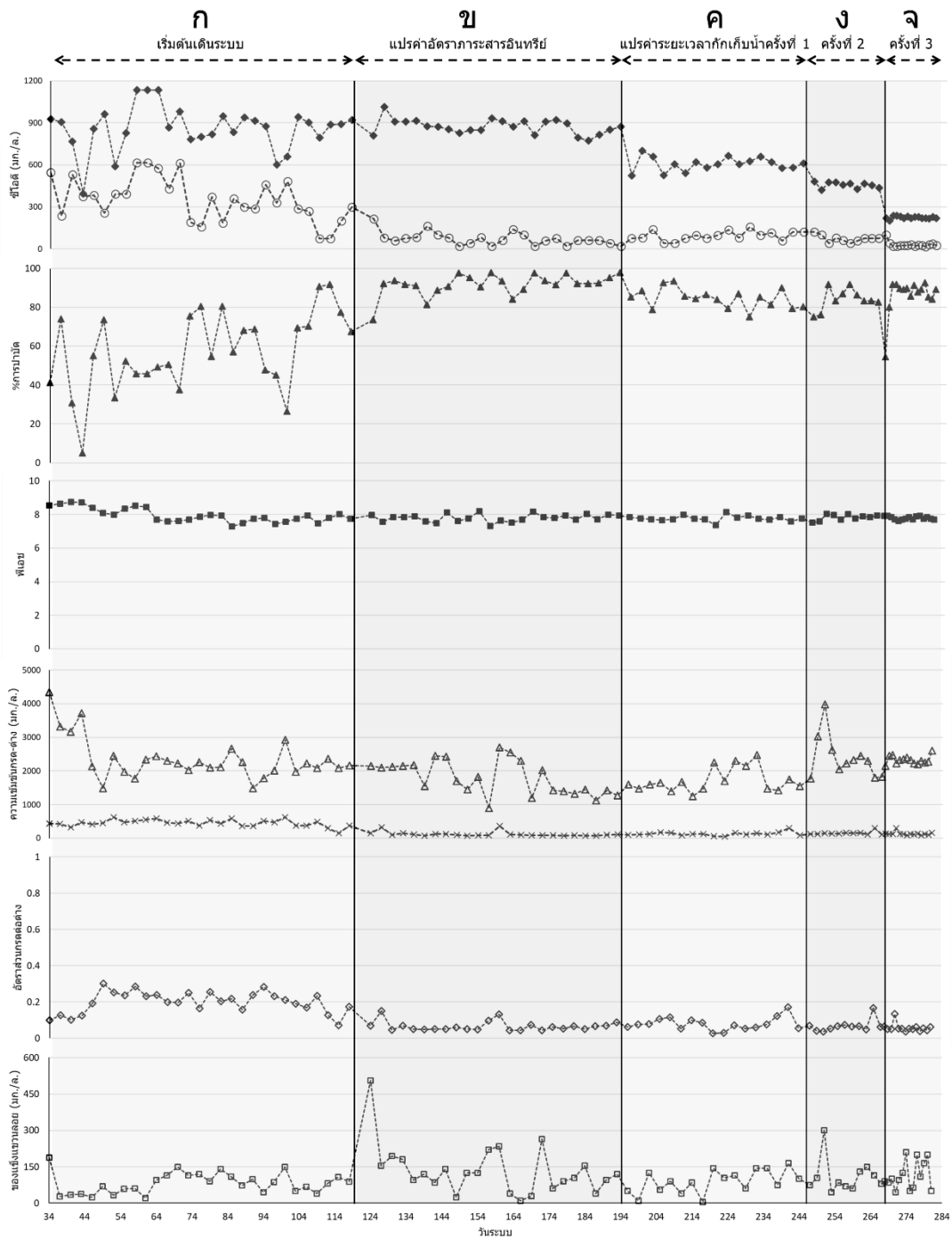
ตลอดการเดินระบบได้ทำการติดตามพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำ ประกอบไปด้วย ความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเข้าและออกจากถังปฏิกรณ์ ปริมาณกรดและค่าสภาพต่างของน้ำขาเข้าและออก พีเอช โออาร์พี และปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำขาออก โดยในแต่ละการทดลองจะทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล จากนั้นจึงนำพารามิเตอร์ต่างๆ ดังกล่าวมาใช้เป็นตัวแทนเพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบไร้อากาศฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำที่สภาวะการทดลองแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้เลือกใช้ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำที่สภาวะการเดินระบบเป็นตัวแทนในการรายงาน เพื่อให้ผลการทดลองเกิดความถูกต้องและมีความแม่นยำของข้อมูลมากขึ้น

ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (ชุดการทดลองที่ 1)

ชุดการทดลองที่ 1 เริ่มต้นเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำภายใต้สภาวะไร้อากาศที่ระยะเวลาการกักเก็บน้ำเท่ากับ 4.4 ชม. และค่าอัตราการระเหยอินทรีย์เท่ากับ 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน (คิดเป็นความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 916 มก./ล.) ทั้งนี้ใช้เวลาทั้งสิ้นตั้งแต่การเริ่มต้นเดินระบบจนเข้าสู่สมดุลและระบบมีความพร้อมสำหรับการเปลี่ยนสภาวะ 89 วัน โดยในช่วงสมดุลที่สภาวะนี้ระบบการ

ทดลองมีค่าความเข้มข้นซีโอดีในน้ำเสียออกเท่ากับ 191.0 มก./ล. อัตราส่วนกรดต่อค่าสภาพต่าง เท่ากับ 0.12 และปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกเท่ากับ 92.9 มก./ล. มีการเปลี่ยนแปลง ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ดังรูปที่ 4.5 (ช่วง ก.) จากนั้นจึงทำการแปรค่าระยะเวลากักเก็บน้ำในถังปฏิกรณ์ ชุดการทดลองที่ 1 เท่ากับ 4.4, 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. ภายใต้สภาวะภาระสารอินทรีย์คงเดิม 5 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน หรือคิดเป็นความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 916, 458, 305 และ 229 มก./ล. ตามลำดับ





รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเดินระบบชุดการทดลองที่ 1

รูปที่ 4.5 (ช่วง ข.) แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำของถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดในชุดการทดลองที่ 1 ที่ระยะเวลาเก็บน้ำเท่ากับ 4.4 ชม. และอัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 5 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าระบบใช้ระยะเวลา 42 วันในการปรับตัวจนเข้าสู่สภาวะคงตัว โดย

ที่จุดสมมูลมีค่าความเข้มข้นซีโอดีในน้ำเสียขาเข้าและออกเท่ากับ 2,513.10 และ 320.70 มก./ล. ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์เท่ากับ 87.24 ค่าอัตราส่วนระหว่างกรดระเหยง่ายและสภาพต่างของน้ำขาออกเท่ากับ 0.03 ซึ่งต่ำกว่าค่าแนะนำที่ควรน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.4 (กรมควบคุมมลพิษ, 2542) เช่นเดียวกับค่าพีเอชขาออกเท่ากับ 7.92 และมีค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 97.00 มก./ล.

สำหรับการทดลองแปรค่าระยะเวลาเก็บน้ำครั้งที่ 1 (ระยะเวลาเก็บน้ำ 2.93 ชม. อัตราการสารอินทรีย์เท่ากับ 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) ถึงปฏิกรณ์ชุดที่ 1 ได้รับสารอินทรีย์เข้าระบบที่ความเข้มข้นเท่ากับ 608.70 มก./ล. จากรูปที่ 4.5 (ช่วง ค.) ระบบใช้ระยะเวลาในการปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุล 6 วัน ที่จุดสมมูลระบบมีค่าความเข้มข้นซีโอดีขาออกเฉลี่ยเท่ากับ 102.10 มก./ล. คิดเป็นร้อยละการบำบัดเท่ากับ 83.23 มีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.73 ค่าของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 126.00 มก./ล. ทั้งนี้ระบบยังคงมีค่าอัตราส่วนกรดและสภาพต่างเท่ากับ 0.06 ซึ่งอยู่ในช่วงค่าที่แนะนำสำหรับการเดินระบบไร้อากาศ

ในการทดลองแปรค่าระยะเวลาเก็บน้ำครั้งที่ 2 (ระยะเวลาเก็บน้ำ 2.2 ชม. อัตราการสารอินทรีย์เท่ากับ 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) ถึงปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดในชุดการทดลองนี้ใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 6 วันในการเข้าสู่สภาวะสมดุล รูปที่ 4.5 (ช่วง ง.) และที่สภาวะสมดุลมีค่าซีโอดีขาออกเท่ากับ 62.60 มก./ล. คิดเป็นร้อยละบำบัดเท่ากับ 86.31 ค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.88 โดยมีค่าของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 78.00 มก./ล. และค่าอัตราส่วนระหว่างกรดและสภาพต่างยังคงอยู่ในช่วงค่าแนะนำเท่ากับ 0.09

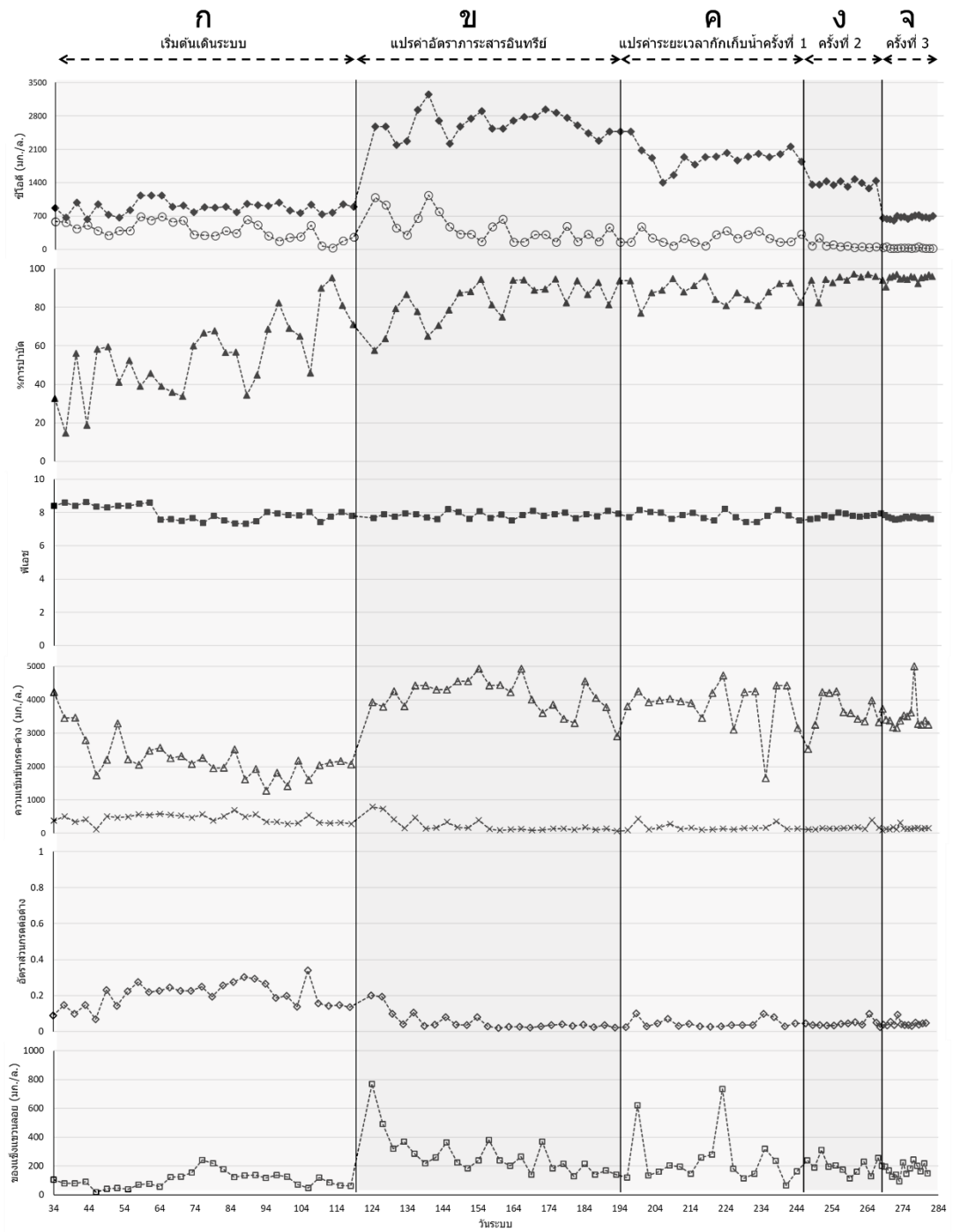
การทดลองแปรค่าระยะเวลาเก็บน้ำครั้งที่ 3 (ระยะเวลาเก็บน้ำ 1.1 ชม. อัตราการสารอินทรีย์เท่ากับ 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) ถึงปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดใช้ระยะเวลาในการปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลเท่ากับ 2 วัน ดังรูปที่ 4.5 (ช่วง จ.) โดยมีค่าความเข้มข้นซีโอดีขาออกเท่ากับ 25.60 มก./ล. คิดเป็นร้อยละการบำบัดเท่ากับ 88.52 พีเอชและโออาร์พีเท่ากับ 7.76 ค่าของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 120.00 มก./ล. ทั้งนี้ระบบยังคงมีค่าอัตราส่วนกรดต่อต่างน้อยกว่าค่าแนะนำเท่ากับ 0.05

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำของชุดการทดลองที่ 1

	เริ่มต้น ระบบ	อัตราการระ สารอินทรีย์ 5 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน	แปรค่าระยะเวลา กักเก็บน้ำครั้งที่ 1	แปรค่าระยะเวลา กักเก็บน้ำครั้งที่ 2	แปรค่าระยะเวลา กักเก็บน้ำครั้งที่ 3
ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุล (วัน)	89	6	6	6	2
ซีไอดีเข้า (มก./ล.)	899.00	825.20	608.70	457.40	229.00
ซีไอดีออก (มก./ล.)	191.00	40.70	102.10	62.60	25.60
ร้อยละบำบัด (%)	78.90	95.07	83.23	86.31	88.52
อัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างน้ำออก	0.12	0.06	0.12	0.09	0.05
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	92.90	97.00	126.00	78.00	120.00
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ล./วัน)	-	13.06	7.00	6.56	6.61
พีเอชขาออก	7.84	7.92	7.73	7.88	7.76
โออาร์พี	-	-42.57	-102.50	-31.80	-121.23

ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 (ชุดการทดลองที่ 2)

เริ่มต้นเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำชุดการทดลองที่ 2 ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำเท่ากับ 4.4 ชม. และอัตราการระสารอินทรีย์เท่ากับ 5 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 89 วัน จึงเข้าสู่สภาวะสมดุล ดังรูปที่ 4.6 (ช่วง ก.) จึงสามารถแปรค่าอัตราการระสารอินทรีย์ของการเดินระบบ โดยในช่วงเริ่มต้นชุดการทดลองนี้มีค่าร้อยละการบำบัดเท่ากับ 82.50 อัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างเท่ากับ 0.14 และค่าของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 71.40 มก./ล. จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนสภาวะการเดินระบบจากเริ่มต้นเข้าสู่การทดลองแปรค่าการระสารอินทรีย์ และการทดลองแปรค่าระยะเวลากักเก็บน้ำครั้งที่ 1, 2 และ 3 โดยในแต่ละช่วงการทดลองมีค่าอัตราการระสารอินทรีย์คงที่เท่ากับ 15 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน หากแต่มีค่าระยะเวลากักเก็บน้ำแตกต่างกันเท่ากับ 4.4, 2.2, 1.5 และ 1.1 ชม. สามารถคิดเป็นความเข้มข้นซีไอดีในแต่ละช่วงเท่ากับ 2,748, 1,374, 916 และ 687 มก./ล.



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเดินระบบชุดการทดลองที่ 2

การทดลองแปรค่าภาระสารอินทรีย์เข้าระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำในชุดการทดลองที่ 2 จาก 5 เป็น 15 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน และการแปรค่าระยะเวลาเก็บน้ำครั้งที่ 1, 2 และ 3 ใช้ระยะเวลาในการปรับตัวเข้าสู่สมดุล 42, 12, 6 และ 2 วัน ดังรูปที่ 4.6 (ช่วง ข, ค, ง และ จ

ตามลำดับ) พบว่าชุดการทดลองที่ 2 ความเข้มข้นซีโอทีในน้ำเสียขาออกมีค่าเท่ากับ 320.70, 250.60, 66.60 และ 31.80 มก./ล. คิดเป็นร้อยละการบำบัดสารอินทรีย์ที่สภาวะการเดินระบบแตกต่างกัน เท่ากับ 87.24, 87.40, 95.21 และ 95.40 ตามลำดับ มีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยเท่ากับ 174.00, 186.00, 170.00 และ 187.00 มก./ล. และมีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นเท่ากับ 6.02, 4.70, 2.33 และ 2.22 ล./วัน รวมถึงค่าพีเอช โออาร์พี และอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างยังคงอยู่ช่วงค่าที่เหมาะสม สำหรับการเดินระบบแบบไร้อากาศ โดยตารางที่ 4.4 แสดงพารามิเตอร์ที่กล่าวมาและพารามิเตอร์อื่นๆ ที่วิเคราะห์ช่วงระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล

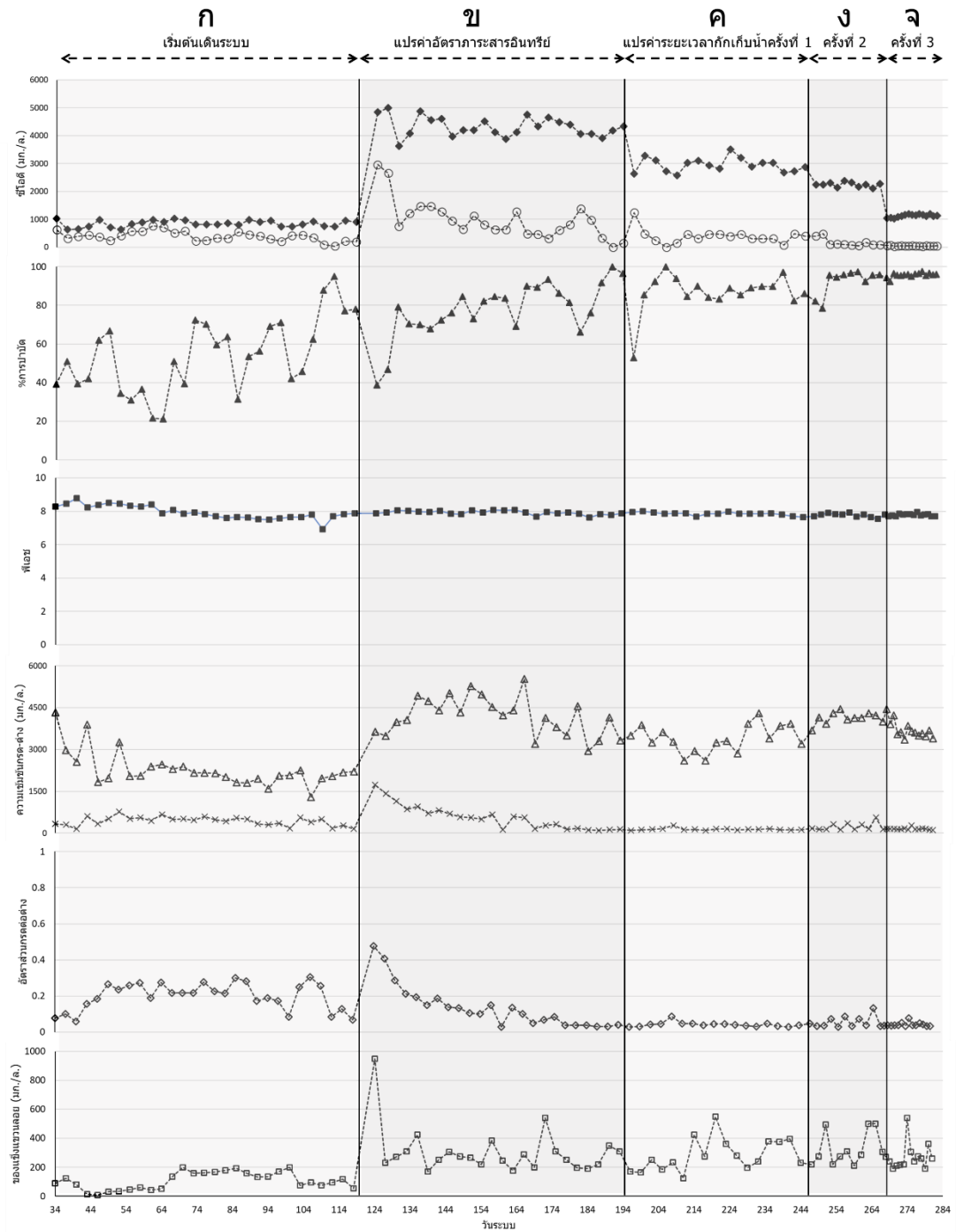
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำของชุดการทดลองที่ 2

	เริ่มต้น ระบบ	อัตราการสารอินทรีย์ 15 กก.ซีโอที/ลบ.ม.-วัน	แปรค่าระยะเวลา กักเก็บน้ำครั้งที่ 1	แปรค่า ระยะเวลา กัก เก็บน้ำครั้งที่ 2	แปรค่า ระยะเวลา กัก เก็บน้ำครั้งที่ 3
ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุล (วัน)	89	42	12	6	2
ซีโอทีเข้า (มก./ล.)	875.00	2513.10	1989.00	1391.50	690.90
ซีโอทีออก (มก./ล.)	159.00	320.70	250.60	66.60	31.80
ร้อยละบำบัด (%)	82.50	87.24	87.40	95.21	95.40
อัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างน้ำออก	0.14	0.03	0.05	0.06	0.04
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ล./วัน)	-	30.10	27.39	23.29	33.31
ของแข็งแขวนลอยน้ำออก (มก./ล.)	71.40	174.00	186.00	170.00	187.00
พีเอชขาออก	7.87	7.92	7.83	7.80	7.66
โออาร์พี	-	-264.77	-38.87	-32.33	-331.90

ถึงปฏิบัติการที่ 3 (ชุดการทดลองที่ 3)

ถึงปฏิบัติการฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำชุดการทดลองที่ 3 เริ่มต้นเดินระบบภายใต้สภาวะเดียวกันกับการทดลองที่ผ่านมา พบว่าระบบใช้ระยะเวลา 89 วันในการปรับตัวเข้าสู่สมดุล ดังตารางที่ 4.5 (ช่วง ก.) ในช่วงเข้าสู่สภาวะสมดุลระบบสามารถบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอทีได้ร้อยละ 83.40 มีค่าอัตราส่วนระหว่างกรดต่อสภาพต่างเฉลี่ยเท่ากับ 0.09 และค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 8.02 ซึ่งอยู่ในช่วงค่าที่แนะนำของการเดินระบบบำบัดประเภทไร้อากาศ และมีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยเท่ากับ 89.00

มก./ล. หลังจากเปลี่ยนสภาวะการเดินระบบเป็นค่าความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 4122.90, 2865.30, 2251.60 และ 1154.40 มก./ล. ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4, 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเดินระบบชุดการทดลองที่ 3

เมื่อเปลี่ยนสภาวะการเดินระบบเข้าสู่การแปรค่าอัตราสารอินทรีย์ และการทดลองแปรค่าระยะเวลาเก็บน้ำครั้งที่ 1, 2 และ 3 พบว่าชุดการทดลองที่ 3 ใช้ระยะเวลาในการปรับตัวเข้าสู่สมดุลที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ เท่ากับ 48, 6, 6 และ 2 วัน ตามลำดับ ถึงปฏิบัติการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอไซด์ได้ร้อยละ 83.03, 89.00, 95.31 และ 96.31 หรือเป็นค่าความเข้มข้นซีโอไซด์ในน้ำขาออกจากระบบเท่ากับ 699.70, 315.20, 105.60 และ 42.60 มก./ล. ตามลำดับ ในรูปที่ 4.7

Error! Reference source not found. (ช่วง ข, ค, ง และ จ) สามารถแปรค่าปริมาณสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 10.90, 7.13, 3.03 และ 4.09 ล./วัน โดยน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยเท่ากับ 241.00, 324.00, 260.00 และ 270.00 มก./ล. ค่าพีเอชเท่ากับ 8.18, 7.60, 7.80 และ 7.45 และอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่าง 0.05, 0.03, 0.08 และ 0.04

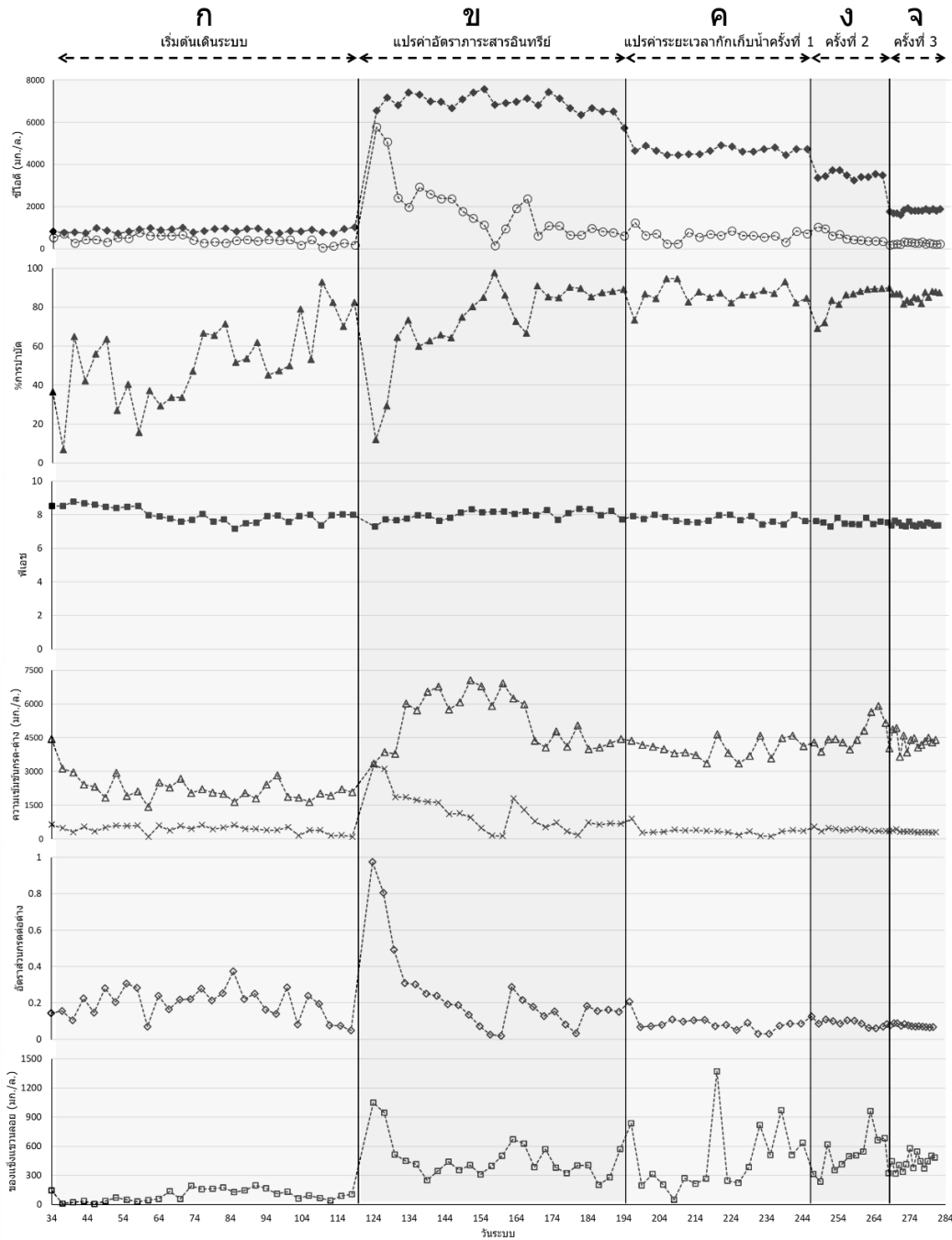
ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำของชุดการทดลองที่ 3

	เริ่มต้นระบบ	อัตราสารอินทรีย์ 25 กก.ซีโอไซด์/ลบ.ม.-วัน	แปรค่าระยะเวลา เก็บน้ำครั้งที่ 1	แปรค่าระยะเวลา เก็บน้ำครั้งที่ 2	แปรค่าระยะเวลา เก็บน้ำครั้งที่ 3
ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุล (วัน)	89	48	6	6	2
ซีโอไซด์เข้า (มก./ล.)	870	4122.90	2865.30	2251.60	1154.40
ซีโอไซด์ออก (มก./ล.)	152.00	699.70	315.20	105.60	42.60
ร้อยละบำบัด (%)	83.40	83.03	89.00	95.31	96.31
อัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างน้ำออก	0.09	0.05	0.03	0.08	0.04
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ล./วัน)	-	54.52	41.60	30.31	61.31
ของแข็งแขวนลอยน้ำออก (มก./ล.)	89.00	241.00	324.00	260.00	270.00
พีเอชขาออก	8.02	8.18	7.60	7.80	7.45
โออาร์พี	-	-182.80	-210.40	-88.17	-331.90

ถึงปฏิบัติการที่ 4 (ชุดการทดลองที่ 4)

ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบพบว่าชุดการทดลองที่ 4 มีค่าความเข้มข้นสารอินทรีย์ในรูปซีโอไซด์ในน้ำขาออกเท่ากับ 196.00 มก./ล. ดังรูปที่ 4.8 (ช่วง ก.) หรือคิดเป็นร้อยละในการบำบัดสารอินทรีย์เท่ากับ 78.40 มีค่าพีเอชและของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยเท่ากับ 7.99 และ 78.10 มก./ล. และอัตราส่วนระหว่างกรดต่อสภาพต่างเฉลี่ยเท่ากับ 0.07 จากนั้นเมื่อถึงปฏิบัติการฟลูอิดไดซ์เบดเข้าสู่สมดุล จึงทำ

การแปรค่าอัตราการระเหยอินทรีย์และระยะเวลาที่เก็บน้ำครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยมีค่าอัตราการระเหยอินทรีย์คงที่เท่ากับ 40 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน และระยะเวลาที่เก็บน้ำ 4.4, 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. ตามลำดับ หรือสามารถคิดเป็นค่าความเข้มข้นซีไอดีเท่ากับ 6540.00, 4683.40, 3456.90 และ 1837.10 มก./ล.



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเดินระบบชุดการทดลองที่ 4

จากการเดินระบบภายใต้สภาวะที่แตกต่างกันพบว่า ชุดการทดลองที่ 4 ใช้ระยะเวลาในการปรับตัวเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 48, 6, 4 และ 2 วัน โดยในแต่ละสภาวะการเดินระบบ ถึงปฏิกรณ์มีความเป็นความเข้มข้นซีไอดีในน้ำขาออกเท่ากับ 773.10, 605.70, 474.00 และ 254.50 มก./ล. หรือคิดเป็นความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีร้อยละ 88.18, 87.07, 86.29 และ 86.15 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ช่วง ข, ค, ง และ จ) และที่สภาวะการเดินระบบอื่นๆ มีค่าพีเอชเท่ากับ 8.17, 7.68, 7.61 และ 7.39 และอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างเท่ากับ 0.17, 0.08, 0.07 และ 0.07 ซึ่งทั้งหมดอยู่ในช่วงแนะนำของการเดินระบบประเภทไร้อากาศ อีกทั้งมีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยเท่ากับ 322.00, 689.00, 463.00 และ 452.10 มก./ล. และการอัตราการแปรสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพเท่ากับ 25.86, 22.47, 6.77 และ 6.25 ล./วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำของชุดการทดลองที่ 4

	เริ่มต้น ระบบ	อัตราการสารอินทรีย์ 40 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน	แปรค่า ระยะเวลา กัก เก็บน้ำครั้งที่ 1	แปรค่า ระยะเวลา กัก เก็บน้ำครั้งที่ 2	แปรค่า ระยะเวลา กัก เก็บน้ำครั้งที่ 3
ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุล (วัน)	89	48	6	4	2
ซีไอดีเข้า (มก./ล.)	902.00	6540.00	4683.40	3456.90	1837.10
ซีไอดีออก (มก./ล.)	196.00	773.10	605.70	474.00	254.50
ร้อยละบำบัด (%)	78.40	88.18	87.07	86.29	86.15
อัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างน้ำออก	0.07	0.17	0.08	0.07	0.07
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ล./วัน)	-	86.21	74.89	67.66	93.80
ของแข็งแขวนลอยน้ำออก (มก./ล.)	78.10	322.00	689.00	463.00	452.10
พีเอชขาออก	7.99	8.17	7.68	7.61	7.39
โออาร์พี	-	-237.10	-190.30	-312.93	-275.87

ผลกระทบระยะยาวของการเดินระบบบำบัดไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำ

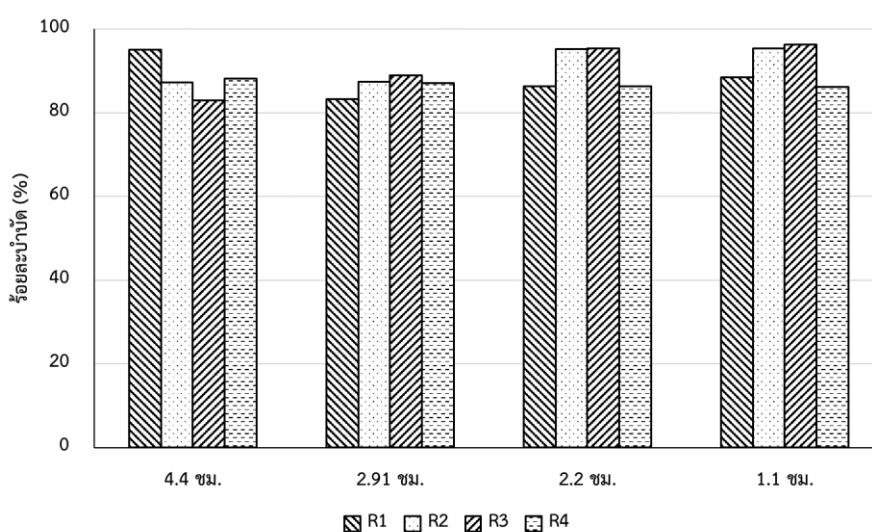
งานวิจัยนี้ศึกษาการเดินระบบที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำและอัตราการสารอินทรีย์เข้าระบบที่แตกต่างกัน โดยผลการทดลองและการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ *ค่าพารามิเตอร์ในช่วงสมดุล* แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงผลกระทบของค่าระยะเวลากักเก็บน้ำ และอัตราการสารอินทรีย์ต่อความสามารถของถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำในการบำบัด

สารอินทรีย์ ซึ่งในหัวข้อนี้จะอภิปรายถึงผลกระทบในระยะยาวของการเดินระบบบำบัดไร้อากาศฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำที่ถูกรบกวนด้วยการเปลี่ยนสภาวะการเดินระบบ และนำค่าความสามารถในการบำบัดที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ มาใช้ในการคำนวณค่าจลนพลศาสตร์

ความสามารถของระบบในการบำบัดสารอินทรีย์

การแปรค่าสภาวะการเดินระบบของถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำ 4 ชุดการทดลองที่แตกต่างกันทั้งค่าอัตราการสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบเท่ากับ 5, 15, 25, 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4, 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. ตามลำดับ ทำให้สามารถเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการเดินระบบแบบคู่อันดับ และเปรียบเทียบที่ค่าอัตราการสารอินทรีย์หรือระยะเวลาพักเก็บน้ำคงที่ได้ ทั้งนี้การทดลองในช่วงการแปรค่าอัตราการสารอินทรีย์ (ภายหลังจากสภาวะเริ่มเดินระบบ) ผลการทดลองที่แสดงถึงร้อยละความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ของชุดการทดลองทั้ง 4 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 88.38 มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 2.5 ซึ่งไม่ถือว่าเป็นส่วนต่างที่มีนัยสำคัญ เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ทำการแปรค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำครั้งที่ 1, 2 และ 3 ร้อยละการบำบัดสารอินทรีย์เฉลี่ยในแต่ละชุดการทดลองเท่ากับ 86.67, 90.78 และ 91.59 และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4.99, 2.47 และ 5.17 ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นค่าร้อยละการบำบัดสารอินทรีย์ที่ใกล้เคียงกันในแต่ละสภาวะการเดินระบบ และหากพิจารณาที่ชุดการทดลองเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของการเปลี่ยนค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำ ได้ค่าเฉลี่ยร้อยละการบำบัดสารอินทรีย์ของแต่ละชุดเท่ากับ 88.28, 91.31, 90.91 และ 86.92 โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 5.02, 4.61, 6.17 และ 0.93 ในชุดการทดลองที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลที่กล่าวมานั้นแสดงให้เห็นว่า ค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำที่ปรับใช้ในการทดลองนี้ ยังคงเพียงพอต่อการเกิดการย่อยสลายของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ รวมถึงค่าอัตราการสารอินทรีย์ที่ปรับใช้ในการทดลองก็เช่นกัน อย่างไรก็ตามพบว่าความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดที่อัตราการสารอินทรีย์สูงสุดเท่ากับ 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และระยะเวลาพักเก็บน้ำต่ำสุดที่ 1.1 ชม. ถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลองดังกล่าวยังคงมีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ได้ถึงร้อยละ 86.15 โดยอาศัยระยะเวลาในการปรับตัวต่ำกว่า 2 วัน (อ้างอิงจาก

ตารางที่ 4.6) อาจเนื่องมาจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการเดินระบบแบบลดความเข้มข้นน้ำเสียเข้าระบบลงทีละขั้น (Step down wastewater concentration) ซึ่งทำให้จุลินทรีย์ใช้ระยะเวลาปรับตัวในช่วงการทดลองแรกๆ มากกว่าการทดลองช่วงหลังที่มีค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีของน้ำเสียน้อยกว่า แม้ในการทดลองช่วงหลังค่าระยะเวลาที่เก็บน้ำจะลดลงถึง 4 เท่า นอกจากนี้ยังอาจเนื่องมาจากการเดินระบบทดลองในงานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำตาลกลูโคส (AR-grade Glucose) เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนสำหรับจุลินทรีย์ในระบบ ซึ่งกลูโคสนั้นถือเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเดี่ยวที่มีโครงสร้างขนาดเล็ก จุลินทรีย์สามารถดูดซึมไปใช้ได้ง่ายและทันที แตกต่างกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ใช้สารอินทรีย์คาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ต่างๆ ในการเดินระบบ (AZBAR และคณะ, 2000 ; Metcalf และ Eddy, 2014) ทำให้สามารถสรุปได้ว่าระยะเวลาที่เก็บน้ำ 1.1 ชม. นั้นเพียงพอต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ประเภทกลูโคสเมื่อเดินระบบไปถึงปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดไร้อากาศที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลาง

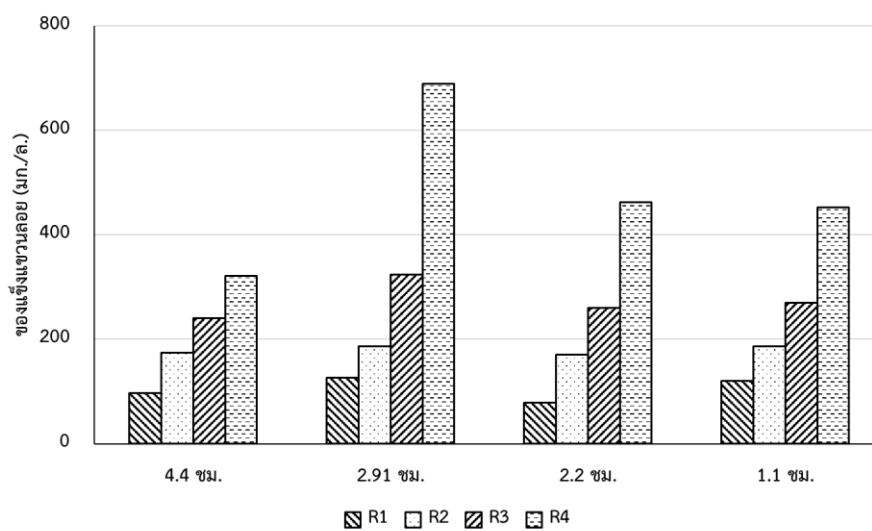


รูปที่ 4.9 ร้อยละการบำบัดสารอินทรีย์ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ

ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียขาออก

ในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียด้วยระบบฟิล์มชีวภาพนั้น มีความเป็นไปได้สูงที่เชื้อจุลินทรีย์ส่วนเกินจะหลุดลอกออกจากตัวกลาง หรือถูกความเร็วไหลขึ้นของน้ำกระทำให้หลุดออกไป ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าวมีโอกาสจะสูญเสียจากระบบออกไปกับน้ำทิ้ง การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้น

ของแข็งแขวนลอย (SS) ในน้ำขาออกจึงมีความสำคัญ ทั้งนี้ในการเดินระบบระดับปฏิบัติการที่ใช้น้ำประปาในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์นั้นสามารถอนุมานได้ว่าค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยในน้ำขาออกคือ ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่หลุดและสูญเสียออกจากระบบ รวมกับปริมาณตัวกลางที่ถูกความเร็วน้ำไหลย้อนระบายออกมาในช่วงเริ่มระบบเท่านั้น



รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ

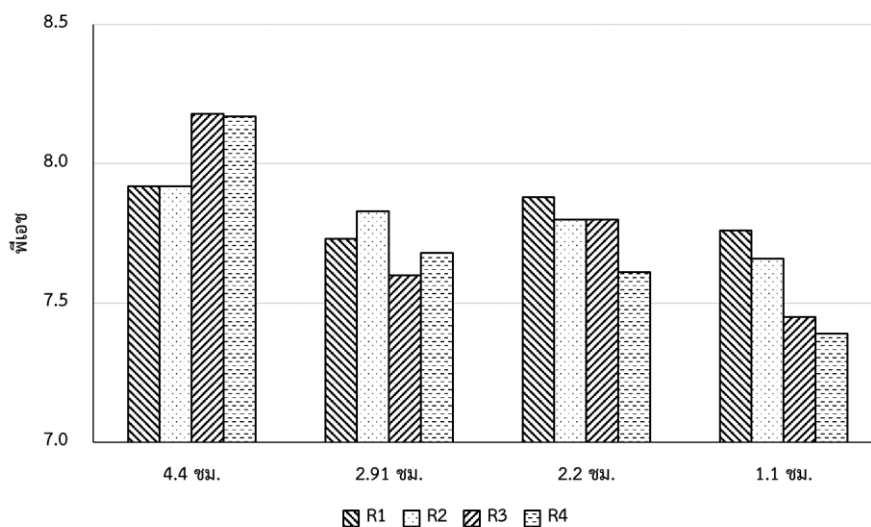
ค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยในน้ำขาออกของทั้งถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดไร้อากาศทั้ง 4 ชุดการทดลองเมื่อทำการเดินระบบที่สภาวะแตกต่างกัน ผลการทดลองดังรูปที่ 4.10 พบว่าในช่วงสมดุลนั้นค่าความเข้มข้นแปรผันตรงไปในทางเดียวกันกับค่าอัตราการสสารอินทรีย์ที่ถูกแปรเปลี่ยนให้กับชุดการทดลอง กล่าวคือหากเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยของชุดการทดลองที่ 1 ถึง 4 ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำเท่ากันในการทดลองแปรค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำครั้งที่ 2 จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยของชุดการทดลอง ทั้ง 4 นั้นมีค่าเรียงจากน้อยไปหามากเท่ากับ 78.00, 170.00, 263.00 และ 463.00 มก./ล. ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าอัตราการสสารอินทรีย์ที่เติมให้กับระบบเท่ากับ 5, 15, 25 และ 40 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4 ชม. อีกทั้งยังเป็นไปในทางเดียวกันสำหรับการทดลองแปรค่าอัตราการสสารอินทรีย์ และการทดลองแปรค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำทั้งครั้งที่ 1 และ 3 ได้ค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยดังตารางที่ 4.3 ถึง 4.6 อย่างไรก็ตามหากพิจารณาที่ชุดการทดลองเดียวกันเมื่อเปลี่ยนสภาวะการเดินระบบจะมี

แนวโน้มค่าของเชิงแขวนลอยลดลงตามค่าระยะเวลาที่เก็บน้ำที่ลดลง เนื่องจากถึงปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นระบบแบบไม่เวียนน้ำ ดังนั้นหากต้องการลดระยะเวลาที่เก็บน้ำจึงต้องเพิ่มความเร็วของน้ำที่เข้าสู่ระบบให้มากขึ้น ที่การทดลองต่อๆ มานั้นค่าความเร็วไหลย้อนเพิ่มขึ้นจาก 0.45 เป็น 0.68, 0.91 และ 1.82 ม./ชม. ตามลำดับ เมื่อค่าความเร็วไหลย้อนมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับชั้นฟิล์มชีวภาพนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อชั้นฟิล์มเหล่านั้นได้รับแรงดังกล่าวมากขึ้น แรงยึดเกาะของเชื้อจุลินทรีย์ที่จับตัวกันอยู่บนพื้นผิวของตัวกลางจึงไม่เพียงพอที่จะยึดเกาะอยู่ได้ และหลุดลอยออกไปกับน้ำทิ้งขาออกในที่สุด (Dong และคณะ, 2012) นอกจากนี้ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ลดลง ณ สภาวะการเดินระบบที่เปลี่ยนไป อาจส่งผลให้เชื้อจุลินทรีย์บางส่วนนั้นตายลง เนื่องจากไม่ได้รับแหล่งคาร์บอนที่เพียงพอและหลุดลอยออกมากับน้ำขาออก (Ketheesan และ Stuckey, 2015) ทั้งนี้การทดลองแปรค่าอัตราการสารอินทรีย์มีค่าความเข้มข้นของเชิงแขวนลอยต่ำกว่าการทดลองอื่นๆ อาจเนื่องมาจากการทดลองดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบอย่างเฉียบพลัน ส่งผลให้เชื้อจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ตายและไม่สามารถทนต่อสภาวะดังกล่าวได้ ซึ่งที่การทดลองภายหลังนั้นไม่มีการเปลี่ยนอัตราการสารอินทรีย์อย่างเฉียบพลัน จุลินทรีย์ในระบบได้ปรับตัวและสามารถทนต่อค่าอัตราการสารอินทรีย์ที่สูงได้ ทำให้มีค่าความเข้มข้นของเชิงแขวนลอยเพิ่มขึ้นในการทดลองแปรค่าระยะเวลาที่เก็บน้ำครั้งที่ 1 ทั้งนี้ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนสภาวะการเดินระบบอย่างเฉียบพลันได้อธิบายอยู่ในหัวข้อ ผลกระทบระยะสั้นของการเดินระบบบำบัดไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำ จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าระยะเวลาที่เก็บน้ำในถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดไร้อากาศส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเข้มข้นของเชิงแขวนลอยของระบบจากแรงเสียดทานที่กระทำต่อชั้นฟิล์มชีวภาพ และความเข้มข้นสารอินทรีย์ที่ลดลงจะทำให้ค่าของเชิงแขวนลอยลดลงเนื่องจากขาดแคลนสารอาหาร เชื้อจุลินทรีย์จะปรับสภาพและลดจำนวนประชากรให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมกับสารอาหาร ตามลำดับ

ค่าความเป็นกรด-เบส (พีเอช)

ในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไร้อากาศนั้น ค่าพีเอชจัดเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ โดยหากค่าพีเอชลดลงจนถึงจุดที่จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถทำงานได้จะส่งผลต่อ

การทำงานของระบบ ซึ่งจากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นถึงค่าพีเอชเฉลี่ย ณ จุดสมดุลของชุดการทดลองที่ 1 ถึง 4 ที่สภาวะการเดินระบบแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าค่าพีเอชมีแนวโน้มคงที่อยู่ในช่วง 7.73 ถึง 7.92 สำหรับชุดการทดลองที่ 1 (อัตราภาระสารอินทรีย์ 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาที่เก็บน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปไม่ส่งผลต่อค่าพีเอชของชุดการทดลองที่ 1 ในทางกลับกันค่าพีเอชของชุดการทดลองที่ 2, 3 และ 4 นั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาที่เก็บน้ำลดลง โดยในชุดการทดลองที่ 4 ค่าพีเอชมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออัตราภาระสารอินทรีย์คงที่เท่ากับ 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.39 ถึง 8.17 โดยมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 4.4 ชม. และต่ำสุดที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 1.1 ชม. แสดงให้เห็นว่าแม้ค่าอัตราส่วนระหว่างกรดต่อสภาพต่างต่ำกว่า 0.4 ตลอดการทดลอง ค่าพีเอชของระบบยังสามารถลดลงได้อันเนื่องมาจากระยะเวลาที่เก็บน้ำที่ปรับใช้ให้กับระบบนั้นเพียงพอต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด แต่ไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนจากความเข้มข้นของกรดที่สะสมในระบบ (อธิบายไว้ในหัวข้อ *ปริมาณความเข้มข้นกรดและอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่าง*) โดยหากพิจารณาร่วมกับค่าพีเอชของชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 15 และ 25 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน จะสามารถยืนยันทฤษฎีดังกล่าวได้ อย่างไรก็ตามตลอดการทดลองนั้นผู้วิจัยได้ทำการเติมความเข้มข้นไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นตามความเหมาะสม เพื่อรักษาระดับอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างให้อยู่ในช่วงต่ำกว่า 0.4 ทำให้ไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าการเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์นั้นส่งผลกระทบมากหรือน้อยเพียงใดต่อค่าพีเอชในระบบเนื่องจากการเติมปริมาณต่างให้เหมาะสม ทั้งนี้หากพิจารณาเพิ่มเติมในกรณีที่ไม่มีกรเติมปริมาณต่างเพิ่มขึ้นค่า พีเอชในระบบจะลดลงจากค่าอัตราภาระสารอินทรีย์ที่สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาในช่วงการเปลี่ยนถ่ายสภาวะการเดินระบบพบว่าหากเชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถปรับตัวได้ จะส่งผลให้ความสามารถในการบำบัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ รวมถึงค่าอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างเช่นกัน (อธิบายรายละเอียดในหัวข้อ *ผลกระทบในระยะสั้นของระบบ*)



รูปที่ 4.11 ค่าพีเอชของถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดไร้อากาศที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ

ปริมาณความเข้มข้นกรดอินทรีย์และอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่าง

ค่าอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างในช่วงจุดสมดุลนั้นแสดงถึงความสมดุลในการเกิดปฏิกิริยาและการรักษาปริมาณกรดอินทรีย์ที่เกิดจากปฏิกิริยาของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด ให้มีปริมาณที่เหมาะสมต่ออัตราการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนและปริมาณสารบัพเฟอร์ที่เติมให้กับระบบ รวมถึงการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของกรดและต่างในน้ำขาเข้าและออก โดยตารางที่ 4.7 ถึง 4.10 แสดงความเข้มข้นกรดอินทรีย์ ความเข้มข้นต่าง และอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างในน้ำเสียขาเข้าและน้ำทิ้งที่ออกจากถังปฏิกรณ์ของการทดลองทั้ง 4 ชุด จะเห็นได้ว่าปริมาณความเข้มข้นของต่างในน้ำขาออกนั้นมีค่าสูงกว่าน้ำขาเข้า อาจเนื่องมาจากปัจจัยหลัก 2 ประการ คือ การละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณธาตุอาหาร โดยปฏิกิริยาอันเกิดจากจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนนั้นให้สารผลิตภัณฑ์คือ ก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นเมื่อละลายน้ำจะสามารถก่อให้เกิดกลุ่มคาร์บอเนตที่มีความสามารถเป็นบัพเฟอร์ในช่วงต่างได้ และในอีกกรณีอาจเกิดขึ้นจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองจำเป็นต้องมีการเติมธาตุอาหารให้กับระบบ เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตเมื่อย่อยสารอินทรีย์ในน้ำ ซึ่งธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต้องให้กับจุลินทรีย์นั้นมีสารประกอบไนโตรเจนเป็นหลัก โดยสารประกอบดังกล่าวหากเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์จะก่อให้เกิดแอมโมเนียที่มีฤทธิ์เป็นบัพเฟอร์ได้เช่นเดียวกัน

กับคาร์บอนไดออกไซด์ (Krakat และคณะ, 2017) อย่างไรก็ตามในกระบวนการแบบไร้อากาศนั้นสามารถเกิดได้ทั้ง 2 กรณีหากแต่จำเป็นต้องคำนึงถึงค่าพีเอชของระบบ เพราะหากมีสารบัฟเฟอร์มากเกินไปจะส่งผลให้ค่าพีเอชของระบบสูงเกินกว่าช่วงที่เหมาะสมของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (ค่าพีเอชในช่วงสูงในรูปที่ 4.11) ในส่วนความเข้มข้นกรดในระบบจากรูปที่ 4.12 **Error! Reference source not found.** แสดงให้เห็นถึงความเข้มข้นของกรดสะสมในถังปฏิกรณ์ ซึ่งในช่วงระยะเวลาที่เก็บน้ำที่ปรับใช้นั้น (4.4, 2.93, 2.2 และ 1.1 ซม.) มีค่าความเข้มข้นของกรดในน้ำขาออกใกล้เคียงกับปริมาณความเข้มข้นของกรดในน้ำขาเข้าในชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการย่อยสลายสารตั้งต้นของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างมีเทนในช่วงอัตราภาระสารอินทรีย์ 5-25 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ในขณะที่ในชุดการทดลองที่ 4 (อัตราภาระสารอินทรีย์ 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) มีความเข้มข้นกรดในน้ำขาออกสูงถึง 687.50, 362.50, 375.00 และ 293.75 มก./ล. ซึ่งเกิดจากปริมาณกรดอินทรีย์ส่วนเกินจากจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด ไม่สัมพันธ์กับความสามารถในการย่อยสลายกรดของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ส่งผลให้เกิดกรดสะสมในน้ำจากอัตราภาระสารอินทรีย์ที่สูงขึ้น

ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นของกรด ต่าง และอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างของชุดการทดลองที่ 1

	แปรค่าอัตราภาระ			
	สารอินทรีย์ (5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.- วัน)	แปรค่าระยะเวลา กักเก็บน้ำครั้งที่ 1	แปรค่าระยะเวลา กักเก็บน้ำครั้งที่ 2	แปรค่าระยะเวลา กักเก็บน้ำครั้งที่ 3
ความเข้มข้นต่างในน้ำเข้า (มก./ล.)	1067.67	1341.67	1408.33	1916.67
ความเข้มข้นต่างในน้ำออก (มก./ล.)	1333.33	1575.00	2183.33	2375.00
ความเข้มข้นกรดในน้ำเข้า (มก./ล.)	83.33	112.50	104.17	150.00
ความเข้มข้นกรดในน้ำออก (มก./ล.)	83.33	187.50	191.67	129.17
อัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างน้ำออก	0.06	0.12	0.09	0.05

ตารางที่ 4.8 ความเข้มข้นของกรด ต่าง และอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างของชุดการทดลองที่ 2

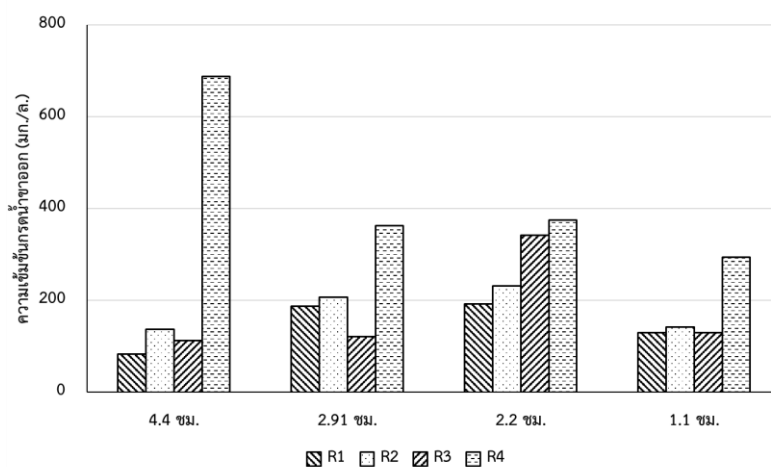
	แปรค่าอัตราภาวะ			
	สารอินทรีย์ (15 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.- วัน)	แปรค่าระยะเวลา กักเก็บน้ำครั้งที่ 1	แปรค่าระยะเวลา กักเก็บน้ำครั้งที่ 2	แปรค่าระยะเวลา กักเก็บน้ำครั้งที่ 3
ความเข้มข้นต่างในน้ำเข้า (มก./ล.)	2700.00	2391.67	2350.00	2691.67
ความเข้มข้นต่างในน้ำออก (มก./ล.)	4125.00	4000.00	4216.67	3291.67
ความเข้มข้นกรดในน้ำเข้า (มก./ล.)	112.50	112.50	120.83	158.33
ความเข้มข้นกรดในน้ำออก (มก./ล.)	137.50	206.50	231.25	141.67
อัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างน้ำออก	0.03	0.05	0.06	0.04

ตารางที่ 4.9 ความเข้มข้นของกรด ต่าง และอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างของชุดการทดลองที่ 3

	แปรค่าอัตราภาวะ			
	สารอินทรีย์ (25 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.- วัน)	แปรค่าระยะเวลา กักเก็บน้ำครั้งที่ 1	แปรค่าระยะเวลา กักเก็บน้ำครั้งที่ 2	แปรค่าระยะเวลา กักเก็บน้ำครั้งที่ 3
ความเข้มข้นต่างในน้ำเข้า (มก./ล.)	2708.33	2325.00	2291.67	2566.67
ความเข้มข้นต่างในน้ำออก (มก./ล.)	2466.67	3658.33	4216.67	3516.67
ความเข้มข้นกรดในน้ำเข้า (มก./ล.)	125.00	116.67	125.00	133.33
ความเข้มข้นกรดในน้ำออก (มก./ล.)	112.50	120.83	341.67	129.17
อัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างน้ำออก	0.05	0.03	0.08	0.04

ตารางที่ 4.10 ความเข้มข้นของกรด ต่างและอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างของชุดการทดลองที่ 4

	แปรค่าอัตราภาวะ			
	สารอินทรีย์ (40 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.- วัน)	แปรค่าระยะเวลา กักเก็บน้ำครั้งที่ 1	แปรค่าระยะเวลา กักเก็บน้ำครั้งที่ 2	แปรค่าระยะเวลา กักเก็บน้ำครั้งที่ 3
ความเข้มข้นต่างในน้ำเข้า (มก./ล.)	3158.33	2758.33	3875.00	3650.00
ความเข้มข้นต่างในน้ำออก (มก./ล.)	4108.33	4400.00	5458.33	4400.00
ความเข้มข้นกรดในน้ำเข้า (มก./ล.)	100.00	108.33	120.83	164.58
ความเข้มข้นกรดในน้ำออก (มก./ล.)	687.50	362.50	375.00	293.75
อัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างน้ำออก	0.17	0.08	0.07	0.07

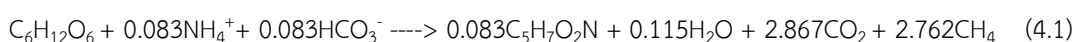


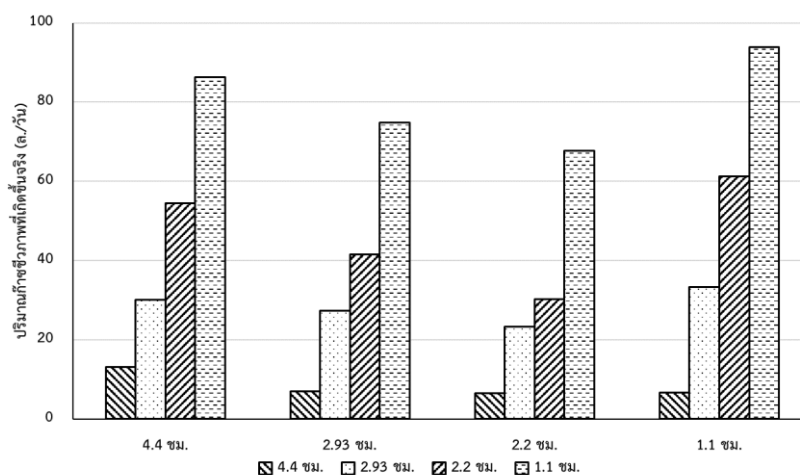
รูปที่ 4.12 กรดอินทรีย์ในน้ำขาออกที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ

การเกิดก๊าซชีวภาพ

เพื่อพิจารณาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงในการทดลองจากการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยเลือกเวลาเก็บตัวอย่างช่วงเดียวกันกับการเก็บพารามิเตอร์อื่นๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะการเดินระบบต่างๆ ในรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการแปรค่าอัตราภาระสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มีปริมาณการก๊าศเกิดมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นให้กับระบบจะก่อให้เกิดสารผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นตามปฏิกิริยาดังสมการที่ 4.1 (รุ่งกิจวัฒน์านุกูล, 2553) ทั้งที่ระยะเวลาเก็บน้ำ 4.4, 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจากมากไปน้อยที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 40, 25, 15 และ 5 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการแปรค่าระยะเวลาเก็บน้ำที่แตกต่างกัน พบว่าเวลากักเก็บน้ำที่ 2.93 และ 2.2 ชม. ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น (ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน) มีค่าลดลงจากเวลากักเก็บน้ำที่ 4.4 ชม. จากปัญหาการอุดตันของท่อส่งก๊าซจากถังปฏิกรณ์ไปยังอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ภายหลังการเปลี่ยนชุดอุปกรณ์ดังกล่าวจึงส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นรายวันของเวลากักเก็บน้ำที่ 1.1 ชม. มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้ความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพจะพิจารณาจากประสิทธิภาพในการแปลงสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพ (ล.มีเทน/ก.ซีไอดีบำบัด) โดยจะเลือกใช้ค่าจากระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 4.4 และ 1.1 ชม. ซึ่ง

ไม่ได้รับผลกระทบจากการอุดตันของท่อส่งก๊าซ พบว่ามีค่าความสามารถในการแปลงสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีเป็นก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 0.55 ± 0.10 ล.ก๊าซชีวภาพ/ก.ซีโอดีบำบัด ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ (รุ่งกิจวัฒนานุกุล, 2553) และ (อุดมสินโรจน์, 2543) ที่มีค่าอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพอยู่ในช่วง $0.46-0.62$ ล.ก๊าซชีวภาพ/ก.ซีโอดีบำบัด อย่างไรก็ตามพบว่าค่าทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 4.1 ควรจะมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.66 ล.ก๊าซชีวภาพ/ก.ซีโอดีบำบัด ซึ่งมากกว่าค่าที่ได้จากการทดลองเล็กน้อยจากปัจจัยหลัก 2 ประการ ปัจจัยแรกเกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเกิดขึ้นร่วมกับมีเทนในขั้นตอนการแปลงกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) ให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพ สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นสารกลุ่มคาร์บอนेटที่มีฤทธิ์เป็นสภาพต่างส่งผลให้ค่าสภาพต่างในน้ำขาออกจากถังปฏิกรณ์สูงกว่าน้ำเข้าระบบ ดังตัวอย่างผลของชุดการทดลองที่ 2 และ 4 ในตารางที่ 4.11 ส่วนปัจจัยที่สองเกิดจากการอุดตันของท่อส่งก๊าซไปยังอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพ เมื่อแรงดันในฝั่งที่ไปยังชุดตรวจนับเพิ่มขึ้นส่งผลให้ก๊าซบางส่วนสูญเสียออกไปทางท่อน้ำขาออก โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีน้ำหนักต่อโมลมากกว่ามีเทน (คาร์บอนไดออกไซด์ 44 ก./โมล, มีเทน 16 ก./โมล) จะถูกบังคับให้ไหลออกทางฝั่งที่มีความดันต่ำกว่าตามหลักกลศาสตร์ของไหล เมื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากระบบการทดลอง พบว่ามีสัดส่วนของก๊าซเทนมากถึงร้อยละ 82.72 และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียงร้อยละ 12.04 ขณะที่เมื่อคำนวณตามสมการที่ 4.1 ก๊าซชีวภาพที่ได้ควรจะมีร้อยละของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ทางทฤษฎีเท่ากับ 24.55 และ 70.01 ตามลำดับ ซึ่งความขัดแย้งดังกล่าวคาดว่าเป็นไปตามเหตุผลที่อธิบายไว้ข้างต้นถึงการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการอุดตันของท่อส่งก๊าซชีวภาพ ทำให้ก๊าซชีวภาพที่ตรวจวิเคราะห์ได้มีปริมาณน้อยกว่าค่าทางทฤษฎีและมีร้อยละของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ ทั้งนี้อาจกล่าวโดยรวมได้ว่า ระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบไร้อากาศที่ใช้ในการทดลองนี้ มีความสามารถในการแปลงสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพได้ดี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.55 ± 0.10 ล.ก๊าซชีวภาพ/ก.ซีโอดีบำบัด เมื่อพิจารณาจากระบบการทดลองที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4 และ 1.1 ชม.





รูปที่ 4.13 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงตามสภาวะการเดินระบบที่แตกต่างกัน

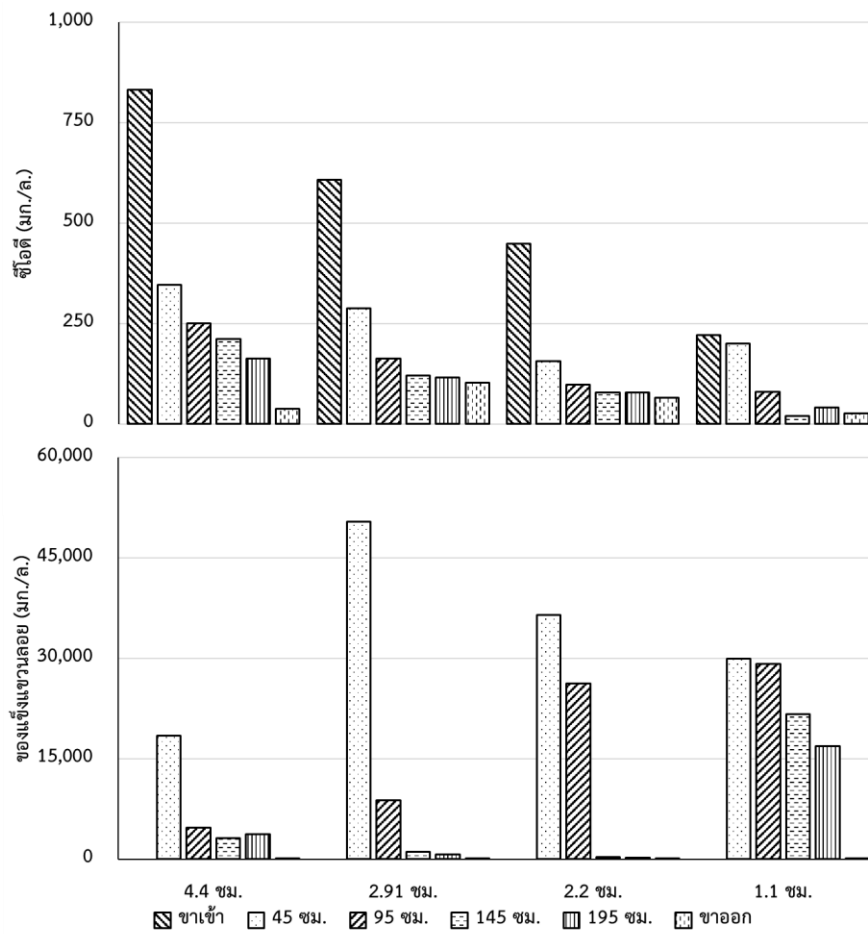
ตารางที่ 4.11 ความเข้มข้นค่าสภาพต่างในน้ำเข้าและออกจากถังปฏิกรณ์ (ชุดการทดลองที่ 2 และ 4)

	ระยะเวลาเก็บน้ำ (ชม.)			
	4.4	2.93	2.2	1.1
ชุดการทดลองที่ 2				
สภาพต่างน้ำเข้า (มก./ล.)	2,700.00	2,391.67	2,350.00	2,691.67
สภาพต่างน้ำออก (มก./ล.)	4,125.00	4,000.00	3,583.33	3,291.67
ส่วนต่าง (มก./ล.)	1,425.00	1,608.00	1,925.00	600.00
ชุดการทดลองที่ 4				
สภาพต่างน้ำเข้า (มก./ล.)	3,158.33	2,758.33	3,875.00	3,650.00
สภาพต่างน้ำออก (มก./ล.)	4,108.33	4,400.00	5,458.33	4,400.00
ส่วนต่าง (มก./ล.)	950.00	1,641.67	1,583.33	750.00

ความสามารถของระบบตามความสูงถังปฏิกรณ์

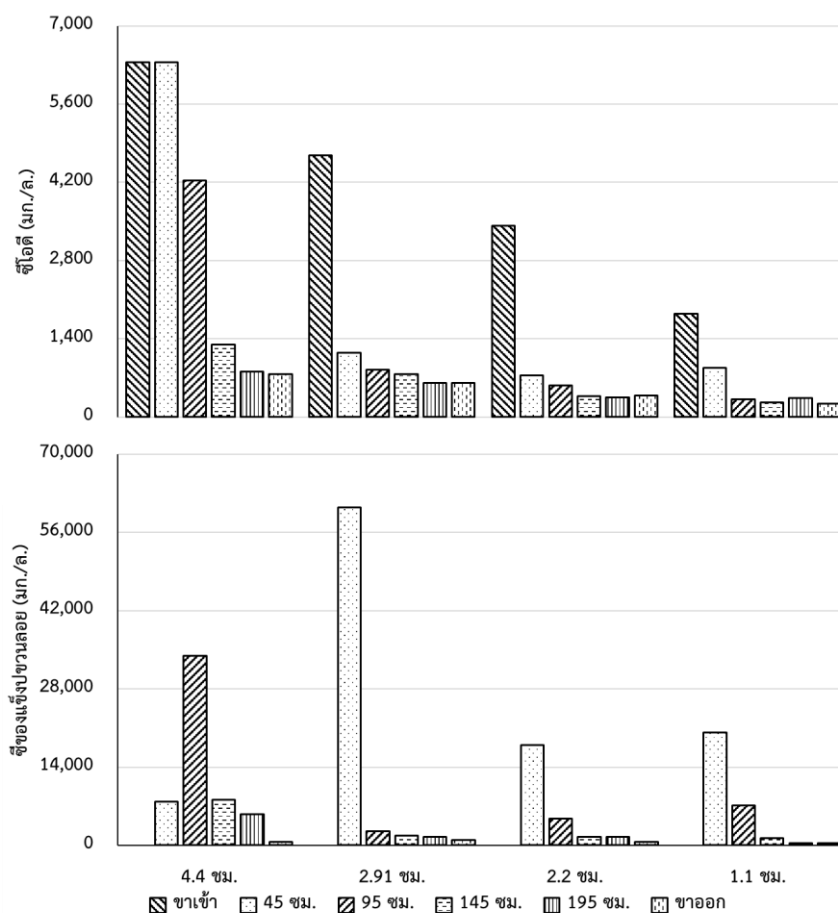
ถังปฏิกรณ์ทุกชุดการทดลองได้มีการติดตั้งจุดเก็บตัวอย่างจำนวน 4 จุด ได้แก่ ที่ระดับความสูง 45, 95, 145 และ 195 ซม. จากกันถึง เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของทั้ง 4 ชุดการทดลอง ณ สภาวะการเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บน้ำเท่ากัน พบว่าสารอินทรีย์ถูกบำบัดได้ดีในช่วงคอลัมน์แรกของถังปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นพื้นที่ทำปฏิกิริยาของเชื้อจุลินทรีย์ รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดง

ความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์และความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยตามระดับความสูงของถังปฏิกรณ์ชุดการทดลองที่ 1 และ 4 โดยความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์บนตัวกลางพีวีเอเจลนั้นสามารถบำบัดได้อยู่สูงสุดในช่วงคอลัมน์ที่ 1 เท่ากับร้อยละ 93.03 และลดลงในช่วงคอลัมน์ที่ 2, 3 และ 4 สอดคล้องกับค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยในช่วงคอลัมน์ดังกล่าว ทั้งนี้ในชุดการทดลองที่ 4 (อัตราภาระสารอินทรีย์ 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4 ชม. นั้นความสามารถในการบำบัดที่ดีอยู่ในช่วงคอลัมน์ที่ 2 ถึง 3 (ร้อยละ 79.49) เนื่องจากที่สภาวะการเดินระบบดังกล่าวมีค่าอัตราไหลขึ้นที่ต่ำ 0.45 ม./ชม. ขณะที่มีความเข้มข้นซีโอดีที่สูง (6,540 มก./ล.) ซึ่งเป็นปัจจัยที่ฟิล์มชีวภาพจะจับตัวกันและชั้นตะกอนยกตัวสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มค่าอัตราไหลขึ้นสูงขึ้น (ลดระยะเวลาพักเก็บน้ำ) แรงเสียดทานที่กระทำกับชั้นฟิล์มชีวภาพจะสูงขึ้นและทำให้ชั้นตะกอนไม่เกาะตัวและลอยขึ้น ที่อัตราไหลขึ้นสูงขึ้นพบว่าชุดการทดลองที่ 4 มีค่าร้อยละการบำบัดสารอินทรีย์ในช่วงคอลัมน์ที่ 1 สูงขึ้นเป็นร้อยละ 75.4 ในการทดลองแปรค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำ จึงสามารถสรุปได้ว่าระดับความสูงของถังปฏิกรณ์นั้นไม่ส่งผลต่อความสามารถโดยรวมของระบบในการบำบัดสารอินทรีย์ เนื่องจากปฏิกิริยาทางชีวภาพเกิดขึ้นได้ดีในช่วงคอลัมน์ที่ 1, 2 ซึ่งเป็นระดับความสูงที่มีเชื้อจุลินทรีย์อาศัยและเติบโตอยู่บนตัวกลาง ในขณะที่ช่วงคอลัมน์ที่ 3, 4 นั้นมีค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยและความสามารถในการบำบัดที่ต่ำอย่างไม่มีความสำคัญ



รูปที่ 4.14 ความเข้มข้นซีโอดีและของแข็งแขวนลอยของชุดการทดลองที่ 1

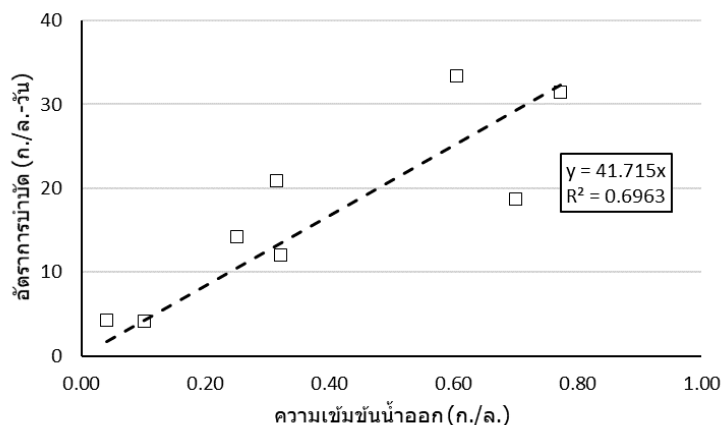
ตามระดับความสูงถึงปฏิกรณ์ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ



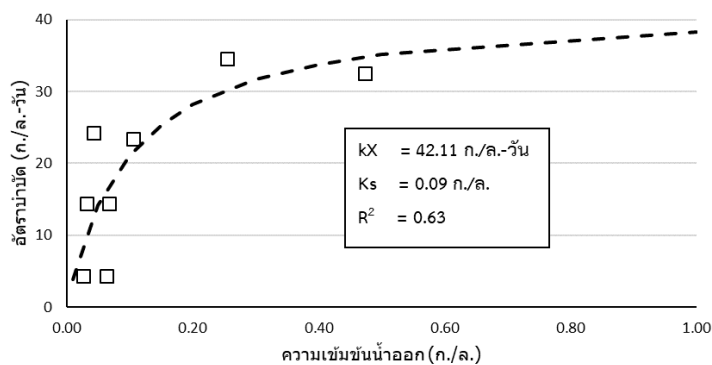
รูปที่ 4.15 ความเข้มข้นซีโอดีและของแข็งแขวนลอยของชุดการทดลองที่ 4 ตามระดับความสูงถึงปฏิกรณ์ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ

ค่าจลนพลศาสตร์ของระบบ

ในการคำนวณค่าจลนพลศาสตร์จะเลือกใช้การคำนวณหาอัตราการบำบัดสารอินทรีย์ต่อเวลา เพื่อเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาทางทฤษฎีว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (1^{st} -order kinetic) หรือปฏิกิริยาทางชีวภาพแบบโมนอด (Monod's kinetic) ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ โดยมีสมการที่ใช้สำหรับการคำนวณดังสมการที่ 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ ทั้งนี้ผลการทดลองที่นำมาใช้สำหรับการคำนวณในสมการดังกล่าว จะเลือกใช้ค่าความเข้มข้นน้ำเสียขาเข้าและออกจากทั้งปฏิกรณ์ทั้ง 4 ชุดการทดลองที่จุดสมดุลภายใต้ระยะเวลาที่เก็บน้ำที่แตกต่างกัน (เลือกใช้ค่าเฉลี่ย 5 จุด) จาก ตารางที่ 4.3 ถึง 4.6



รูปที่ 4.16 ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเมื่อใช้ค่าที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4 และ 2.93 ชม.



รูปที่ 4.17 ปฏิกริยาโมนอทเมื่อใช้ค่าที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 2.2 และ 1.1 ชม.

เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์มาใช้พิจารณารูปแบบปฏิกริยาที่เหมาะสม พบว่าที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4 และ 2.93 ชม. เส้นกราฟที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับปฏิกริยาอันดับหนึ่งแสดงดังรูปที่ 4.16 มีค่าคงที่ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง (k) เท่ากับ 41.72 วัน^{-1} โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.70 ซึ่งค่าคงที่ดังกล่าวแตกต่างจากผลการทดลองของ (İşik และ Sponza, 2005) ที่ได้ค่าคงที่ปฏิกริยาเท่ากับ 0.62 วัน^{-1} ที่ R^2 เท่ากับ 0.93 ทั้งนี้เป็นผลจากความแตกต่างของสารอินทรีย์ตั้งต้นที่ใช้ในการวิจัย โดยสารอาหารในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการทดลองนี้คือ กลูโคส (AR-Grade >95%) ส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ง่ายและย่อยได้ทั้งหมดหากไม่มีสิ่งเจือปน (มีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์มากกว่าร้อยละ 80) มีค่าอัตราการบำบัดสูง แม้จะใช้ระยะเวลาพักเก็บน้ำเพียง 2.93 ชม. เมื่อนำค่าอัตราการบำบัดสารอินทรีย์ (แกน

Y) พลวัตคู่กับความเข้มข้นน้ำขาออก (แกน X) เพื่อหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งจากความชัน (dY/dX) ส่งผลให้ค่าดังกล่าวมีค่าสูงเนื่องจากน้ำเสียเป็นสารอินทรีย์ชนิดย่อยง่าย (มีค่าอัตราบำบัดสูง ภายใต้ระยะเวลาพักเก็บน้ำต่ำ) โดยหากพิจารณาถึงข้อสันนิษฐานดังกล่าวเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ที่กล่าวมาข้างต้น (İşik และ Sponza, 2005) ซึ่งใช้น้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมสิ่งทอและเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี พบว่ามีค่าความสามารถในการบำบัดซีโอดีเพียงร้อยละ 29.4 ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 6 ชม. ส่งผลให้ได้ค่าคงที่ปฏิกิริยาที่ต่ำ ในขณะที่ (Pandian และคณะ, 2011) ทำการเดินระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบผสม (Hybrid reactor) พบว่าสามารถบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตยา (penicillin-G) ได้ร้อยละ 68.0 ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 3 ชม. ได้ค่าคงที่ปฏิกิริยา 30.14 วัน^{-1} ค่าคงที่ที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นผลมาจากการเปลี่ยนชนิดของน้ำเสีย ทั้งนี้ในงานวิจัยของ (Pandian และคณะ, 2011) ลักษณะเส้นกราฟของปฏิกิริยาที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 2.2 และ 1.1 ชม. มีรูปแบบสอดคล้องกับปฏิกิริยาทางชีวภาพตามโมเดลจลนพลศาสตร์ของโมนอท มีค่าคงที่ครึ่งปฏิกิริยา 0.09 ก./ล. และอัตราการบำบัดสารอินทรีย์สูงสุด 42.11 ก.ซีโอดี/ล.-วัน ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งการที่ค่าคงที่ครึ่งปฏิกิริยามีค่าต่ำเพียง 0.09 ก./ล. แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย (ค่าดังกล่าวแสดงถึงความเข้มข้นเพื่อให้ได้ซึ่งครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดสูงสุด) เนื่องจากใช้โปรตีนเวย์ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพในการเตรียมน้ำเสีย ได้ค่าความเข้มข้นครึ่งปฏิกิริยา 0.773 ก./ล. และมีค่าอัตราการบำบัดจำเพาะสูงสุด 0.941 ก.ซีโอดี/ก.วีเอสเอส-วัน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากงานวิจัยนี้เพราะเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย

ค่าอัตราการบำบัดสารอินทรีย์สูงสุดของงานวิจัยนี้มีค่า 42.11 ก.ซีโอดี/ล.-วัน โดยค่าดังกล่าวยังไม่ได้ถูกทำให้เป็นกลางด้วยการหารปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ เนื่องจากในงานวิจัยฉบับนี้ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างแม่นยำ ได้ทำให้ค่าดังกล่าวมีค่าสูงเมื่อเทียบกับงานวิจัยฉบับอื่นๆ อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบค่าคงที่ทางคณิตศาสตร์กับงานวิจัยฉบับอื่นๆ ที่ใช้น้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอของ (İşik และ Sponza, 2005) ที่มีค่าคงที่ครึ่งปฏิกิริยามากกว่า 4,000 มก./ล. และอัตราการบำบัดจำเพาะ 0.105 วัน^{-1} รวมถึง (Sharma และ Pooja, 2016) ที่เลือกใช้น้ำเสียโรงกลั่น มีค่าอัตราการบำบัดจำเพาะ 0.153 วัน^{-1} จึงแตกต่างกับค่าจากงานวิจัยฉบับนี้อย่างชัดเจน อันเป็นผลจากการเปลี่ยนชนิดของน้ำเสีย ทั้งนี้ค่าดังกล่าวแสดงถึงความสามารถในการรองรับอัตราการ

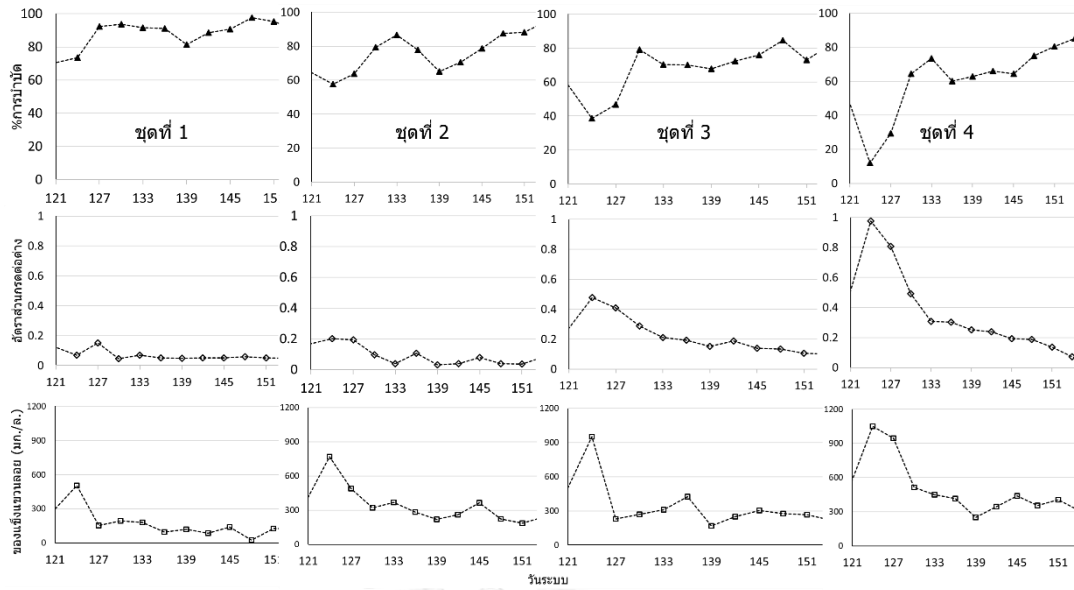
สารอินทรีย์สูงสุดที่ระบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลางภายใต้ระยะเวลาที่เก็บน้ำที่ต่ำสุดถึง 1.1 ซม.

ผลกระทบระยะสั้นของการเดินระบบบำบัดไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำ

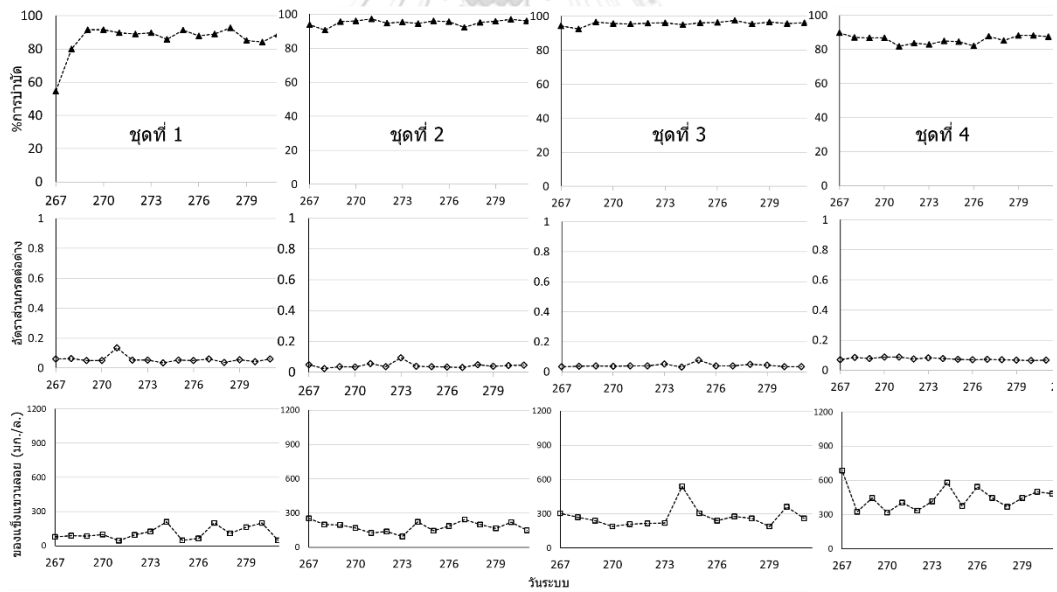
ในขั้นตอนการเดินระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจำเป็นต้องให้ระยะเวลาเก็บน้ำกับเชื้อจุลินทรีย์เพื่อปรับตัวเข้ากับสภาวะการเดินระบบก่อนเข้าสู่จุดสมดุล จากนั้นทั้งค่าความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์และพารามิเตอร์อื่นๆ จะมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ โดยในหัวข้อ *ผลกระทบระยะยาว* ที่ผ่านมามีได้อธิบายถึงประสิทธิภาพของระบบฟลูอิดไดซ์เบดไร้อากาศแบบไม่เวียนน้ำในการทดลองช่วงสมดุล รวมถึงการคำนวณค่าจลนพลศาสตร์

อย่างไรก็ตามในช่วงที่ระบบยังไม่เข้าสู่สภาวะสมดุลค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงและไม่คงที่ขึ้นกับสภาวะการเดินระบบที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะใช้ในการพิจารณาถึงผลกระทบระยะสั้นที่เกิดขึ้นกับถังปฏิกรณ์ในช่วงการเปลี่ยนถ่ายสภาวะการเดินระบบ โดยรูปที่ 4.18 ได้แสดงถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญในช่วงเปลี่ยนสภาวะการเดินระบบจากช่วงเริ่มต้นเป็นการทดลองแปรค่าอัตราภาระสารอินทรีย์ (วันที่ 121-124) ซึ่งจะเปลี่ยนอัตราภาระสารอินทรีย์ที่ป้อนให้กับถัง 4 ชุดการทดลองจากเดิม 5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน เป็น 5, 15, 25 และ 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ โดยยังคงรักษาค่าระยะเวลาเก็บน้ำให้เท่ากับ 4.4 ซม. คงเดิมสำหรับทั้ง 4 ชุดการทดลอง พบว่าค่าความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ลดลง ในชุดการทดลองที่ 4 นั้นมีค่าลดลงสูงสุดจากเดิมที่มีร้อยละการบำบัดเท่ากับ 82.52 คงเหลือเพียงร้อยละ 11.91 จากการเปลี่ยนสภาวะการเดินระบบ ค่าอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจากเดิม 0.05 เป็น 0.98 แสดงถึงความไม่สมดุลกันระหว่างอัตราการผลิตกรดอินทรีย์ของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด และกลุ่มสร้างมีเทนที่ยังไม่สามารถปรับตัวเข้ากับสภาวะการเดินระบบใหม่ได้ อีกทั้งเชื้อจุลินทรีย์บางส่วนที่ไม่สามารถทนต่อสภาวะการเดินระบบได้หลุดออกจากชั้นตัวกลาง ส่งผลให้ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำขาออกเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม 105.70 มก./ล. เป็น 1,050.00 มก./ล. ไม่เพียงแต่ชุดการทดลองที่ 4 เท่านั้นที่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนสภาวะการเดินระบบ ทั้งชุดการทดลองที่

2 และ 3 ก็ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการเดินระบบเช่นเดียวกัน ผลการทดลองดังรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าชุดการทดลองที่ 2 และ 3 นั้นได้รับผลกระทบรองลงมาในเชิงปริมาณจากชุดการทดลองที่ 4 ตามลำดับ เนื่องจากในการทดลองแปรค่าอัตราการระเหยอินทรีย์ได้ทำการเพิ่มอัตราการระเหยอินทรีย์อย่างเฉียบพลัน (Shock load) ให้กับชุดการทดลองทั้ง 3 ในอัตราส่วน 3, 5 และ 8 เท่าตามลำดับ อย่างไรก็ตามในช่วงการทดลองแปรระยะเวลาที่เก็บน้ำครั้งที่ 1, 2 และ 3 ไม่มีการเพิ่มอัตราการระเหยอินทรีย์เฉียบพลันให้กับระบบ เป็นเพียงการลดค่าระยะเวลาที่เก็บน้ำในชุดการทดลอง ซึ่งส่งผลต่อค่าความเข้มข้นซีโอดีขาเข้าที่ลดลงเพื่อคงไว้ซึ่งอัตราการระเหยอินทรีย์ 5, 15, 25 และ 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ทำให้ในการทดลองแปรค่าระยะเวลาที่เก็บน้ำนั้นไม่มีผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนสภาวะการเดินระบบที่ต่ำกว่าในช่วงเปลี่ยนถ่ายจากการเริ่มต้นเดินระบบเป็นการแปรค่าอัตราการระเหยอินทรีย์ดังรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าในช่วงการทดลองแปรค่าระยะเวลาที่เก็บน้ำครั้งที่ 3 (วันที่ 267-269) ความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ของทั้ง 4 ชุดการทดลองมีค่าค่อนข้างคงที่เช่นเดียวกับอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างและของแข็งแขวนลอยในระบบ ซึ่งปัจจัยส่วนหนึ่งมาจากชนิดของสารอาหารที่ให้กับถังปฏิกรณ์ คือน้ำตาลกลูโคส (AR-Grade) ที่มีคุณสมบัติที่ง่ายและสามารถเปลี่ยนเป็นกรดสายสั้นที่จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนสามารถย่อยสลายได้เร็ว แม้ในระบบจะมีระยะเวลาที่เก็บน้ำเพียง 1.1 ชม. ทุกชุดการทดลองก็ยังคงสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้มากกว่าร้อยละ 80



รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์และพารามิเตอร์ต่างๆ ในถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดไร้อากาศเมื่อทำการแปรค่าอัตราการระสารอินทรีย์ (วันที่ 121-151)



รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์และพารามิเตอร์ต่างๆ ในถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดไร้อากาศเมื่อทำการแปรค่าระยะเวลาที่เก็บน้ำครั้งที่ 3 (วันที่ 267-281)

ทั้งนี้แม้การเปลี่ยนแปลงอัตราการระสารอินทรีย์จะส่งผลให้ความสามารถในการบำบัดของถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดไร้อากาศลดลงอย่างมีนัยสำคัญดังได้อธิบายไปแล้ว แต่หากในตัวระบบมีความเข้มข้นที่เหมาะสมและสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้ดี โดยจากการทดลองของ (K.

และคณะ, 1995) สรุปไว้ว่าปริมาณกรดที่สะสมเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ปฏิกิริยาไร้อากาศล้มเหลวได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ ปริมาณความเข้มข้นกรดและอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างในระบบ และ ผลกระทบระยะสั้น ที่แสดงให้เห็นว่าเชื้อจุลินทรีย์จะเริ่มปรับตัวอย่างช้าๆ และความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์รวมของระบบมีสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องดังในรูปที่ 4.19 (ชุดการทดลองที่ 4) กระทั่งเข้าสู่สมดุล โดยอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับการรักษาเสถียรภาพของระบบในหัวข้อ การรักษาเสถียรภาพของระบบ ในช่วงเปลี่ยนถ่ายสภาวะการเดินระบบ

การรักษาเสถียรภาพของระบบบำบัดไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำ

ดังอธิบายในหัวข้อผลกระทบระยะยาวของระบบถึง ความสามารถในการบำบัด ของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 ชุดการทดลอง จะยังไม่อาจสรุปได้ว่าค่าระยะเวลาที่เก็บน้ำและอัตราภาระสารอินทรีย์นั้นไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ เนื่องจากค่าที่ใช้ในการอธิบายในหัวข้อดังกล่าว นั้นเป็นค่าเฉลี่ยในช่วงระบบสมดุล และค่า ณ จุดเปลี่ยนถ่ายสภาวะการเดินระบบเท่านั้น โดยการรักษาเสถียรภาพของระบบไร้อากาศนั้นสามารถทำได้ด้วยการควบคุมค่าอัตราส่วนระหว่างกรดต่อสภาพต่างให้มีค่าต่ำกว่า 0.4 เพื่อไม่ให้เกิดสภาวะที่กรดอินทรีย์สะสมอยู่ในถังปฏิกรณ์มากเกินไปจนส่งผลให้ค่าพีเอชลดต่ำลง จนถึงจุดที่จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถนำกรดเหล่านั้นมาใช้ในขั้นตอนเมทาโนเจเนซิสได้ ซึ่งการป้องกันไม่ให้เกิดสภาวะดังกล่าวสามารถทำได้ด้วยการเติมด่างเข้าไปในระบบ (Alkalinity) ทั้งนี้ตลอดระยะเวลาการเดินระบบผู้วิจัยได้ปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นด่างที่เติมให้เหมาะสมกับค่าความเข้มข้นสารอินทรีย์และอัตราภาระสารอินทรีย์ที่ระบบได้รับ พบว่าค่าพีเอชของทั้ง 4 ชุดการทดลองมีค่าอยู่ในช่วงค่าที่แนะนำสำหรับการเดินระบบไร้อากาศ (6.8-8.2) ดังรูปที่ 4.11 นอกจากนั้นหากเปรียบเทียบที่สภาวะการเดินระบบที่แตกต่างกันของชุดการทดลองที่ 4 จะพบว่าค่าพีเอชเฉลี่ยของระบบในช่วงสมดุลมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาที่เก็บน้ำลดลงเท่ากับ 8.17, 7.68, 7.61 และ 7.39 และที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 4.4, 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. โดยควบคุมอัตราภาระสารอินทรีย์ของชุดการทดลองที่ 4 ให้เท่ากับ 40 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ ซึ่งผลของระยะเวลาที่เก็บน้ำที่เปลี่ยนไปต่อค่าพีเอชนั้นไม่ได้ส่งผลเพียงต่อชุดการทดลองที่ 4 เท่านั้น ในชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ค่าพีเอชเฉลี่ยที่จุดสมดุลมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 4.4

ชม. ค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.92 และ 8.18 ตามลำดับ ลดลงเหลือ 7.66 และ 7.45 ที่ระยะเวลาเก็บเก็บน้ำ 1.1 ชม. เช่นเดียวกับชุดการทดลองที่ 4 ถึงกระนั้นในชุดการทดลองที่ 1 ค่าพีเอชเฉลี่ยมีค่าค่อนข้างคงที่ (รูปที่ 4.11) อาจเนื่องมาจากชุดการทดลองที่ 1 นั้นได้รับค่าอัตราการระเหยอินทรีย์ต่ำที่สุด โดยหากเปรียบเทียบที่ระยะเวลาเก็บน้ำเท่ากันชุดการทดลองที่ 1 มักมีค่าพีเอชเฉลี่ยที่สูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ เช่นที่ระยะเวลาเก็บน้ำ 1.6 ชม. ชุดการทดลองนี้มีค่าพีเอชเฉลี่ยที่จุดสมดุลเท่ากับ 7.80 ในขณะที่ชุดการทดลองที่ 4 มีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.61 และที่ระยะเวลาเก็บน้ำ 1.1 ชม. ชุดการทดลองที่ 1 มีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.76 และชุดการทดลองที่ 3 และ 4 มีค่าเท่ากับ 7.45 และ 7.39 ตามลำดับ ซึ่งอาจสรุปได้ว่าค่าระยะเวลาเก็บน้ำที่ลดลงนั้นส่งผลต่อค่าพีเอชของชุดการทดลอง และค่าอัตราการระเหยอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าพีเอชที่ลดลงแม้จะมีการรักษาอัตราส่วนของกรดต่อสภาพต่างให้มีค่าต่ำกว่า 0.4 อย่างไรก็ตามแม้จะรักษาอัตราส่วนตลอดการทดลองให้อยู่ในช่วงที่แนะนำ แต่ในช่วงการเปลี่ยนถ่ายสถานะการเดินระบบค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและอาจส่งผลให้ระบบล้มเหลวได้

ซึ่งหากพิจารณารวมกับหัวข้อ ปริมาณความเข้มข้นกรดและอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่าง นั้นจะสามารถสรุปได้ว่า ค่าระยะเวลาเก็บน้ำที่ต่ำลงส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบโดยภาพรวมเนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถย่อยสลายกรดจากจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนได้อัตราที่สมดุล นำมาซึ่งความเข้มข้นกรดสะสมในระบบและค่าพีเอชที่ลดต่ำลง อย่างไรก็ตามหากมีการเพิ่มความเข้มข้นต่างที่เพียงพอจะสามารถรักษาสภาพที่เหมาะสม จะสามารถรักษาสมดุลพีเอชในระบบและจุลินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดจะทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพดังรูปที่ 4.18 ที่แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบที่สูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างกลับเข้าสู่ภาวะสมดุล

กลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในระบบ

เมื่อถึงปฏิกรณ์เข้าสู่สมดุลภายใต้เงื่อนไขของการเดินระบบแต่ละสถานะเรียบร้อยแล้วทำการเก็บตัวอย่างหัวเชื้อจากถังปฏิกรณ์เพื่อตรวจสอบกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค Illumina Miseq โดยใช้ไพรเมอร์มาตรฐานที่ใช้ในการตรวจสอบจุลินทรีย์กลุ่มอาศัยและแบคทีเรีย (ITS-1F และ ITS-2R) มีลำดับเบสดังนี้

Forward Primer :

TCGTCGGCAGCGTCAGATGTGTATAAGAGACAGCCTACGGGNGGCWGCAG

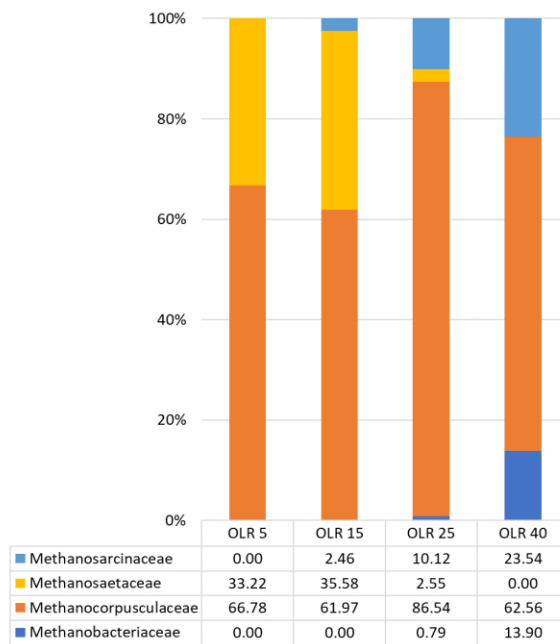
Reverse Primer :

GTCTCGTGGGCTCGGAGATGTGTATAAGAGACAGGACTACHVGGGTATCTAATCC

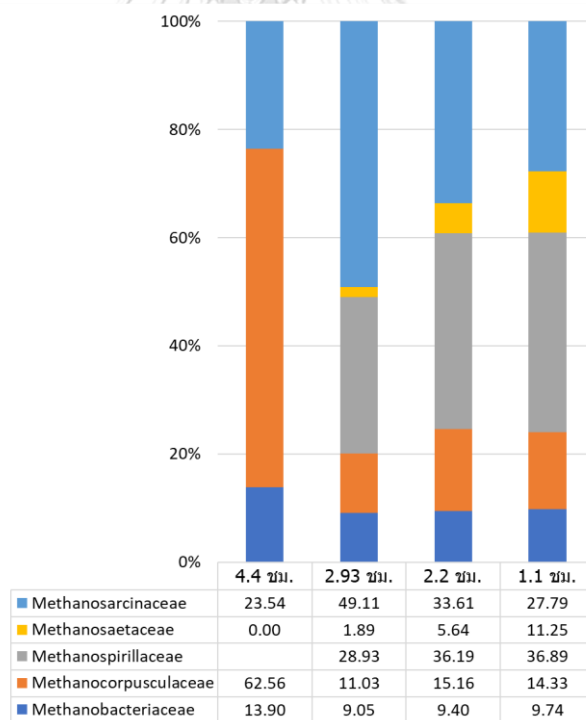
ทั้งนี้ได้เลือกเก็บตัวอย่างหัวเชื้อจากแต่ละชุดการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลของการแปรค่าอัตราภาระสารอินทรีย์เข้าระบบ ณ สภาวะความเข้มข้นสารอินทรีย์สูงสุด โดยเลือกเก็บในช่วงที่ทำการทดลอง แปรค่าอัตราภาระสารอินทรีย์ ภายใต้สภาวะการเดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 5, 15, 25 และ 40 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ของชุดการทดลองที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ และระยะเวลาเก็บน้ำ 4.4 ชม.

ผลจากการตรวจสอบประชากรจุลินทรีย์ หากพิจารณาถึงประชากรของกลุ่มสร้างมีเทน (Methanogens) ซึ่งเป็นกลุ่มสำคัญสำหรับการเดินระบบบำบัดแบบไร้อากาศ พบว่าเมทาโนเจนกลุ่มใช้อะซิติก (Acetoclastic Methanogens) ที่แบ่งออกเป็น Methanosarcina และ Methanosaeta มีปริมาณร้อยละเปลี่ยนแปลงไปตามค่าอัตราภาระสารอินทรีย์ที่ปรับใช้กับระบบดังรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าในช่วงอัตราภาระสารอินทรีย์ต่ำจะพบเชื้อจุลินทรีย์กลุ่ม Methanosaeta มากกว่ากลุ่ม Methanosarcina และในทางตรงข้ามเมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์สูงขึ้นจากอัตราภาระสารอินทรีย์ 15 เป็น 25 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน กลุ่ม Methanosarcina จะมีร้อยละของประชากรเพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 2.5 เป็นร้อยละ 10.1 ขณะที่กลุ่ม Methanosaeta กลับลดลงจากร้อยละ 35.6 เหลือเพียงร้อยละ 2.5 โดยแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงนี้จะชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์จาก 25 เป็น 40 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน นั่นคือตรวจไม่พบกลุ่ม Methanosaeta ในขณะที่กลุ่ม Methanosarcina เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10.1 เป็นร้อยละ 23.5 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณกรดอินทรีย์ที่เพิ่มสูงขึ้นจาก 112.5 มก./ล. เป็น 687.5 มก./ล. ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 25 และ 40 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ (Ziganshin และคณะ, 2016) พบว่าผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยอธิบายว่าเมื่อความเข้มข้นกรดอินทรีย์สูงขึ้น จะส่งผลต่อกลุ่มประชากรของ Methanosarcina และ Methanosaeta โดยความเข้มข้นกรดอะซิติกสำหรับการ

เจริญเติบโตของ Methanosarcina จะอยู่ที่มากกว่า 1 มล.โมล/ล. ในขณะที่ Methanosaeta จะอยู่ในช่วง 5-20 ไมโครโมล/ล. (Smith และ Ingram-Smith, 2007) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงเมทาโนเจนกลุ่มสร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน (Hydrogenotrophic methanogens) พบว่าเมทาโนเจนเหล่านี้เป็นประชากรหลักของกลุ่มสร้างมีเทน โดยตรวจพบทั้งสิ้น 2 กลุ่มหลักคือ Methanobacterium และ Methanocorpusculum มากกว่าร้อยละ 60 ที่อัตราการสสารอินทรีย์ 5, 15, 25 และ 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4 ชม. อาจกล่าวได้ว่าการที่เชื้อเมทาโนเจนกลุ่มนี้เป็นกลุ่มหลักภายในระบบเนื่องมาจากภายในระบบเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน โดยเชื้อทั้ง 2 กลุ่มนี้จะเปลี่ยนสารดังกล่าวให้กลายเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งสอดคล้องกับร้อยละของก๊าซมีเทนที่ตรวจพบมากถึง 82.72 และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12.04 อย่างไรก็ตามเมื่อทำการตรวจสอบกลุ่มจุลินทรีย์ในชุดการทดลองที่ 4 (อัตราการสสารอินทรีย์ 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) เมื่อทำการแปรค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำ พบว่า Methanosarcina มีปริมาณลดลงเมื่อระยะเวลาพักเก็บน้ำสั้นลง ขณะที่ Methanosaeta มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นจากที่ตรวจไม่พบที่ ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4 ชม. เป็นร้อยละ 1.89, 5.64 และ 11.25 ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.21 ทั้งนี้ผลการทดลองสอดคล้องไปในทางเดียวกับ (Ziganshin และคณะ, 2016) ที่ตรวจพบว่ากลุ่ม Methanosaeta สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกว่ากลุ่ม Methanosarcina ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำต่ำ อย่างไรก็ตามในการทดลองของ (Jiang และคณะ, 2020) กลับได้ผลที่ตรงกันข้าม เมื่อลดระยะเวลาพักเก็บน้ำลงกลุ่ม Methanosaeta กลับมีปริมาณลดลง โดยได้อธิบายไว้ว่าเกิดขึ้นจากปริมาณกรดที่สะสมในระบบมีความเข้มข้นลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่อ้างอิงไว้ก่อนหน้านี้ถึงอิทธิพลของความเข้มข้นกรดอินทรีย์ต่อการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากรเมทาโนเจนในระบบ ในสถานะที่มีความเข้มข้นกรดอินทรีย์ต่ำจะเหมาะสมกับกลุ่ม Methanosaeta ขณะที่กลุ่ม Methanosarcina เหมาะสมกับสถานะที่มีความเข้มข้นกรดสูง ผลการทดลองจากงานวิจัยนี้ก็เช่นกัน ในชุดการทดลองที่ 4 ตรวจพบกลุ่ม Methanosaeta เพิ่มมากขึ้นเมื่อลดระยะเวลาพักเก็บน้ำลง และมีค่าปริมาณความเข้มข้นกรดที่สะสมในระบบลดลงจาก 687.5 มก./ล. เหลือ 293.75 มก./ล.



รูปที่ 4.20 ร้อยละเมทาโนเจนแต่ละชนิดที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4 ชม.



รูปที่ 4.21 ร้อยละเมทาโนเจนแต่ละชนิดของชุดการทดลองที่ 4 เมื่อแปรระยะเวลาพักเก็บน้ำ

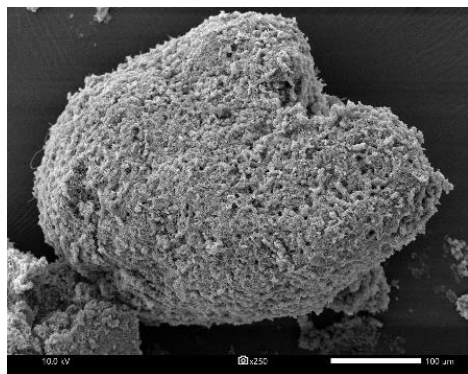
การเปลี่ยนแปลงของตัวกลางพีวีเอเจลในการทดลอง

เนื่องจากการปรับลดขนาดตัวกลางพีวีเอเจลต้นแบบด้วยวิธีการปั่นเปียก ส่งผลให้ลักษณะรูปร่างภายนอกของตัวกลางเปลี่ยนไปจากทรงกลมรีเป็นรูปร่างที่ไม่แน่นอน ดังอธิบายไว้ในหัวข้อ การทดลองก่อนเริ่มต้นระบบ ทำให้จำเป็นต้องศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะของตัวกลางพีวีเอเจลภายหลังสิ้นสุดการเดินระบบในถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด โดยจะตรวจสอบลักษณะพื้นผิวตัวกลางและการเกาะติดของเชื้อจุลินทรีย์บนพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) ที่การทดลองแปรค่าอัตราการระเหยอินทรีย์ในชุดการทดลองที่ 1 และ 4 เนื่องจากมีความแตกต่างของความเข้มข้นสารอินทรีย์สูงสุด

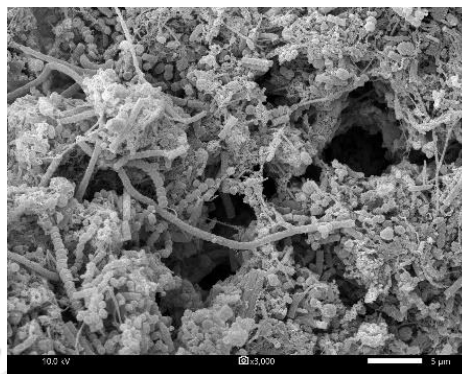
รูปที่ 4.22 (ก.) และ 4.23 (ก.) แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเกาะติดของเชื้อจุลินทรีย์บนตัวกลางพีวีเอเจล จากชุดการทดลองที่ 1 และ 4 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ทั้งนี้ตัวกลางจากชุดการทดลองที่ 1 พบลักษณะของชั้นฟิล์มชีวภาพบนตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าตัวกลางจากชุดการทดลองที่ 4 ซึ่งส่งผลให้รูปลักษณ์ภายนอกของตัวกลางจากชุดการทดลองที่ 1 ยังคงมีลักษณะที่ไม่แน่นอน และสามารถมองเห็นโครงสร้างภายในของตัวกลางอยู่ ส่วนตัวกลางจากชุดการทดลองที่ 4 มีลักษณะโครงสร้างภายนอกที่มีลักษณะกลม และปกคลุมพื้นผิวด้วยชั้นฟิล์มชีวภาพอย่างทั่วถึง อันเนื่องมาจากปริมาณสารอาหารในชุดการทดลองนี้มีปริมาณและความเข้มข้นสารอินทรีย์สูงกว่า ส่งผลให้มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์หนาแน่นมากกว่า

และหากพิจารณาเพิ่มเติมถึงชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ที่เกาะและเจริญเติบโตอยู่บนพื้นผิวของตัวกลางพีวีเอเจลด้วยเทคนิค 16sRNA miseq พบว่าชุดการทดลองที่ 4 ที่มีอัตราการระเหยอินทรีย์สูงกว่านั้น มีกลุ่มประชากรหลักในระบบเป็นจุลินทรีย์ชนิด *Veillonellaceae* มากถึง ร้อยละ 42.4 ทั้งนี้จุลินทรีย์ดังกล่าวเป็นกลุ่มสร้างกรดที่มีรูปทรงกลม ในขณะที่เดียวกันชุดการทดลองที่ 1 ตรวจพบประชากรจุลินทรีย์กลุ่มดังกล่าวอยู่เพียงร้อยละ 1.9 หากแต่มีกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ไร้อากาศชนิดอื่นๆ หลากหลายชนิด เช่น *Flavobacteriaceae*, *Lentimicrobiaceae* และ *Ruminococcaceae* ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะฟิล์มชีวภาพของชุดการทดลองที่ 1 ที่ประกอบด้วยเชื้อจุลินทรีย์หลากหลายรูปร่าง (ผลการวิเคราะห์ชนิดของจุลินทรีย์แสดงในภาคผนวก ง.) มากกว่าชุดการทดลองที่ 4 และ

สามารถสรุปได้ว่าปริมาณสารอาหารที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อลักษณะประชากรจุลินทรีย์ในระบบ รวมไปถึงความหนาแน่นของชั้นฟิล์มชีวภาพ และรูปร่างของตัวกลาง 4.22 และ 4.23

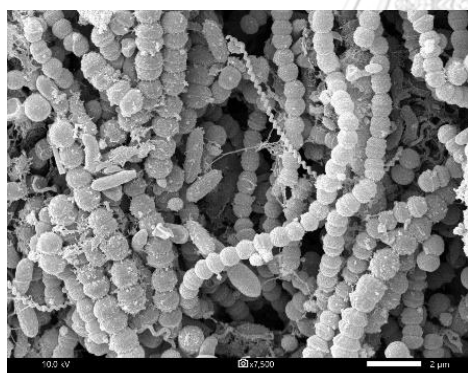


(ก.) กำลังขยาย 250 เท่า

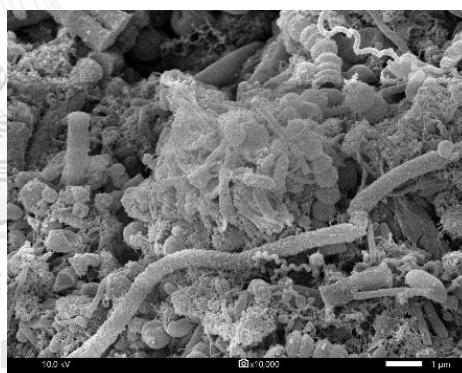


(ข.) กำลังขยาย 3,000 เท่า

การตรวจสอบตัวกลางพีวีเอเจลของชุดการทดลองที่ 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

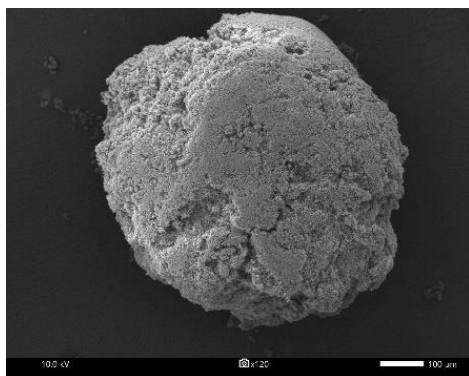


(ค.) กำลังขยาย 7,500 เท่า

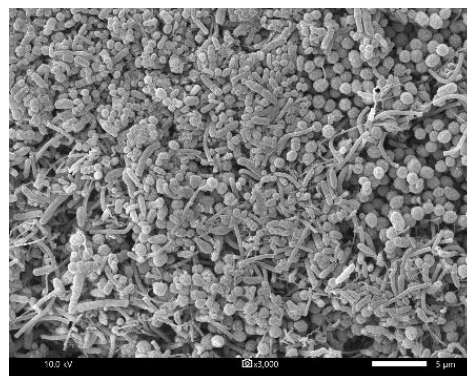


(ง.) กำลังขยาย 10,000 เท่า

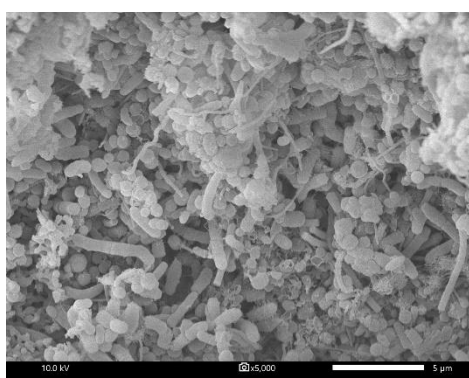
รูปที่ 4.22 การตรวจสอบตัวกลางพีวีเอเจลของชุดการทดลองที่ 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน



(ก.) กำลังขยาย 120 เท่า



(ข.) กำลังขยาย 3,000 เท่า



(ค.) กำลังขยาย 5,000 เท่า



(ง.) กำลังขยาย 14,000 เท่า

รูปที่ 4.23 การตรวจสอบตัวกลางพีวีเอเจลของชุดการทดลองที่ 4 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ภาพรวมสภาวะการทำงานของถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบไร้อากาศในงานวิจัยนี้

จากการอภิปรายผลการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมด สามารถสรุปประสิทธิภาพของการเดินระบบบำบัดไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลางได้ว่า ชุดการทดลองทั้ง 4 นั้นมีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์อยู่ในเกณฑ์ที่ดี (บำบัดได้มากกว่าร้อยละ 80) ภายใต้สภาวะการเดินระบบที่ปรับใช้ในการทดลองที่อัตราการสารอินทรีย์ 5, 15, 25 และ 40 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4, 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. โดยตลอดการทดลองจะเลือกพิจารณาค่าอัตราส่วนความเข้มข้นกรดต่อสภาพต่างและค่าพีเอชเพื่อใช้ในการบ่งบอกถึงสภาพการทำงานและความเป็นไปในระบบ หากค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของกรดต่อสภาพต่างสูงกว่า 0.4 และพีเอชไม่อยู่ในช่วง 6.8-8.2 ซึ่งถือเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน จะถือว่าเป็น

ระบบนั้นไม่สามารถรักษาเสถียรภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 2 กลุ่มหลักได้ ทั้งนี้ในการทดลองได้มีการปรับใช้ค่าสภาพต่างเพื่อให้เหมาะสมกับความเข้มข้นกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้น ในส่วนนี้ถ้าหากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ไม่สามารถรักษาเสถียรภาพได้ ค่าอัตราส่วนของกรดต่อสภาพต่างจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์จะลดลง และค่าพีเอชจะลดลงจนต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสม

โดยตลอดระยะเวลาการเดินระบบในการทดลอง เมื่อพิจารณาในช่วงสมดุลจะพบว่า ถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบไร้อากาศทั้ง 4 ชุดการทดลองสามารถรักษาเสถียรภาพของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศได้ดี ค่าอัตราส่วนของกรดต่อสภาพต่างต่ำกว่า 0.4 และพีเอชอยู่ในช่วงควบคุมตลอดการทดลอง (6.8-8.2) มีความสามารถในการแปลงสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 0.55 ± 0.10 ล.ก๊าซชีวภาพ/ก.ซีโอดีบำบัด ซึ่งแตกต่าง จากค่าทางทฤษฎีที่เท่ากับ 0.66 ล.ก๊าซชีวภาพ/ก.ซีโอดีบำบัด เพียงเล็กน้อย ดังอธิบายในหัวข้อ *ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ* รวมไปถึงการเลือกใช้ตัวกลางพีวีเอเจลในการทดลองเนื่องจากตัวกลางดังกล่าวมีลักษณะเบาทำให้เมื่อคำนวณผ่านสมการความดันลดจะสามารถตัดส่วนการเวียนน้ำของระบบฟลูอิดไดซ์เบดออกได้ ซึ่งถือเป็นข้อได้เปรียบของงานวิจัยฉบับนี้เนื่องจากการตัดการเวียนน้ำของระบบจะสามารถลดภาระการใช้กำลังไฟฟ้าของระบบได้ โดยตัวกลางพีวีเอเจลที่ใช้ในการทดลองนั้นสามารถใช้เป็นตัวกลางสำหรับการเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบดได้ดีทั้งสภาวะอัตราภาระสารอินทรีย์ที่สูงและต่ำ (5 และ 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน) เชื้อจุลินทรีย์ยังคงเกาะอยู่บนตัวกลาง และตัวระบบมีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์มากกว่าร้อยละ 80 ทุกสภาวะที่ปรับใช้ในการทดลอง นอกจากนี้ยังตรวจพบจุลินทรีย์หลากหลายชนิดบนตัวกลาง แสดงให้เห็นว่าตัวกลางพีวีเอเจลสามารถใช้เป็นวัสดุยึดเกาะและแหล่งที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศได้ดี โดยเฉพาะกลุ่มสร้างมีเทนที่เปลี่ยนประชากรหลักไปตามอัตราภาระสารอินทรีย์และระยะเวลาที่เก็บน้ำที่เปลี่ยนไป ดังอธิบายในหัวข้อ *กลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในระบบ* ทั้งนี้เมื่อนำค่าความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์จากการทดลองทั้งหมดมาคำนวณค่าจลนพลศาสตร์ พบว่าที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 4.4 และ 2.93 ชม. ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์นั้นมีรูปแบบปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ที่มีค่าคงที่ปฏิกิริยาเท่ากับ 41.72 วัน^{-1} ($R^2 = 0.70$) และที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 2.2 และ 1.1 ชม. มีลักษณะเป็นปฏิกิริยา

จลนพลศาสตร์แบบโมนอท (Monod's kinetic) ได้ความเข้มข้นครึ่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.09 ก./ล. และ อัตราการบำบัดสูงสุด 42.11 ก./ล.-วัน

สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมและการประยุกต์ใช้

เพื่อพิจารณาถึงสภาวะการเดินระบบสำหรับถังปฏิกรณ์ไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลาง จะทำการตัดสินจากปัจจัยหลัก 2 ประการ คือ ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ และการรักษาเสถียรภาพของระบบ เมื่อพิจารณาที่ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในแง่การทำงานเชิงวิศวกรรม ระบบบำบัดแบบไร้อากาศมีหน้าที่เป็นถังบำบัดขั้นต้นที่ช่วยลดความเข้มข้นสารอินทรีย์ในน้ำเสียในระยะเวลาที่เก็บน้ำค่าหนึ่ง จากนั้นน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์ลดลงจะถูกบำบัดด้วยระบบแบบเติมอากาศอีกครั้ง เพื่อให้ความเข้มข้นของมลพิษต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง และสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในการทดลองมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์มากกว่าร้อยละ 80 ที่อัตราการระสาดสารอินทรีย์ 5, 15, 25 และ 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ภายใต้ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 4.4, 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. ซึ่งเป็นที่น่าพึงพอใจเพราะตัวระบบสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้มากภายใต้ระยะเวลาที่เก็บน้ำในช่วงต่ำ (ระบบไร้อากาศโดยทั่วไปมักใช้ 6-8 ชม.) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยเรื่องการรักษาเสถียรภาพของระบบ ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ *การรักษาเสถียรภาพของระบบ* สามารถพิจารณาเสถียรภาพของถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดนี้ได้จากค่าพีเอชและอัตราส่วนกรดต่อสภาพต่างภายในระบบ โดยควรควบคุมให้มีค่าอยู่ในช่วง 6.8-8.2 และต่ำกว่า 0.4 ตามลำดับ ในระหว่างเข้าสู่สภาวะสมดุลทั้ง 2 ค่าดังกล่าวจะอยู่ในช่วงค่าที่กำหนด แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราการระสาดสารอินทรีย์และระยะเวลาที่เก็บน้ำที่ปรับใช้ในการทดลองนั้นสามารถใช้ในการเดินระบบบำบัดไร้อากาศแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลางได้ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาถึงค่าพีเอชอันบ่งบอกถึงสภาพกรดและต่างภายในถังปฏิกรณ์ ที่อัตราการระสาดสารอินทรีย์ 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีค่าพีเอชลดต่ำลง ดังอธิบายในหัวข้อ *พีเอช* จนเหลือ 7.39 ที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 1.1 ชม. แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาที่เก็บน้ำที่ปรับใช้นั้นไม่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนที่จะย่อยสลายกรดที่เกิดจากกลุ่มสร้างกรด

โดยรวมสามารถสรุปได้ว่าระบบไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์แบบไม่เวียนน้ำที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลางนั้นสามารถเดินระบบที่อัตราการระเหยอินทรีย์สูงสุด 40 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน และระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ 4.4 ถึง 1.1 ชม. อย่างไรก็ตามหากจะทำการเดินระบบที่ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ 1.1 ชม. นั้นควรพึงระวังถึงปริมาณกรดอินทรีย์ส่วนเกินที่อาจทำให้ระบบล้นเหลวได้ นอกจากนี้ค่าจลนพลศาสตร์ที่คำนวณได้เป็นค่าที่มาจากการใช้กลูโคสซึ่งเป็นสารอาหารที่มีคุณสมบัติย่อยง่าย ค่าที่ได้จะดีกว่าน้ำเสียชนิดอื่นๆ ที่มีองค์ประกอบย่อยยากทั้งปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและโมนอท ผู้ทำวิจัยจึงแนะนำให้พิจารณาค่าดังกล่าวร่วมกับค่าที่ได้จากการใช้น้ำเสียรูปแบบอื่นๆ ภายใต้สภาวะการเดินระบบที่ใกล้เคียงกัน เพื่อเป็นตัวเลือกสำหรับการพิจารณาเลือกใช้ระบบชนิดนี้รวมถึงหากต้องการนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยที่ใกล้เคียง งานวิจัยฉบับนี้ได้ชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ภายใต้อัตราการระเหยอินทรีย์สูงโดยใช้ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำต่ำ หากต้องการชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดในการเดินระบบ ผู้ทำวิจัยแนะนำให้ทดลองเดินระบบที่ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำต่ำกว่า 1.1 ชม. และอัตราการระเหยอินทรีย์มากกว่า 40 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน เพื่อให้เห็นถึงข้อจำกัดทางด้านเวลาในการเกิดปฏิกิริยาและรูปแบบของปฏิกิริยาหรือค่าจลนพลศาสตร์ที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้หากต้องการนำค่าจลนพลศาสตร์ไปใช้ในการออกแบบควรพิจารณาเพิ่มเติมถึงรูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่จะนำไปใช้อาติ ถึงกวนผสมรูปทรง ถึงไหลต่อเนื่อง หรือถึงกวนผสมรูปทรงแบบอนุกรม เป็นต้น เนื่องจากมีรูปแบบของสมการสมดุลมวล (4.1) ที่ใช้ในการออกแบบที่แตกต่างกัน และสมการดังกล่าวจำเป็นต้องมีการทดสอบลักษณะการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์เพื่อหารูปแบบ โดยผู้วิจัยได้แสดงการนำผลการทดลองลักษณะการไหลของน้ำที่ได้ถึงกวนผสมอนุกรม 1.6 ถึง กับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังสมการที่ 4.3 และตัวอย่างปฏิกิริยาโมนอทในรูปแบบถึงกวนผสมที่นิยมใช้ในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมดังสมการที่ 4.4 ตามลำดับ

$$Accumulation = Input - Output \pm rate \quad (4.1)$$

$$C_A^{1.6} \cdot (1 + 41.72\tau) = C_{A0}^{1.6} \quad (4.2)$$

$$\frac{0.09C_A}{42.11+C_A} = \frac{Q}{V} \cdot (C_{A0} - C_A) \quad (4.3)$$

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้ทำการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลางจำนวน 4 ชุดการทดลอง โดยแปรค่าสภาวะในการเดินระบบแตกต่างกัน กำหนดค่าอัตราการระเหยสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบเท่ากับ 5, 15, 25 และ 40 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน และเดินระบบภายใต้ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 4.4, 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. ตามลำดับ นอกเหนือจากนั้นได้ทำการศึกษาลักษณะตัวกลาง และทดสอบลักษณะการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าคงที่ทางคณิตศาสตร์ในโมเดลต่างๆ โดยแบ่งหัวข้อในการสรุปผลการทดลองดังนี้

การทดสอบตัวกลาง

ตัวกลางพีวีเอเจลที่ผ่านการปรับลดขนาดเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศฟลูอิดไดซ์เบดระดับห้องปฏิบัติการมีคุณสมบัติต่างๆ ไม่แตกต่างไปจากตัวกลางพีวีเอเจลต้นแบบ ทั้งค่าการทนต่อความร้อน ค่าความถ่วงจำเพาะ และลักษณะโครงสร้างภายในของตัวกลาง

การทดสอบลักษณะการไหลของน้ำ

ทำการทดสอบการไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำ โดยเทียบกับโมเดลทางคณิตศาสตร์ 2 โมเดล เลือกใช้ระยะเวลาที่เก็บน้ำเท่ากับ 1.1, 1.6 และ 4.4 ชม. พบว่าโมเดลถึงกวนสมบูรณ์ต่ออนุกรม ชุดการทดลองนี้มีลักษณะการไหลภายในเป็นถึงกวนสมบูรณ์ต่ออนุกรมกันเฉลี่ย 1.8 ถึง และมีปริมาตรถังไหลต่อเนื่องร้อยละ 16.1 ถึงกวนสมบูรณ์ร้อยละ 66.6 และพื้นที่อับร้อยละ 17.3

ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ

ชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตราการระเหยสารอินทรีย์ 5 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน มีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์คิดเป็นร้อยละ 95.07, 83.23, 86.31 และ 88.52 ที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำ 4.4, 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. ตามลำดับ

ชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 15 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์คิดเป็นร้อยละ 87.24, 87.40, 95.21 และ 95.40 ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4, 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. ตามลำดับ

ชุดการทดลองที่ 3 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 25 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์คิดเป็นร้อยละ 83.03, 89.00, 95.31 และ 96.31 ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4, 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. ตามลำดับ

ชุดการทดลองที่ 4 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 40 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์คิดเป็นร้อยละ 88.18, 87.07, 86.29 และ 86.15 ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4, 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. ตามลำดับ

ความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลางสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดที่ 93.80 ล./วัน โดยมีอัตราการแปลงสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 0.55 ± 0.10 ล. ก๊าซชีวภาพ/กก.ซีโอดีบำบัด

กลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในระบบ

ตะกอนจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดสามารถตรวจพบจุลินทรีย์กลุ่ม Hydrogenic methanogen ชนิด *Methanocorpuscular* และ *Methanobacterial* ส่วนจุลินทรีย์กลุ่ม Acetoclastic methanogen พบชนิด *Methanosaeta* และ *Methanosarcina* ทั้งนี้ที่อัตราภาระสารอินทรีย์สูงขึ้นส่งผลให้กลุ่ม *Methanosarcinar* มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นและกลุ่ม *Methanosaeta* ลดลงจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นกรดที่สะสมในระบบ แต่เมื่อลดระยะเวลาพักเก็บน้ำสั้นลงกลุ่ม *Methanosaeta* จะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น

ค่าคงที่ทางคณิตศาสตร์

ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 4.4 และ 2.93 ชม. มีรูปแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งที่มีค่าคงที่ปฏิกิริยาเท่ากับ 41.72 วัน^{-1} ที่ R^2 เท่ากับ 0.70 และที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 2.2 และ 1.1 ชม. มีรูปแบบ

ปฏิกิริยาแบบโมนอทมิความเข้มข้นครึ่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.09 ก./ล. และอัตราการบำบัดสูงสุดที่ 42.11 ก./ล.-วัน ที่ R^2 เท่ากับ 0.63

ผลกระทบต่อการเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำในระยะยาว

ถึงปฏิกิริยาฟลูอิดไดซ์เบดทุกชุดการทดลองมีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์เฉลี่ยสูงกว่าร้อยละ 80 ในช่วงสภาวะสมดุล โดยมีระยะเวลาที่เก็บน้ำต่ำที่สุดเท่ากับ 1.1 ชม. และอัตราการสารอินทรีย์สูงสุด 40 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ถือเป็นค่าอัตราการสารอินทรีย์ในช่วงสูงและระยะเวลาที่เก็บน้ำที่ต่ำสำหรับการเดินระบบชีวภาพ ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวมีกรดอินทรีย์สะสมในระบบสูง แสดงให้เห็นถึงอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนที่ไม่สัมพันธ์กับจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด ส่งผลให้พีเอชของระบบมีค่าลดต่ำลง ในขณะที่ค่าระยะเวลาที่เก็บน้ำที่เหลือที่ปรับใช้ในการทดลองนั้นเพียงพอสำหรับจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนที่จะย่อยสลายปริมาณสารคาร์บอนที่เข้าสู่ระบบที่อัตราการสารอินทรีย์แตกต่างกัน โดยหากเกิดสภาวะที่ปฏิกิริยาของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดไม่สัมพันธ์กับกลุ่มสร้างมีเทน สามารถป้องกันได้ด้วยการเติมบัฟเฟอร์ไบคาร์บอเนตในปริมาณที่เพียงพอจะสามารถรักษาค่าพีเอชและคงเสถียรภาพของระบบให้อยู่ในสภาวะสมดุลได้

ผลกระทบต่อการเดินระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำในระยะสั้น

ค่าความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ของถึงปฏิกิริยาฟลูอิดไดซ์เบดทุกชุดการทดลองลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยลดลงเหลือเพียงร้อยละ 11.91 จากช่วงสภาวะสมดุล และมีปริมาณกรดอินทรีย์สะสมในระบบเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เชื้อจุลินทรีย์บางส่วนหลุดออกจากระบบ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการเดินระบบอย่างเฉียบพลัน (Shock load) ซึ่งในสภาพดังกล่าวหากสามารถรักษาความเสถียรภาพของระบบผ่านการควบคุมค่าพีเอชและอัตราส่วนกรดต่อสภาพ่างให้ดี จุลินทรีย์จะค่อยๆ ปรับตัวและคงความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบสูงขึ้น เชื้อจุลินทรีย์จะหลุดออกจากระบบน้อยลงและเข้าสู่สภาวะสมดุล

สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมและการนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้

สภาวะการเดินระบบที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ อัตราการสารอินทรีย์ 5, 15, 25 และ 40 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน และระยะเวลาที่เก็บน้ำ 4.4, 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. โดยทุกสภาวะสามารถใช้ใน

การเดินระบบไร้อากาศชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่เวียนน้ำที่ใช้พีวีเอเจลเป็นตัวกลางได้ดี มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์มากกว่าร้อยละ 80 ทั้งนี้หากต้องการนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้ควบคู่กับจลนพลศาสตร์และรูปแบบการไหลของน้ำถังปฏิกรณ์เพื่อเขียนสมการของในการออกแบบ จะสามารถลดขนาดของปริมาตรของถังปฏิกรณ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ เพราะในสภาวะการเดินระบบขนาดใหญ่ การเพิ่มระยะเวลาพักเก็บน้ำหมายถึงความต้องการปริมาตรที่รองรับน้ำเสียที่เพิ่มมากขึ้น รวมถึงหากเป็นระบบชนิดเบดเคลื่อนที่ที่สามารถหาค่าความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ และรูปแบบของถังปฏิกรณ์ได้ จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับผลการทดลองส่วนค่าจลนพลศาสตร์ได้ ทั้งนี้ในการเดินระบบที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 1.1 ชม. นั้นควรพึงระวังถึงปริมาณกรดส่วนเกินที่จะทำให้ค่าพีเอชตกลงและระบบล้มเหลวได้

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

- ควรศึกษาและทำการทดลองเพิ่มเติมด้วยน้ำเสียหลากหลายประเภทเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบบำบัดฟลูอิดไดซ์เบดเมื่อแปรเปลี่ยนชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำ
- ควรทดลองเปลี่ยนชนิดของตัวกลางที่ใช้กับระบบ โดยเจาะจงเป็นตัวกลางที่มีความสามารถในการทนความร้อนได้มากกว่า 550 °C เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชื้อจุลินทรีย์ในระบบได้อย่างแม่นยำ
- ควรทดลองเพิ่มช่วงอัตราการสสารอินทรีย์ที่สูงขึ้น หรือลดระยะเวลาพักเก็บน้ำลง เพื่อแสดงให้เห็นถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เปลี่ยนไป และนำค่าดังกล่าวมาใช้ในการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของอัตราการบำบัดสารอินทรีย์เทียบกับความเข้มข้นสารอินทรีย์ เพื่อหาปริมาตรที่เหมาะสมของถังปฏิกรณ์สำหรับการออกแบบในระดับอุตสาหกรรม ทั้งรูปแบบถังกวนสมบูรณ์และถังไหลต่อเนื่อง
- ควรทำการวิเคราะห์กลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดทุกสภาวะการเดินระบบ เพื่อให้ได้สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมมากที่สุด

ภาคผนวก ก.

รายการคำนวณและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

การคำนวณความเร็วขึ้นต่ำสำหรับสภาวะฟลูอิดไดเซชัน

$$\frac{\rho \bar{V}_{0M}^2}{\varphi_s D_p \varepsilon_M^3} \left(\frac{150 \mu (1 - \varepsilon_M)}{\varphi_s \bar{V}_{0M} \rho D_p} + 1.75 \right) = g(\rho_p - \rho)$$

เมื่อ; \bar{V}_{0M} = ความเร็วต่ำสุดในการเกิดสภาวะฟลูอิดไดเซชัน (ชม./วินาที)

μ = 0.008 ก./ชม.³

φ_s = 1

D_p = 0.05 ชม.

ε_M = 0.4

ρ_p = 1.025 ก./ลบ.ชม.

ρ = 1 ก./ลบ.ชม.

ได้ $\bar{V}_{0M} = 0.196$ ม./ชม.

ความเร็วไหลขึ้นของชุดการทดลอง

$$V = \frac{h}{\tau}$$

เมื่อ τ = ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (ชม.)

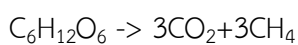
h = ความสูงถังปฏิกรณ์ (ชม.)

V = ความเร็วไหลขึ้น

เมื่อแทนค่า τ เท่ากับ 4.4, 2.93, 2.2 และ 1.1 ชม. และความสูงถังปฏิกรณ์เท่ากับ 200 ชม. จะได้

V เท่ากับ 0.45, 0.68, 0.91 และ 1.82 ม./ชม. ตามลำดับ

การคำนวณปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทางทฤษฎี



จากสมการข้างต้น 1 โมล ของน้ำตาลกลูโคส	=	1	โมล
เปลี่ยนเป็นมีเทนได้	=	3	โมล
เมื่อเปรียบมวลโมลของคาร์บอนเท่ากับ	=	12	ก./โมล
ไฮโดรเจนเท่ากับ	=	1	ก./โมล
ออกซิเจนเท่ากับ	=	16	ก./โมล
น้ำตาลกลูโคสมีมวลเท่ากับ	=	196	ก./โมล
มีเทนมีเทนมีมวลเท่ากับ	=	48	ก./โมล
จะได้ว่าอัตราส่วนระหว่างกลูโคส	=	1	ก.
สามารถเปลี่ยนเป็นมีเทน	=	0.25	ก.
โดยมีเทน 16 ก. มีค่าเท่ากับ	=	22.4	ล.อุณหภูมิมาตรฐาน
มีเทน 1 ก. เท่ากับ	=	1.4	ล.
และมีเทน 0.25 ก. เท่ากับ	=	0.35	ล.

ภาคผนวก ข.

วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ความเข้มข้นซีโอติด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด

สารเคมี

1. สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 0.1 N
 - a. อบแห้งโพแทสเซียมไดโครเมตในโถดูดความชื้น
 - b. ละลายโพแทสเซียมไดโครเมตที่แห้งแล้ว 4.913 ก. ในน้ำกลั่น 500 มล.
 - c. เมื่อละลายจนหมดเติมเมอร์คิวรีซัลเฟต 33.3 ก. และจนหมดเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 167 มล.
 - d. ทิ้งให้เย็นจากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1 ล.
2. กรดซัลฟูริกเข้มข้น
 - a. ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต 22.2 ก. ในกรดซัลฟูริก 2.5 ล.
 - b. ตั้งทิ้งให้ซิลเวอร์ซัลเฟตละลายด้วยตนเองประมาณ 2-3 วัน
3. เฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์
 - a. ละลายฟีนอล์ฟทาลีน (1,10 Phenolphthalein monohydrate) 1.485 ก. ในน้ำกลั่น 50 มล.
 - b. เมื่อละลายจนหมดเติม เหล็กซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 0.695 ก. คนจนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
 - c. เมื่อละลายจนหมดปรับปริมาตรเป็น 100 มล.
4. สารละลายมาตรฐาน FAS 0.05 N
 - a. ละลาย $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 19.6 ก. ในน้ำกลั่น 500 มล.
 - b. เมื่อละลายจนหมดเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20 มล.
 - c. ตั้งทิ้งไว้จนได้อุณหภูมิห้องจึงปรับปริมาตรเป็น 1 ล.

ขั้นตอนวิเคราะห์

1. ตัวอย่างน้ำ 5 มล. ผสมรวมกับสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 0.1 N ปริมาณ 3 มล. และกรดซัลฟูริกที่ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต 7 มล. ผสมให้เข้ากันจากนั้นน้ำเข้าตู้อบอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 2 ชม.
2. เมื่อครบเวลา ตั้งทิ้งไว้ให้ได้อุณหภูมิห้อง
3. หยดเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ประมาณ 2-3 หยด คนให้เข้ากัน
4. ไตเตรตด้วย FAS กระทั่งเป็นสีน้ำตาลอิฐ
5. บันทึกค่าไตเตรต

สมการคำนวณ

$$\text{ความเข้มข้นซีไอดี} = \frac{(A - B) \times N \times 8,000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง}}$$

เมื่อ	A	=	ปริมาตร FAS ที่ใช้ในการำไตเตรตน้ำกลั่น
	B	=	ปริมาตร FAS ที่ใช้ในการไตเตรตน้ำตัวอย่าง
	N	=	ความเข้มข้นของ FAS (N)

ความเข้มข้นกรดและต่างด้วยวิธีไตเตรต

สารเคมี

1. กรดเข้มข้น 0.05 N
 - a. ละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1.4 มล. ในน้ำกลั่น 1 ล.
2. ต่างเข้มข้น 0.05 N
 - a. ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 ก. ในน้ำกลั่น 1 ล.

ขั้นตอนวิเคราะห์

1. วัดค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำตัวอย่าง 50 มล.
2. ไตเตรตด้วยกรด 0.05 N กระทั่งพีเอชเท่ากับ 4 บันทึกค่ากรดที่ใช้ในช่วงพีเอช 7-4
3. ไตเตรตด้วยกรด 0.05 N กระทั่งพีเอชอยู่ในช่วง 3.3-3.5
4. ต้มให้เดือด 3-5 นาที จากนั้นทิ้งให้ได้อุณหภูมิห้อง
5. ไตเตรตด้วยต่าง 0.05 N กระทั่งพีเอชเท่ากับ 4
6. ไตเตรตด้วยต่าง 0.05 N กระทั่งพีเอชเท่ากับ 7 บันทึกค่าต่างที่ใช้ในช่วงพีเอช 4-7

สมการคำนวณ

ความเข้มข้นต่าง

$$\text{ความเข้มข้นต่าง} \left(\frac{\text{mgCaCO}_3}{L} \right) = \frac{\text{ปริมาตรกรดไตเตรตในข้อ 2} \times \text{ความเข้มข้นกรดที่ใช้} \times 50,000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง}}$$

ความเข้มข้นกรด

$$\text{ความเข้มข้นกรด} \left(\frac{\text{mgCaCO}_3}{L} \right) = \frac{\text{ปริมาตรกรดไตเตรตในข้อ 6} \times \text{ความเข้มข้นต่างที่ใช้} \times 50,000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง}}$$

โดยหากความเข้มข้นกรดมีค่ามากกว่า 180 มก.แคลเซียมคาร์บอเนตให้คูณด้วย 1.5

ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยด้วยวิธีอบแห้ง 103-105 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนวิเคราะห์

1. อบกระดาศกรอง GF/C ที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส 1 ชม. จากนั้นนำเข้าโถดูดความชื้น 30 นาที หรือจนแห้ง
2. ชั่งน้ำหนักของกระดาศกรอง GF/C ที่อบแห้ง A
3. กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาศกรอง GF/C ที่อบแห้ง ด้วยชุดกรวยกรองบุชเนอร์ที่ทำคความสะอาดแล้ว
4. นำกระดาศกรอง GF/C ที่ใช้ในการกรองอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส 1 ชม. จากนั้นนำเข้าโถดูดความชื้น 30 นาที หรือจนแห้ง
5. ชั่งน้ำหนักกระดาศที่แห้งแล้ว B

สมการคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)} = \frac{(B-A) \cdot 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง}}$$

เมื่อ A = น้ำหนักกระดาศกรองก่อนกรองน้ำตัวอย่าง (ก.)
 B = น้ำหนักกระดาศกรองหลังกรองน้ำตัวอย่าง (ก.)

ภาคผนวก ค.

ผลการทดสอบร้อยละชนิดของก๊าซชีวภาพ



สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี(บางขุนเทียน)
เลขที่ 49 ซอยเทียนทะเล 25 ถนนบางขุนเทียน-ชายทะเล
แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร 10150 Fax 02-452-3466

ใบรายงานผลการทดสอบ

ชื่อลูกค้า/บริษัท นายชนพงศ์ อุปถัมภานนท์

รายงานการตรวจวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

ตัวอย่าง	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	Bal (%)
แก๊สชีวภาพ TR4	82.72	12.04	5.24

ชื่อลูกค้าบริษัท นายชนพงศ์ อุปถัมภานนท์ ส่งตัวอย่าง วันที่ 14 มกราคม 2563

ทดสอบตัวอย่างก๊าซชีวภาพ วันที่ 14 มกราคม 2563

หมายเหตุ

1. ตรวจวิเคราะห์ด้วย เครื่อง Gas Chromatograph Shimadzu รุ่น GC-14B
2. Bal หมายถึง ก๊าซอื่นๆ

ผู้รับตัวอย่าง



นางสาวจกมล พุนทวี

ผู้ทดสอบ



นางสาวสุพรรณมา จอมคำสิงห์



ห้องปฏิบัติการ Ecowaste นางสาวสุพรรณมา จอมคำสิงห์

โทร. 02-470-7520, 02-470-7523

โทรสาร 02-452-3466

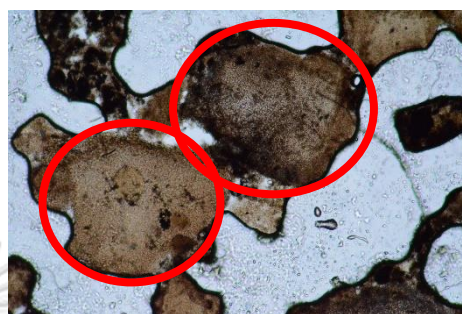
ภาคผนวก ง.

ข้อมูลผลการทดลอง

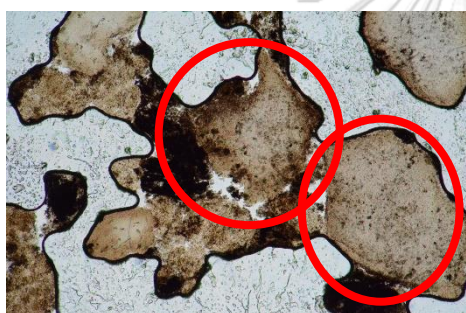
ไบโอฟิล์มบนพื้นผิวของตัวกลางที่สภาวะสมดุล



ก. ชุดการทดลองที่ 1



ข. ชุดการทดลองที่ 2



ค. ชุดการทดลองที่ 3



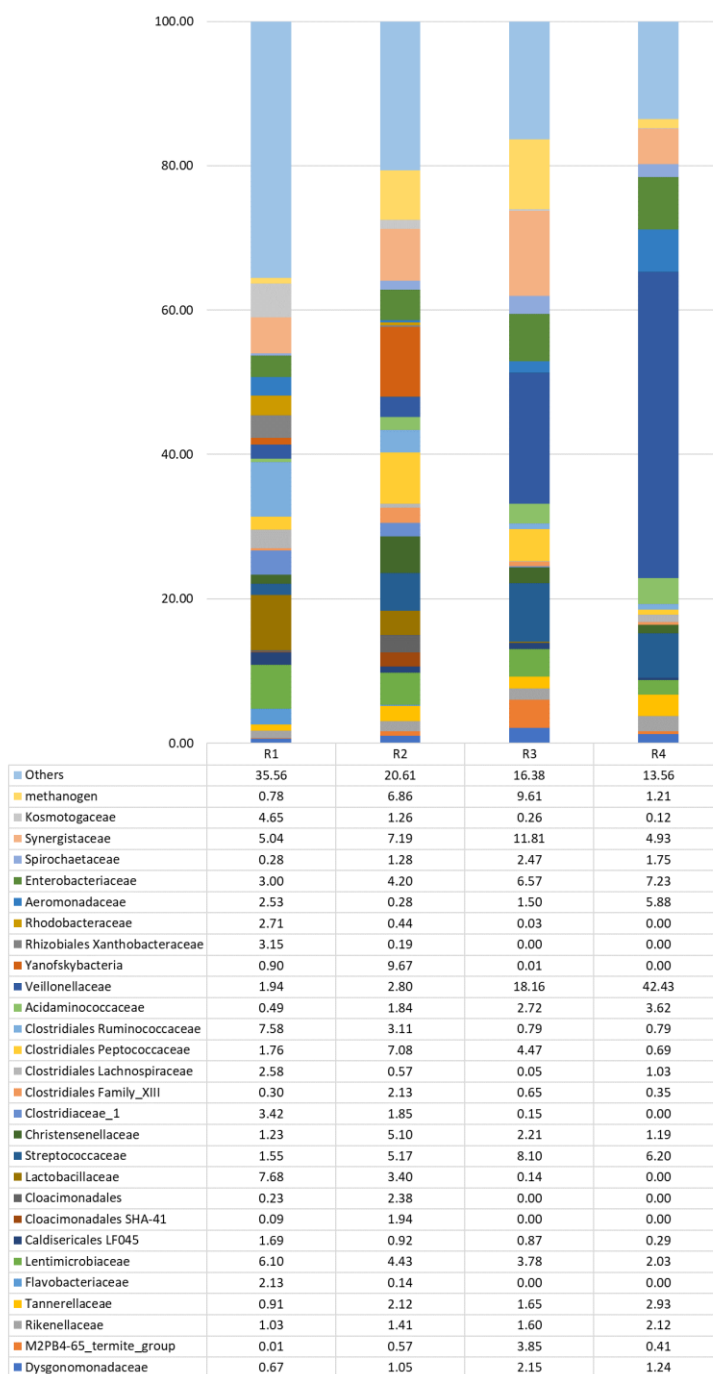
ง. ชุดการทดลองที่ 4

รูปที่ ง.1 ตัวอย่างตัวกลางในระบบ ณ วันที่ 118

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลการวิเคราะห์ประชากรจุลินทรีย์ในระบบ

ตารางที่ ง.1 ผลการวิเคราะห์ประชากรจุลินทรีย์ในระบบแยกกลุ่มอื่นๆ และเมทาโนเจนที่ระยะเวลา
กักเก็บน้ำ 4.4 ชม.



ผลการทดสอบพารามิเตอร์ต่างๆ ตามระดับความสูงถึงปฏิกรณ์

ตารางที่ ง.2 ความเข้มข้นซีโอดีตามระดับความสูงถึงปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 1 ณ สภาวะการเดินระบบต่างๆ

	แปรค่าระยะเวลาเก็บน้ำ		แปรค่าอัตราการสารอินทรีย์ครั้งที่ 1		แปรค่าอัตราการสารอินทรีย์ครั้งที่ 2		แปรค่าอัตราการสารอินทรีย์ครั้งที่ 3	
	ซีโอดี	ของแข็ง	ซีโอดี	ของแข็ง	ซีโอดี	ของแข็ง	ซีโอดี	ของแข็ง
	แขวนลอย		แขวนลอย		แขวนลอย		แขวนลอย	
ขาเข้า (มก./ล.)	832.9	-	608.7	-	448.6	-	220.8	-
ระดับ 45 ซม. (มก./ล.)	345.6	18500.0	288.0	50433.3	156.1	36500.0	200.0	29966.67
ระดับ 95 ซม. (มก./ล.)	211.2	4750.0	163.2	8800.0	96.8	26280.0	80.0	29166.67
ระดับ 145 ซม. (มก./ล.)	211.2	3100.0	120.0	1050.0	77.4	290.0	20.0	21640.0
ระดับ 195 ซม. (มก./ล.)	163.2	3700.0	116.1	700.0	77.4	210.0	40.0	16880.0
ขาออก (มก.ล.)	37.1	120.0	102.1	75.0	65.1	115.0	26.4	110.0

ตารางที่ ง.3 ความเข้มข้นซีโอดีตามระดับความสูงถึงปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 2 ณ สภาวะการเดินระบบต่างๆ

	แปรค่าระยะเวลาที่เก็บน้ำ		แปรค่าอัตราการสารอินทรีย์ครั้งที่ 1		แปรค่าอัตราการสารอินทรีย์ครั้งที่ 2		แปรค่าอัตราการสารอินทรีย์ครั้งที่ 3	
	ซีโอดี	ของแข็ง	ซีโอดี	ของแข็ง	ซีโอดี	ของแข็ง	ซีโอดี	ของแข็ง
	แขวนลอย		แขวนลอย		แขวนลอย		แขวนลอย	
ขาเข้า (มก./ล.)	2455.4	-	1989.0	-	1380.4	-	668.0	-
ระดับ 45 ซม. (มก./ล.)	488.1	23900.0	384.0	44400.0	300.0	17300.0	200.0	32266.67
ระดับ 95 ซม. (มก./ล.)	325.4	8950.0	307.2	1420.0	131.2	10420.0	120.0	18000.0
ระดับ 145 ซม. (มก./ล.)	309.7	6800.0	307.2	920.0	56.3	580.0	60.0	940.0
ระดับ 195 ซม. (มก./ล.)	325.4	2750.0	230.4	940.0	59	410.0	120.0	510.0
ขาออก (มก.ล.)	271.7	140	250.6	235	53.7	130.0	32.8	200.0

ตารางที่ ง.4 ความเข้มข้นซีโอดีตามระดับความสูงถึงปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 3 ณ สภาวะการเดินระบบต่างๆ

	แปรค่าระยะเวลาที่เก็บน้ำ		แปรค่าอัตราการสารอินทรีย์ครั้งที่ 1		แปรค่าอัตราการสารอินทรีย์ครั้งที่ 2		แปรค่าอัตราการสารอินทรีย์ครั้งที่ 3	
	ซีโอดี	ของแข็ง	ซีโอดี	ของแข็ง	ซีโอดี	ของแข็ง	ซีโอดี	ของแข็ง
	แขวนลอย		แขวนลอย		แขวนลอย		แขวนลอย	
ขาเข้า (มก./ล.)	4111.4	-	2865.3	-	2223.9	-	1148	-
ระดับ 45 ซม. (มก./ล.)	1545.8	24600.0	691.2	69400.0	300.0	49667.7	80	42000.0
ระดับ 95 ซม. (มก./ล.)	488.1	10950.0	546.1	2560.0	131.25	20000.0	80	4366.7
ระดับ 145 ซม. (มก./ล.)	406.8	10050.0	468.3	400.0	112.5	1220.0	120	910.0
ระดับ 195 ซม. (มก./ล.)	325.4	5700.0	480.0	1620.0	93.75	840.0	44	1020.0
ขาออก (มก.ล.)	325.0	370.0	315.2	375.0	99.7	500.0	42.4	260.0

ตารางที่ ง.5 ความเข้มข้นซีโอติตามระดับความสูงถึงปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 4 ณ สภาวะการเดินระบบต่างๆ

	แปรค่าระยะเวลาเก็บน้ำ		แปรค่าอัตราการสารอินทรีย์ครั้งที่ 1		แปรค่าอัตราการสารอินทรีย์ครั้งที่ 2		แปรค่าอัตราการสารอินทรีย์ครั้งที่ 3	
	ซีโอติ	ของแข็ง	ซีโอติ	ของแข็ง	ซีโอติ	ของแข็ง	ซีโอติ	ของแข็ง
	แขวนลอย		แขวนลอย		แขวนลอย		แขวนลอย	
ขาเข้า (มก./ล.)	6351.5	-	4683.4	-	3418.9	-	1848.0	-
ระดับ 45 ซม. (มก./ล.)	6345.8	7850.0	1152.0	60500.0	750.0	17983.3	880.0	20190.0
ระดับ 95 ซม. (มก./ล.)	4230.5	33900.0	844.8	2580.0	562.5	4780.0	320.0	7120.0
ระดับ 145 ซม. (มก./ล.)	1301.7	8200.0	768	1710.0	375.0	1460.0	260.0	1250.0
ระดับ 195 ซม. (มก./ล.)	813.6	5550.0	614.4	1510.0	356.3	1520.0	340.0	400.0
ขาออก (มก.ล.)	766.8	570.0	605.7	970.0	387.4	660.0	235.2	370.0

ตารางที่ ง.6 ผลการทดลองลักษณะการไหลของน้ำที่ 4.4 ซม.

ระยะเวลาเก็บน้ำ (ชม.)					
4.4		1.6		1	
เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
0	237	0	228	0	228
1	237	1	228	3	228
2	237	2	227	6	229
3	236	3	228	9	231
4	237	4	228	12	229
5	237	5	228	15	230
6	238	6	230	18	231
7	240	7	229	21	231
8	248	8	229	24	232
9	258	9	229	27	231
10	296	10	228	30	232

ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (ชม.)					
4.4		1.6		1	
เวลา (นาทีก)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาทีก)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาทีก)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
11	397	11	235	33	232
12	489	12	230	36	233
13	573	13	234	39	233
14	644	14	234	42	234
15	725	15	231	45	235
16	812	16	237	48	236
17	923	17	229	51	237
18	1049	18	230	54	308
19	1216	19	256	57	576
20	1415	20	232	60	797
21	1559	21	271	63	853
22	1632	22	264	66	854
23	1677	23	278	69	977
24	1689	24	276	72	1096
25	1686	25	264	75	1143
26	1675	26	272	78	1189
27	1667	27	405	81	1196
28	1659	28	484	84	1271
29	1670	29	588	87	1340
30	1668	30	686	90	1356
31	1662	31	820	93	1478
32	1659	32	891	96	1587
33	1651	33	945	99	1708
34	1644	34	1013	102	1816
35	1622	35	1124	105	1858
36	1636	36	1248	108	1890
37	1622	37	1253	111	1927
38	1600	38	1274	114	1994
39	1604	39	1345	117	2040
40	1606	40	1354	120	2031
41	1603	41	1365	123	2030
42	1591	42	1392	126	2015
43	1573	43	1425	129	1989
44	1601	44	1422	132	1971
45	1586	45	1419	135	1965

ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (ชม.)					
4.4		1.6		1	
เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
46	1572	46	1407	138	1953
47	1573	47	1409	141	1933
48	1564	48	1409	144	1929
49	1547	49	1401	147	1914
50	1551	50	1392	150	1901
51	1542	51	1334	153	1891
52	1533	52	1365	156	1884
53	1496	53	1360	159	1873
54	1515	54	1360	162	1856
55	1509	55	1342	165	1843
56	1502	56	1338	168	1829
57	1451	57	1350	171	1801
58	1479	58	1278	174	1799
59	1475	59	1329	177	1756
60	1461	60	1317	180	1775
61	1456	61	1287	183	1754
62	1464	62	1290	186	1742
63	1452	63	1238	189	1733
64	1425	64	1266	192	1712
65	1425	65	1224	195	1702
66	1429	66	1223	198	1694
67	1417	67	1235	201	1677
68	1412	68	1242	204	1642
69	1393	69	1195	207	1643
70	1399	70	1216	210	1619
71	1396	71	1192	213	1626
72	1382	72	1112	216	1609
73	1354	73	1136	219	1589
74	1357	74	1148	222	1582
75	1339	75	1128	225	1524
76	1336	76	1135	228	1516
77	1329	77	1114	231	1533
78	1326	78	1105	234	1501
79	1318	79	1114	237	1493
80	1317	80	1081	240	1486

ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (ชม.)					
4.4		1.6		1	
เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
81	1305	81	1075	243	1415
82	1298	82	1052	246	1451
83	1288	83	1057	249	1441
84	1275	84	1015	252	1430
85	1277	85	998	255	1404
86	1259	86	971	258	1377
87	1249	87	951	261	1378
88	1237	88	1000	264	1378
89	1204	89	967	267	1338
90	1214	90	978	270	1346
91	1207	91	965	273	1321
92	1214	92	889	276	1323
93	1184	93	934	279	1312
94	1185	94	913	282	1289
95	1199	95	885	285	1286
96	1157	96	890	288	1280
97	1180	97	890	291	1266
98	1162	98	883	294	1248
99	1152	99	875	297	1218
100	1154	100	866	300	1212
101	1142	101	829	303	1201
102	1124	102	864	306	1197
103	1129	103	826	309	1186
104	1121	104	839	312	1159
105	1106	105	822	315	1162
106	1108	106	811	318	1145
107	1091	107	796	321	1121
108	1083	108	798	324	1093
109	1079	109	790	327	1086
110	1075	110	783	330	1046
111	1053	111	741	333	1082
112	1054	112	742	336	1083
113	1053	113	721	339	1071
114	1038	114	745	342	1054
115	1021	115	717	345	1041

ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (ชม.)					
4.4		1.6		1	
เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
116	1023	116	731	348	1039
117	1022	117	730	351	1021
118	1013	118	708	354	1020
119	1004	119	638	357	1022
120	992	120	685	360	1000
121	994	121	664	363	986
122	986	122	673	366	975
123	985	123	659	369	959
124	954	124	652	372	960
125	959	125	641	375	958
126	933	126	647	378	941
127	951	127	617	381	940
128	903	128	641	384	905
129	934	129	600	387	908
130	917	130	638	390	907
131	905	131	579	393	884
132	922	132	597	396	889
133	888	133	587	399	872
134	903	134	557	402	841
135	883	135	581	405	860
136	881	136	552	408	838
137	881	137	574	411	820
138	877	138	575	414	828
139	882	139	558	417	823
140	884	140	559	420	821
141	863	141	529	423	810
142	847	142	533	426	798
143	846	143	534	429	788
144	833	144	556	432	792
145	833	145	527	435	780
146	824	146	534	438	764
147	819	147	527	441	768
148	815	148	488	444	758
149	808	149	498	447	748
150	811	150	511	450	728

ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (ชม.)					
4.4		1.6		1	
เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
151	793	151	494	453	737
152	792	152	505	456	700
153	778	153	462	459	720
154	761	154	492	462	714
155	778	155	475	465	685
156	765	156	472	468	706
157	765	157	481	471	692
158	749	158	466	474	699
159	756	159	447	477	688
160	748	160	473	480	676
161	741	161	453	483	675
162	731	162	467	486	660
163	733	163	450	489	663
164	711	164	454	492	661
165	721	165	448	495	650
166	713	166	452	498	645
167	706	167	440	501	636
168	706	168	435	504	633
169	691	169	436	507	629
170	688	170	430	510	622
171	679	171	424	513	614
172	672	172	422	516	612
173	680	173	433	519	611
174	672	174	417	522	598
175	658	175	405	525	605
176	655	176	386	528	591
177	639	177	402	531	591
178	656	178	385	534	586
179	653	179	383	537	573
180	619	180	395	540	578
181	638	181	393	543	568
182	623	182	401	546	560
183	631	183	399	549	563
184	631	184	386	552	549
185	618	185	390	555	546

ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (ชม.)					
4.4		1.6		1	
เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
186	615	186	383	558	538
187	603	187	379	561	541
188	599	188	377	564	533
189	601	189	374	567	527
190	595	190	374	570	524
191	592	191	366	573	522
192	594	192	367	576	521
193	577	193	364	579	516
194	579	194	363	582	513
195	584	195	361	585	511
196	576	196	352	588	488
197	560	197	361	591	491
198	561	198	337	594	500
199	564	199	354	597	489
200	567	200	348	600	485
201	552	201	345	603	486
202	554	202	351	606	479
203	550	203	330	609	476
204	541	204	339	612	460
205	539	205	337	615	473
206	528	206	336	618	472
207	534	207	335	621	472
208	535	208	334	624	454
209	528	209	334	627	460
210	527	210	307	630	458
211	519	211	319	633	451
212	515	212	326	636	450
213	515	213	326	639	440
214	509	214	324	642	440
215	507	215	318	645	442
216	498	216	319	648	437
217	505	217	316	651	414
218	503	218	316	654	427
219	470	219	316	657	428
220	488	220	314	660	425

ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (ชม.)					
4.4		1.6		1	
เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
221	482	221	309	663	420
222	477	222	310	666	423
223	464	223	306	669	415
224	473	224	306	672	415
225	479	225	306	675	413
226	464	226	303	678	407
227	468	227	304	681	405
228	458	228	302	684	402
229	466	229	300	687	399
230	453	230	289	690	400
231	455	231	289	693	397
232	447	232	296	696	396
233	456	233	287	699	392
234	446	234	288	702	391
235	443	235	292	705	386
236	432	236	290	708	387
237	446	237	293	711	386
238	438	238	291	714	382
239	408	239	279	717	379
240	430	240	284	720	378
241	430	241	286	723	375
242	418	242	283	726	372
243	415	243	278	729	370
244	427	244	282	732	362
245	423	245	284	735	365
246	421	246	273	738	365
247	419	247	280	741	364
248	417	248	281	744	358
249	415	249	279	747	358
250	414	250	279	750	350
251	412	251	276	753	352
252	410	252	274	756	352
253	408	253	275	759	349
254	409	254	275	762	345
255	401	255	268	765	340

ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (ชม.)					
4.4		1.6		1	
เวลา (นาทีก)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาทีก)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาทีก)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
256	395	256	267	768	339
257	396	257	268	771	340
258	395	258	271	774	339
259	394	259	260	777	338
260	374	260	269	780	335
261	374	261	268	783	333
262	379	262	265	786	333
263	377	263	267	789	329
264	381	264	269	792	329
265	378	265	265	795	328
266	375	266	265	798	325
267	376	267	265	801	324
268	353	268	263	804	322
269	369	269	263	807	322
270	370	270	262	810	318
271	368	271	263	813	320
272	368	272	260	816	317
273	360	273	261	819	317
274	360	274	260	822	314
275	359	275	259	825	313
276	364	276	259	828	312
277	356	277	257	831	308
278	350	278	258	834	309
279	355	279	257	837	308
280	348	280	257	840	307
281	347	281	254	843	307
282	349	282	251	846	304
283	347	283	252	849	303
284	348	284	250	852	301
285	345	285	246	855	302
286	343	286	247	858	300
287	343	287	249	861	300
288	339	288	251	864	298
289	331	289	251	867	298
290	332	290	250	870	296

ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (ชม.)					
4.4		1.6		1	
เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
291	337	291	250	873	295
292	332	292	250	876	294
293	328	293	250	879	293
294	331	294	249	882	293
295	320	295	248	885	291
296	328	296	249	888	290
297	328	297	247	891	289
298	325	298	247	894	288
299	321	299	247	897	287
300	318	300	246	900	286
301	322	301	246	903	286
302	320	302	246	906	283
303	318	303	245	909	283
304	305	304	245	912	282
305	304	305	244	915	282
306	312	306	244	918	282
307	310	307	245	921	281
308	312	308	245	924	278
309	310	309	244	927	279
310	308	310	243	930	277
311	309	311	243	933	277
312	302	312	241	936	276
313	302	313	243	939	276
314	302	314	242	942	276
315	301	315	242	945	275
316	299	316	242	948	274
317	302	317	242	951	273
318	299	318	241	954	273
319	300	319	241	957	272
320	299	320	241	960	271
321	298	321	241	963	270
322	295	322	241	966	270
323	296	323	241	969	274
324	293	324	241	972	269
325	294	325	240	975	268

ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (ชม.)					
4.4		1.6		1	
เวลา (นาทีก)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาทีก)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาทีก)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
326	290	326	239	978	268
327	289	327	239	981	267
328	290	328	239	984	266
329	288	329	239	987	266
330	288	330	239	990	265
331	287	331	239	993	264
332	284	332	239	996	263
333	285	333	237	999	263
334	285	334	236	1002	262
335	281	335	235	1005	262
336	281	336	237	1008	261
337	279	337	237	1011	261
338	282	338	237	1014	261
339	278	339	236	1017	260
340	278	340	236	1020	260
341	277	341	236	1023	259
342	280	342	236	1026	258
343	275	343	236	1029	257
344	274	344	236	1032	257
345	277	345	236	1035	257
346	274	346	236	1038	256
347	275	347	236	1041	257
348	271	348	235	1044	255
349	272	349	235	1047	255
350	272	350	235	1050	255
351	272	351	235	1053	254
352	272	352	234	1056	254
353	270	353	235	1059	253
354	271	354	234	1062	253
355	267	355	235	1065	253
356	265	356	234	1068	252
357	268	357	234	1071	252
358	267	358	234	1074	251
359	267	359	233	1077	250
360	267	360	233	1080	250

ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (ชม.)					
4.4		1.6		1	
เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
361	267	361	233	1083	250
362	265	362	232	1086	250
363	265	363	233	1089	249
364	264	364	232	1092	249
365	264	365	232	1095	248
366	263	366	232	1098	248
367	262	367	232	1101	247
368	262	368	232	1104	247
369	262	369	232	1107	247
370	261	370	231	1110	247
371	259	371	232	1113	246
372	260	372	231	1116	246
373	258	373	231	1119	246
374	259	374	231	1122	245
375	258	375	231	1125	245
376	258	376	231	1128	245
377	257	377	231	1131	245
378	257	378	230	1134	244
379	256	379	230	1137	244
380	255	380	231	1140	244
381	256	381	230	1143	244
382	255	382	230	1146	243
383	253	383	230	1149	243
384	254	384	230	1152	243
385	254	385	230	1155	243
386	254	386	230	1158	243
387	254	387	230	1161	242
388	252	388	230	1164	242
389	252	389	230	1167	242
390	251	390	230	1170	241
391	252	391	229	1173	241
392	251	392	229	1176	241
393	251	393	229	1179	241
394	250	394	229	1182	241
395	250	395	229	1185	241

ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (ชม.)					
4.4		1.6		1	
เวลา (นาทีก)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาทีก)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาทีก)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
396	249	396	229	1188	240
397	249	397	229	1191	240
398	250	398	229	1194	240
399	249	399	229	1197	240
400	249	400	228	1200	240
401	249	401	228	1203	239
402	248	402	228	1206	239
403	247	403	228	1209	239
404	247	404	228	1212	239
405	247	405	228	1215	239
				1218	239
				1221	239
				1224	239
				1227	239
				1230	238
				1233	238
				1236	238
				1239	238
				1242	238
				1245	237
				1248	237
				1251	237
				1254	237
				1257	236
				1260	236
				1263	236
				1266	236
				1269	236
				1272	236
				1275	236
				1278	236
				1281	235
				1284	235
				1287	235
				1290	235

ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (ชม.)					
4.4		1.6		1	
เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
				1293	233
				1296	233
				1299	233
				1302	233
				1305	232
				1308	233
				1311	232
				1314	232
				1317	232
				1320	232
				1323	232
				1326	232
				1329	231
				1332	231
				1335	231
				1338	231
				1341	231
				1344	231
				1347	231
				1350	230
				1353	230
				1356	230
				1359	230
				1362	230
				1365	230
				1368	230
				1371	230
				1374	230
				1377	229
				1380	229
				1383	229
				1386	229
				1389	229
				1392	229
				1395	229

ระยะเวลาที่เก็บน้ำ (ชม.)					
4.4		1.6		1	
เวลา (นาทีก)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาทีก)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	เวลา (นาทีก)	ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
				1398	229
				1401	228
				1404	228
				1407	228
				1410	228
				1413	228
				1416	228
				1419	227
				1422	227
				1425	227
				1428	227

ตารางที่ ง.7 ซีไอดีเข้า-ออก ของชุดการทดลองที่ 1 ตลอดการทดลอง

วันระบบ	ซีไอดี					
	ความเข้มข้นขาเข้า		ความเข้มข้นขาออก		ประสิทธิภาพ	
	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	ปริมาณ (มก./ล.)	ร้อยละ (%)
6	1116.28	126.29	587.91	94.72	528.37	47.33
8	885.58	178.91	461.40	21.05	424.19	47.90
10	833.49	105.24	535.81	63.15	297.67	35.71
13	640.00	126.29	342.33	84.20	297.67	46.51
16	766.51	10.52	130.98	0.00	635.53	82.91
19	625.12	42.10	119.07	21.05	506.05	80.95
23	1115.75	21.32	527.72	0.00	588.03	52.70
26	4598.71	0.00	4464.54	0.00	134.17	2.92
29	3957.91	213.23	3874.22	0.00	83.69	2.11
31	1089.08	85.57			1089.08	100.00
34	927.73	28.52	544.54	114.09	383.19	41.30
37	904.92	0.00	236.07	55.64	668.85	73.91
40	767.21	250.39	531.15	27.82	236.07	30.77
43	393.44	55.64	373.77	194.74	19.67	5.00
46	855.74	125.19	383.61	13.91	472.13	55.17
49	963.93	27.82	255.74	166.92	708.20	73.47

วันระบบ	ซีไอที					
	ความเข้มข้นขาเข้า		ความเข้มข้นขาออก		ประสิทธิภาพ	
	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	ปริมาณ (มก./ล.)	ร้อยละ (%)
52	590.16	55.64	393.44	55.64	196.72	33.33
55	826.23	0.00	393.44	55.64	432.79	52.38
58	1132.80	0.00	614.40	135.76	518.40	45.76
61	1132.80	0.00	614.40	81.46	518.40	45.76
64	1132.80	0.00	576.00	27.15	556.80	49.15
67	864.78	54.97	427.53	41.22	437.25	50.56
70	981.38	54.97	612.15	27.48	369.23	37.62
73	782.61	24.60	191.30	73.79	591.30	75.56
76	800.00	0.00	156.52	24.60	643.48	80.43
79	819.51	27.59	370.73	55.19	448.78	54.76
82	946.34	13.80	185.37	41.39	760.98	80.41
85	832.26	41.06	358.06	27.37	474.19	56.98
88	938.71	246.35	300.00	0.00	638.71	68.04
91	914.29	26.94	285.71	134.69	628.57	68.75
94	876.19	26.94	457.14	0.00	419.05	47.83
97	600.00	0.00	329.03	54.74	270.97	45.16
100	658.06	0.00	483.87	54.74	174.19	26.47
103	940.80	54.31	288.00	54.31	652.80	69.39
106	902.40	108.61	268.80	27.15	633.60	70.21
109	793.85	26.11	73.85	0.00	720.00	90.70
112	886.15	0.00	73.85	0.00	812.31	91.67
115	890.00	14.14	200.00	56.57	690.00	77.53
118	920.00	0.00	300.00	28.28	620.00	67.39
124	809.76	13.80	214.63	55.19	595.12	73.49
127	1014.63	110.38	78.05	27.59	936.59	92.31
130	907.09	80.18	56.69	53.45	850.39	93.75
133	907.09	26.73	75.59	80.18	831.50	91.67
136	915.25	28.76	81.36	0.00	833.90	91.11
139	874.58	86.29	162.71	57.53	711.86	81.40
142	872.73	84.15	99.17	56.10	773.55	88.64
145	852.89	56.10	79.34	0.00	773.55	90.70
148	826.89	0.00	20.17	0.00	806.72	97.56
151	847.06	28.52	40.34	28.52	806.72	95.24
154	847.06	28.52	80.67	28.52	766.39	90.48
157	932.23	0.00	19.83	28.05	912.40	97.87
160	912.40	112.20	59.50	56.10	852.89	93.48

วันระบบ	ซีไอที					
	ความเข้มข้นขาเข้า		ความเข้มข้นขาออก		ประสิทธิภาพ	
	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	ปริมาณ (มก./ล.)	ร้อยละ (%)
163	872.73	112.20	138.84	84.15	733.88	84.09
166	912.40	56.10	99.17	28.05	813.22	89.13
169	812.90	0.00	19.35	27.37	793.55	97.62
172	909.68	191.60	58.06	27.37	851.61	93.62
175	919.35	41.06	77.42	54.74	841.94	91.58
178	894.92	0.00	20.34	28.76	874.58	97.73
181	793.22	28.76	61.02	28.76	732.20	92.31
184	772.88	57.53	61.02	28.76	711.86	92.11
187	813.56	0.00	61.02	28.76	752.54	92.50
190	851.61	109.49	40.68	28.76	810.93	95.22
193	870.97	82.12	19.35	27.37	851.61	97.78
196	522.58	27.37	77.42	54.74	445.16	85.19
199	700.00	84.85	80.00	0.00	620.00	88.57
202	660.00	84.85	140.00	28.28	520.00	78.79
205	526.83	27.59	39.02	0.00	487.80	92.59
208	604.88	27.59	39.02	0.00	565.85	93.55
211	541.94	54.74	77.42	54.74	464.52	85.71
214	619.35	54.74	96.77	27.37	522.58	84.38
217	580.65	0.00	77.42	0.00	503.23	86.67
220	604.88	27.59	97.56	27.59	507.32	83.87
223	663.41	55.19	136.59	82.78	526.83	79.41
226	604.88	27.59	78.05	55.19	526.83	87.10
229	624.39	0.00	156.10	0.00	468.29	75.00
232	658.06	27.37	96.77	27.37	561.29	85.29
235	619.35	54.74	116.13	0.00	503.23	81.25
238	576.00	27.15	57.60	54.31	518.40	90.00
241	580.00	28.28	120.00	56.57	460.00	79.31
244	610.00	14.14	120.00	0.00	490.00	80.33
247	480.00	56.57	120.00	0.00	360.00	75.00
249	420.00	28.28	100.00	28.28	320.00	76.19
251	476.03	112.20	39.67	56.10	436.36	91.67
253	476.03	56.10	79.34	0.00	396.69	83.33
255	456.20	28.05	59.50	28.05	396.69	86.96
257	464.52	0.00	38.71	0.00	425.81	91.67
259	425.81	0.00	58.06	27.37	367.74	86.36
261	464.52	54.74	77.42	0.00	387.10	83.33

วันระบบ	ซีไอดี					
	ความเข้มข้นขาเข้า		ความเข้มข้นขาออก		ประสิทธิภาพ	
	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	ปริมาณ (มก./ล.)	ร้อยละ (%)
263	453.54	26.73	75.59	80.18	377.95	83.33
265	434.65	53.45	75.59	26.73	359.06	82.61
267	220.00	28.28	100.00	28.28	120.00	54.55
268	200.00	0.00	40.00	56.57	160.00	80.00
269	236.07	55.64	19.67	5.56	216.39	91.67
270	236.07	0.00	19.67	5.56	216.39	91.67
271	232.00	0.00	24.00	0.00	208.00	89.66
272	220.00	5.66	24.00	0.00	196.00	89.09
273	232.13	5.56	23.61	0.00	208.52	89.83
274	220.33	0.00	31.48	0.00	188.85	85.71
275	228.20	0.00	19.67	5.56	208.52	91.38
276	228.20	0.00	27.54	5.56	200.66	87.93
277	220.00	5.66	24.00	0.00	196.00	89.09
278	220.00	5.66	16.00	0.00	204.00	92.73
279	216.00	0.00	32.00	0.00	184.00	85.19
280	228.00	5.66	36.00	5.66	192.00	84.21
281	220.00	5.66	24.00	0.00	196.00	89.09

ผลการติดตามพารามิเตอร์ต่างๆ ของชุดการทดลองทั้ง ๔

ตารางที่ ง.8 ผลการติดตามพารามิเตอร์อื่นๆ ของชุดการทดลองที่ 1

วันระบบ	พารามิเตอร์								
	พีเอช		ความเข้มข้นต่าง (มก./ล.)		ความเข้มข้นกรด (มก./ล.)		กรดต่อต่าง ขาออก	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	โออาร์พี (mV)
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก			
3	8.48	8.68	2387.50	3662.50	150.00	346.88	0.09	0.00	
6	8.52	8.24	1862.50	2262.50	375.00	175.00	0.08	0.00	
10	8.09	8.21	2362.50	2562.50	618.75	562.50	0.22	0.00	
19	8.23	8.12	1212.50	1437.50	309.38	87.50	0.06	0.00	
23	7.67	8.53	912.50	2375.00	337.50	100.00	0.04	0.00	
34	8.05	8.54	2925.00	4350.00	131.25	431.25	0.10	187.14	
37	8.21	8.65	2712.50	3312.50	62.50	421.88	0.13	27.14	
40	8.38	8.74	3550.00	3162.50	62.50	318.75	0.10	34.24	
43	8.18	8.71	1487.50	3712.50	87.50	468.75	0.13	38.15	
46	8.09	8.38	875.00	2131.25	62.50	412.50	0.19	24.29	

วัน ระบบ	พารามิเตอร์								
	พีเอช		ความเข้มข้นต่าง (มก./ล.)		ความเข้มข้นกรด (มก./ล.)		กรดต่อต่าง ขาออก	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	โออาร์พี (mV)
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก			
49	8.40	8.09	2900.00	1487.50	168.75	450.00	0.30	70.00	
52	8.42	8.00	2137.50	2443.75	100.00	618.75	0.25	32.86	
55	7.99	8.35	1100.00	1975.00	112.50	468.75	0.24	58.57	
58	8.38	8.51	2500.00	1775.00	131.25	506.25	0.29	61.43	
61	8.35	8.44	2500.00	2337.50	162.50	543.75	0.23	21.43	
64	7.90	7.70	2375.00	2437.50	137.50	581.25	0.24	95.71	
67	8.20	7.59	2450.00	2293.75	125.00	459.38	0.20	114.29	
70	7.90	7.62	2337.50	2225.00	94.37	440.63	0.20	150.00	
73		7.69	2200.00	2018.75	100.00	506.25	0.25	114.29	
76		7.87	2025.00	2262.50	150.00	375.00	0.17	120.00	
79	7.70	7.97	2337.50	2100.00	137.50	534.38	0.25	90.00	
82	7.55	7.93	2125.00	2112.50	100.00	431.25	0.20	140.00	
85	7.56	7.29	2262.50	2668.75	150.00	581.25	0.22	110.00	
88	7.61	7.50	1487.50	2262.50	112.50	356.25	0.16	72.86	
91	7.58	7.73	1650.00	1487.50	100.00	356.25	0.24	98.57	
94	7.51	7.79	1625.00	1787.50	112.50	506.25	0.28	45.71	
97	7.75	7.43	1412.50	2012.50	137.50	468.75	0.23	87.14	
100	7.67	7.56	1450.00	2925.00	118.75	618.75	0.21	150.00	
103	7.78	7.74	2087.50	1975.00	137.50	375.00	0.19	50.00	
106	7.94	7.94	2206.25	2225.00	112.50	375.00	0.17	67.14	
109	6.93	7.46	2025.00	2087.50	506.25	487.50	0.23	40.00	
112	7.90	7.78	1862.50	2362.50	393.75	300.00	0.13	81.43	
115	7.73	8.01	2187.50	2087.50	281.25	150.00	0.07	108.57	
118	7.93	7.74	2312.50	2162.50	87.50	375.00	0.17	88.57	
124	7.95	7.97	2068.75	2150.00	100.00	150.00	0.07	505.00	
127	7.79	7.57	2150.00	2100.00	112.50	318.75	0.15	155.00	
3	8.48	8.68	2387.50	3662.50	150.00	346.88	0.09	0.00	
133	7.85	7.84	1900.00	2150.00	125.00	150.00	0.07	180.00	
136	7.70	7.89	1900.00	2175.00	62.50	112.50	0.05	95.00	
139	7.64	7.58	1925.00	1550.00	100.00	75.00	0.05	120.00	
142	7.77	7.50	2350.00	2450.00	50.00	125.00	0.05	85.00	
145	7.37	8.12	1875.00	2425.00	50.00	125.00	0.05	140.00	
148	7.54	7.61	1700.00	1700.00	100.00	100.00	0.06	25.00	
151	7.82	7.77	1425.00	1450.00	75.00	75.00	0.05	125.00	
154	7.68	8.19	925.00	1825.00	75.00	87.50	0.05	125.00	

วัน ระบบ	พารามิเตอร์								
	พีเอช		ความเข้มข้นต่าง (มก./ล.)		ความเข้มข้นกรด (มก./ล.)		กรดต่อต่าง ขาออก	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	โออาร์พี (mV)
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก			
157	8.10	7.32	2125.00	900.00	162.50	87.50	0.10	220.00	
160	8.10	7.63	2325.00	2700.00	87.50	356.25	0.13	235.00	
163	7.89	7.52	1950.00	2550.00	75.00	112.50	0.04	40.00	
166	7.62	7.69	1050.00	2300.00	62.50	100.00	0.04	10.00	
169	7.63	8.17	1675.00	1200.00	75.00	87.50	0.07	30.00	-89.00
172	7.78	7.85	1300.00	2025.00	87.50	87.50	0.04	265.00	
175	7.58	7.80	1125.00	1425.00	100.00	87.50	0.06	60.00	-20.20
178	7.87	7.94	1050.00	1400.00	75.00	75.00	0.05	90.00	26.20
181	7.82	7.69	1325.00	1325.00	75.00	87.50	0.07	105.00	19.50
184	7.52	8.05	875.00	1450.00	62.50	75.00	0.05	155.00	-30.10
187	7.83	7.72	1150.00	1125.00	75.00	75.00	0.07	40.00	52.50
190	7.76	8.00	1175.00	1425.00	112.50	100.00	0.07	95.00	45.10
193	7.54	7.94	1375.00	1275.00	87.50	112.50	0.09	120.00	
196	7.76	7.83	1175.00	1600.00	162.50	100.00	0.06	50.00	28.70
199	7.83	7.76	2200.00	1475.00	100.00	112.50	0.08	10.00	-264.50
202	7.62	7.71	1575.00	1600.00	100.00	125.00	0.08	125.00	-237.70
205	7.56	7.66	1500.00	1650.00	125.00	175.00	0.11	55.00	-365.00
208	7.66	7.72	1200.00	1400.00	87.50	162.50	0.12	90.00	-218.50
211	7.46	8.00	875.00	1675.00	100.00	87.50	0.05	40.00	28.70
214	7.75	7.74	1875.00	1250.00	87.50	125.00	0.10	85.00	64.00
217	7.86	7.72	1475.00	1475.00	125.00	125.00	0.08	5.00	-61.90
220	7.53	7.36	1575.00	2250.00	100.00	62.50	0.03	145.00	-377.50
223	7.76	8.13	1250.00	1700.00	137.50	50.00	0.03	105.00	29.30
226	7.68	7.82	1600.00	2300.00	150.00	162.50	0.07	115.00	49.80
229	7.61	7.94	2025.00	2150.00	125.00	112.50	0.05	60.00	17.80
232	7.60	7.75	1650.00	2475.00	162.50	150.00	0.06	145.00	-92.20
235	7.52	7.69	900.00	1475.00	125.00	112.50	0.08	145.00	108.90
238	7.44	7.83	1575.00	1425.00	125.00	175.00	0.12	75.00	-190.80
241	7.41	7.60	1525.00	1750.00	125.00	300.00	0.17	165.00	-95.50
244	7.35	7.77	925.00	1550.00	87.50	87.50	0.06	100.00	-21.20
247	7.20	7.52	2275.00	1775.00	137.50	125.00	0.07	75.00	-319.90
249	7.45	7.60	1475.00	3025.00	75.00	125.00	0.04	105.00	-32.90
251	7.63	8.04	1475.00	3975.00	137.50	150.00	0.04	300.00	-37.70
253	7.68	7.97	1450.00	2625.00	75.00	137.50	0.05	45.00	-10.00
255	7.50	7.69	2050.00	2050.00	87.50	137.50	0.07	85.00	-9.40

วัน ระบบ	พารามิเตอร์								
	พีเอช		ความเข้มข้นต่าง (มก./ล.)		ความเข้มข้นกรด (มก./ล.)		กรดต่อต่าง ขาออก	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	โออาร์พี (mV)
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก			
257	7.84	8.01	1975.00	2225.00	100.00	162.50	0.07	70.00	-12.90
259	7.70	7.76	1625.00	2325.00	100.00	150.00	0.06	60.00	26.60
261	7.66	7.89	1575.00	2450.00	87.50	162.50	0.07	130.00	33.90
263	7.74	7.83	1650.00	2300.00	100.00	112.50	0.05	150.00	-36.70
265	7.41	7.93	1000.00	1800.00	125.00	300.00	0.17	115.00	-24.80
267	7.52	7.91	1450.00	1825.00	162.50	112.50	0.06	80.00	-188.20
268	7.60	7.92	1700.00	2150.00	112.50	137.50	0.06	90.00	-44.10
269	7.81	7.83	1650.00	2450.00	137.50	125.00	0.05	85.00	-219.00
270	7.62	7.72	1900.00	2475.00	125.00	125.00	0.05	100.00	-238.60
271	7.61	7.61	2050.00	2225.00	137.50	300.00	0.13	45.00	-330.20
272	7.58	7.70	1600.00	2325.00	75.00	125.00	0.05	95.00	-241.10
273	7.58	7.75	1800.00	2350.00	125.00	125.00	0.05	125.00	-153.50
274	7.64	7.84	1700.00	2400.00	75.00	87.50	0.04	210.00	-88.50
275	7.63	7.71	1950.00	2325.00	112.50	125.00	0.05	50.00	-251.70
276	7.51	7.88	1525.00	2225.00	87.50	112.50	0.05	65.00	-217.30
277	7.61	7.92	2325.00	2200.00	112.50	137.50	0.06	200.00	-77.30
278	7.60	7.74	1700.00	2300.00	100.00	87.50	0.04	110.00	-98.90
279	7.54	7.85	1900.00	2250.00	162.50	125.00	0.06	165.00	-60.10
280	7.59	7.74	1975.00	2275.00	137.50	100.00	0.04	200.00	-182.90
281	7.59	7.69	1875.00	2600.00	150.00	162.50	0.06	50.00	-120.70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ง. 9 ซีไอดีเข้า-ออก ของชุดการทดลองที่ 2 ตลอดการทดลอง

วันระบบ	ซีไอดี					
	ความเข้มข้นขาเข้า		ความเข้มข้นขาออก		ประสิทธิภาพ	
	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	ปริมาณ (มก./ล.)	ร้อยละ (%)
3	1099.35	21.90	689.03	54.74	410.32	37.32
6	796.28	31.57	238.14	315.73	558.14	70.09
8	1101.40	105.24	312.56	147.34	788.84	71.62
10	625.12	0.00	431.63	63.15	193.49	30.95
13	826.05	94.72	297.67	84.20	528.37	63.96
16	803.72	21.05	89.30	21.05	714.42	88.89
19	960.00	94.72	223.26	#DIV/0!	736.74	76.74

วันระบบ	ซีไอดี					
	ความเข้มข้นขาเข้า		ความเข้มข้นขาออก		ประสิทธิภาพ	
	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	ปริมาณ (มก./ล.)	ร้อยละ (%)
23	844.35	21.32	467.41	127.94	376.94	44.64
26	4523.32	53.31	4711.80	0.00	-188.48	-4.17
29	4259.46	319.85	4146.38	159.92	113.08	2.65
34	867.23	0.00	584.87	114.09	282.35	32.56
37	668.85	333.85	570.49	27.82	98.36	14.71
40	983.61	166.92	432.79	278.21	550.82	56.00
43	629.51	333.85	511.48	0.00	118.03	18.75
46	944.26	27.82	393.44	27.82	550.82	58.33
49	727.87	83.46	295.08	27.82	432.79	59.46
52	668.85	55.64	393.44	0.00	275.41	41.18
55	826.23	0.00	393.44	166.92	432.79	52.38
58	1132.80	0.00	691.20	27.15	441.60	38.98
61	1132.80	0.00	614.40	27.15	518.40	45.76
64	1132.80	0.00	691.20	27.15	441.60	38.98
67	893.93	68.71	573.28	137.41	320.65	35.87
70	923.08	0.00	612.15	27.48	310.93	33.68
73	782.61	73.79	313.04	98.38	469.57	60.00
76	886.96	24.60	295.65	24.60	591.30	66.67
79	878.05	27.59	282.93	41.39	595.12	67.78
82	897.56	27.59	390.24	66.23	507.32	56.52
85	783.87	27.37	338.71	54.74	445.16	56.79
88	958.06	0.00	629.03	82.12	329.03	34.34
91	933.33	0.00	514.29	53.87	419.05	44.90
94	914.29	107.75	285.71	0.00	628.57	68.75
97	987.10	27.37	174.19	54.74	812.90	82.35
100	812.90	27.37	251.61	0.00	561.29	69.05
103	768.00	27.15	268.80	81.46	499.20	65.00
106	940.80	108.61	508.80	67.88	432.00	45.92
109	738.46	0.00	73.85	52.22	664.62	90.00
112	775.38	0.00	36.92	0.00	738.46	95.24
115	950.00	98.99	180.00	84.85	770.00	81.05
118	900.00	28.28	260.00	28.28	640.00	71.11
124	2575.61	110.38	1092.68	220.76	1482.93	57.58
127	2575.61	110.38	936.59	220.76	1639.02	63.64
130	2192.13	106.90	453.54	0.00	1738.58	79.31
133	2267.72	0.00	302.36	213.80	1965.35	86.67

วันระบบ	ซีไอที					
	ความเข้มข้นขาเข้า		ความเข้มข้นขาออก		ประสิทธิภาพ	
	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	ปริมาณ (มก./ล.)	ร้อยละ (%)
136	2928.81	0.00	650.85	0.00	2277.97	77.78
139	3254.24	460.22	1138.98	920.44	2115.25	65.00
142	2697.52	448.81	793.39	897.62	1904.13	70.59
145	2221.49	224.40	476.03	448.81	1745.45	78.57
148	2581.51	228.18	322.69	228.18	2258.82	87.50
151	2742.86	0.00	322.69	228.18	2420.17	88.24
154	2904.20	228.18	161.34	0.00	2742.86	94.44
157	2538.84	0.00	476.03	224.40	2062.81	81.25
160	2538.84	448.81	634.71	0.00	1904.13	75.00
163	2697.52	224.40	158.68	224.40	2538.84	94.12
166	2776.86	336.61	158.68	224.40	2618.18	94.29
169	2787.10	0.00	309.68	0.00	2477.42	88.89
172	2941.94	218.98	309.68	437.95	2632.26	89.47
175	2864.52	328.46	154.84	218.98	2709.68	94.59
178	2766.10	230.11	488.14	230.11	2277.97	82.35
181	2603.39	0.00	162.71	230.11	2440.68	93.75
184	2440.68	230.11	325.42	460.22	2115.25	86.67
187	2277.97	460.22	162.71	230.11	2115.25	92.86
190	2477.42	0.00	464.52	218.98	2012.90	81.25
193	2477.42	437.95	154.84	218.98	2322.58	93.75
196	2477.42	218.98	154.84	218.98	2322.58	93.75
199	2080.00	226.27	480.00	452.55	1600.00	76.92
202	1920.00	0.00	240.00	113.14	1680.00	87.50
205	1404.88	0.00	156.10	220.76	1248.78	88.89
208	1560.98	220.76	78.05	110.38	1482.93	95.00
211	1935.48	109.49	232.26	109.49	1703.23	88.00
214	1780.65	109.49	154.84	0.00	1625.81	91.30
217	1935.48	109.49	77.42	109.49	1858.06	96.00
220	1951.22	110.38	312.20	0.00	1639.02	84.00
223	2029.27	220.76	390.24	110.38	1639.02	80.77
226	1873.17	441.51	234.15	110.38	1639.02	87.50
229	1951.22	110.38	312.20	220.76	1639.02	84.00
232	2012.90	437.95	387.10	109.49	1625.81	80.77
235	1935.48	109.49	232.26	109.49	1703.23	88.00
238	1996.80	108.61	153.60	108.61	1843.20	92.31
241	2160.00	113.14	160.00	0.00	2000.00	92.59

วันระบบ	ซีไอดี					
	ความเข้มข้นขาเข้า		ความเข้มข้นขาออก		ประสิทธิภาพ	
	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	ปริมาณ (มก./ล.)	ร้อยละ (%)
244	1840.00	113.14	320.00	226.27	1520.00	82.61
247	1360.00	113.14	80.00	113.14	1280.00	94.12
249	1360.00	113.14	240.00	113.14	1120.00	82.35
251	1428.10	224.40	79.34	0.00	1348.76	94.44
253	1348.76	112.20	99.17	84.15	1249.59	92.65
255	1428.10	0.00	59.50	28.05	1368.60	95.83
257	1316.13	109.49	77.42	54.74	1238.71	94.12
259	1470.97	109.49	38.71	0.00	1432.26	97.37
261	1393.55	0.00	58.06	27.37	1335.48	95.83
263	1285.04	213.80	37.80	26.73	1247.24	97.06
265	1436.22	0.00	56.69	0.00	1379.53	96.05
267	660.00	28.28	40.00	0.00	620.00	93.94
268	640.00	0.00	60.00	28.28	580.00	90.63
269	629.51	0.00	27.54	5.56	601.97	95.63
270	609.84	27.82	23.61	0.00	586.23	96.13
271	700.00	28.28	20.00	5.66	680.00	97.14
272	680.00	0.00	36.00	5.66	644.00	94.71
273	688.52	27.82	31.48	0.00	657.05	95.43
274	639.34	13.91	35.41	16.69	603.93	94.46
275	688.52	27.82	27.54	5.56	660.98	96.00
276	708.20	0.00	31.48	11.13	676.72	95.56
277	720.00	56.57	56.00	33.94	664.00	92.22
278	680.00	0.00	32.00	0.00	648.00	95.29
279	680.00	0.00	28.00	5.66	652.00	95.88
280	660.00	28.28	20.00	5.66	640.00	96.97
281	700.00	28.28	28.00	5.66	672.00	96.00

ตารางที่ ง.10 ผลการติดตามพารามิเตอร์อื่นๆ ของชุดการทดลองที่ 2

วันระบบ	พารามิเตอร์								
	พีเอช		ความเข้มข้นต่าง (มก./ล.)		ความเข้มข้นกรด (มก./ล.)		กรดต่อต่าง ขาออก	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	โออาร์ที (mV)
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก			
3	8.29	8.57	1350.00	312.50	62.50	375.00	1.20	0.00	

วันระบบ	พารามิเตอร์								
	พีเอช		ความเข้มข้นด่าง (มก./ล.)		ความเข้มข้นกรด (มก./ล.)		กรดต่อต่าง ขาออก	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	โออาร์พี (mV)
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก			
6	8.30	8.11	1381.25	1475.00	37.50	125.00	0.08	0.00	
10	8.05	8.00	2125.00	2125.00	431.25	281.25	0.13	0.00	
23	7.94	8.47	900.00	2493.75	150.00	112.50	0.05	0.00	
34	8.25	8.41	2943.75	4231.25	125.00	375.00	0.09	107.14	
37	8.48	8.61	2612.50	3450.00	37.50	506.25	0.15	78.57	
40	8.40	8.40	2862.50	3462.50	62.50	337.50	0.10	80.45	
43	8.24	8.63	1325.00	2787.50	62.50	412.50	0.15	90.00	
46	8.27	8.36	2106.25	1737.50	112.50	118.75	0.07	20.00	
49	8.35	8.31	3368.75	2200.00	281.25	506.25	0.23	41.43	
52	8.39	8.40	2425.00	3293.75	118.75	468.75	0.14	48.57	
55	8.38	8.41	1250.00	2212.50	75.00	496.88	0.22	40.00	
58	8.34	8.53	2562.50	2050.00	125.00	562.50	0.27	70.00	
61	8.39	8.61	2637.50	2475.00	100.00	543.75	0.22	77.14	
64	7.90	7.56	2362.50	2562.50	112.50	581.25	0.23	57.14	
67	8.20	7.59	2387.50	2256.25	125.00	553.13	0.25	122.86	
70	7.82	7.49	2350.00	2312.50	100.00	525.00	0.23	125.71	
73		7.66	2487.50	2075.00	87.50	468.75	0.23	155.71	
76		7.37	2187.50	2262.50	125.00	562.50	0.25	242.86	
79	7.70	7.80	1975.00	1950.00	100.00	375.00	0.19	220.15	
82	7.53	7.51	2112.50	1968.75	93.75	506.25	0.26	178.57	
85	7.70	7.34	1987.50	2518.75	156.25	693.75	0.28	124.29	
88	7.57	7.32	2000.00	1612.50	150.00	487.50	0.30	134.29	
91	7.58	7.48	1287.50	1925.00	150.00	562.50	0.29	138.57	
94	7.56	8.02	1506.25	1275.00	62.50	337.50	0.26	118.57	
97	7.62	7.95	1487.50	1812.50	100.00	337.50	0.19	138.57	
100	7.57	7.86	2218.75	1412.50	112.50	281.25	0.20	125.71	
103	7.73	7.83	1250.00	2181.25	112.50	300.00	0.14	71.43	
106	7.81	8.02	2912.50	1600.00	137.50	543.75	0.34	47.14	
109	6.99	7.42	1956.25	2037.50	431.25	318.75	0.16	121.43	
112	7.78	7.76	2000.00	2112.50	100.00	300.00	0.14	85.71	
115	7.74	8.03	2262.50	2162.50	125.00	318.75	0.15	65.71	
118	7.89	7.81	2225.00	2062.50	112.50	281.25	0.14	62.86	
124	7.93	7.67	3062.50	3925.00	75.00	787.50	0.20	770.00	
127	7.67	7.89	4975.00	3787.50	137.50	731.25	0.19	490.00	
130	7.83	7.75	3231.25	4250.00	131.25	412.50	0.10	320.00	

วันระบบ	พารามิเตอร์								
	พีเอช		ความเข้มข้นค่า (มก./ล.)		ความเข้มข้นกรด (มก./ล.)		กรดต่อต่าง ขาออก	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	โออาร์พี (mV)
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก			
133	7.91	7.95	2887.50	3800.00	100.00	150.00	0.04	370.00	
136	7.89	7.91	4200.00	4425.00	125.00	468.75	0.11	285.00	
139	7.84	7.69	3200.00	4425.00	112.50	137.50	0.03	220.00	
142	8.03	7.59	3350.00	4300.00	87.50	162.50	0.04	260.00	
145	7.64	8.20	2900.00	4300.00	87.50	337.50	0.08	365.00	
148	7.91	8.03	3150.00	4550.00	112.50	175.00	0.04	225.00	
151	7.87	7.62	3750.00	4550.00	87.50	162.50	0.04	185.00	
154	7.94	8.08	4050.00	4925.00	87.50	393.75	0.08	240.00	
157	8.01	7.67	5325.00	4425.00	112.50	125.00	0.03	380.00	
160	7.95	7.87	3575.00	4437.50	100.00	87.50	0.02	240.00	
163	8.00	7.52	3900.00	4225.00	87.50	112.50	0.03	200.00	
166	7.89	7.85	3050.00	4925.00	75.00	125.00	0.03	265.00	
169	7.84	8.10	3050.00	4000.00	75.00	87.50	0.02	140.00	-81.00
172	7.92	7.81	2875.00	3600.00	87.50	100.00	0.03	370.00	-330.50
175	7.70	7.90	2425.00	3850.00	75.00	137.50	0.04	185.00	-343.20
178	7.89	8.01	2425.00	3425.00	112.50	137.50	0.04	215.00	-130.40
181	7.78	7.65	3175.00	3300.00	75.00	100.00	0.03	130.00	44.50
184	7.82	7.89	2825.00	4550.00	87.50	175.00	0.04	215.00	-291.90
187	7.88	7.77	2875.00	4050.00	137.50	100.00	0.02	140.00	-341.60
190	7.78	8.10	2400.00	3775.00	112.50	137.50	0.04	170.00	-160.80
193	7.81	7.93	2725.00	2900.00	75.00	62.50	0.02	140.00	
196	7.96	7.72	3975.00	3800.00	137.50	87.50	0.02	120.00	-147.80
199	7.92	8.14	4050.00	4250.00	100.00	431.25	0.10	620.00	2.90
202	7.91	8.03	3375.00	3925.00	100.00	112.50	0.03	135.00	-302.50
205	7.88	8.00	3125.00	3975.00	112.50	175.00	0.04	160.00	-56.00
208	7.86	7.61	3150.00	4025.00	100.00	281.25	0.07	205.00	-296.30
211	7.92	7.85	3400.00	3950.00	87.50	125.00	0.03	195.00	-56.70
214	7.92	7.97	2975.00	3900.00	150.00	162.50	0.04	145.00	-88.90
217	7.88	7.67	3100.00	3450.00	100.00	100.00	0.03	260.00	-261.00
220	7.86	7.52	2925.00	4200.00	137.50	112.50	0.03	280.00	-140.40
223	7.95	8.22	2625.00	4725.00	137.50	137.50	0.03	735.00	20.20
226	7.83	7.73	3500.00	3100.00	300.00	112.50	0.04	180.00	-285.40
229	7.88	7.43	3950.00	4225.00	162.50	150.00	0.04	115.00	-20.00
232	7.88	7.42	4075.00	4250.00	150.00	150.00	0.04	145.00	-157.50
235	7.86	7.81	3350.00	1650.00	137.50	162.50	0.10	320.00	58.80

วันระบบ	พารามิเตอร์								
	พีเอช		ความเข้มข้นด่าง (มก./ล.)		ความเข้มข้นกรด (มก./ล.)		กรดต่อด่าง	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	โออาร์พี (mV)
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก			
238	7.78	8.14	2975.00	4425.00	137.50	356.25	0.08	235.00	6.30
241	7.70	7.83	2300.00	4425.00	87.50	125.00	0.03	65.00	-27.90
244	7.63	7.51	1900.00	3150.00	112.50	137.50	0.04	165.00	-29.90
247	7.56	7.60	4050.00	2525.00	125.00	112.50	0.04	240.00	-100.70
249	7.71	7.65	3725.00	3250.00	137.50	112.50	0.03	190.00	-20.00
251	7.88	7.82	4000.00	4225.00	150.00	150.00	0.04	310.00	-80.00
253	7.86	7.71	3425.00	4200.00	137.50	137.50	0.03	195.00	-80.10
255	7.75	8.00	3650.00	4250.00	112.50	137.50	0.03	205.00	-20.80
257	7.86	7.92	3025.00	3625.00	112.50	150.00	0.04	175.00	-112.70
259	7.63	7.80	2375.00	3600.00	150.00	162.50	0.05	115.00	-13.20
261	7.82	7.75	2950.00	3425.00	137.50	175.00	0.05	160.00	9.70
263	7.62	7.80	2200.00	3350.00	125.00	125.00	0.04	230.00	-62.40
265	7.59	7.84	1900.00	3975.00	100.00	393.75	0.10	130.00	-44.30
267	7.80	7.96	2800.00	3325.00	100.00	162.50	0.05	255.00	-63.20
268	7.77	7.84	2825.00	3725.00	100.00	87.50	0.02	200.00	-46.20
269	7.81	7.73	2650.00	3400.00	125.00	125.00	0.04	195.00	-192.50
270	7.72	7.64	2550.00	3375.00	112.50	112.50	0.03	170.00	-84.00
271	7.79	7.56	2975.00	3175.00	162.50	175.00	0.06	125.00	-143.20
272	7.77	7.60	2725.00	3150.00	150.00	112.50	0.04	140.00	-188.90
273	7.79	7.65	2625.00	3375.00	281.25	318.75	0.09	95.00	-151.70
274	7.75	7.75	2900.00	3525.00	137.50	137.50	0.04	225.00	-153.70
275	7.78	7.68	2450.00	3500.00	162.50	125.00	0.04	145.00	-132.90
276	7.96	7.77	2825.00	3612.50	100.00	125.00	0.03	185.00	-121.60
277	7.78	7.71	2375.00	5000.00	112.50	150.00	0.03	245.00	-275.20
278	7.78	7.64	2775.00	3275.00	100.00	162.50	0.05	200.00	-127.60
279	7.78	7.69	3050.00	3250.00	175.00	125.00	0.04	165.00	-208.80
280	7.72	7.69	2475.00	3375.00	150.00	150.00	0.04	220.00	-136.70
281	7.68	7.59	2550.00	3250.00	150.00	150.00	0.05	150.00	-180.10

ตารางที่ ง.11 ซีไอดีเข้า-ออก ของชุดการทดลองที่ 3 ตลอดการทดลอง

วันระบบ	ซีไอดี					
	ความเข้มข้นขาเข้า		ความเข้มข้นขาออก		ประสิทธิภาพ	
	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	ร้อยละ (%)
6	684.65	210.49	327.44	147.34	357.21	52.17
8	907.91	21.05	297.67	42.10	610.23	67.21
10	848.37	63.15	439.07	10.52	409.30	48.25
13	1049.30	52.62	29.77	#DIV/0!	1019.53	97.16
16	863.26	21.05	119.07	147.34	744.19	86.21
19	974.88	31.57	44.65	84.20	930.23	95.42
23	934.82	127.94	75.39	0.00	859.43	91.94
26	4561.02	0.00	3882.52	0.00	678.50	14.88
29	4561.02	0.00	4070.99	106.62	490.03	10.74
34	1028.57	114.09	625.21	57.04	403.36	39.22
37	641.31	16.69	314.75	166.92	326.56	50.92
40	649.18	27.82	393.44	456.26	255.74	39.39
43	747.54	445.13	432.79	0.00	314.75	42.11
46	983.61	55.64	373.77	0.00	609.84	62.00
49	708.20	55.64	236.07	0.00	472.13	66.67
52	629.51	0.00	413.11	27.82	216.39	34.37
55	826.23	0.00	570.49	250.39	255.74	30.95
58	892.80	95.04	566.40	40.73	326.40	36.56
61	979.20	54.31	768.00	81.46	211.20	21.57
64	902.40	0.00	710.40	54.31	192.00	21.28
67	1029.96	13.74	505.26	13.74	524.70	50.94
70	961.94	137.41	583.00	96.19	378.95	39.39
73	817.39	0.00	226.09	24.60	591.30	72.34
76	817.39	73.79	243.48	49.19	573.91	70.21
79	819.51	27.59	331.71	27.59	487.80	59.52
82	858.54	27.59	312.20	0.00	546.34	63.64
85	803.23	0.00	551.61	82.12	251.61	31.33
88	977.42	27.37	454.84	0.00	522.58	53.47
91	914.29	26.94	400.00	53.87	514.29	56.25
94	954.29	29.63	295.24	13.47	659.05	69.06
97	735.48	27.37	212.90	54.74	522.58	71.05
100	735.48	27.37	425.81	27.37	309.68	42.11
103	812.16	35.30	441.60	54.31	370.56	45.63

วันระบบ	ซีไอดี					
	ความเข้มข้นขาเข้า		ความเข้มข้นขาออก		ประสิทธิภาพ	
	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	ร้อยละ (%)
106	921.60	81.46	345.60	27.15	576.00	62.50
109	756.92	26.11	92.31	26.11	664.62	87.80
112	738.46	0.00	36.92	52.22	701.54	95.00
115	960.00	56.57	220.00	28.28	740.00	77.08
118	910.00	14.14	200.00	28.28	710.00	78.02
124	4839.02	1103.78	2965.85	220.76	1873.17	38.71
127	4995.12	662.27	2653.66	441.51	2341.46	46.87
130	3628.35	213.80	755.91	0.00	2872.44	79.17
133	4081.89	427.60	1209.45	213.80	2872.44	70.37
136	4881.36	460.22	1464.41	230.11	3416.95	70.00
139	4555.93	0.00	1464.41	230.11	3091.53	67.86
142	4601.65	0.00	1269.42	224.40	3332.23	72.41
145	3966.94	0.00	952.07	224.40	3014.88	76.00
148	4194.96	228.18	645.38	228.18	3549.58	84.62
151	4194.96	228.18	1129.41	0.00	3065.55	73.08
154	4517.65	228.18	806.72	456.35	3710.92	82.14
157	4125.62	897.62	634.71	448.81	3490.91	84.62
160	3887.60	561.01	634.71	897.62	3252.89	83.67
163	4125.62	448.81	1269.42	0.00	2856.20	69.23
166	4760.33	897.62	476.03	673.21	4284.30	90.00
169	4335.48	0.00	464.52	218.98	3870.97	89.29
172	4645.16	0.00	309.68	0.00	4335.48	93.33
175	4490.32	656.93	619.35	437.95	3870.97	86.21
178	4393.22	230.11	813.56	690.33	3579.66	81.48
181	4067.80	230.11	1383.05	115.05	2684.75	66.00
184	4067.80	230.11	976.27	460.22	3091.53	76.00
187	3905.08	230.11	325.42	115.06	3579.66	91.67
190	4180.65	218.98	0.00	0.00	4180.65	100.00
193	4335.48	0.00	154.84	656.93	4180.65	96.43
196	2632.26	218.98	1238.71	437.95	1393.55	52.94
199	3280.00	113.14	480.00	226.27	2800.00	85.37
202	3120.00	113.14	240.00	113.14	2880.00	92.31
205	2731.71	110.38	0.00	0.00	2731.71	100.00
208	2575.61	110.38	156.10	0.00	2419.51	93.94
211	3019.35	109.49	464.52	218.98	2554.84	84.62
214	3096.77	0.00	309.68	0.00	2787.10	90.00

วันระบบ	ซีไอดี					
	ความเข้มข้นขาเข้า		ความเข้มข้นขาออก		ประสิทธิภาพ	
	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	ร้อยละ (%)
217	2941.94	0.00	464.52	218.98	2477.42	84.21
220	2809.76	220.76	468.29	220.76	2341.46	83.33
223	3512.20	551.89	390.24	110.38	3121.95	88.89
226	3200.00	110.38	468.29	220.76	2731.71	85.37
229	2887.80	110.38	312.20	0.00	2575.61	89.19
232	3019.35	109.49	309.68	0.00	2709.68	89.74
235	3019.35	109.49	309.68	109.49	2709.68	89.74
238	2688.00	0.00	76.80	0.00	2611.20	97.14
241	2720.00	226.27	480.00	0.00	2240.00	82.35
244	2880.00	0.00	400.00	113.14	2480.00	86.11
247	2240.00	0.00	400.00	113.14	1840.00	82.14
249	2240.00	0.00	480.00	0.00	1760.00	78.57
251	2300.83	112.20	99.17	28.05	2201.65	95.69
253	2142.15	112.20	119.01	112.20	2023.14	94.44
255	2380.17	224.40	99.17	28.05	2280.99	95.83
257	2322.58	437.95	77.42	0.00	2245.16	96.67
259	2167.74	0.00	58.06	27.37	2109.68	97.32
261	2245.16	109.49	174.19	27.37	2070.97	92.24
263	2116.54	106.90	94.49	0.00	2022.05	95.54
265	2267.72	106.90	94.49	0.00	2173.23	95.83
267	1040.00	0.00	60.00	28.28	980.00	94.23
268	1060.00	28.28	80.00	0.00	980.00	92.45
269	1022.95	0.00	35.41	5.56	987.54	96.54
270	1081.97	27.82	47.21	0.00	1034.75	95.64
271	1120.00	0.00	52.00	5.66	1068.00	95.36
272	1160.00	0.00	48.00	0.00	1112.00	95.86
273	1200.00	27.82	47.21	11.13	1152.79	96.07
274	1160.66	27.82	59.02	5.56	1101.64	94.92
275	1140.98	0.00	43.28	5.56	1097.70	96.21
276	1200.00	27.82	43.28	5.56	1156.72	96.39
277	1160.00	0.00	28.00	39.60	1132.00	97.59
278	1120.00	0.00	52.00	5.66	1068.00	95.36
279	1200.00	56.57	40.00	0.00	1160.00	96.67
280	1120.00	0.00	48.00	11.31	1072.00	95.71
281	1140.00	28.28	44.00	16.97	1096.00	96.14

ตารางที่ ง.12 ผลการติดตามพารามิเตอร์อื่นๆ ของชุดการทดลองที่ 3

วันระบบ	พารามิเตอร์								
	พีเอช		ความเข้มข้นต่าง (มก./ล.)		ความเข้มข้นกรด (มก./ล.)		กรดต่อต่าง ขาออก	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	โออาร์พี (mV)
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก			
3	8.43	8.66	1887.50	2593.75	156.25	590.63	0.23	0.00	
6	8.16	8.46	2443.75	1050.00	31.25	375.00	0.36	0.00	
23	7.72	8.51	712.50	2012.50	175.00	106.25	0.05	0.00	
26	7.17	5.25	137.50	500.00	125.00	993.75	1.99	0.00	
34	8.27	8.40	2812.50	4325.00	100.00	337.50	0.08	90.00	
37	8.45	8.55	2212.50	2968.75	75.00	300.00	0.10	122.86	
40	8.79	8.77	3725.00	2550.00	75.00	150.00	0.06	80.44	
43	8.24	8.77	1437.50	3887.50	50.00	609.38	0.16	14.29	
46	8.39	8.42	1525.00	1837.50	87.50	337.50	0.18	8.57	
49	8.51	8.40	3412.50	1968.75	281.25	525.00	0.27	31.43	
52	8.45	8.33	2225.00	3262.50	112.50	768.75	0.24	32.86	
55	8.34	8.42	1787.50	2037.50	87.50	525.00	0.26	45.71	
58	8.28	8.53	2437.50	2062.50	137.50	562.50	0.27	60.00	
61	8.40	7.97	2562.50	2387.50	125.00	450.00	0.19	41.43	
64	7.88	7.37	3050.00	2462.50	137.50	675.00	0.27	50.00	
67	8.08	7.66	2425.00	2293.75	125.00	496.88	0.22	135.71	
70	7.86	7.37	2400.00	2387.50	100.00	515.63	0.22	198.57	
73		7.71	2162.50	2162.50	100.00	468.75	0.22	157.14	
76		7.75	2250.00	2168.75	112.50	600.00	0.28	160.00	
79	7.70	7.51	2268.75	2150.00	137.50	487.50	0.23	168.28	
82	7.60	7.70	1900.00	2006.25	100.00	431.25	0.21	178.57	
85	7.65	7.36	1787.50	1812.50	0.00	543.75	0.30	194.29	
88	7.63	7.68	1937.50	1800.00	100.00	506.25	0.28	157.14	
91	7.53	7.50	1425.00	1950.00	100.00	337.50	0.17	131.43	
94	7.51	8.08	1600.00	1587.50	81.25	300.00	0.19	135.71	
97	7.57	7.93	2062.50	2062.50	112.50	356.25	0.17	171.43	
100	7.66	7.83	1475.00	2075.00	112.50	175.00	0.08	198.57	
103	7.65	7.79	1400.00	2250.00	112.50	562.50	0.25	75.71	
106	7.81	7.91	1800.00	1287.50	100.00	393.75	0.31	94.29	
109	6.92	7.35	1987.50	1975.00	393.75	506.25	0.26	75.71	
112	7.70	8.02	2075.00	2050.00	125.00	175.00	0.09	95.71	
115	7.82	8.02	2287.50	2175.00	112.50	281.25	0.13	117.14	

วันระบบ	พารามิเตอร์								
	พีเอช		ความเข้มข้นด่าง (มก./ล.)		ความเข้มข้นกรด (มก./ล.)		กรดต่อด่าง	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	โออาร์พี (mV)
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก			
118	7.87	8.02	2225.00	2212.50	112.50	150.00	0.07	54.29	
124	7.88	7.88	3787.50	3637.50	75.00	1734.38	0.48	950.00	
127	7.94	7.94	3018.75	56.25	100.00		0.00	230.00	
130	8.06	7.74	4950.00	3975.00	125.00	1143.75	0.29	270.00	
133	8.02	7.91	3961.25	4062.50	150.00	862.50	0.21	310.00	
136	7.99	7.93	3600.00	4925.00	75.00	956.25	0.19	425.00	
139	7.95	8.03	3275.00	4725.00	137.50	712.50	0.15	170.00	
142	8.02	7.67	5550.00	4400.00	100.00	825.00	0.19	250.00	
145	7.86	8.18	2950.00	5025.00	81.25	693.75	0.14	305.00	
148	7.82	8.25	2925.00	4325.00	75.00	581.25	0.13	275.00	
151	8.05	8.12	4150.00	5275.00	112.50	562.50	0.11	265.00	
154	7.94	8.21	4925.00	4975.00	137.50	506.25	0.10	220.00	
157	8.09	8.15	3725.00	4525.00	62.50	675.00	0.15	385.00	
160	8.05	8.07	3950.00	4225.00	125.00	125.00	0.03	245.00	
163	8.09	7.92	4625.00	4400.00	137.50	600.00	0.14	175.00	
166	7.92	8.25	2750.00	5525.00	100.00	562.50	0.10	290.00	
169	7.67	7.84	2775.00	3200.00	62.50	162.50	0.05	200.00	-68.00
172	7.96	8.24	2375.00	4125.00	87.50	281.25	0.07	540.00	-298.90
175	7.89	8.01	2100.00	3800.00	62.50	318.75	0.08	310.00	-264.30
178	7.94	8.29	2550.00	3500.00	100.00	137.50	0.04	250.00	-243.60
181	7.84	8.17	1975.00	4550.00	100.00	175.00	0.04	195.00	-210.00
184	7.63	8.28	2975.00	2950.00	112.50	112.50	0.04	190.00	-210.80
187	7.83	8.13	2475.00	3300.00	125.00	100.00	0.03	220.00	-137.50
190	7.78	8.12	2675.00	4150.00	137.50	125.00	0.03	350.00	-200.10
193	7.88	8.24	2300.00	3325.00	75.00	137.50	0.04	310.00	
196	7.96	7.81	3225.00	3500.00	112.50	100.00	0.03	170.00	-229.70
199	8.00	7.74	3225.00	3875.00	87.50	125.00	0.03	165.00	-317.40
202	7.92	7.80	3050.00	3250.00	100.00	137.50	0.04	250.00	-355.10
205	7.85	7.75	3575.00	3625.00	125.00	162.50	0.04	185.00	-345.00
208	7.89	7.73	1500.00	3275.00	112.50	281.25	0.09	235.00	-367.50
211	7.87	7.66	2350.00	2600.00	137.50	125.00	0.05	125.00	-357.50
214	7.67	7.66	2500.00	2950.00	137.50	137.50	0.05	425.00	-340.10
217	7.84	7.54	3525.00	2600.00	100.00	100.00	0.04	275.00	-344.80
220	7.86	7.94	2425.00	6900.00	150.00	150.00	0.02	550.00	-35.90
223	7.97	7.73	2450.00	3300.00	125.00	150.00	0.05	360.00	-107.70

วันระบบ	พารามิเตอร์								
	พีเอช		ความเข้มข้นด่าง (มก./ล.)		ความเข้มข้นกรด (มก./ล.)		กรดต่อต่าง ขาออก	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	โออาร์พี (mV)
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก			
226	7.84	7.81	3925.00	2850.00	281.25	112.50	0.04	280.00	-305.40
229	7.85	7.48	3975.00	3925.00	281.25	137.50	0.04	195.00	-323.90
232	7.84	7.55	4250.00	4300.00	125.00	137.50	0.03	240.00	-303.60
235	7.89	7.60	1900.00	3400.00	137.50	162.50	0.05	380.00	-336.70
238	7.81	7.55	2800.00	3850.00	112.50	125.00	0.03	375.00	-139.80
241	7.71	7.66	2325.00	3925.00	137.50	112.50	0.03	395.00	-207.20
244	7.65	7.59	1850.00	3200.00	100.00	125.00	0.04	230.00	-284.20
247	7.69	7.67	4300.00	3675.00	137.50	175.00	0.05	220.00	-237.40
249	7.81	7.58	3525.00	4150.00	150.00	137.50	0.03	275.00	-336.60
251	7.91	7.47	3700.00	3925.00	150.00	137.50	0.04	495.00	-137.70
253	7.82	7.48	2875.00	4300.00	62.50	318.75	0.07	220.00	-318.40
255	7.80	7.38	3725.00	4450.00	112.50	125.00	0.03	275.00	-343.70
257	7.93	7.55	4125.00	4075.00	150.00	356.25	0.09	310.00	-94.40
259	7.67	7.85	2975.00	4125.00	162.50	137.50	0.03	210.00	-61.20
261	7.79	7.83	2675.00	4125.00	137.50	300.00	0.07	285.00	13.30
263	7.65	7.70	2275.00	7200.00	100.00	162.50	0.02	500.00	-168.00
265	7.56	7.88	1925.00	6100.00	137.50	562.50	0.09	500.00	-109.80
267	7.79	8.02	2825.00	4000.00	137.50	137.50	0.03	305.00	-86.40
268	7.70	7.80	2950.00	4450.00	112.50	162.50	0.04	270.00	-68.10
269	7.74	7.64	2900.00	3900.00	112.50	150.00	0.04	240.00	-172.50
270	7.69	7.55	2775.00	4225.00	112.50	150.00	0.04	190.00	-255.30
271	7.84	7.53	2500.00	3550.00	112.50	137.50	0.04	210.00	-171.80
272	7.81	7.39	2475.00	3625.00	125.00	137.50	0.04	215.00	-317.10
273	7.82	7.60	3000.00	3350.00	175.00	175.00	0.05	220.00	-288.00
274	7.83	7.36	2775.00	3850.00	125.00	125.00	0.03	540.00	-349.70
275	7.78	7.37	2625.00	3650.00	162.50	281.25	0.08	305.00	-344.20
276	7.95	7.52	2775.00	3600.00	100.00	137.50	0.04	240.00	-252.50
277	7.75	7.39	2250.00	3500.00	112.50	137.50	0.04	275.00	-336.50
278	7.79	7.60	2700.00	3575.00	137.50	175.00	0.05	260.00	-326.80
279	7.83	7.49	2550.00	3475.00	137.50	150.00	0.04	190.00	-322.90
280	7.71	7.42	2600.00	3675.00	137.50	125.00	0.03	360.00	-282.30
281	7.71	7.44	2550.00	3400.00	125.00	112.50	0.03	260.00	-333.60

ตารางที่ ง.13 ซีไอดีเข้า-ออก ของชุดการทดลองที่ 4 ตลอดการทดลอง

วันระบบ	ซีไอดี					
	ความเข้มข้นขาเข้า		ความเข้มข้นขาออก		ประสิทธิภาพ	
	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	ปริมาณ (มก./ล.)	ร้อยละ (%)
3	944.52	109.49	727.74	65.69	216.77	22.95
6	1056.74	252.59	267.91	42.10	788.84	74.65
8	982.33	84.20	684.65	210.49	297.67	30.30
10	1056.74	147.34	424.19	73.67	632.56	59.86
13	1190.70	21.05	491.16	231.54	699.53	58.75
23	1296.69	21.32	294.02	10.66	1002.67	77.33
26	4711.80	0.00	4711.80	0.00	0.00	0.00
29	4711.80	0.00	2789.38	53.31	1922.41	40.80
34	826.89	57.04	524.37	484.87	302.52	36.59
37	760.00	139.10	708.20	111.28	51.80	6.82
40	786.89	278.21	275.41	55.64	511.48	65.00
43	747.54	445.13	432.79	111.28	314.75	42.11
46	983.61	55.64	432.79	27.82	550.82	56.00
49	865.57	55.64	314.75	55.64	550.82	63.64
52	727.87	139.10	531.15	27.82	196.72	27.03
55	826.23	0.00	491.80	111.28	334.43	40.48
58	921.60	27.15	777.60	13.58	144.00	15.62
61	979.20	0.00	614.40	0.00	364.80	37.25
64	883.20	27.15	624.00	13.58	259.20	29.35
67	923.08	0.00	612.15	27.48	310.93	33.68
70	1010.53	41.22	670.45	27.48	340.08	33.65
73	791.30	12.30	417.39	147.57	373.91	47.25
76	834.78	98.38	278.26	49.19	556.52	66.67
79	936.59	27.59	321.95	13.80	614.63	65.62
82	956.10	55.19	273.17	27.59	682.93	71.43
85	822.58	27.37	396.77	27.37	425.81	51.76
88	938.71	27.37	435.48	27.37	503.23	53.61
91	952.38	80.81	361.90	53.87	590.48	62.00
94	800.00	26.94	438.10	0.00	361.90	45.24
97	735.48	27.37	387.10	136.86	348.39	47.37
100	851.61	27.37	425.81	27.37	425.81	50.00
103	825.60	54.31	172.80	0.00	652.80	79.07
106	902.40	54.31	422.40	27.15	480.00	53.19

วันระบบ	ซีไอดี					
	ความเข้มข้นขาเข้า		ความเข้มข้นขาออก		ประสิทธิภาพ	
	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	ปริมาณ (มก./ล.)	ร้อยละ (%)
109	775.38	52.22	55.38	78.33	720.00	92.86
112	738.46	26.11	129.23	0.00	609.23	82.50
115	940.00	28.28	280.00	0.00	660.00	70.21
118	1030.00	127.28	180.00	28.28	850.00	82.52
124	6556.10	220.76	5775.61	883.02	780.49	11.90
127	7180.49	220.76	5073.17	331.13	2107.32	29.35
130	6803.15	0.00	2418.90	213.80	4384.25	64.44
133	7407.87	0.00	1965.35	0.00	5442.52	73.47
136	7322.03	690.33	2928.81	0.00	4393.22	60.00
139	6996.61	230.11	2603.39	460.22	4393.22	62.79
142	6981.82	224.40	2380.17	448.81	4601.65	65.91
145	6664.46	224.40	2380.17	0.00	4284.30	64.29
148	7099.16	228.18	1774.79	0.00	5324.37	75.00
151	7421.85	228.18	1452.10	0.00	5969.75	80.43
154	7583.19	456.35	1129.41	456.35	6453.78	85.11
157	6823.14	224.40	158.68	224.40	6664.46	97.67
160	6902.48	561.01	952.07	897.62	5950.41	86.21
163	6981.82	448.81	1904.13	448.81	5077.69	72.73
166	7140.50	224.40	2380.17	224.40	4760.33	66.67
169	6812.90	437.95	619.35	218.98	6193.55	90.91
172	7432.26	437.95	1083.87	218.98	6348.39	85.42
175	7122.58	875.90	1083.87	218.98	6038.71	84.78
178	6671.19	690.33	650.85	0.00	6020.34	90.24
181	6345.76	230.11	650.85	230.11	5694.92	89.74
184	6671.19	230.11	976.27	460.22	5694.92	85.37
187	6508.47	460.22	813.56	230.11	5694.92	87.50
190	6503.23	875.90	774.19	656.93	5729.03	88.10
193	5729.03	218.98	619.35	0.00	5109.68	89.19
196	4645.16	437.95	1238.71	0.00	3406.45	73.33
199	4880.00	113.14	640.00	226.27	4240.00	86.89
202	4640.00	226.27	720.00	113.14	3920.00	84.48
205	4448.78	110.38	234.15	331.13	4214.63	94.74
208	4448.78	110.38	234.15	110.38	4214.63	94.74
211	4490.32	0.00	774.19	218.98	3716.13	82.76
214	4490.32	0.00	541.94	109.49	3948.39	87.93
217	4645.16	437.95	696.77	109.49	3948.39	85.00

วันระบบ	ซีไอดี					
	ความเข้มข้นขาเข้า		ความเข้มข้นขาออก		ประสิทธิภาพ	
	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	เฉลี่ย (มก./ล.)	SD (มก./ล.)	ปริมาณ (มก./ล.)	ร้อยละ (%)
220	4917.07	331.13	624.39	220.76	4292.68	87.30
223	4839.02	220.76	858.54	110.38	3980.49	82.26
226	4604.88	110.38	624.39	0.00	3980.49	86.44
229	4604.88	110.38	624.39	220.76	3980.49	86.44
232	4722.58	328.46	541.94	109.49	4180.65	88.52
235	4800.00	218.98	619.35	218.98	4180.65	87.10
238	4454.40	108.61	307.20	108.61	4147.20	93.10
241	4720.00	113.14	840.00	56.57	3880.00	82.20
244	4720.00	339.41	720.00	113.14	4000.00	84.75
247	3360.00	0.00	1040.00	113.14	2320.00	69.05
249	3440.00	339.41	960.00	226.27	2480.00	72.09
251	3728.93	112.20	614.88	28.05	3114.05	83.51
253	3728.93	336.61	694.21	84.15	3034.71	81.38
255	3490.91	0.00	476.03	0.00	3014.88	86.36
257	3251.61	218.98	425.81	54.74	2825.81	86.90
259	3406.45	0.00	406.45	27.37	3000.00	88.07
261	3406.45	0.00	367.74	27.37	3038.71	89.20
263	3552.76	213.80	377.95	26.73	3174.80	89.36
265	3477.17	106.90	359.06	53.45	3118.11	89.67
267	1760.00	0.00	180.00	28.28	1580.00	89.77
268	1680.00	0.00	220.00	28.28	1460.00	86.90
269	1691.80	55.64	224.26	5.56	1467.54	86.74
270	1613.11	55.64	212.46	11.13	1400.66	86.83
271	1840.00	0.00	336.00	11.31	1504.00	81.74
272	1920.00	113.14	316.00	5.66	1604.00	83.54
273	1809.84	0.00	310.82	5.56	1499.02	82.83
274	1809.84	0.00	271.48	5.56	1538.36	85.00
275	1809.84	0.00	279.34	5.56	1530.49	84.57
276	1809.84	0.00	326.56	5.56	1483.28	81.96
277	1880.00	56.57	232.00	0.00	1648.00	87.66
278	1800.00	169.71	268.00	5.66	1532.00	85.11
279	1880.00	56.57	224.00	11.31	1656.00	88.09
280	1800.00	56.57	216.00	0.00	1584.00	88.00
281	1880.00	56.57	236.00	5.66	1644.00	87.45

ตารางที่ ง.14 ผลการติดตามพารามิเตอร์อื่นๆ ของชุดการทดลองที่ 4

วันระบบ	พารามิเตอร์								
	พีเอช		ความเข้มข้นต่าง (มก./ล.)		ความเข้มข้นกรด (มก./ล.)		กรดต่อต่าง ชาออก	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	โออาร์พี (mV)
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก			
3	8.40	8.62	1387.50	1837.50	162.50	506.25	0.28	0.00	
6	8.05	8.03	2550.00	1662.50	337.50	150.00	0.09	0.00	
10	8.10	8.29	3737.50	3162.50	928.13	459.38	0.15	0.00	
23	7.11	8.54	325.00	2812.50	162.50	156.25	0.06	0.00	
34	8.39	8.52	2956.25	4437.50	106.25	637.50	0.14	145.71	
37	8.70	8.53	2825.00	3137.50	62.50	487.50	0.16	8.57	
40	8.78	8.78	2368.75	2962.50	75.00	309.38	0.10	24.11	
43	8.44	8.68	2000.00	2418.75	62.50	543.75	0.22	34.29	
46	8.40	8.60	1975.00	2312.50	112.50	337.50	0.15	7.14	
49	8.53	8.48	2912.50	1837.50	300.00	515.63	0.28	35.71	
52	8.53	8.40	2337.50	2950.00	100.00	600.00	0.20	71.43	
55	8.37	8.48	1637.50	1900.00	100.00	581.25	0.31	50.00	
58	8.40	8.53	2400.00	2112.50	137.50	600.00	0.28	32.86	
61	8.44	7.97	2600.00	1412.50	125.00	100.00	0.07	45.71	
64	7.91	7.89	2637.50	2500.00	150.00	600.00	0.24	57.14	
67	8.04	7.76	2418.75	2287.50	125.00	375.00	0.16	135.71	
70	7.86	7.60	2400.00	2668.75	440.63	581.25	0.22	58.57	
73		7.69	2187.50	2037.50	125.00	450.00	0.22	194.29	
76		8.04	2437.50	2212.50	125.00	618.75	0.28	157.14	
79	7.70	7.58	2012.50	2056.25	356.25	440.63	0.21	162.82	
82	7.55	7.71	1650.00	2006.25	68.75	506.25	0.25	175.71	
85	7.57	7.16	2625.00	1650.00	156.25	618.75	0.38	128.57	
88	7.66	7.49	1900.00	2037.50	112.50	450.00	0.22	145.71	
91	7.53	7.51	1775.00	1800.00	100.00	450.00	0.25	198.57	
94	7.51	7.92	1625.00	2412.50	112.50	393.75	0.16	168.57	
97	7.69	7.95	1962.50	2837.50	93.75	393.75	0.14	111.43	
100	7.67	7.56	1487.50	1875.00	137.50	534.38	0.29	130.00	
103	7.62	7.93	1612.50	1825.00	100.00	150.00	0.08	64.29	
106	7.80	8.00	3237.50	1650.00	137.50	393.75	0.24	91.43	
109	6.96	7.36	1825.00	2025.00	356.25	393.75	0.19	67.14	
112	7.71	7.96	2562.50	1925.00	125.00	150.00	0.08	38.57	
115	7.82	8.02	2237.50	2212.50	87.50	162.50	0.07	90.00	

วันระบบ	พารามิเตอร์								
	พีเอช		ความเข้มข้นค่า (มก./ล.)		ความเข้มข้นกรด (มก./ล.)		กรดต่อต่าง ขาออก	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	โออาร์พี (mV)
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก			
118	7.85	7.99	2075.00	2075.00	75.00	100.00	0.05	105.71	
124	7.30	7.30	4462.50	3362.50	1256.25	3281.25	0.98	1050.00	
127	8.04	7.72	5787.50	3862.50	1162.50	3112.50	0.81	945.00	
130	8.05	7.67	4950.00	3787.50	125.00	1865.63	0.49	515.00	
133	8.05	7.78	5362.50	6025.00	125.00	1856.25	0.31	450.00	
136	8.06	7.97	6050.00	5725.00	75.00	1725.00	0.30	415.00	
139	8.04	7.94	4650.00	6550.00	100.00	1650.00	0.25	250.00	
142	8.11	7.65	5775.00	6775.00	112.50	1621.88	0.24	345.00	
145	7.93	7.81	5450.00	5750.00	125.00	1106.25	0.19	440.00	
148	7.95	8.12	5050.00	6075.00	87.50	1143.75	0.19	355.00	
151	8.08	8.31	5650.00	7050.00	112.50	956.25	0.14	405.00	
154	7.91	8.15	5500.00	6800.00	37.50	487.50	0.07	310.00	
157	7.90	8.18	6450.00	5900.00	150.00	150.00	0.03	395.00	
160	8.17	8.20	6575.00	6925.00	75.00	125.00	0.02	500.00	
163	8.17	8.05	6400.00	6250.00	150.00	1800.00	0.29	670.00	
166	7.95	8.20	3175.00	5975.00	87.50	1293.75	0.22	625.00	
169	7.62	7.97	3200.00	4375.00	75.00	787.50	0.18	385.00	-75.00
172	8.00	8.27	3375.00	4075.00	112.50	525.00	0.13	570.00	-206.20
175	8.05	7.70	3300.00	4775.00	75.00	731.25	0.15	380.00	-250.20
178	7.95	8.10	3150.00	4100.00	125.00	337.50	0.08	325.00	-230.10
181	7.86	8.35	2750.00	5050.00	75.00	162.50	0.03	400.00	-133.50
184	7.73	8.31	2650.00	4000.00	75.00	731.25	0.18	405.00	-272.20
187	8.00	7.98	3075.00	4075.00	100.00	637.50	0.16	200.00	-218.30
190	7.76	8.22	3750.00	4250.00	125.00	693.75	0.16	280.00	-220.80
193	7.93	7.72	2975.00	4450.00	106.25	675.00	0.15	570.00	
196	8.01	7.91	3850.00	4375.00	150.00	900.00	0.21	835.00	-361.20
199	8.00	7.73	3875.00	4175.00	100.00	281.25	0.07	195.00	-347.10
202	7.86	8.00	3325.00	4100.00	125.00	300.00	0.07	315.00	-256.60
205	7.87	7.88	3225.00	4000.00	100.00	318.75	0.08	205.00	-256.60
208	7.95	7.64	3000.00	3800.00	100.00	412.50	0.11	50.00	-365.60
211	7.84	7.57	2550.00	3850.00	112.50	375.00	0.10	270.00	-331.40
214	7.84	7.54	2725.00	3725.00	125.00	393.75	0.11	215.00	-327.40
217	7.88	7.64	3225.00	3350.00	100.00	356.25	0.11	265.00	-322.70
220	7.89	7.97	2775.00	4650.00	125.00	337.50	0.07	1370.00	-186.30
223	7.95	7.99	2925.00	3825.00	137.50	300.00	0.08	245.00	-26.70

วันระบบ	พารามิเตอร์								
	พีเอช		ความเข้มข้นด่าง (มก./ล.)		ความเข้มข้นกรด (มก./ล.)		กรดต่อต่าง ขาออก	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	โออาร์พี (mV)
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก			
226	7.89	7.66	3325.00	3350.00	150.00	175.00	0.05	225.00	-332.30
229	7.82	7.92	4000.00	3700.00	393.75	337.50	0.09	385.00	-60.20
232	7.87	7.41	3600.00	4600.00	150.00	137.50	0.03	820.00	-21.10
235	7.92	7.60	1625.00	3575.00	112.50	112.50	0.03	510.00	-286.60
238	7.86	7.42	3125.00	4475.00	125.00	337.50	0.08	970.00	-311.30
241	7.79	8.00	2925.00	4600.00	100.00	393.75	0.09	510.00	-50.20
244	7.71	7.61	2225.00	4125.00	100.00	356.25	0.09	635.00	-209.40
247	7.69	7.62	4100.00	4300.00	175.00	543.75	0.13	315.00	-76.80
249	7.79	7.54	3475.00	3875.00	125.00	337.50	0.09	235.00	-183.60
251	7.88	7.30	3750.00	4425.00	150.00	487.50	0.11	620.00	-337.80
253	7.90	7.81	3450.00	4450.00	87.50	450.00	0.10	355.00	-60.00
255	7.82	7.47	3625.00	4300.00	100.00	375.00	0.09	415.00	-122.20
257	7.88	7.45	3800.00	3975.00	112.50	412.50	0.10	495.00	-256.60
259	7.88	7.41	3325.00	4400.00	87.50	450.00	0.10	505.00	-335.40
261	7.90	7.81	3775.00	4825.00	137.50	412.50	0.09	545.00	-6.60
263	7.94	7.44	4150.00	5650.00	137.50	356.25	0.06	960.00	-330.10
265	7.85	7.58	3700.00	5900.00	87.50	356.25	0.06	660.00	-340.80
267	7.89	7.53	3325.00	5150.00	150.00	356.25	0.07	685.00	-344.20
268	7.87	7.37	3575.00	4025.00	137.50	337.50	0.08	325.00	-316.80
269	7.98	7.65	3750.00	4875.00	281.25	375.00	0.08	445.00	-276.40
270	7.83	7.51	2875.00	4925.00	112.50	431.25	0.09	320.00	-254.30
271	7.88	7.33	2900.00	3650.00	112.50	318.75	0.09	405.00	-332.90
272	7.82	7.32	2525.00	4600.00	100.00	337.50	0.07	335.00	-335.30
273	7.84	7.58	3200.00	3850.00	281.25	318.75	0.08	415.00	-338.20
274	7.83	7.37	3375.00	4400.00	150.00	337.50	0.08	580.00	-306.10
275	7.89	7.31	3600.00	4475.00	125.00	318.75	0.07	375.00	-342.40
276	7.95	7.45	3750.00	4075.00	137.50	281.25	0.07	545.00	-192.50
277	7.89	7.33	3850.00	4175.00	150.00	300.00	0.07	445.00	-326.00
278	7.87	7.54	3675.00	4350.00	150.00	300.00	0.07	370.00	-208.30
279	7.88	7.46	3900.00	4500.00	281.25	300.00	0.07	445.00	-192.90
280	7.88	7.33	3875.00	4300.00	100.00	281.25	0.07	500.00	-332.10
281	7.80	7.37	3175.00	4400.00	112.50	300.00	0.07	485.00	-302.60

บรรณานุกรม

- Ali, M., Oshiki, M., Rathnayake, L., Ishii, S., Satoh, H. และ Okabe, S. Rapid and successful start-up of anammox process by immobilizing the minimal quantity of biomass in PVA-SA gel beads. Water Res 79 (2015): 147-57.
- AZBAR, N., URSILLO, P. และ SPEECE, R.E. Effect of process configuration and substrate complexity on the performance of anaerobic process. Water Res 35(3) (2000): 817-829.
- Chaikasem, S., Jacob, P. และ Visvanathan, C. Performance improvement in a two-stage thermophilic anaerobic membrane bioreactor using PVA-gel as biocarrier. Desalination and Water Treatment 53(10) (2014): 2839-2849.
- Dong, C., Pan, Q., Zhao, T. และ Wang, Y. Effect of liquid upflow velocity and recirculation way on microaerobic EGSB reactor system treating actual coking wastewater. in 2012 2nd International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. Nanjing, China: IEEE, 2012.
- Emembolu, L., Nwabanne, J. และ Elijah, O. Kinetic Modeling of Anaerobic Digestion of Restaurant Waste Water. British Journal of Applied Science & Technology 21(4) (2017): 1-12.
- Fia, F.R.L., Borges, A.C., Matos, A.T.d., Duarte, I.C.S., Fia, R. และ Campos, L.C.d. <Development of biofilm in anaerobic reactors treating wastewater from coffee grain processing.pdf>. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 14(2) (2010): 210-217.
- Hoa, T.T.H., Khanh, L.N., Zhi-jun, L., Fujii, T., Rouse, J.D. และ Furukawa, K. Nitrogen removal by immobilized sludge using PVA-gel as biocarrier. Japanese Journal of Water Treatment Biology 42(3) (2006): 139-149.
- Işik, M. และ Sponza, D.T. Substrate removal kinetics in an upflow anaerobic sludge blanket reactor decolorising simulated textile wastewater. Process Biochemistry 40(3-4) (2005): 1189-1198.

- Jiang, M., Westerholm, M., Qiao, W., Wandera, S.M. และ Dong, R. High rate anaerobic digestion of swine wastewater in an anaerobic membrane bioreactor. Energy 193 (2020).
- Jr., C.P.L.G., Daigger, G.T. และ Lim, H.C. Biological wastewater treatment 2nd edition, revised and expanded. New York: Marcel Dekker, Inc., 1980.
- K., A.B., M., S. และ I., A. Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors. Appl Microbiol Biotechnol 43 (1995): 559-565.
- Ketheesan, B. และ Stuckey, D.C. Effects of Hydraulic/Organic Shock/Transient Loads in Anaerobic Wastewater Treatment: A Review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 45(24) (2015): 2693-2727.
- Khanh, D., Quan, L., Zhang, W., Hira, D. และ Furukawa, K. Effect of temperature on low-strength wastewater treatment by UASB reactor using poly(vinyl alcohol)-gel carrier. Bioresour Technol 102(24) (2011): 11147-54.
- Krakat, N., Demirel, B., Anjum, R. และ Dietz, D. Methods of ammonia removal in anaerobic digestion: a review. Water Sci Technol 76(7-8) (2017): 1925-1938.
- Kumar Singh, N., Singh, J., Bhatia, A. และ Kazmi, A.A. A pilot-scale study on PVA gel beads based integrated fixed film activated sludge (IFAS) plant for municipal wastewater treatment. Water Sci Technol 73(1) (2016): 113-23.
- Langer, S., Schropp, D., Bengelsdorf, F.R., Othman, M. และ Kazda, M. Dynamics of biofilm formation during anaerobic digestion of organic waste. Anaerobe 29 (2014): 44-51.
- Lettinga, G., Rebac, S. และ Zeeman, G. Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment. Trends in Biotechnology 19(9) (2001): 363-370.
- Levenspiel, O. Chemical reaction engineering 3rd edition. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- Metcalf และ Eddy. Wastewater Engineering 5th edition. Treatment and Resource Recovery. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and resource recovery, ed. 5th-edition. New York: McGraw-Hill, 2014.

- Pandian, M., NGO, H.-H. และ Pazhaniappan, S. <Substrate Removal Kinetics of an Anaerobic Hybrid Reactor Treating Pharmaceutical Wastewater.pdf>. Journal of Water Sustainability 1(3) (2011): 301-312.
- Pishgar, R., Najafpour, G.D., Neya, B.N., Bakhshi, Z. และ Mousavi, N. Effects of Organic Loading Rate and Hydraulic Retention Time on Treatment of Phenolic Wastewater in an Anaerobic Immobilized Fluidized Bed Reactor. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management 22(1) (2014): 40-49.
- Salama, Y., Chennaoui, M., Mountadar, M., Rihani, M. และ Assobhei, O. Influence of support media on COD and BOD removal from domestic wastewater using biological treatment in batch mode. Desalination and Water Treatment 54(1) (2014): 37-43.
- Sharma และ Pooja. Kinetic Model for Anaerobic Digestion of Distillery Spent Wash. American Journal of Chemical Engineering 4(6) (2016).
- Siqueira, L.M., Damiano, E.S. และ Silva, E.L. Influence of organic loading rate on the anaerobic treatment of sugarcane vinasse and biogas production in fluidized bed reactor. J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng 48(13) (2013): 1707-16.
- Smith, K.S. และ Ingram-Smith, C. Methanosaeta, the forgotten methanogen? Trends Microbiol 15(4) (2007): 150-5.
- Speece, R.E. Anaerobic Biotechnology and Odor/Corrosion Control for Municipalities and Industries. Tennessee: Archae Press, 2008.
- Wiegel, J. Temperature spans for growth Hypothesis and discussion. Microbiology Review 75 (1990): 155-170.
- Zhang, W., Xie, Q., Rouse, J.D., Qiao, S. และ Furukawa, K. Treatment of high-strength corn steep liquor using cultivated polyvinyl alcohol gel beads in an anaerobic fluidized-bed reactor. J Biosci Bioeng 107(1) (2009): 49-53.
- Ziganshin, A.M., et al. Reduction of the hydraulic retention time at constant high organic loading rate to reach the microbial limits of anaerobic digestion in various reactor systems. Bioresour Technol 217 (2016): 62-71.

Ziganshin, A.M., Ziganshina, E.E., Kleinstuber, S. และ Nikolausz, M. Comparative Analysis of Methanogenic Communities in Different Laboratory-Scale Anaerobic Digesters. *Archaea* 2016 (2016): 3401272.

โอภาสวัตชัย, ศ. การย่อยสลายและการผลิตก๊าซชีวภาพของขยะแบบไร้ออกซิเจนโดยแบคทีเรียชนิดชอบความร้อน. มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.

กรมควบคุมมลพิษ. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2542.

รุ่งกิจวัฒนากุล, พ. การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยระบบแอนแอโรบิกฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้เม็ดยางเป็นวัสดุตัวกลาง : ผลของอัตราสารอินทรีย์. มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

ศิรินุกุลวัฒนา, ธ. การบำบัดน้ำเสียซีโอไซด์ต่ำด้วยระบบแอนแอโรบิกฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้เม็ดยางเป็นวัสดุตัวกลางโดยไม่มีกรหมุนเวียนน้ำภายใน. มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.

อุดมสินโรจน์, เ. วิศวกรรมกำจัดน้ำเสียเล่ม 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรังสิต, 2543.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชนพงศ์ อุปถัมภ์ภานนท์
วัน เดือน ปี เกิด	7 กรกฎาคม 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2559
ที่อยู่ปัจจุบัน	23/379 ประชาอุทิศ 76 ทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY