



การศึกษาแบบจำลองจลพลศาสตร์ของการกำจัดไนโตรเจนและกำลงไฟฟ้าในกระบวนการบำบัดน้ำ
ปัสสาวะด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบกรองชีวภาพ

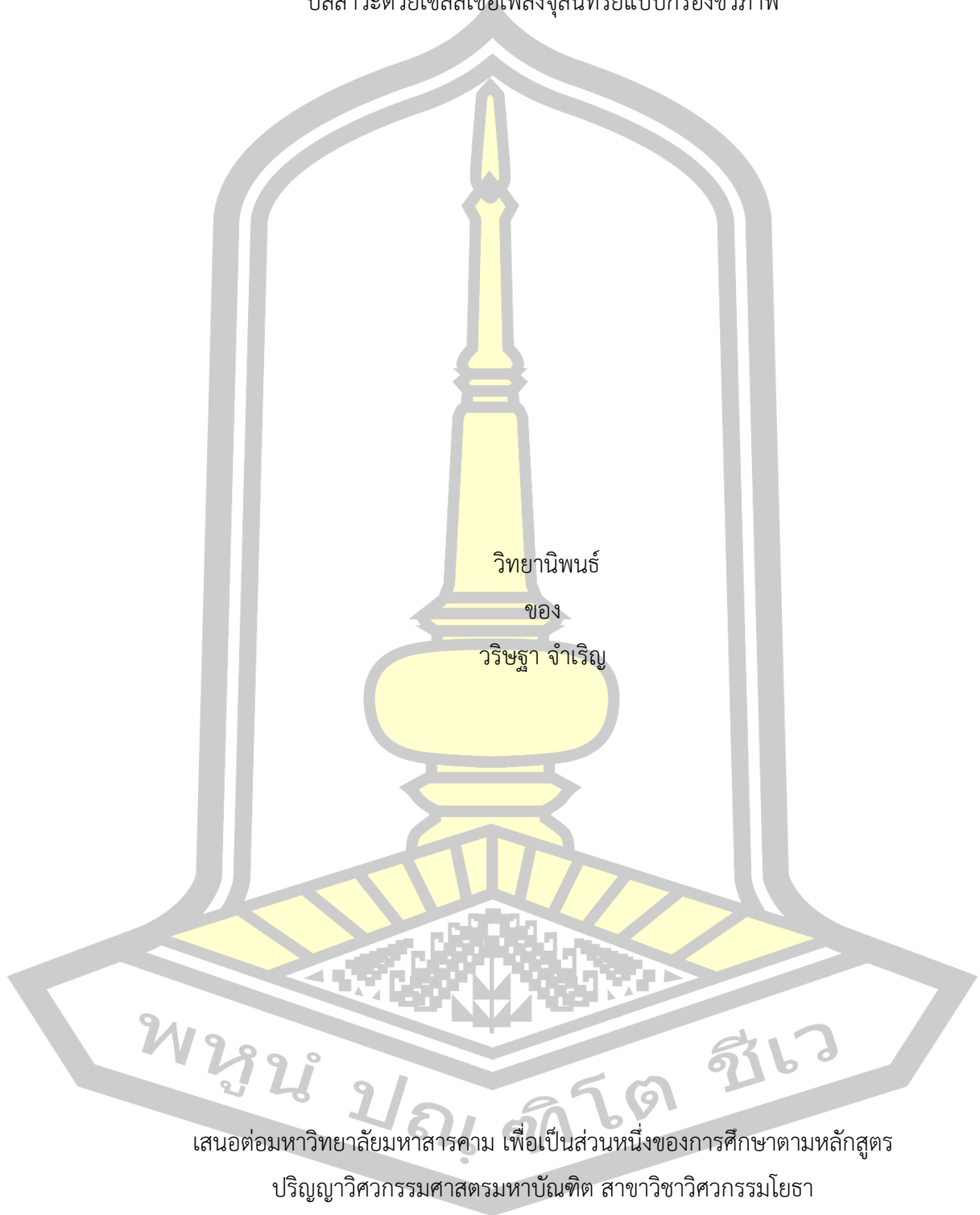
วิทยานิพนธ์
ของ
วริษฐา จำเริญ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

กรกฎาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การศึกษาแบบจำลองจลพลศาสตร์ของการกำจัดไนโตรเจนและกำลังไฟฟ้าในกระบวนการบำบัดน้ำ
ปัสสาวะด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบกรองชีวภาพ



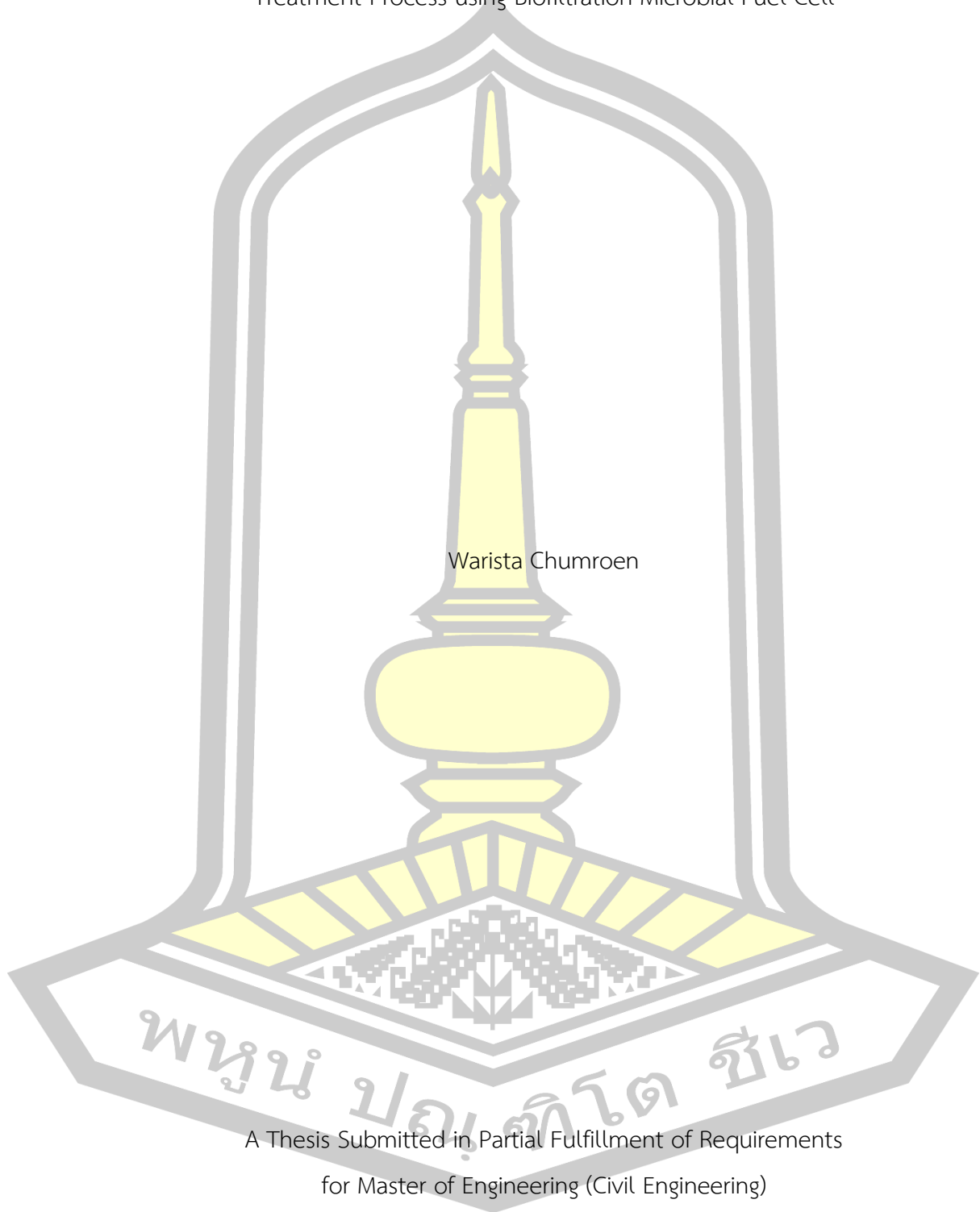
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

กรกฎาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Investigation of Kinetic Model for Nitrogen Removal and Electrical Power of Urine
Treatment Process using Biofiltration-Microbial Fuel Cell



Warista Chumroen

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Civil Engineering)

July 2021

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาววิรัชฐา จำเริญ
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. กันยรัตน์ โหละสุด)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. เพชร เพ็งชัย)

กรรมการ

(ศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ณัฐฉิ สุวรรณทา)

กรรมการ

(ผศ. ดร. นิดา ชัยมูล)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

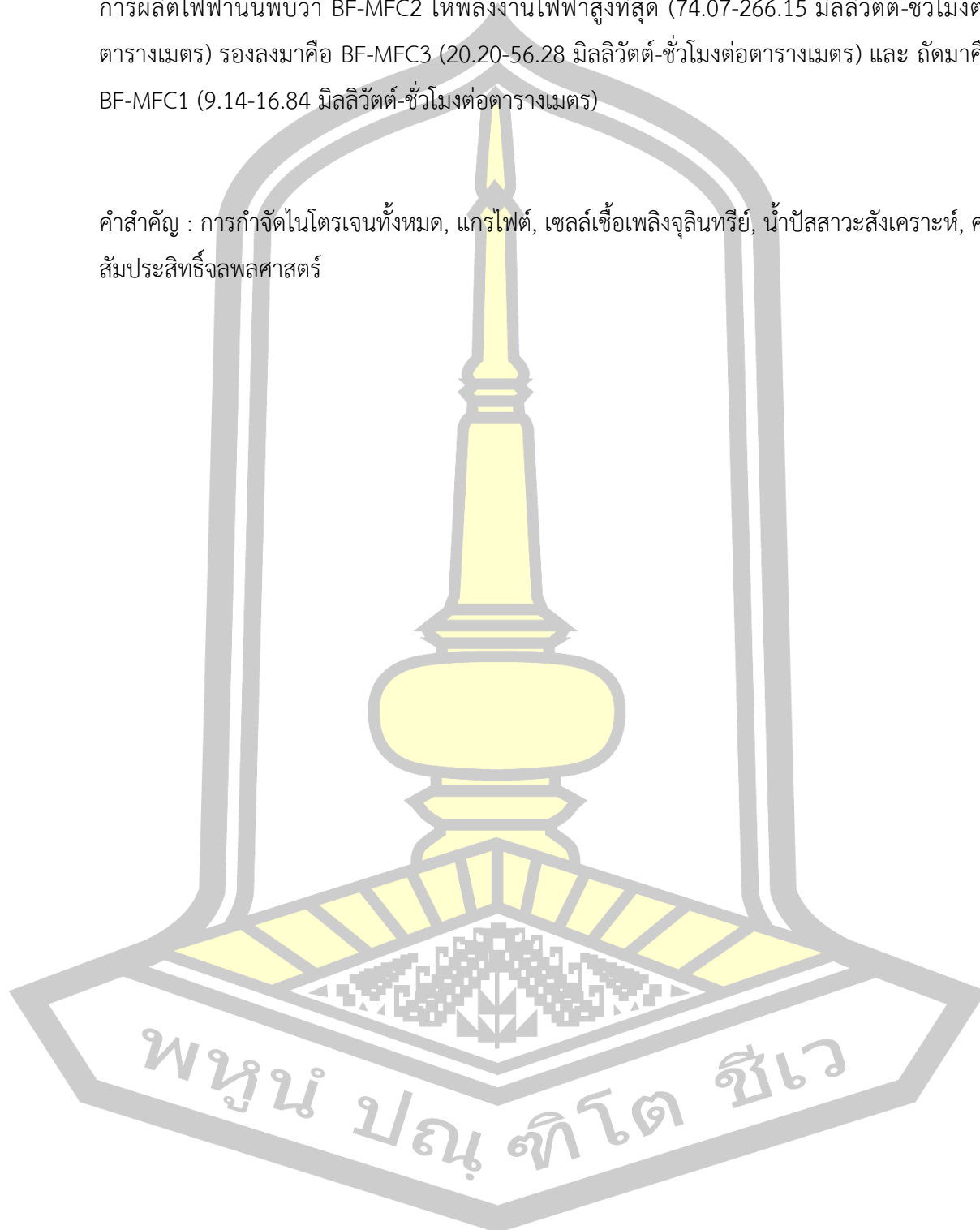
ชื่อเรื่อง	การศึกษาแบบจำลองจลพลศาสตร์ของการกำจัดไนโตรเจนและกำลงไฟฟ้าในกระบวนการบำบัดน้ำปัสสาวะด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบกรงชีวภาพ		
ผู้วิจัย	วริษฐา จำเริญ		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพชร เพ็งชัย		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเก็บข้อมูลพื้นฐานในการเดินระบบและศึกษาค่าสัมประสิทธิ์จลพลศาสตร์ของการกำจัดไนโตรเจนและการผลิตกำลงไฟฟ้าในกระบวนการบำบัดน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองพัฒนามาจากถังกรงชีวภาพต้นทุ่นต่ำจึงเรียกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบถังกรง (Biofilter-Microbial Fuel Cell : BF-MFC) น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นปัสสาวะสังเคราะห์ มี 2 ระดับความเข้มข้นคือ 1) ระดับไม่เจือจาง (SU-D0) ซึ่งมีความเข้มข้นซีโอดีอยู่ในช่วง 3,000-3,200 มก./ล. และมีความเข้มข้นไนโตรเจนทั้งหมดอยู่ในช่วง 46.99-64.49 มก./ล. และ 2) ระดับเจือจาง 1 เท่า (SU-D1) ซึ่งมีความเข้มข้นซีโอดีอยู่ในช่วง 1,424-2,644 มก./ล. และมีความเข้มข้นไนโตรเจนทั้งหมดอยู่ในช่วง 4.69-14.73 มก./ล. BF-MFC ถังที่ 1 (BF-MFC1) มีอัตราการไหลของน้ำปัสสาวะสังเคราะห์เข้าระบบ 20 ลิตร/วัน ระยะเวลาพักเก็บ 6 ชม. คิดเป็นอัตราภาระบรรทุกทุกไนโตรเจนทั้งหมดเข้าระบบ 0.22 กก./ลบ.ม.-วัน และ 0.05 กก./ลบ.ม.-วัน BF-MFC ถังที่ 2 (BF-MFC2) มีอัตราการไหลของน้ำปัสสาวะสังเคราะห์เข้าระบบ 30 ลิตร/วัน ระยะเวลาพักเก็บ 4 ชม. คิดเป็นอัตราภาระบรรทุกทุกไนโตรเจนทั้งหมดเข้าระบบ 0.32 กก./ลบ.ม.-วัน และ 0.07 กก./ลบ.ม.-วัน BF-MFC ถังที่ 3 (BF-MFC3) มีอัตราการไหลของน้ำปัสสาวะสังเคราะห์เข้าระบบ 40 ลิตร/วัน ระยะเวลาพักเก็บ 3 ชม. คิดเป็นอัตราภาระบรรทุกทุกไนโตรเจนทั้งหมดเข้าระบบ 0.43 กก./ลบ.ม.-วัน และ 0.10 กก./ลบ.ม.-วัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า BF-MFC ทุกถังสามารถบำบัดน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ได้โดยมีประสิทธิภาพการกำจัด COD อยู่ในช่วง 64-71% ประสิทธิภาพการกำจัด BOD อยู่ในช่วง 46-59% ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดอยู่ในช่วง 57-58% ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด อยู่ในช่วง 40-70% ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรต อยู่ในช่วง 49-83% ประสิทธิภาพการกำจัดไนไตรท์ อยู่ในช่วง 26-59% ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตอยู่ในช่วง 46-75% ทั้งนี้ถังที่มีอัตราเร็วในการกำจัดไนโตรเจนรวมสูงสุดคือ BF-MFC3 (58%) โดยปฏิกิริยาการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด แอมโมเนียไนเตรต ฟอสเฟต ที่เกิดขึ้นใน BF-MFC ทุกถังสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองจลพลศาสตร์

Modified Stover-Kincannon ได้โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.92-0.98 ได้ ในด้านการผลิตไฟฟ้านั้นพบว่า BF-MFC2 ให้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุด (74.07-266.15 มิลลิวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร) รองลงมาคือ BF-MFC3 (20.20-56.28 มิลลิวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร) และ ถัดมาคือ BF-MFC1 (9.14-16.84 มิลลิวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร)

คำสำคัญ : การกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด, แกรฟไฟต์, เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์, น้ำปัสสาวะสังเคราะห์, ค่าสัมประสิทธิ์จลพลศาสตร์



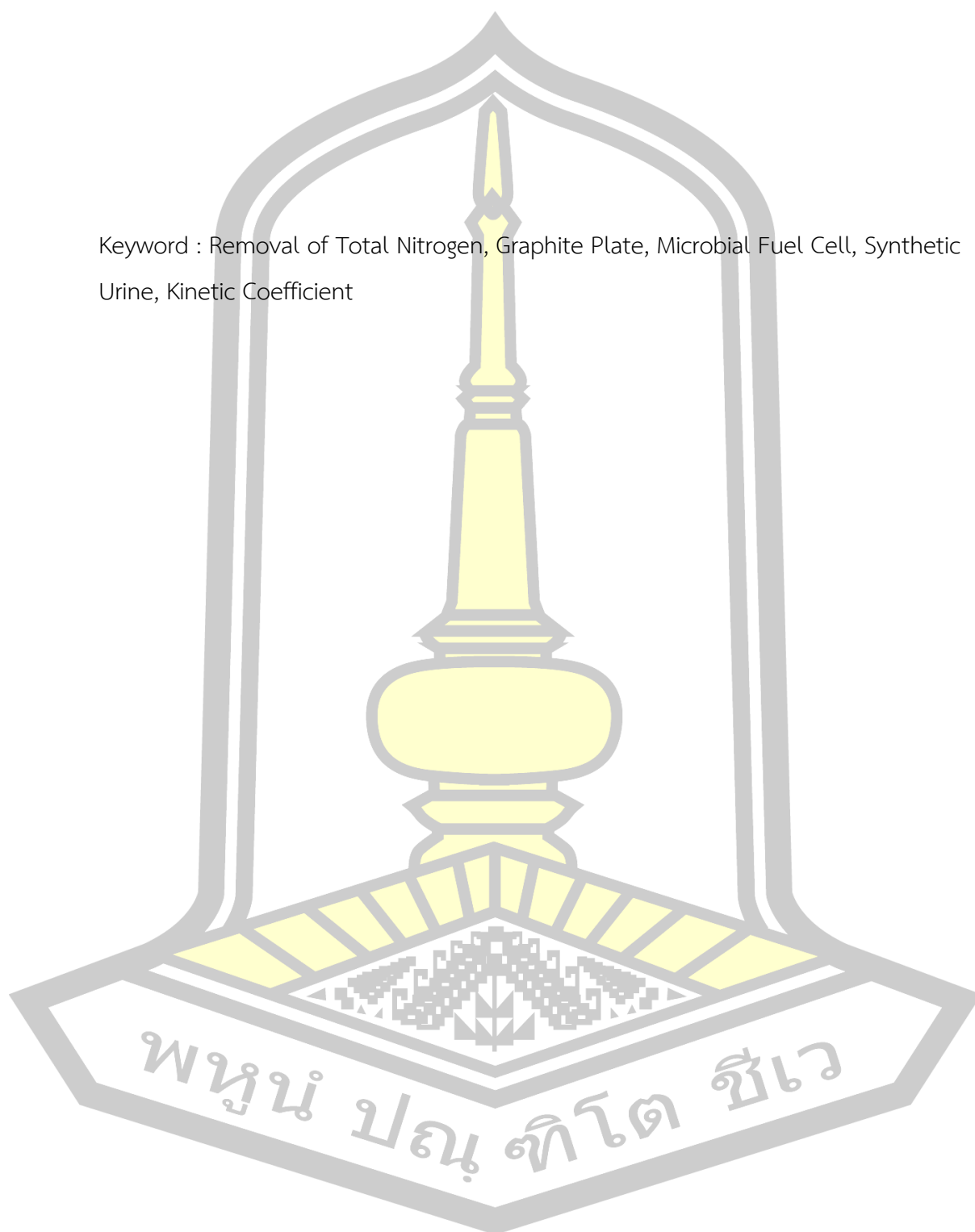
TITLE	Investigation of Kinetic Model for Nitrogen Removal and Electrical Power of Urine Treatment Process using Biofiltration-Microbial Fuel Cell		
AUTHOR	Warista Chumroen		
ADVISORS	Assistant Professor Petch Pengchai , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Civil Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2021

ABSTRACT

This research aimed to collect basic operational data and investigate kinetic coefficient of total nitrogen removal and power generation in synthetic urine treatment process of microbial fuel cell (MFC). The MFCs used in this study were defined as Biofilter-Microbial Fuel Cells (BF-MFCs) as they were developed from low-cost biofilters. Two concentration levels of synthetic urine, i.e., 1) non-dilution level (SU-D0) with 3,000-3,200 mg/L COD and 4.69-14.73 mg/L total nitrogen (TN), 2) 1:1 diluted level (SU-D1) with 1,424-2,644 mg/L COD and 4.69-14.73 mg/L TN were applied to 3 BF-MFCs. Three BF-MFCs were operated in different flow rates (Q), hydraulic retention times (HRT) and total nitrogen loading rate (NLR), i.e., BF-MFC1 (Q=20L/d, HRT=6 hr, and NLR = 0.22 kg/m³-d and 0.05 kg/m³-d), BF-MFC2 (Q=30 L/d, HRT=4 hr, and NLR = 0.32 kg/m³-d and 0.07 kg/m³-d), and BF-MFC3 (Q=40L/d, HRT=3 hr, and NLR = 0.43 kg/m³-d and 0.10 kg/m³-d). The result revealed that the each BF-MFCs removed 64-71% of COD, 46-59% of BOD, 57-58% of TN, 40-70% of total ammonia nitrogen (TAN), 49-83% of nitrate, 26-59% of nitrite and 46-75% of phosphate in the influent. The best TN remover was BF-MFC3 with the highest TN removal efficiency (58%). It was proved that removal reactions of TN, TAN, nitrate, and phosphate of each BF-MFC could be expressed using Modified Stover-Kincannon kinetic model with 0.92-0.98 determination coefficient (r²). In terms of power generation, BF-MFC2 was recognized as the highest electrical energy contributor (74.07-266.15 mWhr/m²), following by BF-MFC3 (20.20-56.28 mWhr/m²), and BF-MFC1

(9.14-16.84 mWhr/m²), respectively.

Keyword : Removal of Total Nitrogen, Graphite Plate, Microbial Fuel Cell, Synthetic Urine, Kinetic Coefficient



กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพชร เฟ็งชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ แนะนำแนวทางการศึกษาทั้งด้านการศึกษาค้นคว้าข้อมูล การทดสอบ การวิเคราะห์ผล ตลอดจนตรวจสอบเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กันยรัตน์ โหละสุต กรรมการสอบ ที่เสียสละเวลาอันมีค่ามาร่วมให้ข้อคิดเห็นและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ สุวรรณทา คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะ แนวทางแก้ไข และให้แนวคิดต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณภูพิงค์ ช่วยอุดม และคุณทรงยศ มงคลพิศ บุคลากรของคณะวิศวกรรมศาสตร์ และบุคลากรในห้องวิจัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และได้ร่วมทำการศึกษ เก็บรวบรวมข้อมูลทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ บุคลากร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พี่น้องและเพื่อนๆ ตลอดจนบุคคลต่างๆ ที่มีส่วนร่วมให้ความช่วยเหลืออีกมากมาย ที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวชานามได้หมด ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้วิจัย ที่ช่วยส่งเสริม สนับสนุน คอยเอาใจใส่ดูแล ให้กำลังใจและสนับสนุนทุนทรัพย์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างในความกรุณาและปรารถนาดีของท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

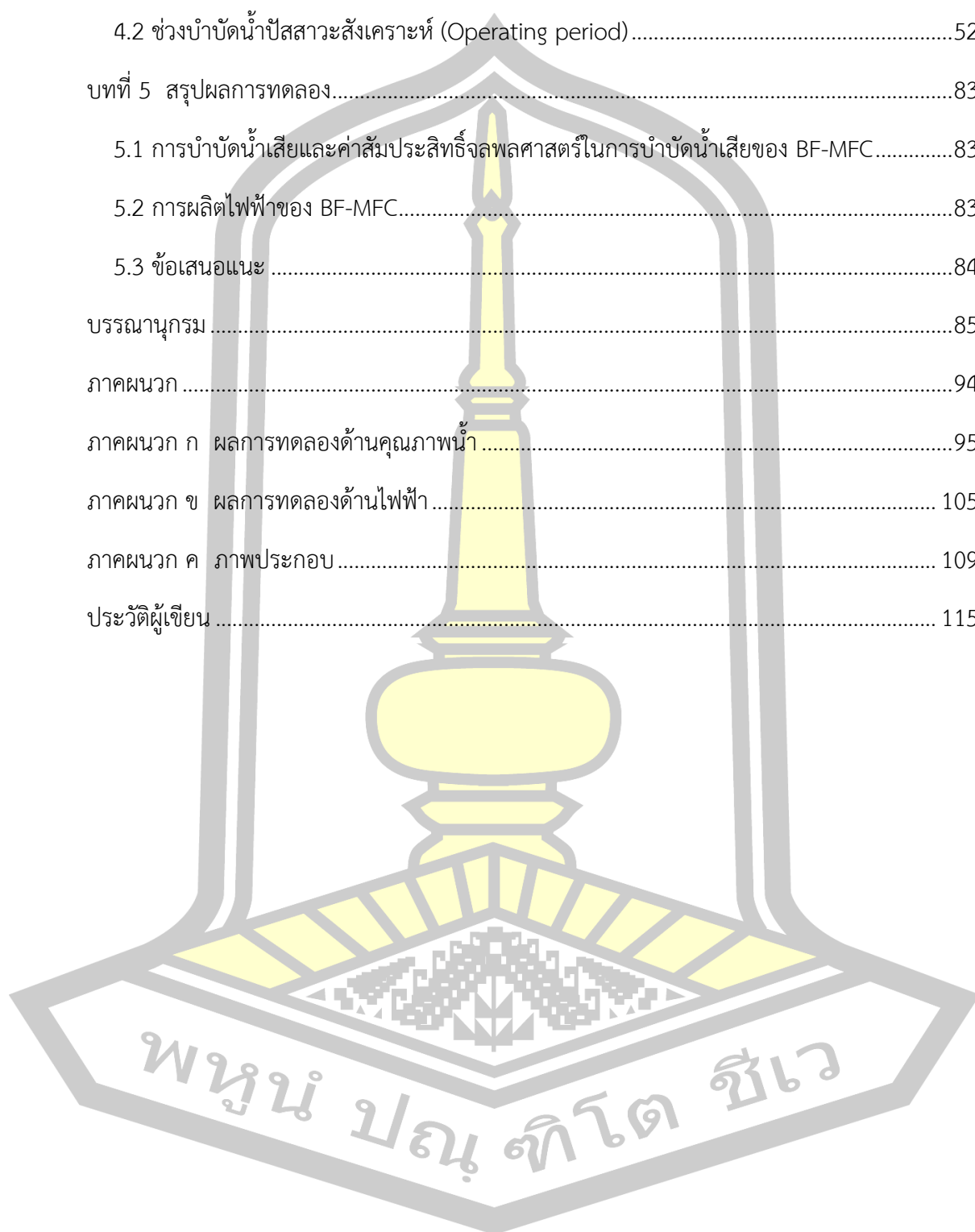
วริษฐา จำเริญ

พูน ปรณ ทิโต ชีเว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ปัญหาและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 น้ำปัสสาวะ.....	4
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์.....	12
2.3 ถังกรองไม่เต็มอากาศแบบไหลขึ้น.....	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.1 MFC ที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3.2 การเพาะเลี้ยงเชื้อให้เกาะกับวัสดุกรอง.....	38
3.3 การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์จลพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำปัสสาวะสังเคราะห์และผลิตไฟฟ้า.....	41
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	43

4.1 ช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (Start-up period)	43
4.2 ช่วงบำบัดน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ (Operating period)	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	83
5.1 การบำบัดน้ำเสียและค่าสัมประสิทธิ์จลพลศาสตร์ในการบำบัดน้ำเสียของ BF-MFC.....	83
5.2 การผลิตไฟฟ้าของ BF-MFC.....	83
5.3 ข้อเสนอแนะ	84
บรรณานุกรม	85
ภาคผนวก	94
ภาคผนวก ก ผลการทดลองด้านคุณภาพน้ำ	95
ภาคผนวก ข ผลการทดลองด้านไฟฟ้า	105
ภาคผนวก ค ภาพประกอบ	109
ประวัติผู้เขียน	115



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 องค์ประกอบของน้ำปัสสาวะ.....	4
ตาราง 2 ค่าศักยภาพการเกิดรีดักชันของสารชนิดต่างๆ.....	18
ตาราง 3 เภนธ์การออกแบบระบบถังกรองแบบไร้อากาศ.....	30
ตาราง 4 ตัวอย่างลักษณะน้ำเสียจากบ้านพักอาศัย.....	33
ตาราง 5 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน.....	34
ตาราง 6 พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดในการศึกษานี้.....	39
ตาราง 7 องค์ประกอบน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษานี้.....	41
ตาราง 8 เปรียบเทียบผลการทดสอบคุณภาพน้ำ กับงานวิจัยอื่นๆ.....	72
ตาราง 9 คำสัมประสิทธิ์จลพลศาสตร์ของแบบจำลองจลพลศาสตร์ Modified Stover-Kincannon ของการกำจัดฟอสเฟต ไนเตรต แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด ไนโตรเจนทั้งหมด ซีโอดี และไนไตรท์ ด้วย BF-MFC.....	74
ตาราง 10 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่าทางไฟฟ้า กับงานวิจัยอื่นๆ.....	80

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 แผนผังการไหลของกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งและแยกบำบัดปัสสาวะ.....	6
ภาพประกอบ 2 ระบบบำบัดน้ำเสียระบบบ่อเกรอะและบ่อซึม.....	7
ภาพประกอบ 3 ระบบถังบำบัดน้ำเสียสำเร็จรูป.....	7
ภาพประกอบ 4 กระบวนการ Forward Osmosis-Membrane Distillation	9
ภาพประกอบ 5 การแสดงแบบแผนของเครื่องปฏิกรณ์ UVC	10
ภาพประกอบ 6 Samsung GT-E2121B powered by the ceramic MFC stack.....	11
ภาพประกอบ 7 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์โดยใช้ลักษณะโครงสร้างเป็นเกณฑ์.....	12
ภาพประกอบ 8 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่.....	13
ภาพประกอบ 9 ลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว.....	14
ภาพประกอบ 10 ลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ห้องเดี่ยวแบบไม่ใช่เมมเบรน.....	15
ภาพประกอบ 11 แสดงแผนผังของส่วนประกอบพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่.....	16
ภาพประกอบ 12 องค์ประกอบพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์.....	17
ภาพประกอบ 13 กระบวนการที่เกี่ยวข้องข้องในการกักเก็บแอมโมเนียโดยใช้ระบบ MFC.....	21
ภาพประกอบ 14 ประเภทของ MFC ที่แตกต่างกันสำหรับการบำบัดปัสสาวะ.....	22
ภาพประกอบ 15 ระบบ MFCs	23
ภาพประกอบ 16 การทำงานของ MFCs แบบ dual chambered ในการบำบัดปัสสาวะ.....	24
ภาพประกอบ 17 ถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น.....	27
ภาพประกอบ 18 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับระยะเวลาการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ในการย่อย สลายสารอินทรีย์และประสิทธิภาพการกำจัดน้ำโสโครกด้วยวิธีทางชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	28
ภาพประกอบ 19 แบบจำลองถึงปฏิกิริยาชุดการทดลอง.....	36
ภาพประกอบ 20 แผ่นแกรไฟต์ที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรด.....	37

ภาพประกอบ 21	ตัวกรองเชือกไนลอน.....	38
ภาพประกอบ 22	ภาพรวมของการทดลองบำบัดน้ำปัสสาวะสังเคราะห์.....	42
ภาพประกอบ 23	ค่าพีเอชของช่วงเริ่มต้นเดินระบบ.....	44
ภาพประกอบ 24	ค่าโออาร์พีของช่วงเริ่มต้นระบบ.....	44
ภาพประกอบ 25	ค่าดีโอของช่วงเริ่มต้นเดินระบบ.....	45
ภาพประกอบ 26	ค่าไนโตรเจนทั้งหมดในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ.....	46
ภาพประกอบ 27	แอมโมเนียไนโตรเจนในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ.....	46
ภาพประกอบ 28	ไนโตรทรีในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ.....	47
ภาพประกอบ 29	ไนเตรตในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ.....	47
ภาพประกอบ 30	ฟอสเฟตในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ.....	48
ภาพประกอบ 31	ค่าซีโอดีในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ.....	48
ภาพประกอบ 32	ค่าการนำไฟฟ้าของช่วงเริ่มต้นเดินระบบ.....	49
ภาพประกอบ 33	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบไม่ต่อตัวต้านทาน (OCV) ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ.....	49
ภาพประกอบ 34	กราฟโพลาริเซชันของถัง BF-MFC1.....	50
ภาพประกอบ 35	กราฟโพลาริเซชันของถัง BF-MFC2.....	50
ภาพประกอบ 36	กราฟโพลาริเซชันของถัง BF-MFC3.....	51
ภาพประกอบ 37	กราฟโพลาริเซชันของ BF-MFC ทั้ง 3 ถังที่ผ่านการ Normalization แล้ว.....	51
ภาพประกอบ 38	ค่าพีเอช (pH) ของน้ำขาเข้า-ออก.....	53
ภาพประกอบ 39	ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (DO) ของน้ำขาเข้า-ออก.....	53
ภาพประกอบ 40	ค่าโออาร์พี (Oxidation Reduction Potential : ORP).....	54
ภาพประกอบ 41	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำขาเข้า-ออก.....	55
ภาพประกอบ 42	ค่าความเข้มข้นซีโอดี ของน้ำขาเข้า-ออก.....	56
ภาพประกอบ 43	ประสิทธิภาพการกำจัด COD.....	56
ภาพประกอบ 44	อัตราเร็วในการกำจัด COD.....	57

ภาพประกอบ 45	ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ BOD	58
ภาพประกอบ 46	ประสิทธิภาพการกำจัด BOD.....	59
ภาพประกอบ 47	อัตราเร็วในการกำจัด BOD.....	59
ภาพประกอบ 48	ค่าความเข้มข้นไนโตรเจนทั้งหมดของน้ำขาเข้า-ออก.....	60
ภาพประกอบ 49	ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด.....	60
ภาพประกอบ 50	อัตราเร็วในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen removal rate)	62
ภาพประกอบ 51	ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกกำจัดรายวัน.....	62
ภาพประกอบ 52	ค่าความเข้มข้นแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดของน้ำขาเข้า-ออก	64
ภาพประกอบ 53	ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด.....	64
ภาพประกอบ 54	อัตราเร็วในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด.....	64
ภาพประกอบ 55	ค่าความเข้มข้นไนไตรท์ (NO ₂ ⁻) ของน้ำขาเข้า-ออก	65
ภาพประกอบ 56	ประสิทธิภาพการกำจัดไนไตรท์	66
ภาพประกอบ 57	อัตราเร็วในการกำจัดไนไตรท์	66
ภาพประกอบ 58	ค่าความเข้มข้นไนเตรตของน้ำขาเข้า-ออก.....	67
ภาพประกอบ 59	ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรต.....	68
ภาพประกอบ 60	อัตราเร็วในการกำจัดไนเตรตของน้ำขาออก	68
ภาพประกอบ 61	ค่าความเข้มข้นฟอสเฟตของน้ำขาเข้า-ออก.....	69
ภาพประกอบ 62	ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต.....	70
ภาพประกอบ 63	อัตราเร็วในการกำจัดฟอสเฟต.....	70
ภาพประกอบ 64	ปริมาณฟอสเฟตที่ถูกบำบัดรายวัน	71
ภาพประกอบ 65	แบบจำลองจลพลศาสตร์ Modified Stover-Kincannon ของการกำจัดฟอสเฟต ไนเตรต แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด ไนโตรเจนทั้งหมด ซีโอดี และไนไตรท์ด้วย BF-MFC.....	73
ภาพประกอบ 66	ค่าความต่างศักย์ OCV ของ SU-D0	76
ภาพประกอบ 67	ค่าความต่างศักย์ OCV ของ SU-D0	76

ภาพประกอบ 68 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด Maximum power density (P_{max}).....	77
ภาพประกอบ 69 ค่าความต่างศักย์ CCV ของ SU-D0.....	77
ภาพประกอบ 70 ค่าความต่างศักย์ CCV ของ SU-D0.....	78
ภาพประกอบ 71 กระแสไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จริง	79
ภาพประกอบ 72 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จริง	79
ภาพประกอบ 73 พลังงานไฟฟ้า Energy ที่แต่ละถังผลิตได้ตลอดการทดลอง.....	80
ภาพประกอบ 74 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตของ BF-MFC	82
ภาพประกอบ 75 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับอัตราเร็วในการกำจัดไนเตรตของ BF-MFC	82



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาและที่มา

ปัสสาวะเป็นของเสียชนิดหนึ่งที่เกิดจากมนุษย์ ในน้ำปัสสาวะมีไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย และแอมโมเนียอยู่ถึง 4,050 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร มีฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต 210 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัสต่อลิตร มีค่าซีโอติอยู่ในระดับ 3,900 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 35 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (Kuntke et al., 2012) สารเหล่านี้หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ได้รับการบำบัด สามารถก่อให้เกิดภาวะ Eutrophication ทำให้แหล่งน้ำเน่าเสียได้ ในประเทศไทย เรามักปล่อยน้ำปัสสาวะจากอาคารที่พักอาศัยลงสู่ถังเกรอะซึ่งทำหน้าที่กักเก็บทิ้งอุจจาระและปัสสาวะเพื่อบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศซึ่งสามารถบำบัดบีโอดีได้ร้อยละ 40-60 โดยน้ำเสียหลังบำบัดยังคงมีคุณภาพไม่เหมาะสมต้องบำบัดอีกครั้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ (กรมควบคุมมลพิษ, 2560)

เมื่อไม่นานมานี้ นักวิจัยต่างชาติจำนวนหนึ่งได้ค้นพบว่าสามารถนำน้ำปัสสาวะไปบำบัดโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (MFC : Microbial fuel cell) ทำให้เกิดผลพลอยได้เป็นกระแสไฟฟ้า Santoro et al. (2013) พบว่า MFC แบบห้องเดียวสามารถผลิตความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้ 2.60 วัตต์ต่อตารางเมตรและบำบัดค่าซีโอติในน้ำปัสสาวะได้ร้อยละ 60-75 ธนรัฐ เข็มเพชร (2558) พบว่า MFC แบบห้องเดียวสามารถผลิตความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้ 0.222 วัตต์ต่อตารางเมตร และบำบัดค่าซีโอติในน้ำปัสสาวะได้ร้อยละ 96.84 ± 1.82 Zhou et al. (2017) พบว่า MFC แบบห้องคู่สามารถผลิตผลิตความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้ 0.934 วัตต์ต่อลูกบาศก์ Kuntke et al. (2012) พบว่า MFC แบบห้องเดียวแอร์แคโทดสามารถผลิตความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้ 23.07 ± 1.15 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และบำบัดค่าซีโอติในน้ำปัสสาวะได้ร้อยละ 61.5 นอกจากนี้มีนักวิจัยจำนวนหนึ่งประสบความสำเร็จในการนำ MFC หลายเซลล์มาต่อกันก็สามารถให้ผลลัพธ์เป็นกำลังไฟฟ้าที่วิเศษจนเพียงพอที่จะชาร์จโทรศัพท์มือถือได้ Ieropoulos et al. (2013b) พบว่าเมื่อนำ MFC แบบ 6.25 มิลลิลิตร rapid prototyped มาต่อกันแบบอนุกรมจำนวน 48 เซลล์ สามารถผลิตความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ารวมได้ 4.93 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร Walter et al. (2017) พบว่าเมื่อนำ MFC แบบ Cascade มาต่อกันแบบอนุกรมจำนวน 6 เซลล์ สามารถชาร์จโทรศัพท์มือถือแบบ Samsung Galaxy S I9000; แบตเตอรี่ 1,650 มิลลิแอมแปร์ต่อชั่วโมง ให้เต็มได้ในเวลา 68 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยที่ผ่านมา

มายังไม่พบการศึกษาถึงค่าสัมประสิทธิ์จลพลศาสตร์ในการบำบัดไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสของ MFC ที่ใช้บำบัดน้ำปัสสาวะ ตลอดจนยังมีงานวิจัยไม่มากนักที่รายงานความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการบำบัดไนโตรเจนกับอัตราการผลิตไฟฟ้าของ MFC จึงยังไม่มีคำแนะนำสมการที่ใช้ในการออกแบบ MFC ให้สามารถบำบัดน้ำปัสสาวะและผลิตไฟฟ้าได้ตามต้องการ ส่วนหนึ่งอาจมาจากความซับซ้อนและความหลากหลายของกลไกต่างๆในระบบทั้งทางกายภาพและทางเคมีชีวภาพก่อให้เกิดความไม่เสถียร ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจเก็บข้อมูลพื้นฐานในการเดินระบบและศึกษาค่าสัมประสิทธิ์จลพลศาสตร์ของการบำบัดไนโตรเจนและการผลิตกำลังไฟฟ้าในกระบวนการบำบัดปัสสาวะด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ เพื่อนำเสนอข้อมูลที่จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบ MFC บำบัดน้ำปัสสาวะต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาแบบจำลองจลพลศาสตร์ของการบำบัดไนโตรเจนและกำลังไฟฟ้าในกระบวนการบำบัดปัสสาวะด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบกรองชีวภาพ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 น้ำปัสสาวะที่ใช้ในการวิจัย

1. น้ำปัสสาวะจริงผสมกับน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ (ใช้ในช่วงแรกของงานวิจัย)
2. น้ำปัสสาวะสังเคราะห์ (ใช้ในช่วงหลังของงานวิจัย)

1.3.2 MFC ที่ใช้ในการวิจัย

เป็น MFC แบบถังกรองไม่มีเมมเบรนซึ่งประยุกต์จากงานของ ทรงยศ มงคลพิศ และเพชร เพ็งชัย (2560) ซึ่งได้นำรูปแบบ MFC ในงานของ Sukkasem et al. (2011) มาทดลองสร้างและดัดแปลงอีกรอบหนึ่ง

1.3.3 ตัวแปรของการวิจัย ประกอบด้วย

1. ตัวแปรอิสระ

ได้แก่ อัตราการไหล, ระยะเวลาที่เก็บ, ความเข้มข้นขององค์ประกอบสารเคมีในน้ำปัสสาวะขาเข้า MFC

2. ตัวแปรตาม

ได้แก่ ขององค์ประกอบสารเคมีในน้ำปัสสาวะหลังบำบัด อัตราเร็วในการบำบัดสารเคมีในน้ำปัสสาวะ ประสิทธิภาพการบำบัดสารเคมีในน้ำปัสสาวะ ค่าสัมประสิทธิ์จลพลศาสตร์ของการบำบัดไนโตรเจน กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ MFC ผลิตได้ ความต้านทานภายในของ MFC

3. ตัวแปรควบคุม

ได้แก่ ค่าความพรุนของชั้นกรองใน MFC หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเลี้ยงเชื้อเพื่อเริ่มต้นระบบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้แบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบกรองชีวภาพที่สามารถนำไปใช้ติดตั้งในคณะวิศวกรรมศาสตร์เพื่อบำบัดน้ำปัสสาวะและผลิตไฟฟ้า

1.4.2 นำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยไปใช้วิเคราะห์เพื่อนำเสนอบางส่วนของสมการที่ใช้ในการออกแบบระบบถังกรองชีวภาพที่สามารถการบำบัดน้ำปัสสาวะและผลิตไฟฟ้าได้



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำปัสสาวะ

ลักษณะโดยทั่วไปของน้ำปัสสาวะเป็นของเหลวที่เกิดจากระบบการเผาผลาญทั้งในมนุษย์และในสัตว์หลายชนิด ของเหลวที่ถูกกรองจากพลาสมาโดยไตเพื่อเอาสารที่ร่างกายไม่ต้องการหรือมีมากเกินไปจะถูกขับออกจากร่างกายผ่านทางท่อปัสสาวะ ซึ่งในน้ำปัสสาวะอุดมไปด้วยองค์ประกอบที่เป็นธาตุอาหารหลายชนิดสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

1. องค์ประกอบของน้ำปัสสาวะ

น้ำปัสสาวะมีองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในช่วงที่กว้างมาก เนื่องจากความแตกต่างขององค์ประกอบทางด้านสุขภาพ การรับประทานอาหาร และการดำเนินชีวิต จากผลการศึกษาขององค์ประกอบน้ำปัสสาวะของนักศึกษาชายมหาวิทยาลัย Ghent ในประเทศเบลเยียม พบว่า น้ำปัสสาวะของมนุษย์นั้น มีองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 2

ตาราง 1 องค์ประกอบของน้ำปัสสาวะ

Parameter	Unit	Fresh urine
pH	-	7.35 ± 0.12
EC	mS/cm	20.64 ± 1.28
TKN	mg/L	5268 ± 304
TAN	mg/L	1250 ± 216
Total COD	mgO ₂ /L	5600 ± 1237
VFA	mgO ₂ /L	248 ± 62
Na ⁺	mg/L	2018 ± 195
K ⁺	mg/L	1597 ± 126
Ca ₂ ⁺	mg/L	58 ± 10
Mg ₂ ⁺	mg/L	11 ± 4
Cl ⁻	mg/L	3650 ± 139

ตาราง 1 (ต่อ) องค์ประกอบของน้ำปัสสาวะ

Parameter	Unit	Fresh urine
NO_2^-	mgN/L	Below quantification limit (LOQ) of 3 mg NO_2^- N/L.
NO_3^-	mgN/L	8.65 ± 5.15
PO_4^{3-}	mg/L	676 ± 102
SO_4^{2-}	mg/L	810 ± 62

ที่มา : Christiaens et al. (2019)

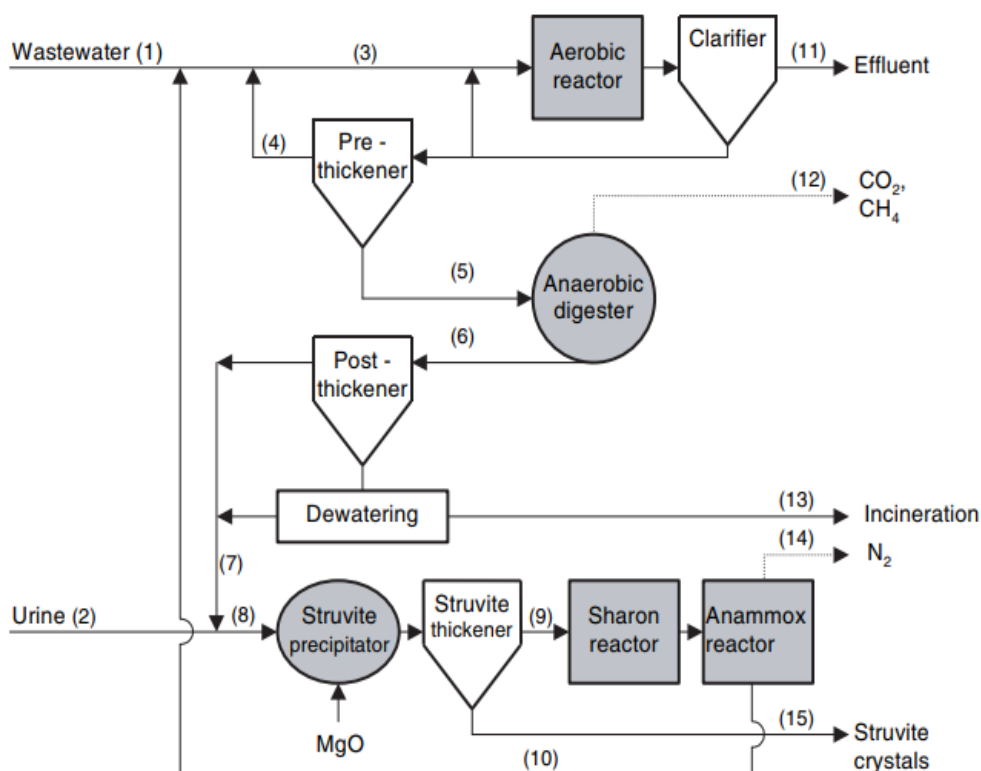
2. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำปัสสาวะ

2.1 เทคโนโลยีทั่วไป

2.1.1 ประเทศที่พัฒนาแล้ว

ปัจจุบันนี้มีนักวิจัยชาวต่างชาติที่เล็งเห็นความสำคัญในการแยกน้ำปัสสาวะออกมาบำบัด ถึงแม้ว่าปัสสาวะมีปริมาณเพียงร้อยละ 1 ของปริมาณน้ำเสียทั้งหมด แต่มีปริมาณสารอาหารสูงถึงร้อยละ 80 ดังนั้นการแยกปัสสาวะจากน้ำเสียอื่น ๆ อาจส่งผลให้เกิดระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพสูงและยังช่วยลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เช่น Eutrophication การแยกน้ำปัสสาวะออกมาบำบัดมีความสำคัญอย่างยิ่งในประเทศกำลังพัฒนาที่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วเช่นประเทศจีน ซึ่งการบำบัดน้ำเสียยังไม่สามารถตอบสนองต่อการพัฒนาความเป็นเมืองได้อย่างรวดเร็วและมลพิษทางน้ำที่เกิดจากน้ำเสียภายในประเทศส่งผลถึงระดับที่ร้ายแรง (Irene Keller, 2008) ระบบ MFC เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่กำลังเป็นที่นิยมในห้องทดลองจนนำไปสู่การใช้งานจริง จากการแยกน้ำปัสสาวะมาบำบัด ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัด COD และ TOC เกิดขึ้นพร้อมกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ความหนาแน่นของพลังงานเฉลี่ย 23 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร และที่ความหนาแน่นกระแส 65 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร (Cid et al., 2018)

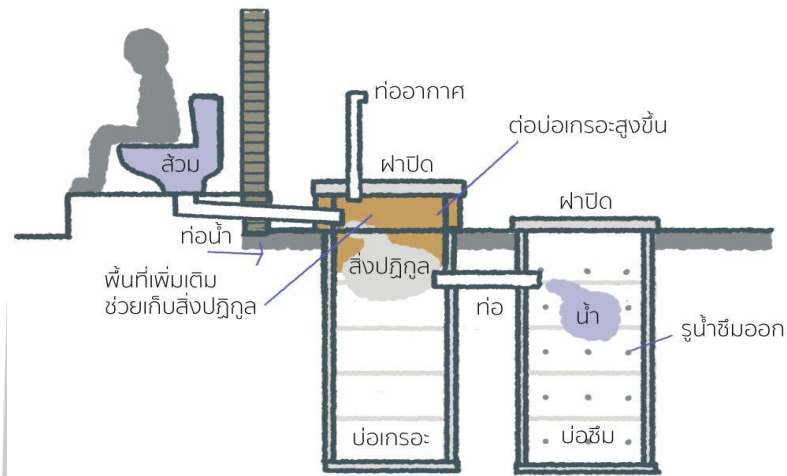
พูน ปรณ ทิโต ชิว



ภาพประกอบ 1 แผนผังการไหลของกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งและแยกบำบัดปัสสาวะ
ที่มา: (Wilsenach and Van, 2003)

2.1.2 ประเทศที่กำลังพัฒนา

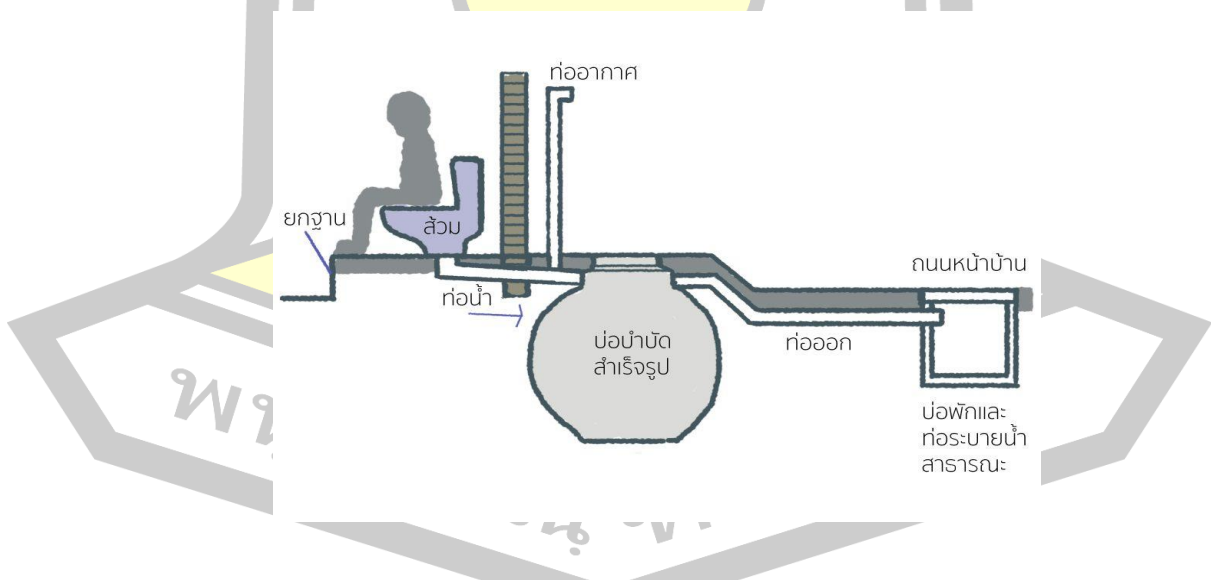
ในอดีตรูปแบบของการบำบัดน้ำปัสสาวะและอุจจาระจากโถสุขภัณฑ์ในประเทศที่กำลังพัฒนาอย่างประเทศไทย ก็คือ ระบบบ่อเกรอะและบ่อซึม เป็นการนำถังคอนกรีตสำเร็จรูปทรงกระบอก มาต่อกันและฝังไว้ในดิน จำนวน 2 บ่อ บ่อที่ 1 เรียกว่าบ่อเกรอะ (Septic Tank) ทำหน้าที่รับของเสียภายในบ้านโดยตรง โดยมีระยะกักเก็บน้ำเสียไว้ ประมาณ 1-3 วัน เพื่อให้ของแข็งที่ปะปนมากับน้ำเสียดกตะกอนลงด้านล่าง ซึ่งเป็นการแยกกากและยังเป็นการปรับสภาพน้ำเสียโดยการย่อยสลายตามธรรมชาติ และทำการสูบลากของเสียและตะกอนทิ้งเพื่อทำความสะอาด ทุกๆ 3-5 ปี ถัดมาในบ่อที่ 2 เรียกว่าบ่อซึม (Seepage Pit) น้ำเสียซึ่งได้แยกกากเรียบร้อยแล้วจากบ่อที่ 1 จะถูกส่งต่อมายังบ่อนี้ จากนั้นจะมีการกระจายน้ำออกไปตามดินโดยรอบ โดยผนังของบ่อซึมจะทำด้วยวัสดุพรุน (Porous Materials) หรือ ใช้ท่อคอนกรีตเจาะรูเพื่อให้ น้ำค่อยๆ ซึมออกสู่ชั้นดินรอบบ่อ



ภาพประกอบ 2 ระบบบำบัดน้ำเสียระบบบ่อกระและบ่อซึม

ที่มา: (เว็บไซต์: baanlaesuan.com, 2019)

ต่อมาในสมัยปัจจุบันได้มีการพัฒนารูปแบบของการบำบัดน้ำเสียจากโถสุขภัณฑ์ โดยใช้ถังบำบัดน้ำเสียสำเร็จรูปแทนระบบบ่อกระ-บ่อซึม ซึ่งเป็นที่นิยมสำหรับบ้านพักอาศัย เนื่องจากดูแลรักษาง่ายและใช้พื้นที่ค่อนข้างน้อยในการติดตั้งระบบ



ภาพประกอบ 3 ระบบถังบำบัดน้ำเสียสำเร็จรูป

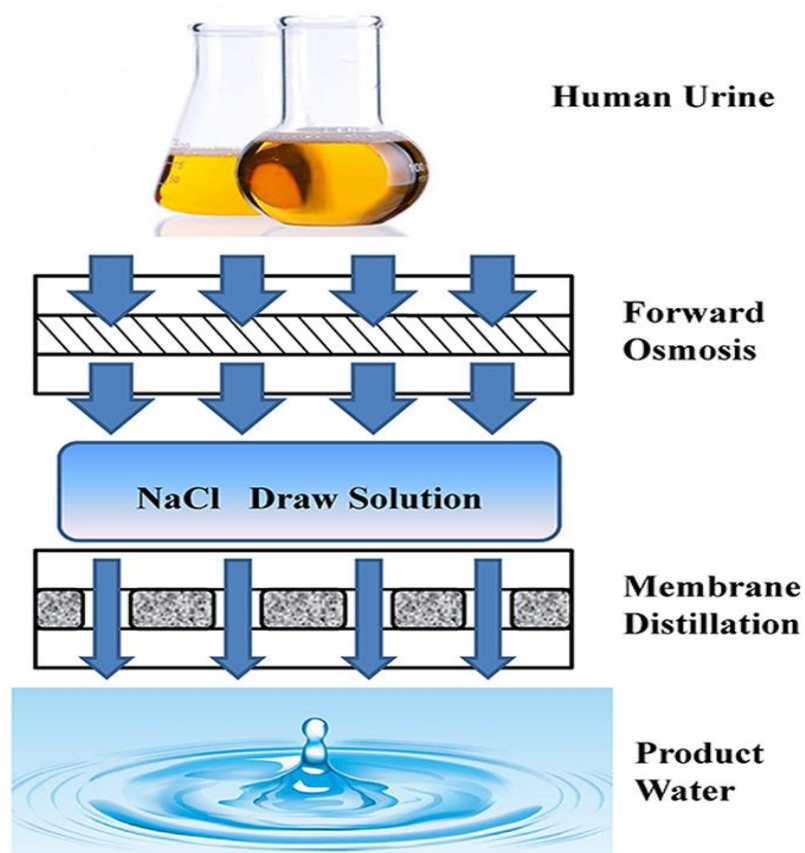
ที่มา: (เว็บไซต์: baanlaesuan.com, 2019)

2.2 เทคโนโลยีขั้นสูง

2.2.1 กระบวนการกลั่นแบบออสโมซิสด้วยเมมเบรน (Osmosis-Membrane)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ Osmosis-Membrane เป็นการบังคับให้เกิดปรากฏการณ์ออสโมซิส โดยการให้ความดันไฮดรอลิก (Hydraulic pressure) แก่สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง เพื่อให้เกิดการออสโมซิสจากสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมนำมาในบำบัดน้ำอย่างแพร่หลาย เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายที่ดีและมีขนาดโมเลกุลเล็กมาก จึงสามารถแพร่กระจายผ่านเมมเบรนได้ง่าย แต่ข้อจำกัดของการบำบัดน้ำด้วยวิธีนี้จะให้ผลผลิตน้ำที่มีอัตราการไหลต่ำ ดังนั้นจึงต้องใช้พื้นที่ผิวของเมมเบรนมากขึ้น เพื่อให้ได้น้ำที่ผ่านการบำบัดในปริมาณมากภายในเวลาที่เหมาะสม นอกจากนี้หากนำน้ำที่มีการปนเปื้อนสูงมาบำบัดจะทำให้เกิดปัญหาจากการอุดตันและการเสียหายของเมมเบรนได้ง่าย ต่อมามีการศึกษาเกี่ยวกับ Forward Osmosis-Membrane Distillation (FO-MD) เป็นเทคโนโลยีไฮบริดที่ใช้เมมเบรนที่พัฒนาขึ้นใหม่แตกต่างจากกระบวนการกลั่นแบบออสโมซิสที่ใช้เมมเบรนทั่วไป เช่น microfiltration (MF), ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF) and RO ซึ่ง FO เป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ความดันหรือใช้ความดันต่ำในการซึมผ่านเมมเบรนของสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำจากการไล่ระดับความดันออสโมติกผ่านเมมเบรน (McCutcheon and Eliemelech, 2006) ปัจจุบันได้นำวิธี (FO-MD) มาบำบัดน้ำเสียจากการทำเหมืองแร่ (Xie et al., 2013) การบำบัดน้ำเสียจากน้ำมัน (Zhang et al., 2014) และการบำบัดน้ำเสียจากปัสสาวะมนุษย์ (Qianliang et al., 2016)





ภาพประกอบ 4 กระบวนการ Forward Osmosis-Membrane Distillation

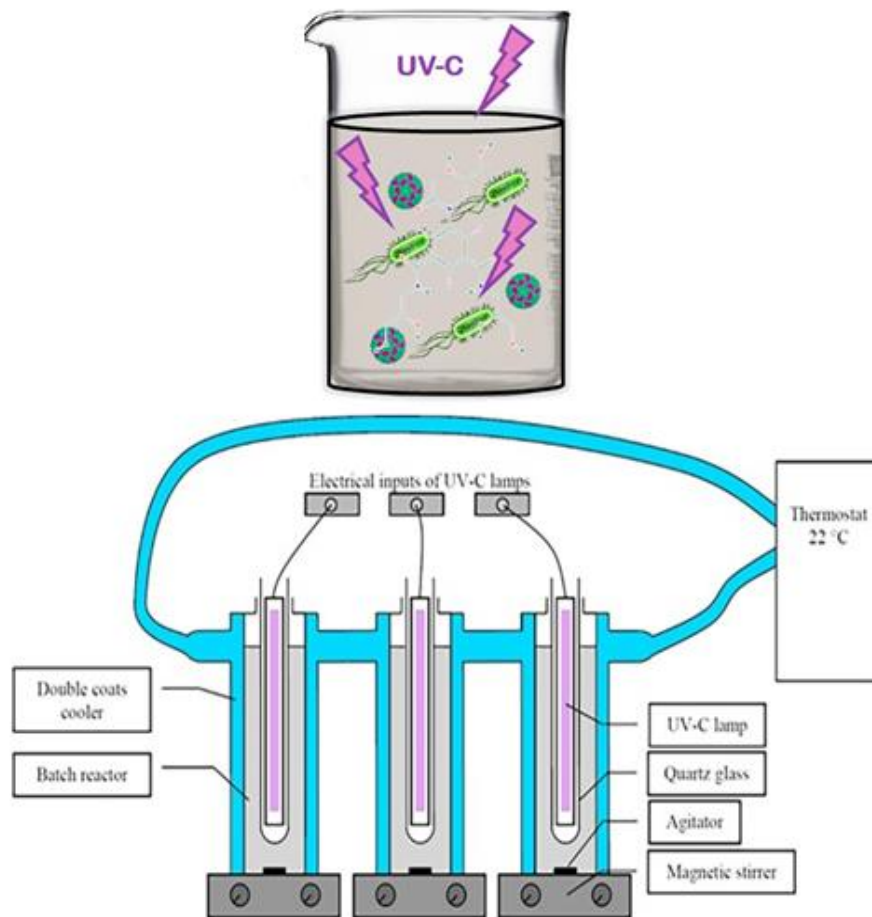
ที่มา: (Qianliang et al., 2016)

2.2.2 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes : AOPs)

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงสำหรับการบำบัดน้ำทิ้งหลากหลายชนิดรวมทั้งน้ำเสียที่มีความเป็นพิษสูงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากได้ ในการบำบัดน้ำเสียโดยการทำปฏิกิริยาของการฉายแสงยูวี (UV Irradiation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\bullet) ที่ได้มาจากแสงยูวีเข้าไปทำปฏิกิริยา ดังสมการ (2.1)



จากการบำบัดทางชีวภาพของน้ำปัสสาวะด้วยการประยุกต์ใช้ AOPs แบบฉายแสง UVC พบว่าระดับสารอินทรีย์ของปัสสาวะลดลงและประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Giannakis et al., 2018)



ภาพประกอบ 5 การแสดงแบบแผนของเครื่องปฏิกรณ์ UVC
ที่มา: (Giannakis et al., 2018)

พหุ ประ โท ชีวะ

2.2.3 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (Microbial fuel cell ; MFCs)

เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เป็นพลังงานรูปแบบใหม่ที่สามารถเปลี่ยนน้ำเสียให้เป็นพลังงานกระแสไฟฟ้าโดยใช้จุลินทรีย์เป็นตัวกระตุ้นการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากเซลล์ของแบคทีเรียไปสู่ขั้วไฟฟ้าภายใต้สภาวะไร้อากาศ ซึ่งปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกระบวนการย่อยสลายสารอาหารชนิดต่างๆด้วยจุลินทรีย์นั้นยังมีปริมาณน้อย ปัจจุบันนักวิจัยบางกลุ่มได้พัฒนาระบบ MFC ให้สามารถผลิตไฟฟ้าในปริมาณที่มากขึ้นโดยใช้น้ำปัสสาวะเป็นสารตั้งต้นในระบบ สามารถผลิตไฟฟ้าได้ถึง 3.7 V สำหรับชาร์จแบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือ (Ieropoulos et al., 2013b)



ภาพประกอบ 6 Samsung GT-E2121B powered by the ceramic MFC stack.

ที่มา: (Ieropoulos et al., 2013b)

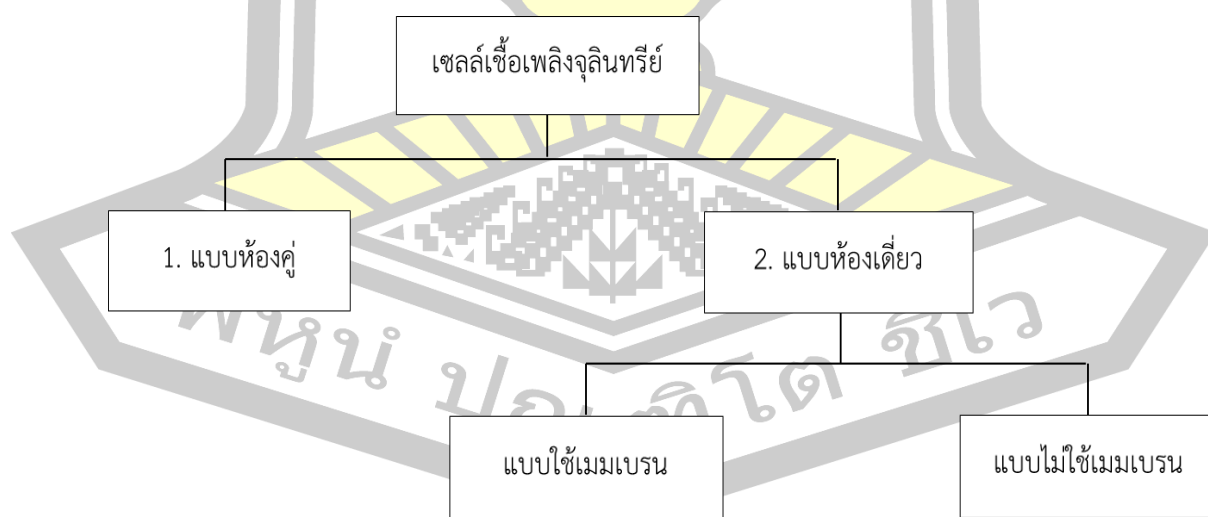
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

1. นิยามของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์หลากหลายชนิด เช่น คาร์โบไฮเดรต กรดไขมัน โปรตีน และน้ำเสียต่างๆ จนทำเกิดอิเล็กตรอนขึ้นทำให้มีการนำเอาอิเล็กตรอนส่วนนี้มาใช้ประโยชน์มานานหลายศตวรรษซึ่งในสมัยก่อนยังเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ยากในเวลาต่อมาพบว่านักวิทยาศาสตร์สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในนาฬิกาและกล้องถ่ายรูปจากนั้นในปี ค.ศ. 1790 ลูกิ แกวานี เป็นบุคคลแรกที่ค้นพบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ซึ่งเรียกว่า เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (Microbial Fuel Cell; MFC) และในปีค.ศ. 1910 Michael Gress Potter สาธิตให้ดูว่าเชื้อจุลินทรีย์สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าและส่งกระแสไฟฟ้าจากเชื้อ Escherichia coli และยีสต์สายพันธุ์ Saccharomyces cerevisia แต่การผลิตไฟฟ้าจาก MFC ของ Potter ยังไม่ประสบความสำเร็จมากนักเนื่องจากปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้มีปริมาณน้อย แต่ปัจจุบัน MFC ได้พัฒนาระบบจนสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าได้เพียงพอเพื่อใช้เป็นระบบแสงสว่างที่ใช้แสงจากหลอด LED โดยนำทดลองไปใช้จริงสำหรับห้องสุชา 1 ห้อง (Walter et al., 2018)

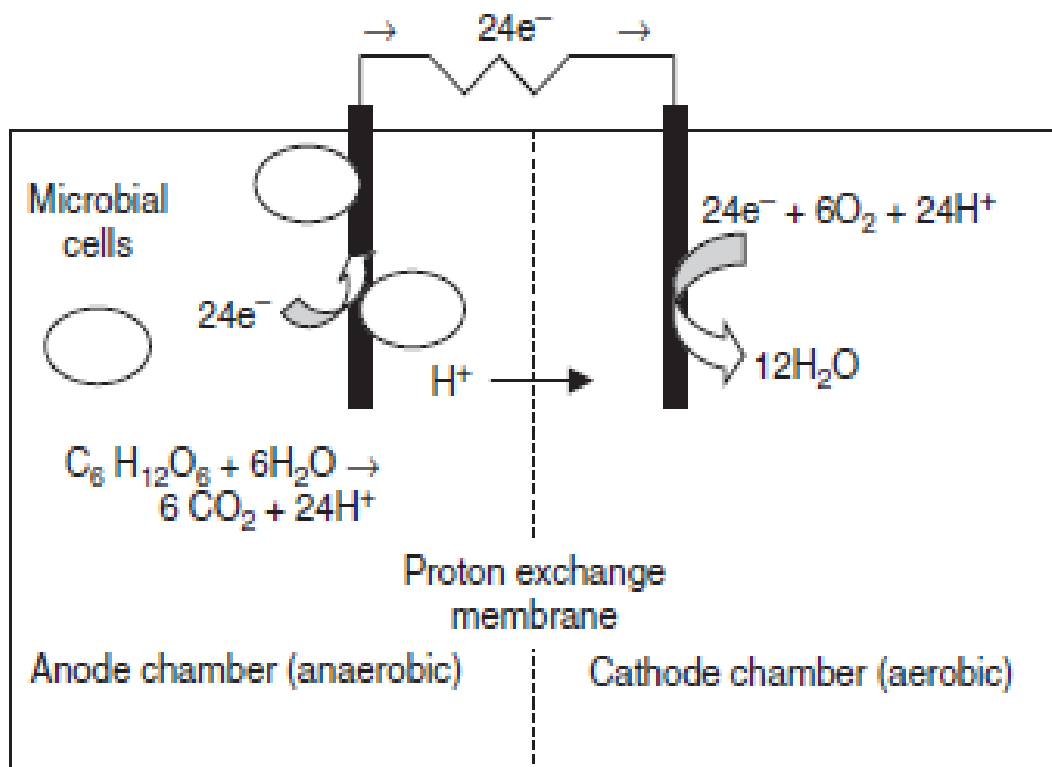
2. ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท โดยแบ่งตามลักษณะโครงสร้างเป็นเกณฑ์ ดังแสดงในภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์โดยใช้ลักษณะโครงสร้างเป็นเกณฑ์

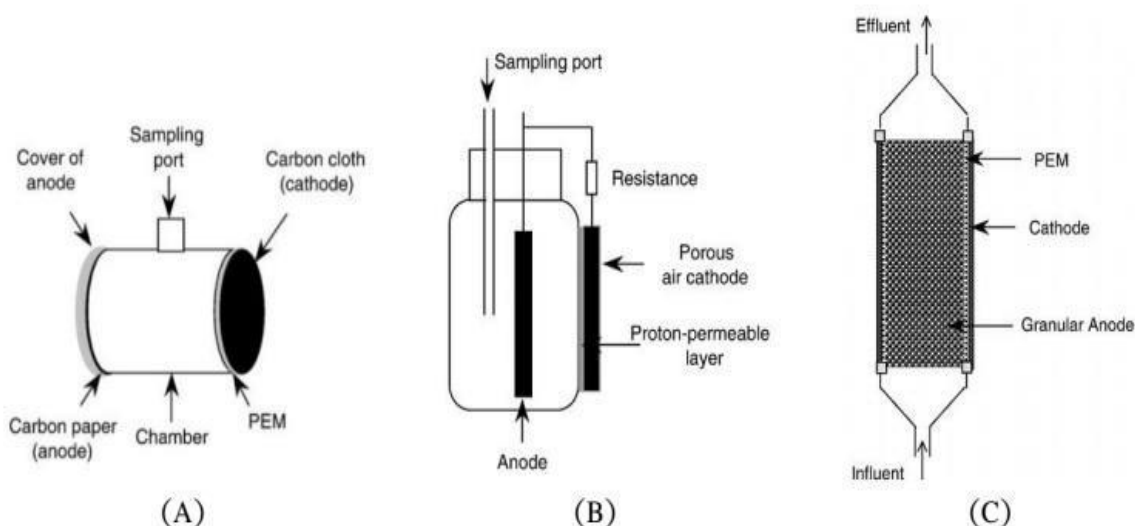
1. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่ (Two-Compartment Microbial Fuel Cell or Two-Chamber Microbial Fuel Cell; TCMFC) เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่สามารถทำงานได้ทั้งแบบกะ (Batch) และแบบต่อเนื่องและนิยมใช้ในระดับห้องปฏิบัติการโดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ประกอบด้วยห้องแอโนดและห้องแคโทดที่กั้นกลางด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane) หรือในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์บางชนิดอาจใช้สะพานเกลือ (Salt bridge) ที่ยอมให้อิออนบวกเคลื่อนที่ผ่านเป็นตัวเชื่อมระหว่างห้องแอโนดและห้องแคโทด ซึ่งในขณะเดียวกันจะไม่ยอมให้ออกซิเจนในห้องแคโทดผ่านมายังห้องแอโนดได้ (ทวิทย์ จันทร์สด, 2551) ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่
ที่มา: (Drapcho et al., 2008)

2. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว (Single-Compartment Microbial Fuel Cell หรือ Single Chamber Microbial Fuel Cell; SCMFC) เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวจะออกแบบง่ายและมีต้นทุนต่ำกว่าแบบห้องคู่โดยจะมีแค่ส่วนแอโนดโดยจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวใช้เมมเบรน (Membrane Single Chamber Microbial Fuel Cell; M-SCMFC) ประกอบด้วยส่วนแอโนดที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ (Bioreactor) กับส่วนแคโทดที่อยู่ภายนอกถังโดยมีเยื่อเลือกผ่านโปรตอนเป็นตัวเชื่อมระหว่างส่วนแอโนดและแคโทดซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวใช้เมมเบรนนี้อาจมีรูปร่างลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะของการออกแบบและการใช้งาน (ชนิษฐา หมูโสภิญ, 2554) ดังแสดงในภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 ลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว

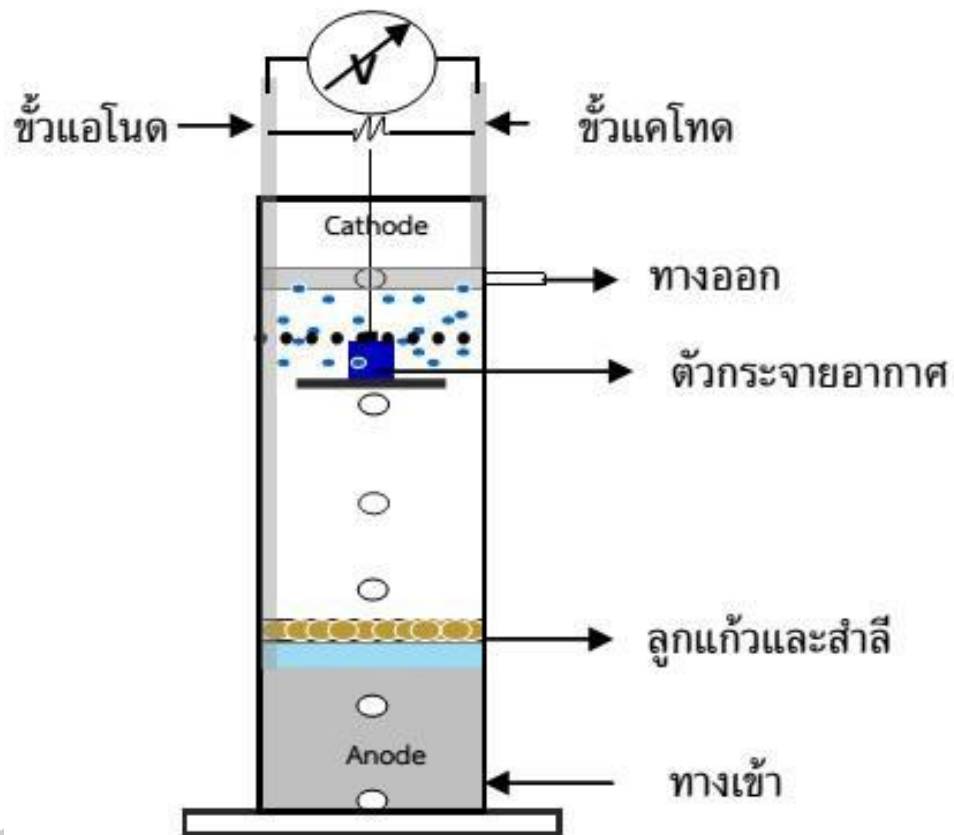
(A) ส่วนแคโทดและแอโนดอยู่คนละด้านของทรงกระบอก,

(B) เยื่อแลกเปลี่ยนเคลื่อนที่อยู่ที่ช่องทางออกติดกับแคโทด,

(C) แอโนดมีลักษณะเป็นเม็ดแกรไฟต์อยู่ในแคโทดอยู่ที่ผิวของทรงกระบอก

ที่มา: (ทวีทย์ จันทรสวด, 2551)

2. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบไม่ใช้เมมเบรน (Membrane less Single Chamber Microbial Fuel Cell; ML-SCMFC) เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบไม่ใช้เมมเบรนจะสร้างด้วยท่อหรือวัสดุที่เป็นลักษณะคอลัมน์ประกอบด้วยส่วนแอโนดที่ถูกติดตั้งไว้ส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ที่ประกอบไปด้วยเชื้อจุลินทรีย์ขั้วแอโนด อาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ และส่วนแคโทดที่วางอยู่ส่วนบนของถังปฏิกรณ์ โดยที่ใกล้ ๆ กับแอโนดมีชั้นของสำลีและใยแก้วทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นระหว่างส่วนแอโนดกับแคโทด (ธันยรัตน์ ไชยอินปัน และ ณัฐวุฒิ เขื่อนแก้ว, 2553) ดังแสดงในภาพประกอบ 10

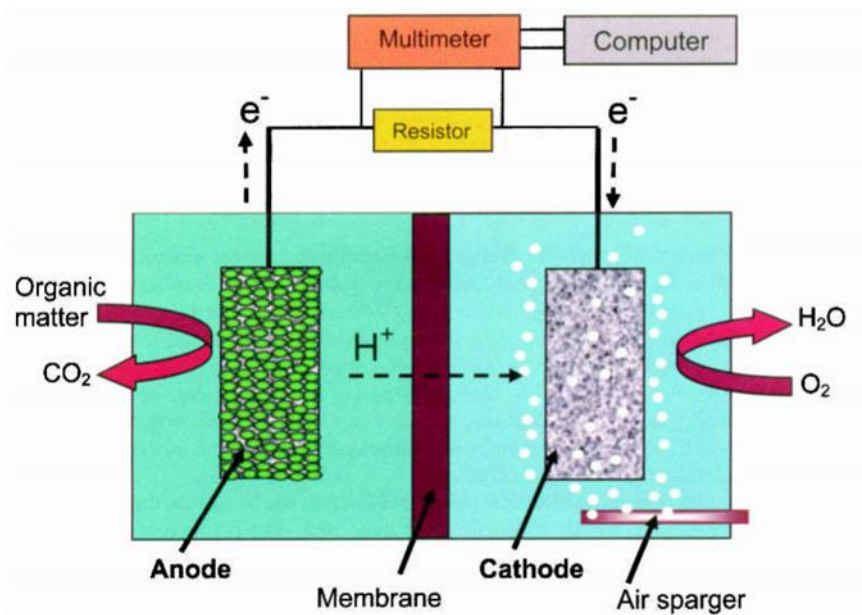


ภาพประกอบ 10 ลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ห้องเดียวแบบไม่ใช้เมมเบรน
ที่มา: (สุทธิพร วารีสุนเนิน, 2550)

พหุ ประ โท ชี เว

3. กลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

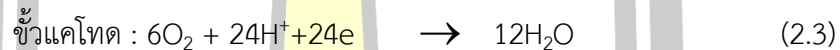
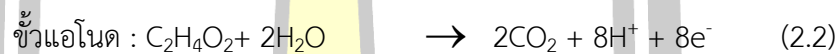
ด้วยความสามารถของแบคทีเรียบางชนิดที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังตัวรับอิเล็กตรอน เช่น เหล็กออกไซด์ ซึ่งเรียกว่า Exoelectrogens ภายในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ MFCs ออกซิเจนในห้องแอโนดจะยับยั้งการผลิตกระแสไฟฟ้างั้นระบบต้องได้รับการออกแบบมาเพื่อให้แบคทีเรียแยกออกจากออกซิเจน (Catholyte) การแยกแบคทีเรียออกจากออกซิเจนสามารถทำได้โดยแบ่ง MFCs ออกเป็นสองห้องโดยใช้เมมเบรนที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนประจุระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย ห้องแอโนดที่มีส่วนประกอบสำคัญคือห้องแอโนด ทำหน้าที่ให้แบคทีเรียเจริญเติบโต และห้องแคโทดทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนทำปฏิกิริยากับ Catholyte ในบางครั้งห้องแคโทดจะมีการเติมอากาศเพื่อให้มีออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยา ขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้วจะเชื่อมต่อกันด้วยเส้นลวดที่มีตัวต้านทาน เช่น อุปกรณ์ที่ใช้พลังงาน แต่ในห้องปฏิบัติการตัวต้านทานจะนิยมใช้ Resistor ดังแสดงในภาพประกอบ 11



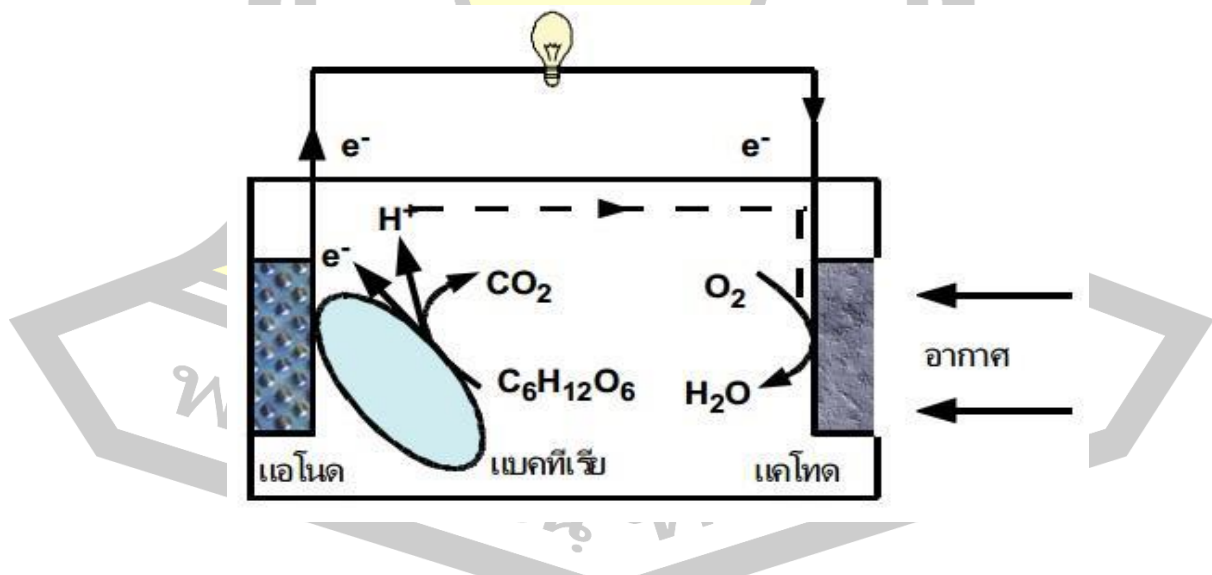
ภาพประกอบ 11 แสดงแผนผังของส่วนประกอบพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่
ที่มา: (Bruce E. Logan, 2008)

ตามหลักการเมมเบรนสามารถให้โปรตอนที่ผลิตจากห้องแอโนดผ่าน โปรตอนจะเคลื่อนที่ไปยังห้องแคโทดรวมกับอิเล็กตรอนที่ถ่ายโอนผ่านทางเส้นลวด และออกซิเจนกลายเป็นน้ำ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตโดย MFCs คำนวณโดยการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโดยใช้โวลต์มิเตอร์ มิลลิโวลต์มิเตอร์หรือ Potentiostat ที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูล

เมื่อทำการป้อนสารอินทรีย์ตั้งต้นเช่นกลูโคสเข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ สารอินทรีย์เหล่านี้จะถูกจุลินทรีย์ที่อยู่รอบๆ ขั้วแอโนดย่อยสลายได้ผลิตผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โปรตอน (H^+) และอิเล็กตรอน (e^-) ดังสมการ (2.2) โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านสารอิเล็กโทรไลต์ ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปตามวงจรไฟฟ้าด้านนอกไปยังขั้วแคโทดเพื่อรวมตัวกับ โปรตอนและตัวรับอิเล็กตรอนเช่นออกซิเจนได้ผลิตภัณฑ์คือน้ำและเกิดกระแสไฟฟ้าดังสมการ (2.3) โดยที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดผลักดันให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอน (ชนิษฐา หมูโสภิญ, 2554)



ปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แสดงดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 12 องค์ประกอบพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

ที่มา: (ชนิษฐา หมูโสภิญ, 2554)

การคำนวณค่าความต่างศักย์ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ทำได้โดยการนำค่า ศักยภาพการเกิดรีดักชันของครึ่งปฏิกิริยา (E^0) ของซัลเฟอร์ (1.123 โวลต์) ตั้ง แล้วลบด้วยค่า (E^0) ของซัลเฟอร์ (-0.014 โวลต์) จากสมการที่ (2) และ (3) จะได้ค่าความต่างศักย์ของเซลล์เชื้อเพลิง จุลินทรีย์เท่ากับ $1.123 - (-0.014)$ เท่ากับ 1.124 โวลต์ ทั้งนี้ค่า E^0 ของครึ่งปฏิกิริยาต่างๆได้รวบรวม ไว้ในตารางที่ 2

ตาราง 2 ค่าศักยภาพการเกิดรีดักชันของสารชนิดต่างๆ

Redox Pair (ox/red)	Electron donor compound	E^0 (volt)	ΔG^0 (kJ/e ⁻)
CO ₂ /CH ₂ O	Carbohydrate	-0.43	+41.5
CO ₂ /CH ₃ OH	Methanol	-0.39	+37.5
CO ₂ /CH ₃ COCOO ⁻	Pyruvate	-0.37	+35.8
CO ₂ /CH ₂ CHOHCOO ⁻	Lactate	-0.34	+32.9
CO ₂ /C ₁₆ H ₂₄ O ₅ N ₄	Protein	-0.33	+32.2
CO ₂ /C ₁₀ H ₁₉ O ₃ N	Domestic Wastewater BOD	-0.33	+31.8
CO ₂ /CH ₃ CH ₂ OH	Ethanol	-0.33	+31.8
CO ₂ /CH ₃ COO ⁻	Acetate	-0.29	+28.0
CO ₂ /C ₂ H ₅ COO ⁻	Propionate	-0.29	+28.0
CO ₂ /C ₈ H ₁₆ O	Oil and Grease	-0.29	+28.0
CO ₂ /CH ₄	Methane	-0.25	+24.1
SO ₄ ²⁻ /HS ⁻	Sulfide	-0.22	+20.9
NO ₃ ⁻ /NH ₄ ⁺	Ammonium	+0.36	-34.7
NO ₃ ⁻ /N ₂	Nitrogen	+0.75	-72.4
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	Ferrous Iron	+0.77	-74.3
O ₂ /H ₂ O	Water	+0.82	-79.1

4. ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

4.1 ขั้วไฟฟ้า

4.1.1 ชนิดของวัสดุทำขั้วไฟฟ้า การใช้วัสดุขั้วไฟฟ้าที่ทำงานได้ดีสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ให้ดีขึ้นเพราะวัสดุขั้วแอโนดที่แตกต่างกันมีผลกระตุ้นให้เกิดโพลาริเซชันที่แตกต่างกัน มีวัสดุหลายชนิดที่ถูกนำมาใช้เป็นขั้วแอโนด เช่น แท่งกราไฟท์ ฝ้ายคาร์บอน กระดาษคาร์บอน และแผ่นกราไฟท์ (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

4.1.2 ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า การลดความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์สามารถทำได้โดยการลดระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทด และการเลือกวัสดุที่เหมาะสม (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

4.1.3 พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวขั้วแคโทดเพิ่มขึ้นและพลังงานไฟฟ้าลดลง เมื่อพื้นที่ผิวขั้วแคโทดลดลง (Oh et al., 2004)

4.2 การสูญเสียความต่างศักย์ไฟฟ้า การสูญเสียความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วแอโนด คุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า การมีอยู่ของสารสื่อกลางและอุณหภูมิ (Rabaey and Verstraete, 2005) ความต่างศักย์ไฟฟ้าอาจมีการสูญเสียในระหว่างการขนส่งอิเล็กตรอนผ่านตัวต้านทานภายนอกและภายใน ซึ่งความต้านทานภายในมักเกิดจากกระบวนการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากตัวจุลินทรีย์สู่ขั้วไฟฟ้า การสูญเสียอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอนในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ โดยที่มีการสูญเสียในขั้นตอนต่างๆ คือ (1) การถ่ายเทอิเล็กตรอนจากตัวจุลินทรีย์ (2) ความต้านทานของสารอิเล็กโทรไลต์ (3) ขั้วแอโนด (4) เมมเบรน (5) ขั้วแคโทด และ (6) การรับอิเล็กตรอนโดยออกซิเจน ซึ่งต้องพิจารณาให้เหมาะสมจึงจะทำให้ได้พลังงานไฟฟ้าที่มากเพียงพอต่อการใช้งาน เช่น การปรับให้ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดเข้าใกล้กันที่สุดเท่าที่จะทำได้ อย่างไรก็ตามการสูญเสียค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความต้านทานภายนอกเป็นหลัก (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

4.3 อุณหภูมิ เป็นที่ทราบกันว่าอุณหภูมิมีผลต่อกิจกรรมของแบคทีเรียในการผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดียว พบว่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงเมื่อมีอุณหภูมิสูงทำให้ศักย์ไฟฟ้าของขั้วแคโทดสูงขึ้น (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

4.4 พีเอช ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการผลิต H_2 คือพีเอช 5.5 จะมีผลต่อรูปแบบของกรดที่ผลิตในระหว่างการผลิตไฮโดรเจน ความเข้มข้นของกรดอะซิติก หรือกรดบิวทริกในรูปแบบที่ไม่แตกตัวจะเกิดที่พีเอช 4.5 มากกว่าที่พีเอช 5.5 ดังนั้นกรดรูปแบบที่ไม่แตกตัวที่มีมากที่พีเอชต่ำจะทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตไฮโดรเจน (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

4.5 เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane : PEM) โดยปกติแล้วขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดจะถูกแยกออกจากกันโดยเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งจะยอมให้

มีการถ่ายโอนของโปรตอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด และช่วยป้องกันการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในห้องขั้วแอโนด เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

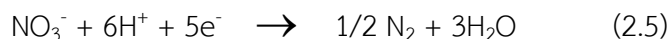
4.6 สารสื่อกลาง (Mediator) เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ใช้จุลินทรีย์ทั่วไปจะต้องการสารสื่อกลางในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากระบบการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของจุลินทรีย์ไปยังขั้วไฟฟ้า สารสื่อกลางชนิดต่างกันจะทำให้กำลังไฟฟ้าต่างกันด้วย (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

4.7 อัตราการให้อากาศ อัตราการให้อากาศที่มากเกินไปจะไปรบกวนการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ค่ากระแสไฟฟ้าต่ำลง (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

4.8 อัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารตั้งต้น อัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารตั้งต้นก็มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ ซึ่งขึ้นกับชนิดของสารตั้งต้นปริมาณของจุลินทรีย์ภายในเซลล์จนพลศาสตร์ของจุลินทรีย์ ปริมาณออกซิเจน รวมถึงอัตราการระบรทุก (Organic Loading Rate : OLR) และระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียในระบบ (Hydraulic Retention Time : HRT) (Rabaey et al., 2003) ที่เหมาะสมต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ จะช่วยให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดสารอินทรีย์ได้ดี (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

4.9 การเกิดก๊าซมีเทน การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียเกิดจากการบำบัดแบบไม่ใช้แสง การสร้างก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพต้องใช้ทรัพยากรร่วมจากการผลิตก๊าซมีเทนในระบบหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งเป็นการทำงานแบบผสมผสานของจุลินทรีย์สองกลุ่มในสองกระบวนการทางชีวเคมี ดังนั้นการยับยั้งการใช้ทรัพยากรร่วมจึงมีความสำคัญ การสร้างไฮโดรเจนต้องยับยั้งกลุ่มที่ใช้ไฮโดรเจน เช่น กลุ่ม Homoacetogens และกลุ่ม Methanogens (ชลธิศา สุขเกษม, 2554)

4.10 สารประกอบซัลเฟตและไนเตรต ในกรณีในขั้วแอโนดมีสารที่มีศักย์ไฟฟ้าสูง เช่น ซัลเฟต หรือไนเตรตในน้ำเสีย ศักย์ไฟฟ้าในขั้วแอโนดจะสูงขึ้น ทำให้แอโนดเปลี่ยนเป็นหน้าที่รับอิเล็กตรอนแทน (Rabaey and Verstraete, 2005) ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าลดลง โดย Ecke and Lagerkvist (2000) พบว่าเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ใช้อากาศจะสร้าง ATP จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ในขณะที่บางส่วนของสารประกอบอินทรีย์จะถูกใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Substrate-level phosphorylation) ภาตัวรับอิเล็กตรอนเป็นสารอนินทรีย์หรือไอออน เช่น ไนเตรต ซัลเฟต ซัลเฟอร์คาร์บอเนต ฟลูมาเลท หรือ ไอออนของเหล็ก การสร้าง ATP จะผ่านกระบวนการ Electron transport phosphorylation การหายใจโดยใช้ไนเตรตมักพบในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศ การหมักแบบมีอากาศบางส่วนไนเตรตจะถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรท์ ก๊าซไนตรัสออกไซด์และก๊าซไนโตรเจน จุลินทรีย์กลุ่ม Nitrate-reducing bacteria จะใช้ไฮโดรเจนในการเปลี่ยนไนเตรตเป็นก๊าซไนโตรเจนดังสมการ (2.5)

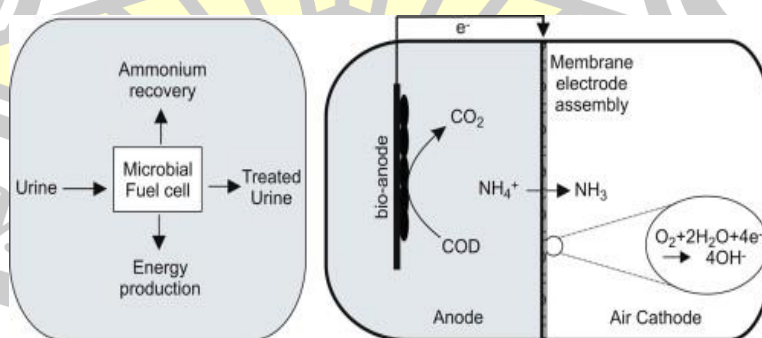


5. ข้อจำกัดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

ความซับซ้อนของกระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ต้องใช้หลายศาสตร์ร่วมกัน เช่น ชีวะ เคมี ไฟฟ้า และยังไม่เป็นที่เปิดเผยมากนัก ซึ่งการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จากระดับเล็กขยายไปสู่ขนาดใหญ่ยังเป็นเรื่องที่ยาก เนื่องจากมีข้อจำกัดที่ต้องใช้อุปกรณ์ยุ่งยากซับซ้อนในการบ่อนอาหารและต้องใช้เวลาในการเตรียมสารอาหาร ทำให้ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในชุมชนหรือโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีปริมาณน้ำเสียในปริมาณมากๆ ได้ ปริมาณพลังงานที่ผลิตได้น้อยลงถึงแม้ว่าจะเพิ่มขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ขึ้นก็ตาม (Greenman and Ioannis, 2017) สำหรับการเพิ่มปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ในระบบ MFC โดยมีความง่ายสูง จากการเติมสารสื่อกลางในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากเชื้อจุลินทรีย์ไปยังขั้วไฟฟ้า (Kim et al., 2005; Tanaka et al., 1983) ความไม่เสถียรของระบบ MFC อันเกิดจากการทำงานโดยมีปัจจัยที่แตกต่างกันดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

6. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ใช้น้ำปัสสาวะเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ

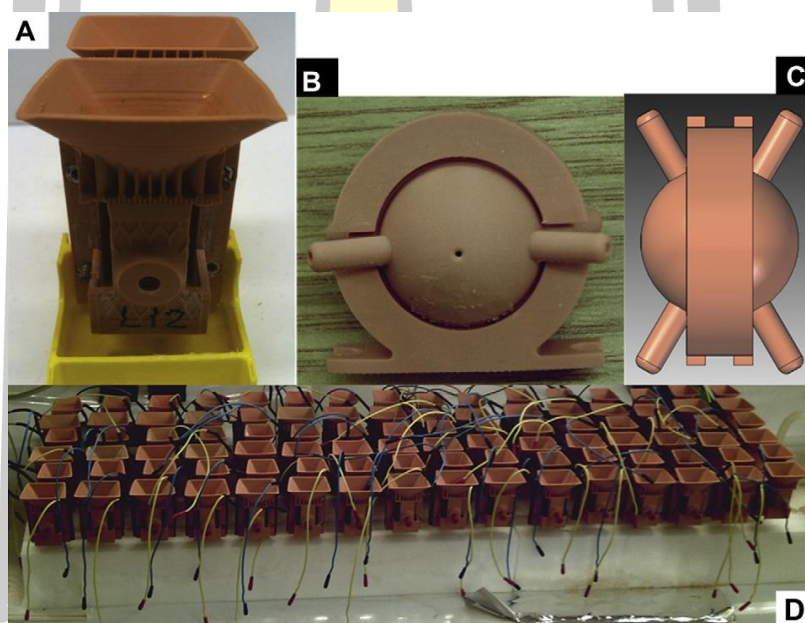
น้ำปัสสาวะเป็นแหล่งพลังงานอุดมไปด้วยแอมโมเนีย ในการกู้คืนและการผลิตพลังงานโดยใช้ระบบ MFC NH_4^+ เกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์ที่ห้องแอโนดเป็นตัวสำคัญสำหรับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ซึ่งการแพร่กระจาย NH_3 ช่วยเพิ่มการขนส่งแอมโมเนียทั้งหมดไปยังขั้วแคโทด จากนั้น NH_3 จะแยกออกจากเขตของก๊าซเหลวที่ขั้วแคโทด เกิดจากบริเวณที่ค่า pH สูง และการเติมอากาศมีการแพร่กระจายก๊าซที่ห้องแคโทด (Kuntke et al., 2012)



ภาพประกอบ 13 กระบวนการที่เกี่ยวข้องในการกู้คืนแอมโมเนียโดยใช้ระบบ MFC

ที่มา: (Kuntke et al., 2012)

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่สร้างจาก Nanocure® Polymer ซึ่งเป็นเทคโนโลยีต้นแบบ ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดทำจากผ้าคาร์บอนขนาด 15 ตารางเซนติเมตร พับอยู่ในท่อขนาด 1 มิลลิเมตร เมื่อเติมตะกอนจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศลงไป หลังจาก 17 วัน ทำการเติมน้ำปัสสาวะ สังกะราษท์เข้าไปในอัตรา 0.09 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และเพิ่มเป็น 0.43 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง โดย HRT อยู่ที่ 12.69 นาที ซึ่งให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 117 ไมโครวัตต์ หรือ 962.94 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร การใช้น้ำปัสสาวะที่ไม่เจือปนเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อหลักสำหรับการผลิตพลังงานด้วยระบบ MFC แบบต่างๆ และ แบบ Stacks ขนาดเล็กสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรงซึ่งมี ปริมาตรรวม 1.4 มิลลิลิตร เมื่อใช้ MFCs 48 เซลล์ ขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกันเป็นชั้นให้พลังงานที่เท่ากับกับ MFC ขนาดใหญ่ 6.25 มิลลิลิตร ส่งผลให้ความหนาแน่นของพลังงานเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 4.93 มิลลิวัตต์ต่อ ตารางเมตร (Ieropoulos et al., 2013a)

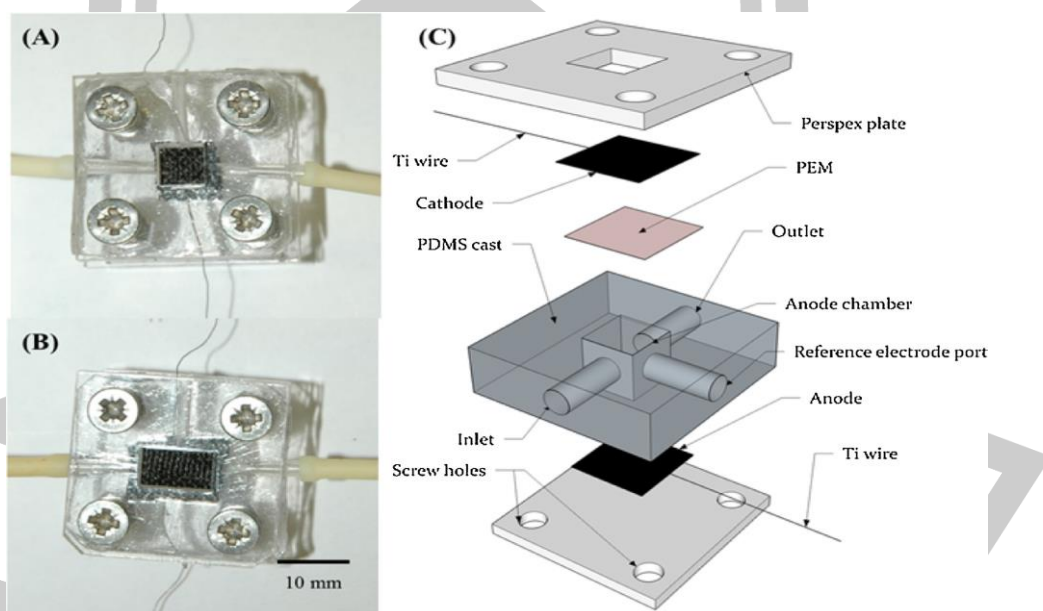


ภาพประกอบ 14 ประเภทของ MFC ที่แตกต่างกันสำหรับการบำบัดปัสสาวะ
 (A) MFC ที่ทำจากแม่พิมพ์อย่างรวดเร็วขนาด 6.25 mL ที่ออกแบบมาสำหรับการไหลอย่างต่อเนื่อง,
 (B) MFC ขนาด 1.4 mL,
 (C) MFC ขนาด 1.4 mL ออกแบบมาสำหรับการไหลอย่างต่อเนื่อง,
 (D) Stacks MFCs 6.25 mL

ที่มา: (Ieropoulos et al., 2013a)

การศึกษาผลต่างระหว่างขั้วแคโทดที่มีส่วนผสมของแพลตตินัมและไม่มีแพลตตินัม เตินระบบต่อเนื่องเป็นเวลามากกว่า 1000 ชั่วโมง ของการผลิตพลังงานจากระบบ MFC แบบห้องเดี่ยวไม่ใช่เมมเบรนในการบำบัดน้ำปัสสาวะ ทำให้ทราบว่าค่า pH ของน้ำปัสสาวะเพิ่มขึ้นจาก 5.4-6.4 เป็น 9.0 จากกระบวนการไฮโดรไลซิสของยูเรีย ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากขั้วแคโทดที่มีส่วนผสมของแพลตตินัมนั้นจะมีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.13 มิลลิแอมแปร์ และขั้วแคโทดที่ไม่มีส่วนผสมของแพลตตินัมนั้นจะอยู่ระหว่าง 0.13-0.15 มิลลิแอมแปร์ สำหรับขั้วแคโทดที่มีส่วนผสมของแพลตตินัมจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.18-0.23 มิลลิแอมแปร์ เห็นได้ว่าประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า pH จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของยูเรีย (Santoro et al., 2013)

แนวทางการพัฒนา MFCs ขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพได้ใช้การกำหนดค่าระยะห่างขั้วไฟฟ้า โดยการเพิ่มความยาวของขั้วไฟฟ้าและระยะเวลาพักเก็บ ทำให้ความหนาแน่นของพลังงานเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 เท่าเนื่องจากคุณสมบัติการถ่ายเทมวลและการใช้พื้นผิวขั้วแคโทดที่เพิ่มขึ้น ป้อนน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ที่อัตราการไหลคงที่ 0.36 มิลลิแอมแปร์ต่อนาที อย่างต่อเนื่องที่ระบบ MFCs 3 เซลล์ ต่อกันแบบขนาน ทำให้ผลิตพลังงานได้ถึง 1.2 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร (Chouler et al., 2016)

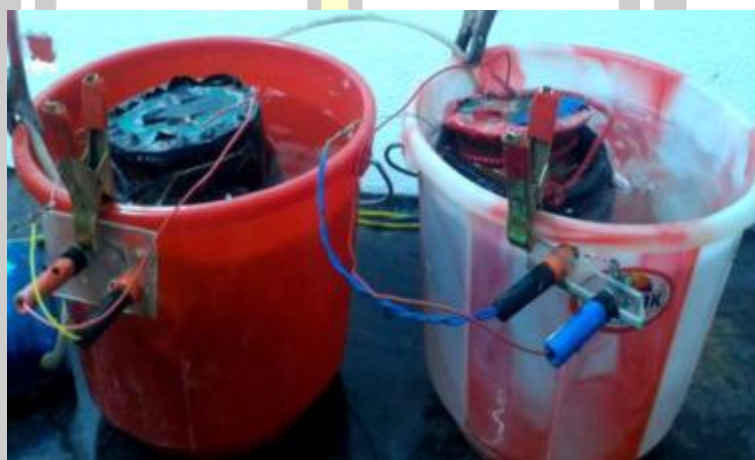


ภาพประกอบ 15 ระบบ MFCs

(A) ภาพถ่ายของ MFC-S, (B) รูปภาพของ MFC-L, (C) คำโครงแบบแผนของอุปกรณ์

ที่มา: (Chouler et al., 2016)

การบำบัดน้ำปัสสาวะของวัวโดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จากดินเหนียว โดยมีค่า COD แตกต่างกัน ความเข้มข้นของอาหารเลี้ยงเชื้อเพิ่มขึ้นจาก 1.5 เป็น 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน เมื่อเพิ่ม COD ขึ้นอีก 30 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าความเข้มข้นของอาหารที่เหมาะสมคือ 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 5.23 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 1.36 ± 0.05 โวลต์ ในการเชื่อมต่อแบบขนานและกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 48 แอมแปร์ต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตร้อยละ 77 ± 4.1 และการกำจัดคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 80 ± 3.9 (Jadhav et al., 2016)



ภาพประกอบ 16 การทำงานของ MFCs แบบ dual chambered ในการบำบัดปัสสาวะ
ที่มา: (Jadhav et al., 2016)

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ MFCs มีความสามารถในการออกซิไดซ์อินทรีย์วัตถุและถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังวงจรภายนอกเป็นกระแสไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 1 โวลต์ จากงานวิจัยที่ผ่านเป็นที่ทราบว่าน้ำปัสสาวะเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อที่ดีเยี่ยมสำหรับระบบ MFC ต่างๆ โดยศึกษาระบบ MFC ที่ประกอบด้วยเซลล์จำนวน 32 เซลล์ ที่เชื่อมต่อกันแบบขนาน โดยผลิตได้ค่าความหนาแน่นพลังงานเฉลี่ย 23 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร และมีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 65 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร (Cid et al., 2018)

2.3 ถังกรองไม่เติมอากาศแบบไหลขึ้น

ถังกรองแบบไร้อากาศเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน มีระยะเวลาเก็บกักตะกอนสูง และเป็นระบบที่ใช้เครื่องมืออ่อนโยน โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นถังกลม หรือ ถังสี่เหลี่ยมปิดมิดชิด เพื่อให้อยู่ในสถานะไร้อากาศ ภายในเครื่องกรองบรรจุด้วยตัวกรอง (Filter Media) ซึ่งจะมีน้ำท่วมเต็มถึงตลอดเวลา และเมื่อน้ำเสียไหลผ่านตามช่องว่างของตัวกรองซึ่งมีตะกอน แบคทีเรียสะสมอยู่แล้วนั้น จะเกิดการสัมผัสระหว่างแบคทีเรียกับน้ำทิ้งได้อย่างทั่วถึง จุลินทรีย์ที่เกาะ หลวมๆ อยู่ตามบริเวณผิวของตัวกรองและอยู่ตามช่องว่างระหว่างตัวกลางทำให้ระบบนี้ไม่ต้องกวนน้ำ เสียภายในถัง จะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นก๊าซมีเทนและ คาร์บอนไดออกไซด์ (Aiyuk et al., 2006) การย่อยสลายในถังการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบนี้จะ ใช้เวลา เก็บกักของน้ำเสียอาจมีตั้งแต่ 1-10 วัน โดยสามารถรับ COD ของน้ำเสียได้ตั้งแต่ 4-16 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน ได้อย่างมีประสิทธิภาพตัวกลางที่สามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพคือพวกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติได้แก่ ก้อนหิน พลาสติก อิฐ ทราย ดินเผา เป็นต้น สำหรับขนาดของตัวกลางไม่ควรมีขนาดเล็กหรือจนใหญ่เกินไป ถ้ามีขนาดเล็กเกินไปอาจทำให้เกิดปัญหาอุดตันขึ้นได้ง่ายทำให้เกิดการไหลล้นวงจร แต่ถ้าใช้ตัวกลางที่มีขนาดใหญ่เกินไปอาจทำให้มี พื้นที่ผิวตัวกลางน้อยลง ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียลดลงในบางครั้งน้ำเสียที่ไหล เข้าระบบมีค่า BOD สูงกว่าปกติ ก็อาจแก้ไขได้โดย การสูบน้ำทิ้งที่ไหลผ่านระบบ Anaerobic Filter นี้แล้วกลับเข้าสู่ระบบอีกครั้งเพื่อทำให้ BOD ผสมมีปริมาณความเข้มข้นปกติ กระบวนการบำบัดน้ำ เสียในสถานะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Wastewater Treatment) ของถังกรองไม่เติมอากาศแบบ ไหลขึ้นโดยจุลินทรีย์จะอาศัยสารประกอบสารประกอบอื่นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนละลาย น้ำ (Dissolved oxygen) หรือออกซิเจนอิสระสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนในน้ำเสียจะถูกย่อย สลาย โดยแบคทีเรียชนิดผลิตกรด (Acid formers) ได้กรดอินทรีย์ และแอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์จะ ถูกย่อยสลายต่อโดยแบคทีเรียชนิดผลิตมีเทน (Methane formers) ได้มีเทน (CH_4) และ คาร์บอนไดออกไซด์การย่อยสลายแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน

(1) ขั้นตอนการเกิดกรด (Acid phase) ขั้นตอนนี้แบคทีเรียที่เรียกว่าแบคทีเรียชนิดผลิต กรด (acid forming bacteria) จะย่อยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนไปเป็นกรดอินทรีย์ซึ่งระเหย ได้ ทำให้ pH ต่ำลง

(2) ขั้นตอนการเกิดมีเทน (Methane phase) แบคทีเรียกลุ่มที่ 2 คือชนิดผลิตมีเทน (Methane forming bacteria) ใช้กรดอินทรีย์ในขั้นตอนแรกได้เกิดเป็นก๊าซมีเทน และ คาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนกรดอะมิโนจากขั้นตอนแรกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียทำให้กรดอินทรีย์ที่ เหลืออยู่เป็นกลาง pH สูงขึ้นเหมาะกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มนี้

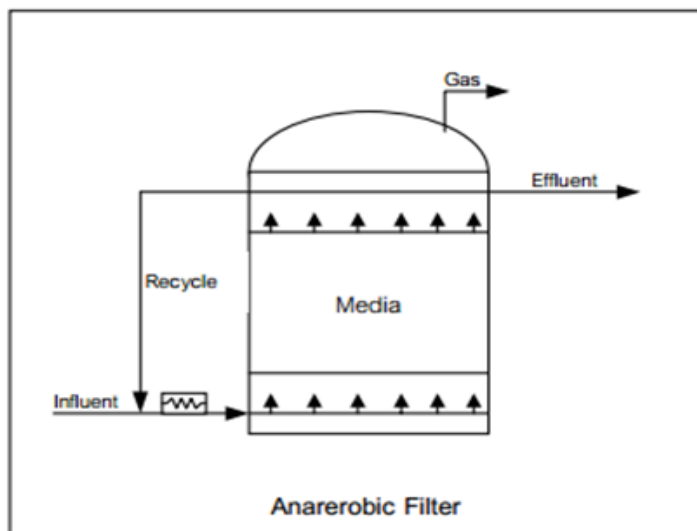
แบคทีเรียชนิดผลิตมีเทน จะย่อยพวกกรดอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว และสามารถย่อยพวกกรดไขมันที่ไม่ถูกย่อยในขั้นตอนแรก กรดไขมันจะถูกย่อยเป็นกรดอะซิติก และกรดอะซิติกถูกย่อยเป็นมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแบคทีเรียที่พบมี 2 ชนิด

(1) แบคทีเรียชนิดผลิตกรด เป็นพวกใช้หรือไม่ใช้ออกซิเจน (facultative bacteria) คือระยะเริ่มแรกอาจมีออกซิเจนปนอยู่บ้าง แบคทีเรียกลุ่มนี้ก็สามารถดำรงชีพได้เป็นแบคทีเรียที่ย่อยสารอินทรีย์เป็นกรดอินทรีย์ แบคทีเรียกลุ่มนี้มี Pseudomonas, Flavobacterium, Aerobacter, Escherichia

(2) แบคทีเรียชนิดมีเทนเป็นแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนอย่างแท้จริง แบคทีเรียกลุ่มนี้ย่อยพวกกรดอินทรีย์เป็นก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียกลุ่มนี้คือ Methanobacteria, Methanosarcina, Methanococcus, Methanobacillus ซึ่งเป็นแบคทีเรียชนิดกรัมลบไม่ใช้ออกซิเจน

1. กลไกการบำบัดน้ำเสียของถังกรองไม่เติมอากาศแบบไหลขึ้น

ระบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Anaerobic Up flow Filter) มีรูปแบบและการทำงานของถังปฏิกริยาดังแสดงในภาพประกอบ 17 โดยน้ำเสียจะถูกป้อนเข้าสู่ถังปฏิกริยาทางด้านก้นถังและผ่านชั้นของตัวกลางขึ้นสู่ทางด้านบนของถังปฏิกริยา ชั้นของตัวกลางที่ถูกบรรจุอยู่ในถังปฏิกริยาจะทำหน้าที่ให้จุลินทรีย์ที่จะทำการย่อยสลายมลพิษ (สารอินทรีย์) โดยทั่วไปแล้วการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าวต้องคำนึงถึงความหนาหรือความสูงของตัวกลางด้วย นั่นคือความสูงของตัวกลางควรมีค่าไม่เกิน 1.5 เมตร หากความสูงของตัวกลางมากเกินไปอาจจะประสบปัญหาการอุดตันของชั้นตัวกลางได้ง่าย เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่เพิ่มจำนวนมากขึ้นหลังจากการเดินระบบไประยะหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้ความดันในระบบบำบัดน้ำเสียหรือถังกรองไร้อากาศลดลง (Head loss) ดังนั้น การออกแบบโดยทั่วไปแล้ว ชั้นของตัวกลางควรมีความสูงประมาณ 1.20 เมตร นอกจากนี้แล้วระยะเวลาเก็บกักของน้ำเสียในถังปฏิกริยาควรจะไม่น้อยกว่า 4 วัน (โดยทั่วไปมักจะออกแบบไว้ประมาณ 7 วัน) อนึ่ง น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมักจะมีค่าความเข้มข้นของมลพิษคือสารอินทรีย์ หรือบีโอดีสูงอยู่ อาจจะกล่าวได้ว่า ความเข้มข้นของบีโอดีที่เหลือในน้ำเสียที่ผ่านถังปฏิกริยาแล้วยังสูงกว่า 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (พรพิมล ยิ้มห้อย, 2552)



ภาพประกอบ 17 ถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น

ที่มา: (Grady et al., 1999)

2. ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของถังกรองไม่เติมอากาศแบบไหลขึ้น

เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศหรือระบบบำบัดน้ำเสียที่ไม่มีการเติมอากาศจะประกอบด้วยจุลินทรีย์หลายกลุ่มทำงานร่วมกันจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มจะมีความแตกต่างกันไปในการดำรงชีวิตและมีความต้องการสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันในการเจริญเติบโต การย่อยสลายทางอินทรีย์ รวมทั้งการผลิตก๊าซมีเทนสภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย มีดังนี้ (ทวีทรัพย์ เลียรนัยขจร, 2545)

2.1 อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ที่ใช้ในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ดังภาพประกอบ 18 ถ้าหากเอนไซม์ถูกทำลายเซลล์ของแบคทีเรียจะตายในที่สุดอุณหภูมิมี และมีผลอย่างมากต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยจุลินทรีย์ในแต่ละกลุ่มในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจะมีความต้องการสภาวะอุณหภูมิและระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันในการดำรงชีวิต สามารถแบ่งกลุ่มของจุลินทรีย์ได้ดังนี้

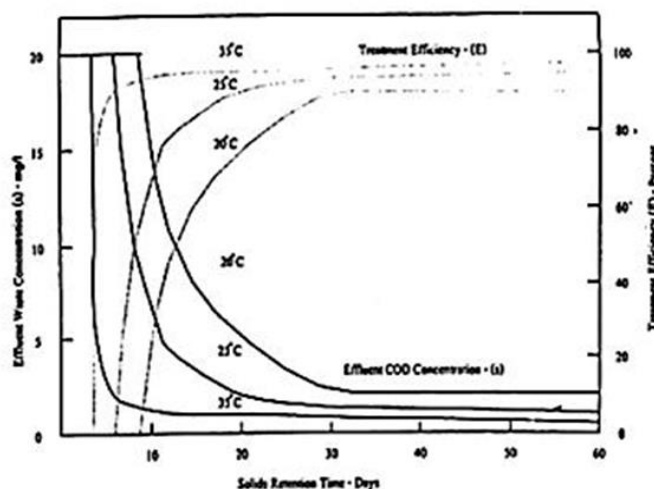
2.1.1 Psychrophilic range มีช่วงอุณหภูมิ 5-15 องศาเซลเซียส

2.1.2 Mesophilic range มีช่วงอุณหภูมิ 35-37 องศาเซลเซียส

2.1.3 Thermophilic range มีช่วงอุณหภูมิ 55- 50 องศาเซลเซียส

โดยทั่วไปแล้วจุลินทรีย์กลุ่ม Mesophilic bacteria จะเป็นที่ยอมรับใช้มากที่สุดในระบบบำบัดน้ำเสียโดยเฉพาะประเทศในแถบร้อน เช่น ประเทศไทย รวมทั้งประเทศในแถบเอเชียที่อุณหภูมิเฉลี่ยเฉลี่ย ในธรรมชาติในสภาวะปกติประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์

ของระบบบำบัดน้ำเสียจะสูง กว่าอุณหภูมิปกติประมาณ 3-5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในถังปฏิกริยาน่าจะอยู่ในช่วง 35-37 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะสม สำหรับจุลินทรีย์กลุ่ม Mesophilic bacteria โดยไม่มีความจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของถัง ปฏิกริยาหรือระบบบำบัดน้ำเสีย ส่วนน้ำเสียที่มีอุณหภูมิสูงหรือต้องการควบคุมอุณหภูมิของน้ำเสียให้สูง อาจจะต้องเลือกจุลินทรีย์กลุ่ม Thermophilic bacteria ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิในช่วง 50-55 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบบำบัดน้ำเสีย โดยส่วนใหญ่ประสิทธิภาพการบำบัดที่ 55 องศาเซลเซียส จะสูงขึ้น 1 เท่าตัวเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส อนึ่งการเลือกควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียที่อุณหภูมิในช่วงใดนั้นควรพิจารณาความเหมาะสมในหลายๆด้านด้วยแม้ว่าในช่วงเทอร์โมฟิลิคจะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้รวดเร็วกว่ามีโซฟิลิค แต่มักจะให้จุลินทรีย์อยู่ในช่วงมีโซฟิลิคมากกว่า ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากพวกเทอร์โมฟิลิคจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิมากกว่า ดังนั้นการรักษาอุณหภูมิให้สม่ำเสมอจึงมีความสำคัญมากกว่าจะให้ อุณหภูมิที่มีอัตราการย่อยสลายสูงสุด การลดลงหรือเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 2-3 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซมีเทนอย่างมาก



ภาพประกอบ 18 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับระยะเวลาการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์และประสิทธิภาพการกำจัดน้ำโสโครกด้วยวิธีทางชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ที่มา: (Lawrence and McCarty, 1969)

2.2 ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความเป็นกรด-ด่างหรือค่าพีเอชเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ การย่อยสลายของจุลินทรีย์ ในถังย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่ง จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ถ้าค่าพีเอชมีค่าที่ไม่เป็นกลางการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนจะถูกยับยั้งทำให้ระบบการย่อยสลายทั้งระบบล้มเหลวได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการควบคุมพีเอชอาจจะต้องมีการเติมสารเคมี เช่น ปูนขาวหรือโซเดียมคาร์บอเนตใน กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า 6.5 ประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์พวกสร้างมีเทนจะลดลงอย่างมาก แต่ถ้าต่ำกว่า 5.0 จะยับยั้งการเจริญเติบโตและตาย สำหรับจุลินทรีย์พวกสร้างกรดมีความสามารถทนต่อสภาพความเป็นกรดได้ต่ำกว่า 4.5 โดยไม่เป็นอันตราย เนื่องจากสภาพธรรมชาติของจุลินทรีย์ชนิดนี้ ซึ่งเมื่อย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วจะได้กรดอินทรีย์ และที่ค่าพีเอชสูงกว่า 8.0 การเกิดก๊าซมีเทนก็จะลดลงด้วยเช่นกัน ช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศควรจะเป็น 6.6-7.4 13 กรดอินทรีย์และค่าความเป็นกรดต่าง (Volatile fatty acid & total alkalinity) กรดอินทรีย์ ที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศได้แก่ กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดบิวทีริก (Butyric Acid) กรดโพรพิโอนิก (Propionic Acid) เป็นต้น แต่โดยส่วนใหญ่จะเป็นกรดอะซิติกในสภาพพีเอชเป็นกลาง กรดอินทรีย์เหล่านี้จะอยู่ในรูปของอะซิเตทบิวทีเรท และโพรพิโอเนท ในระบบที่อยู่ในสภาวะสมดุลอัตราการสร้างกรดและอัตราการใช้กรดเพื่อสร้างมีเทนของจุลินทรีย์จะเท่ากัน แต่ถ้าอยู่ในสภาวะไม่สมดุล อัตราการสร้างกรดสูงกว่า จะเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ที่ความเข้มข้นเกินกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ก็อาจจะทดสอบได้ถึงความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3 อัตราภาระบรรทุกอินทรีย์ (Organic loading) ปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบในแต่ละวัน คิดเทียบกับขนาดของถังเติมอากาศ ซึ่งจะมีค่าเป็นสัดส่วนกับค่า F/M Ratio มีหน่วยเป็น กิโลกรัมบีโอดี ต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

2.4 ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) แบคทีเรียที่เป็นสารอินทรีย์ในน้ำต้องการออกซิเจน (Aerobic bacteria) ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ความต้องการออกซิเจนของแบคทีเรียนี้จะทำให้จะทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง ดังนั้นในน้ำที่สะอาดจะมีค่า DO สูง และน้ำเสียจะมีค่า DO ต่ำ มาตรฐานของน้ำที่มีคุณภาพดีโดยทั่วไปจะมีค่า DO ประมาณ 5-8 ppm หรือปริมาณ O_2 ละลายอยู่ประมาณ 5-8 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 5-8 ppm น้ำเสียจะมีค่า DO ต่ำกว่า 3 ppm ค่า DO มีความสำคัญในการบ่งบอกว่าแหล่งน้ำนั้นมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอต่อความต้องการของสิ่งมีชีวิตหรือไม่

2.5 ตัวกลางระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังกรองไร้อากาศ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบจะมีตัวกลางที่เหมาะสมเพื่อให้จุลินทรีย์ยึดเกาะ ทำให้จุลินทรีย์ไม่หลุดออกจากระบบ และทำให้ระบบสามารถรองรับความสกปรกของสารอินทรีย์ได้สูง ทนต่อความแปรปรวนของภาระบรรทุกอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นได้

2.6 สภาพไร้ออกซิเจน น้ำทิ้งในถังปฏิบัติการต้องไม่มีออกซิเจนอยู่เลยเนื่องจาก ออกซิเจนเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์จำพวก Methane Formers

3. ค่าแนะนำในการออกแบบถังกรองไม่เติมอากาศแบบไหลขึ้น

ปริมาณและความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ของตะกอน เป็นตัวแปรสำคัญในการทำงานของระบบถังกรองไม่ใช้ อากาศเช่นเดียวกับถังปฏิบัติการไม่ใช้อากาศแบบอื่นๆ โดยจุลินทรีย์ในระบบถังกรองไม่ใช้อากาศจะขึ้นอยู่กับตัวกลางที่ใช้ สำหรับเกณฑ์การออกแบบของระบบถังกรองไม่ใช้อากาศจะใช้อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ในการออกแบบปริมาตรของถัง ปกติระบบถังกรองไม่ใช้อากาศสามารถรับอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ได้ 5-15 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน และมีอัตราการกำจัดสารอินทรีย์สูงสุดประมาณ 1.0 กก.ซีโอดี/กก.VSS-วัน และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ร้อยละ 60-95 ระยะเวลาพักเก็บ 1-4 วัน ที่อัตราการระบรทุก COD 4-16 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2537) สำหรับแนวทางในการออกแบบถังกรองเบื้องต้น ดังแสดงในตารางที่ 3

ตาราง 3 เกณฑ์การออกแบบระบบถังกรองแบบไร้อากาศ

รายละเอียด	เกณฑ์
ส่วนเกรอะ (septic)	
-ประสิทธิภาพการกำจัด BOD	≤ 60%
-hydraulic detention time	ไม่น้อยกว่า 24 ชม
ส่วนกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter)	
-ประสิทธิภาพการกำจัด BOD	≤ 60%
- hydraulic detention time	ไม่น้อยกว่า 10 ชม
-อัตราการกำจัดสารอินทรีย์ของวัสดุกรองไร้อากาศ	0.2 – 0.3 กิโลกรัม.ปีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน

ที่มา : สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย “คำกำหนดการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย” (2540) หมายถึง SRT = ระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ในบ่อกำจัด, HRT = ระยะเวลาที่น้ำทิ้งอยู่ในบ่อ

4. แบบจำลองจลพลศาสตร์ในการบำบัดน้ำเสียของถังกรองไม่เติมอากาศแบบไหลขึ้น

ในมุมมองทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม การเปลี่ยนค่าอัตราการป้อนน้ำเสีย (Q : Flow rate หรือ feeding rate) หรืออัตราการเวียนน้ำเสียเข้าระบบ (Recirculation rate) ซึ่งส่งผลกระทบต่อระยะเวลาที่กักเก็บ (HRT : Hydraulic Retention Time) และอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR : Organic Loading Rate) ของระบบ เมื่อพิจารณา MFC ในฐานะระบบบำบัดน้ำเสียชนิดหนึ่ง กล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่า Q , HRT, OLR ฯลฯ ย่อมทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในระบบเปลี่ยนแปลงไปด้วย ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานทางพลศาสตร์ของไหลที่มีต่อกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพการบำบัดเสียสังเคราะห์ของ MFC และนำเสนอแบบจำลองใช้ในการตัดสินใจเลือกค่า Q , HRT, S_0 พารามิเตอร์พื้นฐานทางพลศาสตร์ของไหลในการใช้ MFC บำบัดน้ำปัสสาวะและผลิตไฟฟ้าเสนอแบบจำลองแบบจำลองที่ใช้คาดคะเนค่าอัตราเร็วในการบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดจากตัวแปรต้น Q , HRT, S_0 และค่าคงที่ต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ ทั้งนี้แบบจำลองที่นำเสนอจัดอยู่ในรูปแบบ Monod (สมการ 2.6) modified Stover-Kincannon (สมการ 2.7) และ Grau second-order models (สมการ 2.8)

$$\mu = \mu_m S / (K_s + S) \quad (2.6)$$

โดย μ คือ อัตราจำเพาะการเจริญเติบโต (day^{-1})
 μ_m คือ อัตราจำเพาะการเจริญเติบโตสูงสุด (day^{-1})
 S คือ ค่าความเข้มข้นของสารอาหาร (g/m^3)
 K_s คือ ค่าคงที่ของความอิ่มตัว (g/m^3)

$$\frac{V}{Q(S_i - S_e)} = \frac{k_B V}{U_{\max} Q S_i} + \frac{1}{U_{\max}} \quad (2.7)$$

โดย Q คือ อัตราการไหล (L/day)
 V คือ ปริมาตรใช้งานจริงของถังกรองไร้อากาศ (L)
 A คือ พื้นที่ผิวของจานหมุนที่เกิดการตรึงของจุลินทรีย์ (m^2)
 S_i และ S_e คือ ค่าความเข้มข้นของสารมลพิษขาเข้าและขาออก (mg/L)
 U_{\max} คือ อัตราเร็วสูงสุดในการกำจัดมลพิษ ($\text{g}/\text{L}\text{-day}$)
 K_B คือค่าคงที่ของความอิ่มตัว ($\text{g}/\text{L}\text{-day}$)

$$\frac{S_0 HRT}{S_0 - S} = a + bHRT \quad (2.8)$$

โดย $\frac{S_0}{S_0 - S}$ คือ ประสิทธิภาพการบำบัด

HRT คือ ระยะเวลาที่กักเก็บ

a, b คือสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ได้จากการทดลองใน

ห้องปฏิบัติการ (Fatty acid a,b=0.0054,0.033 , Carbohydrate a,b=0.240,0.033 , Protein a,b=0.076,0.014) (Metcalf and Eddy, 1991)

พบว่างานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟิล์มตรึง (Fixed Film) ซึ่งเป็นรูปแบบของการบำบัดใน MFC แต่ยังไม่พบการนำเสนอสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์พื้นฐานทางพลศาสตร์ของไหล (Q, HRT, OLR) กับความต้านทานภายใน MFC กล่าวได้ว่ายังขาดเครื่องมือในการตัดสินใจเลือกค่า Q, HRT, OLR ที่ทำให้ MFC ผลิตความต่างศักย์ (V) กระแสไฟฟ้า (I) และกำลังไฟฟ้า (P) ได้สูงทั้งนี้ นอกจากนี้ยังพบว่าในบางกรณีค่า Q, HRT, OLR ที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงกลับให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียต่ำ Greenman et al. (2009) ทดลองเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของน้ำชะขยะเข้าถัง MFC รูปทรงกระบอกจาก 24 ถึง 192 mL/hr โดยไม่ได้รักษาค่า HRT และ OLR ให้คงที่ พวกเขาพบว่าอัตราการไหล 192 mL/hr (OLR= 2.9 kgBOD/m³-d) ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ในขณะที่อัตราการไหล 48 mL/hr (OLR= 0.8 kgBOD/m³-d) ให้ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีสูงสุด แต่เมื่อ Greenman et al. (2009) ควบคุมอัตราการไหลและระยะเวลาที่กักเก็บให้คงที่แล้วเจือจางน้ำชะขยะเข้าระบบให้มีความเข้มข้นบีโอดีตั้งแต่ 258-2400 mg/L (OLR= 0.7-6.1 kgBOD/m³-d) พวกเขาพบว่าค่า OLR ที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดกลับกลายเป็น 1.6 kgBOD/m³-d ซึ่งมีค่าบีโอดีในน้ำเข้าระบบ 630 mg/L เตรียมจากการเจือจางน้ำชะขยะต่อน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 ผลนี้ชี้ให้เห็นข้อจำกัดในการใช้ค่า OLR ระบุเงื่อนไขการเดินระบบที่เหมาะสม You et al. (2006) พบว่าความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสีย (S : Substrate) กับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (P : Power) มีความสัมพันธ์กันในรูปแบบคล้ายสมการของ Monod ดังนี้ $P = P_{max} S / (K_s + S)$ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นความเหมาะสมของ S ในการเป็นตัวแปรต้นสำหรับความสามารถในการผลิตไฟฟ้าของ MFC

ในส่วนของค่าพารามิเตอร์ทางจลนที่ใช้ในการออกแบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น Padilla-Gasca and Lopez-Lopez (2010) ได้นำเสนอสมการของ Stover and Kincannon (1982) โดยรายงานว่าในการบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ที่ความเข้มข้นซีโอดีระบบเท่ากับ 6,000-6,500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร และอุณหภูมิ 27.5 องศาเซลเซียส ระบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้นที่

ใช้ลูกบอลพลาสติกเป็นตัวกลาง มีค่าอัตราการกำจัดสูงสุดของพื้นผิว (U_{max}) เท่ากับ 17.21 กรัมต่อลิตร-วัน และค่าคงที่ความอิมมัตว (KB) เท่ากับ 19.75 กรัมต่อลิตร-วัน ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากรณีของถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้นในงานวิจัยของ Buyukkamaci และ Filibeli ซึ่งมีค่า U_{max} เท่ากับ 83.3 กรัมต่อลิตร-วัน และ KB เท่ากับ 186.23 กรัมต่อลิตร-วัน [12] และมากกว่ากรณีของถัง UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) ในงานวิจัยของ Isik and Sponza (2005) ซึ่งมีค่า U_{max} เท่ากับ 8.21 กรัมต่อลิตร-วัน และ KB เท่ากับ 7.50 กรัมต่อลิตร-วัน เมื่อนำค่าเหล่านี้ไปใช้ในการออกแบบถังกรองไร้อากาศที่ใช้บำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่าต้องใช้ถังปฏิกริยาขนาดใหญ่จึงจะทำให้บีโอดีในน้ำออกมีค่าไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามมาตรฐานน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553)

5. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากถังกรองไม่เติมอากาศแบบไหลขึ้น
น้ำทิ้งจากบ้านพักอาศัยหากยังไม่ผ่านการบำบัดจะมีลักษณะน้ำเสีย ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 ตัวอย่างลักษณะน้ำเสียจากบ้านพักอาศัย

พารามิเตอร์	น้ำเสียจากครัว
pH	7.7
COD (mg/l)	1,500
BOD (mg/l)	700
TKN (mg/l)	300
PO ₄ (mg/l)	24
SS (mg/l)	560
FOG (mg/l)	540

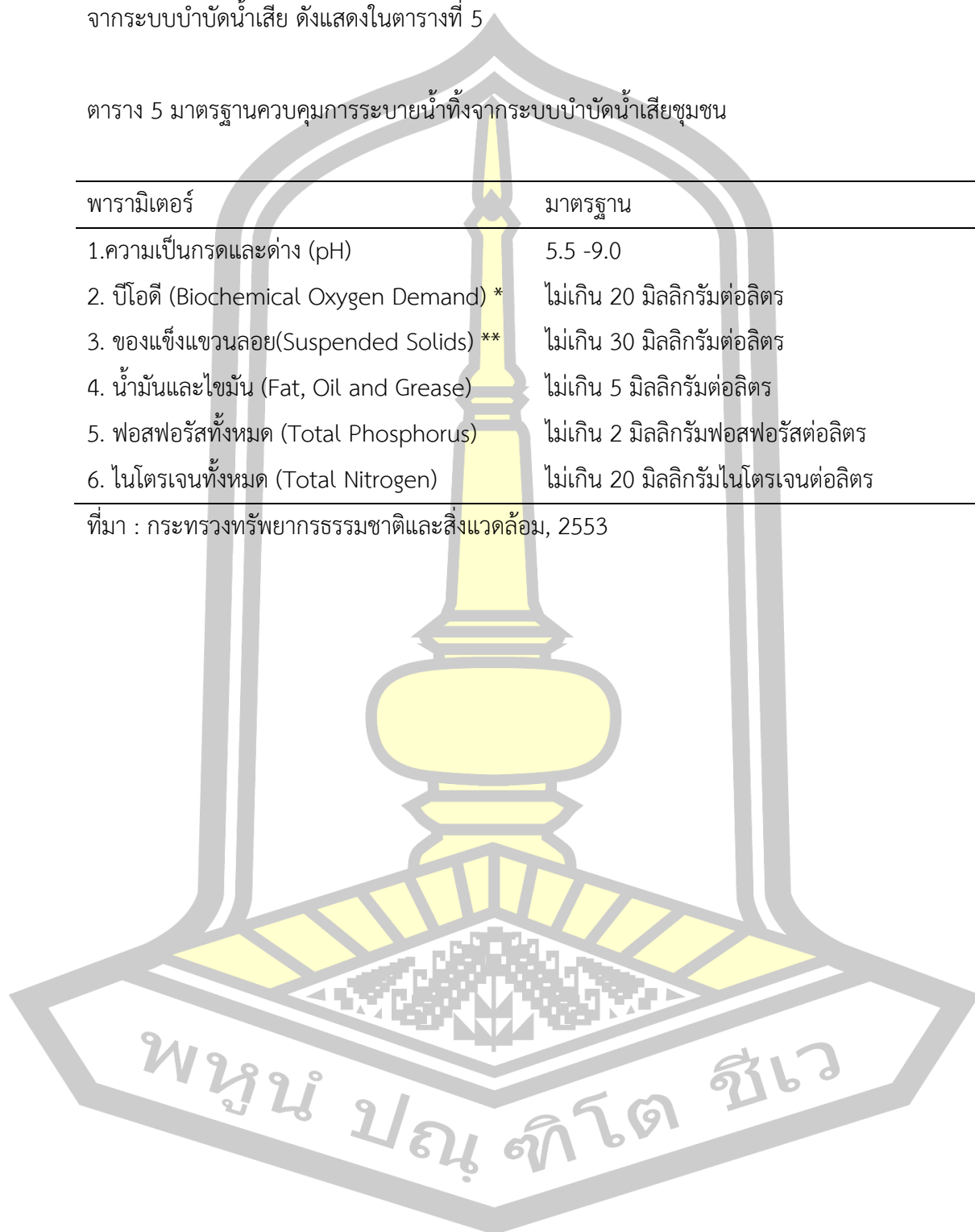
ที่มา : น้ำเสียชุมชนและปัญหามลภาวะทางน้ำในเขต กทม. และปริมณฑล, ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และคณะสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2530

น้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วควรจะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย ดังแสดงในตารางที่ 5

ตาราง 5 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

พารามิเตอร์	มาตรฐาน
1.ความเป็นกรดและด่าง (pH)	5.5 -9.0
2. บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) *	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ของแข็งแขวนลอย(Suspended Solids) **	ไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus)	ไม่เกิน 2 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร
6. ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen)	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

ที่มา : กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

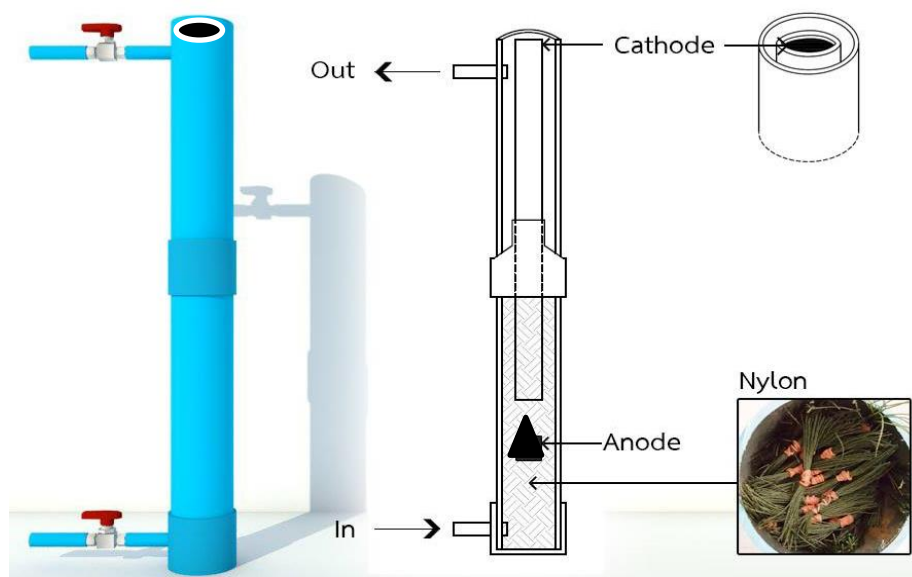
วิธีดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นการสร้าง MFC สำหรับใช้ในการทดลอง ส่วนที่ 2 เป็นช่วงเพาะเลี้ยงเชื้อให้เกาะกับวัสดุกรอง ส่วนที่ 3 เป็นช่วงทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์จลพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำปัสสาวะสังเคราะห์และผลิตไฟฟ้าของ MFC

3.1 MFC ที่ใช้ในการทดลอง

ผู้วิจัยได้นำรูปแบบ MFC ในงานวิจัยของทรงยศ มงคลพิศ และ เพชร เพ็งชัย (2560) ที่ดัดแปลงมาจากงานวิจัยของ Sukkasem et al. (2011) นำมาปรับปรุงในด้านต่างๆ เช่น ความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลางของถัง ชนิดวัสดุกรอง ตำแหน่งติดตั้งขั้วไฟฟ้าในถังกรอง ตำแหน่งการวางท่อน้ำเข้าระบบ ฯลฯ เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานและได้ความต่างศักย์สูงกว่าที่ได้ในงานของ ทรงยศ มงคลพิศ และ เพชร เพ็งชัย (2560)

1. รูปแบบถัง

แบบจำลองถังกรองไม่ใช้อากาศแบบไหลขึ้น (Up Flow Anaerobic) รูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 85.4 เซนติเมตร ตัวกรองสูง 50 เซนติเมตร ทำจากท่อ PVC (Polyethylene) จำนวน 3 ถัง โดยแต่ละถังบรรจุตัวกลางเชือกไนลอนจำนวน 1,515 ชิ้น กำหนดอัตราการไหล MFC ถังที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 20 ลิตร/วัน 30 ลิตร/วัน และ 40 ลิตร/วัน ซึ่งจะได้ค่าระยะเวลาพักเก็บในแต่ละถังเท่ากับ 6 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ การออกแบบระยะพักเก็บสูงสุดไม่เกิน 6 ชั่วโมงเพื่อเปรียบเทียบความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ถังขนาดเล็ก ทุกถังจะใช้ขั้วลวด PVC รูปทรงกรวยคว่ำลงซึ่งเป็นรูปแบบประยุกต์มาจากงานวิจัยของ Sukkasem et al. (2011) เพื่อกันไม่ให้วัสดุกรองลอยขึ้นด้านบนของถังกรองและคั่นระหว่างส่วนที่มีวัสดุกรองกับส่วนที่ไม่มีวัสดุกรองเพื่อแยกเป็นห้องแอโนด (มีวัสดุกรอง) และห้องแคโทด (ไม่มีวัสดุกรอง) ในถังกรองจะติดตั้งขั้วแอโนดที่ทำจากแผ่นแกรไฟต์รูปสามเหลี่ยมมีพื้นที่เท่ากับ 20.77 ตารางเซนติเมตร โดยเชื่อมต่อเข้ากับสายไฟและที่ผนังขั้วลวดรูปกรวยได้เจาะรูและติดตั้งแผ่นแกรไฟต์รูปวงรีมีพื้นที่เท่ากับ 20.79 ตารางเซนติเมตร เพื่อเป็นสะพานอ็อนเชื่อมระหว่างห้องแอโนดและแคโทด



ภาพประกอบ 19 แบบจำลองถังปฏิกริยาชุดการทดลอง

1.1 กำหนดปริมาตรถังและปริมาตรชั้นกรอง

จากความสามารถในการนำน้ำปัสสาวะมาทดลองและงบประมาณในการสร้างระบบของผู้วิจัยได้กำหนดขนาดถังกรองให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 85.4 เซนติเมตร โดยชั้นที่ใส่วัสดุกรอง (ห้องแอโนด) มีความสูง 50 เซนติเมตร คิดเป็นปริมาตรชั้นกรองเท่ากับ 1.67 ลิตร ส่วนห้องแคโทดมีความสูง 35.4 เซนติเมตรอยู่ด้านบนห้องแอโนดที่คั่นไว้ด้วยขอลดรูปทรงกรวย ซึ่งปริมาตรถังเท่ากับ 6.67 ลิตร

1.2 กำหนดระยะเวลาที่เก็บน้ำในถังกรอง (HRT_{ออกแบบ}) และอัตราการไหล (Q_{ออกแบบ})

ระยะเวลาที่เก็บน้ำในถังกรอง ถังที่ 1, 2 และ 3 จะกำหนดจากผลการทดลองใน ส่วนที่ 2 ทั้งนี้คาดว่าจะใช้ที่ 6 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง หรือคิดเป็น 0.250 วัน 0.166 วัน และ 0.125 วัน ตามลำดับ เนื่องจากถังกรองมีขนาดเล็กและอยากทราบว่าถ้าระยะเวลาที่เก็บต่ำกว่าเกณฑ์การออกแบบ 1-10 วัน (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2537) จะมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียมากน้อยเพียงใด อย่างไรก็ตาม ขึ้นอยู่กับผลการทดลองในส่วนที่ 2 ส่วนอัตราการไหลนั้นจะคำนวณจากค่า HRT_{ออกแบบ} และปริมาตรน้ำในถังตามสมการ $V = Q \times HRT$ ซึ่งจะได้ค่าอัตราการไหลของถังที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 20 ลิตรต่อวัน 30 ลิตรต่อวัน และ 40 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ

1.3 ค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate)

คำนวณจากสมการ $OLR = \frac{COD \times Q}{V}$ โดยค่าแนะนำในการออกแบบอยู่ในช่วง 4-16 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2537)

1.4 ขั้วไฟฟ้า

ขั้วแอโนดใช้แผ่นแกรไฟต์ (ห้างหุ้นส่วนจำกัด คิมเทค เทคโนโลยี) ตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมีพื้นที่เท่ากับ 20.77 ตารางเซนติเมตร มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 3.5 โวลต์ และขั้วแคโทดใช้แผ่นแกรไฟต์รูปวงรีมีพื้นที่เท่ากับ 20.79 ตารางเซนติเมตร โดยนำแผ่นแกรไฟต์ไปอบที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำไปใช้งาน เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับอิเล็กตรอน (ประยุกต์จาก Choudhury et al., 2017)



ภาพประกอบ 20 แผ่นแกรไฟต์ที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรด

1.5 วัสดุกรอง

ทั้ง 3 ถังจะใช้ตัวกลางชนิดเดียวกัน โดยใช้เชือกไนลอนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร ตัดเป็นชิ้นๆ มีขนาดความยาว 10 เซนติเมตร นำมามัดรวมกันด้วยยางพลาสติกตรงกลาง ใช้เชือกไนลอนจำนวน 20 เส้นต่อตัวกรอง 1 ชั้น สามารถคำนวณเป็นปริมาตรโดยวิธีแทนที่ด้วยน้ำได้เท่ากับ 1.1 มิลลิลิตร โดยแต่ละถังใช้ตัวกรองเชือกไนลอนทั้งหมด 1,515 ชิ้น และจะมีอัตราส่วนช่องว่างชั้นกรองหรือค่าความพรุนของถัง Void Ratio (VR) เท่ากับ 75% หรือ มีปริมาตรชั้นกรองเท่ากับ 1.667 ลิตร ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทำ Pre-experiment (Mongkulphit et al., 2021)



ภาพประกอบ 21 ตัวกรองเชื้อกลั่น

3.2 การเพาะเลี้ยงเชื้อให้เกาะกับวัสดุกรอง

1. เตรียมหัวเชื้อ

นำตะกอนเปียกจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ (หรือเทียบเท่า) มาผสมกับน้ำปัสสาวะจริงในสัดส่วน 1 : 10 โดยปริมาตรแล้วกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ในถังแบบปิดให้ตกตะกอน 30 นาที แล้วนำเฉพาะของเหลวที่อยู่ด้านบนมาเป็นหัวเชื้อ

2. เพาะเลี้ยงเชื้อให้เกาะกับวัสดุกรอง

นำหัวเชื้อป้อนเข้าห้องแอโนดของ MFC แต่ละถังด้วยอัตราการไหล 20 ลิตรต่อวัน แล้วเวียนน้ำกลับเข้าถัง 100 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 2 สัปดาห์ ระหว่างนั้นจะตรวจวัดคุณภาพน้ำเข้า-ออก MFC และค่าทางไฟฟ้าของ MFC ตั้งแต่วันที่เริ่มเพาะเลี้ยงเชื้อดังสรุปไว้ในตารางที่ 6

ตาราง 6 พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดในการศึกษานี้

พารามิเตอร์	วิธีตรวจวัด	ความหมาย
ไนโตรเจนทั้งหมด	Spectrophotometry using phenol after alkaline peroxodisulfate digestion method	ความสามารถในการบำบัดน้ำปัสสาวะ
แอมโมเนียรวม	Closed Reflux, Nesslerization Method	
ไนไตรท์	Colorimetric Method	
ไนเตรต	Phenol Disulphonic Acid Method	
ฟอสเฟต	Vanadomolybdophosphoric Acid Method	
COD	Closed Reflux, Titrimetric Method	
BOD	Dilution Method	
pH	ตรวจวัดด้วยเครื่อง pH มิเตอร์	ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำปัสสาวะและผลิตไฟฟ้า
DO	ตรวจวัดด้วยเครื่อง DO มิเตอร์	
ORP	ตรวจวัดด้วยเครื่อง ORP มิเตอร์	
ความต่างศักย์	ตรวจวัดด้วยเครื่อง มัลติมิเตอร์	ความสามารถในการผลิตไฟฟ้า
ความต้านทานภายใน	คำนวณจากความต่างศักย์และค่าความต้านทานใน Polarization curve	
กระแสไฟฟ้า	คำนวณจาก polarization curve	
กำลังไฟฟ้า	คำนวณจากสมการ (3.1)	
พลังงานไฟฟ้า	คำนวณจากสมการ (3.2)	

เมื่อค่าความต่างศักย์วงจรมีค่าสูงและเริ่มคงที่ ผู้วิจัยจะทำการทดลอง Polarization เพื่อหา Polarization curve โดยการนำตัวต้านทานภายนอกหลากหลายค่าตั้งแต่ 20 ถึง 22,000 โอห์ม มาต่อขั้วแอโนดเข้ากับขั้วแคโทด เพื่อความเสถียรของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเก็บข้อมูลการเชื่อมต่อความต้านทาน 1 ค่า ภายในระยะเวลา 5 นาที (Papaharalabos et al., 2015; Zhang and He, 2015) แล้ววัดค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทานภายนอกโดยใช้เครื่องมือมัลติมิเตอร์ (GW INSTRUMENT Model: GDM - 8255A) เพื่อบันทึกผลความต่างศักย์ จากนั้นนำไปคำนวณกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรสำหรับค่าความต้านทานภายนอกแต่ละกรณี แล้วพล็อต Polarization curve หรือ กราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์และกราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้า เพื่อหาค่าความ

ต้านทานภายนอกที่นำมาต่อแล้วทำให้ MFC มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด ทั้งนี้ ณ จุดที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้น ความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ถือว่ามีค่าเท่ากับความต้านทานภายนอกที่นำมาต่อ ในขณะนั้นเลย (JM et al., 2017) จากผล polarization curve แล้วจึงนำตัวต้านทานค่านั้นมาต่อ ขั้วแอโนดเข้ากับขั้วแคโทด แล้วเดินระบบต่อ 2-3 วัน การเลี้ยงเชื้อจะสิ้นสุดลงเมื่อค่าความต่างศักย์ที่ วัดได้มีค่าคงที่และพบว่า MFC สามารถบำบัดพารามิเตอร์แสดงคุณภาพน้ำส่วนใหญ่ได้

วิธีวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าที่ใช้แสดงความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ได้แก่ กำลังไฟฟ้า (Power ; P) คำนวณจากสมการ (3.1) พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ BF-MFC ผลิตได้ ตลอดระยะเวลาเดินระบบ (Electrical Energy ; EE) คำนวณจากสมการ (3.2) และความต้านทาน ภายใน (r: Internal resistance) คำนวณจากสมการ (3.3)

$$P = V \times I \quad (3.1)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (W)

V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า (A)

$$EE = \int_{t_0}^{t_n} P dt = \sum_i P_i \times t_i \quad (3.2)$$

เมื่อ EE คือ พลังงานไฟฟ้าที่ BF-MFC ผลิตได้ตั้งแต่เวลา t_0 ถึงเวลา t_n (W.h)

t คือ เวลา (h)

i คือ จำนวนข้อมูลรายชั่วโมงที่เก็บได้

$$V = OCV - (I \times r) \quad (3.3)$$

เมื่อ OCV คือ ความต่างศักย์วงจรเปิด Open circuit voltage (V)

I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

r คือ ความต้านทานภายใน (Ω)

3.3 การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์จลศาสตร์ของการบำบัดน้ำปัสสาวะสังเคราะห์และผลิตไฟฟ้า

1. เตรียมน้ำปัสสาวะสังเคราะห์

เตรียมน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ (SU-D0 : synthetic urine without dilution) ที่มีองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 7

ตาราง 7 องค์ประกอบน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษานี้

ชื่อสาร	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)
$\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.651
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.651
NaCl	4.6
Na_2SO_4	2.3
Sodium citrate	0.65
Sodium oxalate	0.02
KH_2PO_4	2.8
KCl	1.6
NH_4Cl	1.0
Urea	25
Creatine	1.1
Tryptic soy broth	10

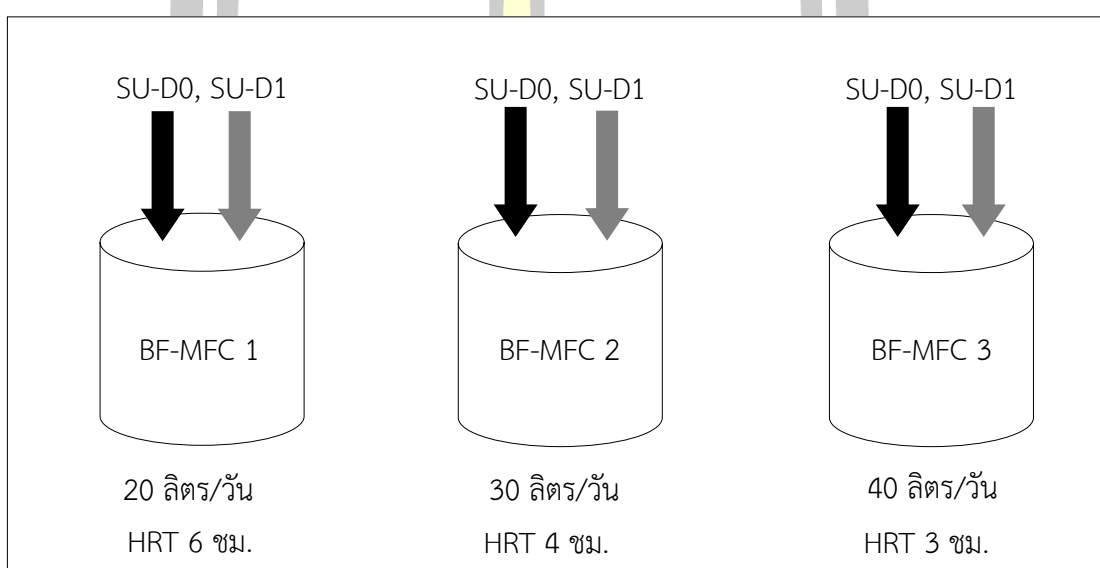
ที่มา: McLean et al., 1988

แล้วนำ SU-D0 มาผสมน้ำสะอาดเพื่อผลิตน้ำปัสสาวะสังเคราะห์เจือจาง 1 ระดับ (SU-D1) สำหรับใช้ในการทดลองต่อไป SU-D1 ผลิตโดยการนำ SU-D0 มาเจือจางด้วยน้ำสะอาดในอัตราส่วน SU-D0 ต่อ น้ำสะอาด เท่ากับ 1:1

2. ใช้ MFC บำบัดน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ที่อัตราการไหลและความเข้มข้นต่างๆ

ป้อน SU-D0 เข้า MFC ถังที่ 1 (BF-MFC1), ถังที่ 2 (BF-MFC2) และ ถังที่ 3 (BF-MFC3) ด้วยอัตราการไหล 20 ลิตรต่อวัน 30 ลิตรต่อวัน และ 40 ลิตรต่อวัน ซึ่งจะได้ค่าระยะเวลาพัก

เก็บในแต่ละถังเท่ากับ 6 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 22 พร้อมกันนั้น จะตรวจวัดคุณภาพน้ำเข้า-ออก BF-MFC และค่าทางไฟฟ้าของ BF-MFC แต่ละถังตั้งแต่วันที่เริ่มการทดลอง (ตารางที่ 6) โดยจะต่อตัวต้านทานภายนอกตัวเดียวกับในช่วงเพาะเลี้ยงเชื้อไปก่อน จากนั้นจึงทำการทดลองเพื่อหา Polarization curve เป็นระยะๆ เพื่อหาค่าความต้านทานภายนอกที่นำมาต่อกับ MFC แล้วให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้วนำไปต่อกับ MFC แต่ละถัง เมื่อการบำบัดน้ำของ BF-MFC ทั้ง 3 ถัง อยู่ในสภาวะใกล้เคียง Steady state จึงตรวจวัดทุกพารามิเตอร์เป็นครั้งสุดท้ายแล้วหยุดการทดลอง



ภาพประกอบ 22 ภาพรวมของการทดลองบำบัดน้ำปัสสาวะสังเคราะห์

ป้อน SU-D1 เข้า MFC ที่ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ด้วยอัตราการไหล 20 ลิตรต่อวัน 30 ลิตรต่อวัน และ 40 ลิตรต่อวัน แล้วดำเนินการทดลองเหมือนกรณี SU-D0 เมื่อสิ้นสุดการทดลองแล้วจึงทำการนำชุดข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ตลอดจนพล็อตกราฟเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์จลพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำของ MFC ทั้งนี้ นำแบบจำลอง Stover-Kincannon model มาทดลองวิเคราะห์แบบจำลองทางจลพลศาสตร์

ส่วนปริมาณไฟฟ้าที่ MFC ผลิตได้นั้น คาดว่าจะพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่ MFC ผลิตได้ กับอัตราเร็วในการบำบัดสารต่างๆ ในน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ เพื่อนำเสนอข้อมูลที่ใช้ในการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการบำบัดน้ำปัสสาวะด้วย MFC

บทที่ 4

ผลการทดลอง

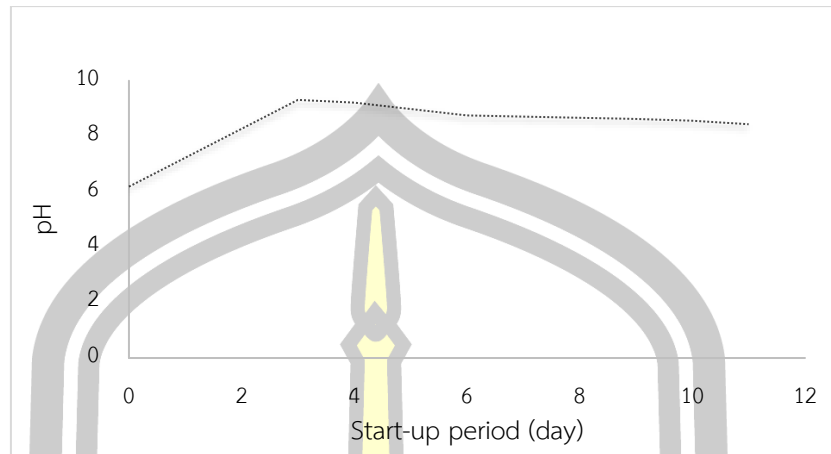
งานวิจัยนี้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์จลพลศาสตร์ในการบำบัดความเข้มข้นไนโตรเจนของน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและมีการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ประดิษฐ์จากถังกรองชีวภาพ (BF-MFC : Microbial Fuel Cell) การศึกษาในครั้งนี้ใช้น้ำปัสสาวะสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นที่ (SU-D0 : synthetic urine without dilution) SU-D0 และ SU-D1 การเดินระบบเป็นแบบต่อเนื่องในทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนที่ 1 ช่วงเริ่มต้นระบบ เป็นช่วงเลี้ยงจุลินทรีย์ให้เกาะติดตัวกลางเชือกไนลอน ขั้นตอนที่ 2 ช่วงบำบัดน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ เป็นช่วงศึกษาประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดน้ำเสียและการผลิตกระแสไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นแผ่นแกรไฟต์ ทั้งนี้ใช้น้ำปัสสาวะสังเคราะห์ทั้ง 2 ความเข้มข้นที่ใช้เติมเข้าระบบ BF-MFC เป็นปริมาตรสำหรับการทดสอบทั้งหมด 4 วัน ต่อการเติมหนึ่งครั้ง ซึ่งมีผลการศึกษิตตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (Start-up period)

ช่วงเริ่มต้นของการเดินระบบใช้ระยะเวลาในการศึกษาจากวันที่ 2 กุมภาพันธ์ ถึงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2563 เป็นระยะเวลาทั้งหมด 12 วัน มีผลดังต่อไปนี้

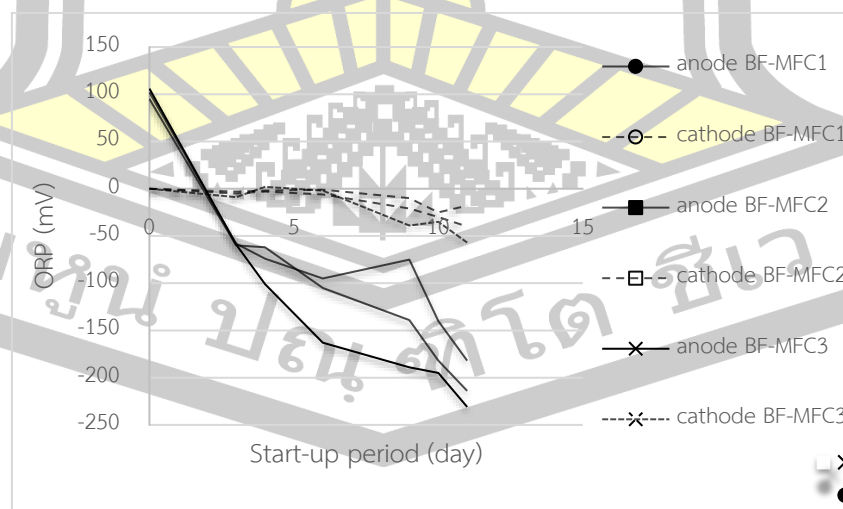
ค่าพีเอช (pH) ของช่วงเริ่มต้นเดินระบบนั้นอยู่ที่ 6.18-8.43 ดังแสดงในภาพประกอบ 23 จากข้อมูลที่ว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีเสถียรภาพที่ดีควรมีพีเอชอยู่ในช่วงระหว่าง 6.6-7.6 (เสริมพล รัตสุข และ ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์, 2524) จึงกล่าวได้ว่า ถังกรองไร้อากาศในช่วงเริ่มต้นเดินระบบนี้มีพีเอชที่เหมาะสม ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีใดๆในการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง

พหุ ประถมศึกษา



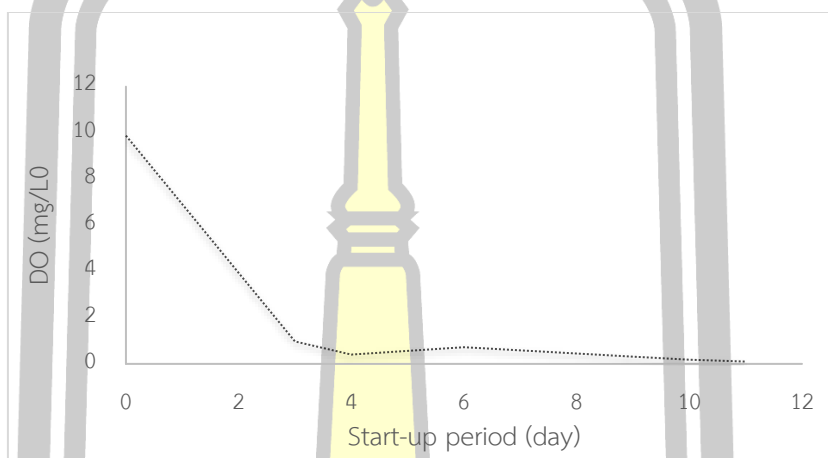
ภาพประกอบ 23 ค่าพีเอชของช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

ส่วนค่าโออาร์พี (Oxidation Reduction Potential : ORP) ของช่วงเริ่มต้นเดินระบบ อยู่ประมาณ -1 ถึง -250 mV ดังแสดงในภาพประกอบ 24 จากการวัดค่าโออาร์พี พบว่ากรณีถึง BF-MFC1 ห้องแอโนดมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง 102 ถึง -182 mV ส่วนของห้องแคโทดอยู่ในช่วง 0 ถึง -18 mV กรณีถึง BF-MFC2 ห้องแอโนดมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง 95 ถึง -214 mV ห้องแคโทดอยู่ในช่วง 0 ถึง -40 mV และกรณีถึง BF-MFC3 ห้องแอโนดมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง 106 ถึง -231 mV ห้องแคโทดอยู่ในช่วง 0 ถึง -57 mV การที่ห้องแอโนดมีค่า ORP ตีลบและน้อยกว่าค่าโออาร์พีในห้องแคโทดนั้น แสดงว่าระบบพร้อมจะทำงานเป็น MFC โดยถ่วงย่อยแบบไร้ออกซิเจน (ห้องแอโนด) จะทำงานได้ดีควรมีค่า ORP ที่ห้องแอโนดอยู่ในช่วง -300 ถึง -500 mV (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)



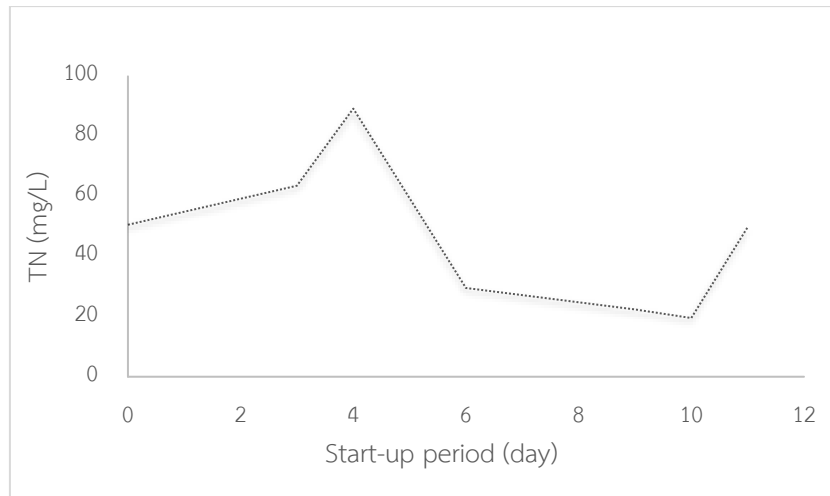
ภาพประกอบ 24 ค่าโออาร์พีของช่วงเริ่มต้นระบบ

ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) บริเวณห้องแอโนดของช่วงเริ่มต้นเดินระบบอยู่ที่ 0.1-9.9 mg/L ดังแสดงในภาพประกอบ 25 และพบว่าค่า DO มีปริมาณลดลงเรื่อยๆตามลำดับ ทำให้ทราบถึงความพร้อมของระบบในการทำงานเป็น MFC เนื่องจากเมื่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในห้องแอโนดลดลง ห้องแอโนดก็เหมาะสมเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกาศที่ย่อยสลายความสกปรกในน้ำ และทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนไปยังห้องแคโทด

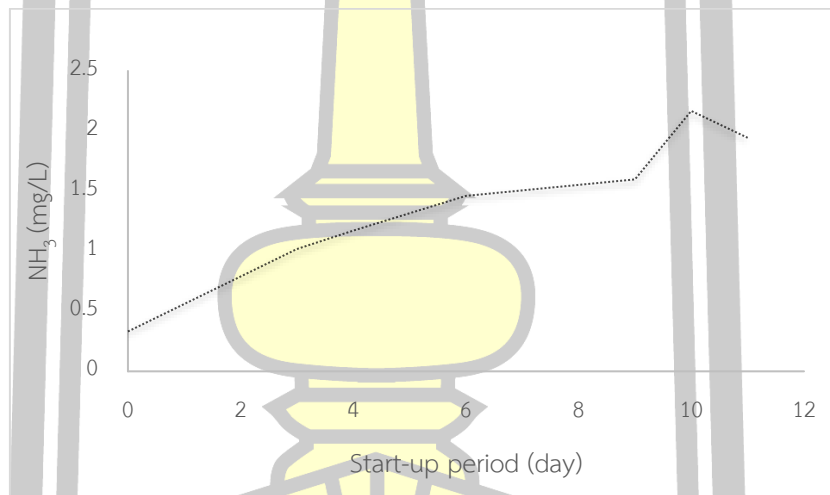


ภาพประกอบ 25 ค่าดีโอของช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

ค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ของช่วงเริ่มต้นเดินระบบอยู่ที่ 51, 64, 89, 30, 22, 20, 50 และ 49 mg/L ดังแสดงในภาพประกอบ 26 ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน (NH_3) ของช่วงเริ่มต้นเดินระบบอยู่ที่ 3, 10, 12, 15, 16, 22 และ 19 mg/L ดังแสดงในภาพประกอบ 27 ค่าไนไตรท์ (NO_2^-) ของช่วงเริ่มต้นเดินระบบอยู่ที่ 1.4, 2.3, 2.4, 2.6, 2.5, 3.0, 4.0 และ 3.7 mg/L ดังแสดงในภาพประกอบ 28 ค่าไนเตรต (NO_3^-) ของช่วงเริ่มต้นเดินระบบอยู่ที่ 0.7, 0.9, 0.9, 1.1, 1.7, 0.4 และ 0.7 mg/L ดังแสดงในภาพประกอบ 29 ทั้งนี้ในวันที่ 10 ของการเดินระบบความเข้มข้นไนเตรตมีค่าลดลงอย่างชัดเจน สันนิษฐานว่าเป็นเพราะช่วงวันที่ 0-8 ของการเดินระบบนั้นจุลินทรีย์ที่กำจัดไนเตรตได้ เช่น denitrification bacteria ยังมีจำนวนไม่มากพอจึงไม่เกิดการบำบัด ส่วนความเข้มข้นฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ของช่วงเริ่มต้นเดินระบบมีค่าอยู่ที่ 338, 286, 364, 274, 292, 266 และ 285 mg/L ดังแสดงในภาพประกอบ 30 ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ของช่วงเริ่มต้นเดินระบบอยู่ที่ 3,718, 3,429, 3,086, 2,400, 2,057, 2,560 และ 3,040 mg/L ดังแสดงในภาพประกอบ 31 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity : EC) ของช่วงเริ่มต้นเดินระบบอยู่ที่ 13.45, 16.44, 13.66, 3.88, 9.76, 9.12 และ 10.51 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ดังแสดงในภาพประกอบ 32 พบว่าช่วงวัน 0-4 เดินระบบมีค่า EC ค่อนข้างมาก ต่อมาวันที่ 6 ค่า EC ลดจากนั้น ในวันที่ 8-12 ค่า EC ก็เพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

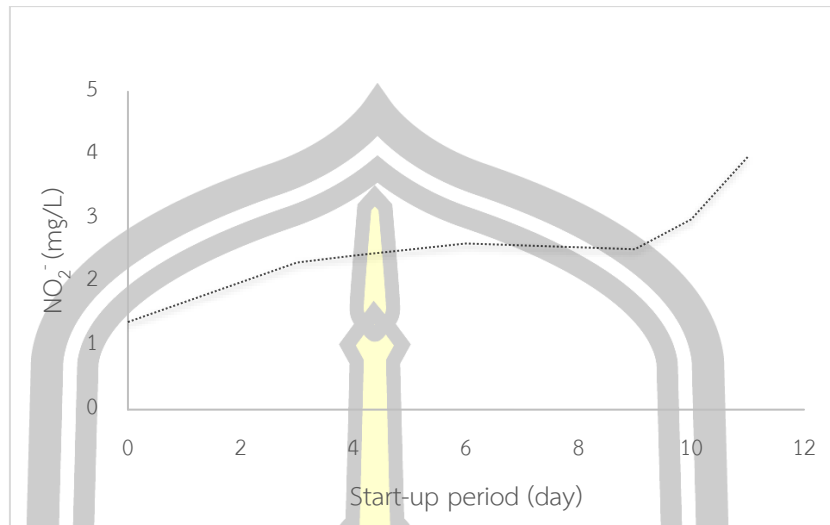


ภาพประกอบ 26 ค่าไนโตรเจนทั้งหมดในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

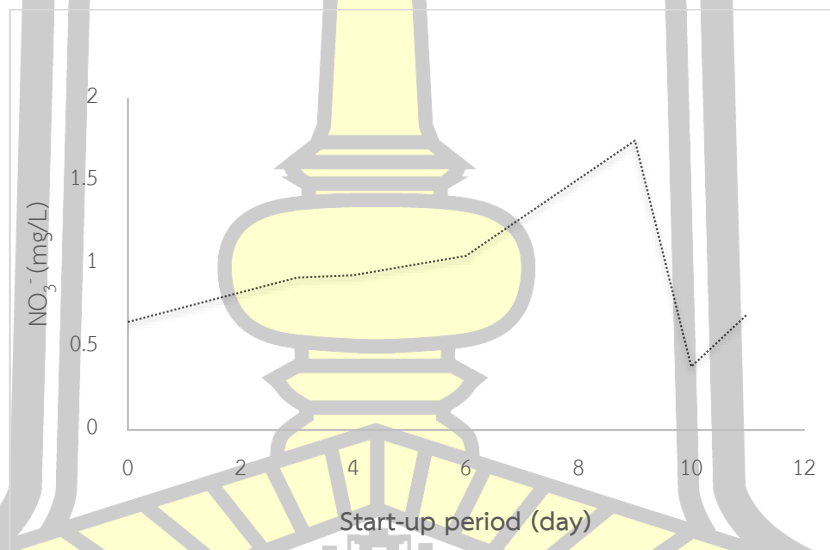


ภาพประกอบ 27 แอมโมเนียไนโตรเจนในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ



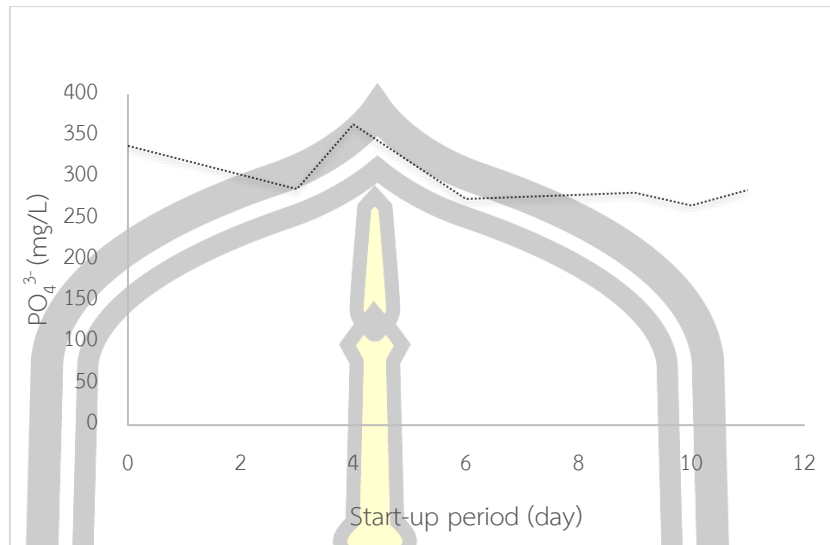


ภาพประกอบ 28 ไนไตรท์ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

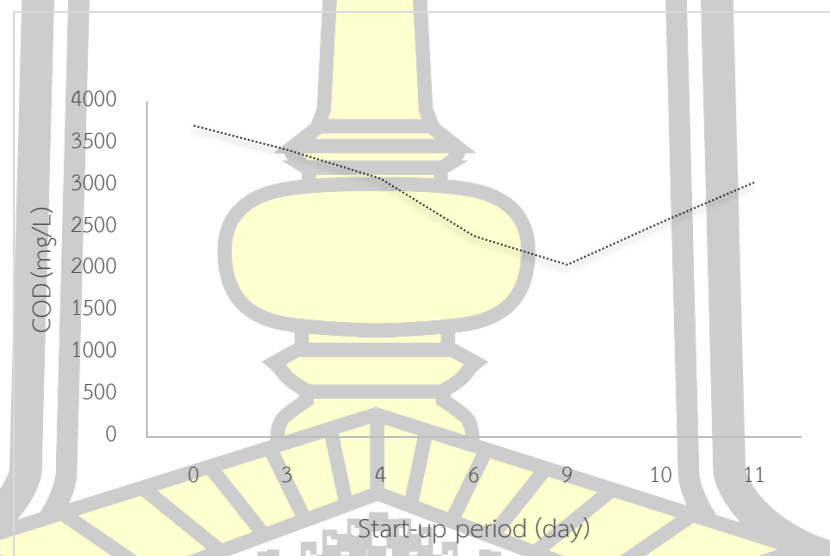


ภาพประกอบ 29 ไนเตรตในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

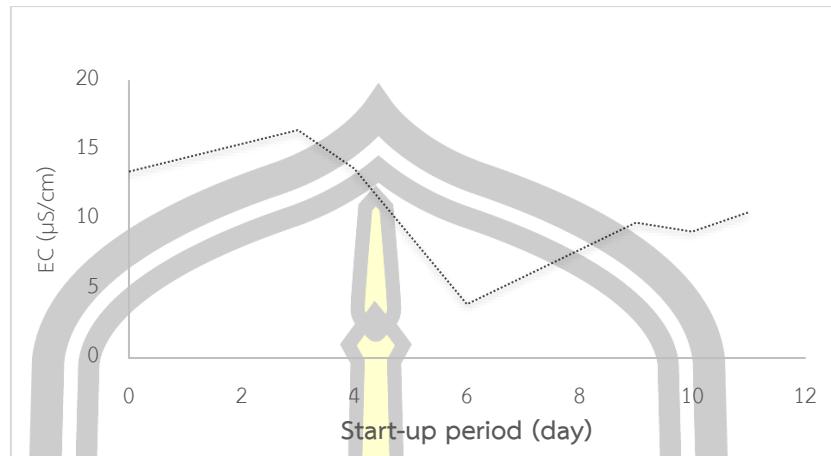


ภาพประกอบ 30 ฟอสเฟตในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ



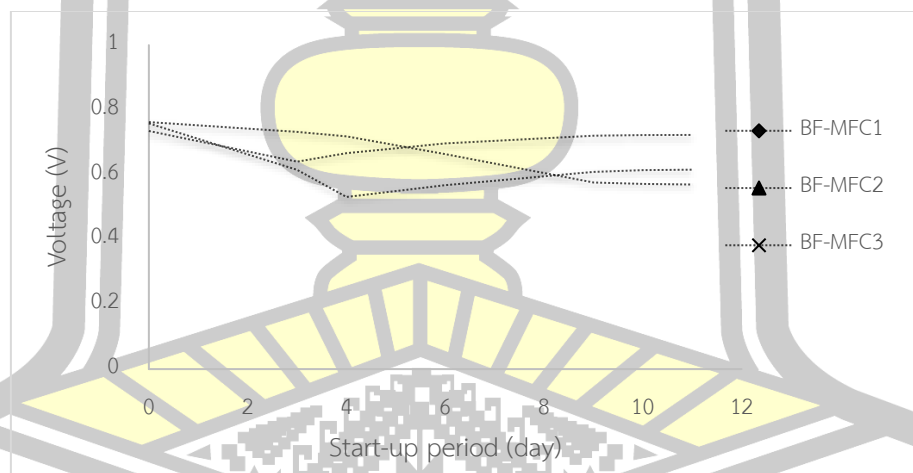
ภาพประกอบ 31 ค่าซีโอดีในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์ ชีวะ



ภาพประกอบ 32 ค่าการนำไฟฟ้าของช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

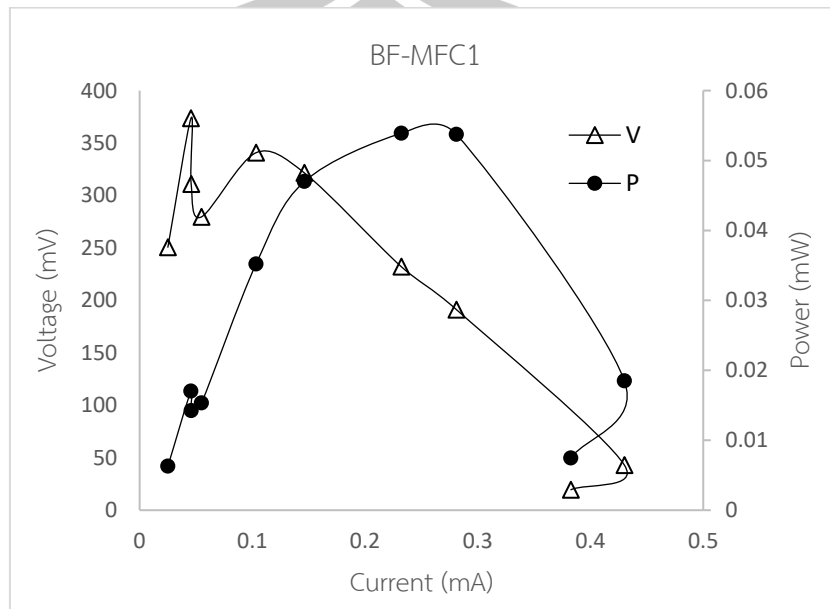
ในส่วนของค่าทางไฟฟ้านั้น พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบไม่ต่อตัวต้านทาน (Open Circuit Voltage : OCV) มีความเสถียรในระดับหนึ่งดังแสดงในภาพประกอบ 33 ค่า OCV เฉลี่ยของ BF-MFC1 BF-MFC2 และ BF-MFC3 เท่ากับ 0.723, 0.570, และ 0.615 V ตามลำดับ



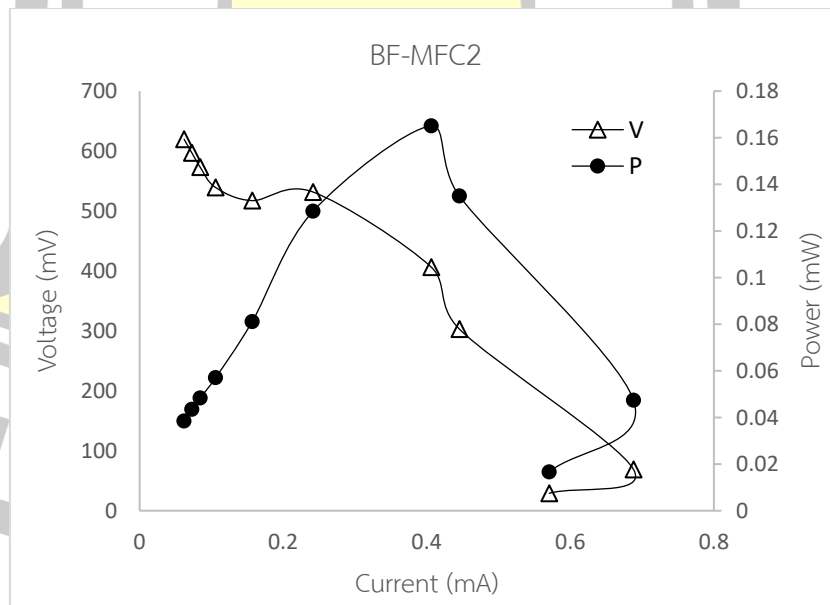
ภาพประกอบ 33 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบไม่ต่อตัวต้านทาน (OCV) ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

ก่อนเดินระบบจริงในช่วงต่อไป ผู้วิจัยได้ทำการทดลอง polarization เพื่อหาค่าความต้านทานภายนอกที่เหมาะสมในการนำมาต่อกับ BF-MFC แต่ละถัง ผลที่ได้เป็นดังแสดงในภาพประกอบ 34, 35 และ 36 ค่าความต้านทานภายนอกที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับถัง BF-MFC1 คือ 1,000 โอห์ม (0.05 mW) สำหรับถัง BF-MFC2 คือ 1,000 โอห์ม (0.16 mW) และ

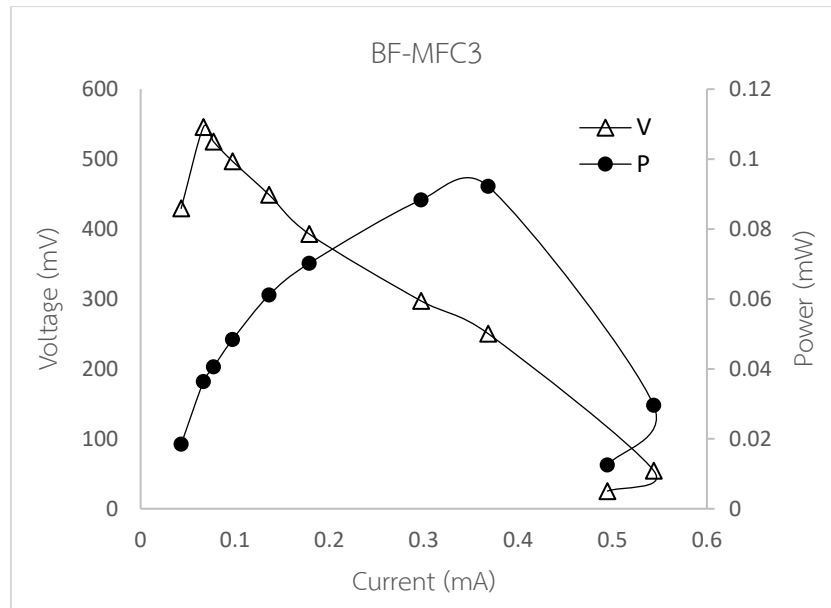
สำหรับถัง BF-MFC3 คือ 680 โอห์ม (0.09 mW) โดยแต่ละถังผลิตค่ากระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 0.43 mA 0.68 mA และ 0.54 mA ตามลำดับ



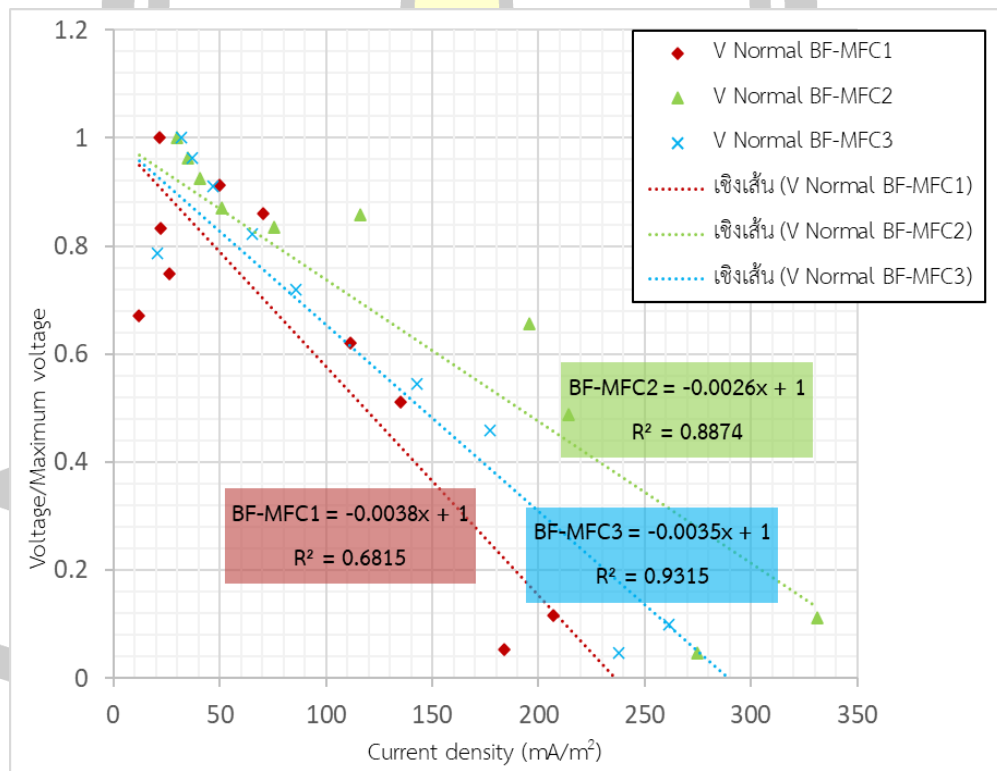
ภาพประกอบ 34 กราฟโพลาริเซชันของถัง BF-MFC1



ภาพประกอบ 35 กราฟโพลาริเซชันของถัง BF-MFC2



ภาพประกอบ 36 กราฟโพลาริเซชันของถัง BF-MFC3



ภาพประกอบ 37 กราฟโพลาริเซชันของ BF-MFC ทั้ง 3 ถังที่ผ่านการ Normalization แล้ว

ทั้งนี้เนื่องจาก BF-MFC ทั้ง 3 ถึงมีค่า OCV เริ่มต้นไม่เท่ากันจึงเปรียบเทียบความสามารถในการผลิตไฟฟ้าได้ลำบาก ในการนี้คณะผู้วิจัยได้ทดลองนำข้อมูลความต่างศักย์ในการทดลอง Polarization มา Normalize โดยการหารด้วยค่าความต่างศักย์สูงสุดในชุดข้อมูล แล้วนำมาพล็อตกราฟดังในภาพประกอบ 37 สังเกตได้ว่าแกนตั้งของกราฟในภาพประกอบ 37 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 จากผลดังกล่าวพบว่า ถัง BF-MFC2 มีค่าความต้านทานภายในต่ำที่สุด (ดูจากความชันกราฟที่มีค่าต่ำสุด) จึงมีความเป็นไปได้สูงกว่า BF-MFC2 จะผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเมื่อเทียบกับ ถัง BF-MFC1 และ BF-MFC3

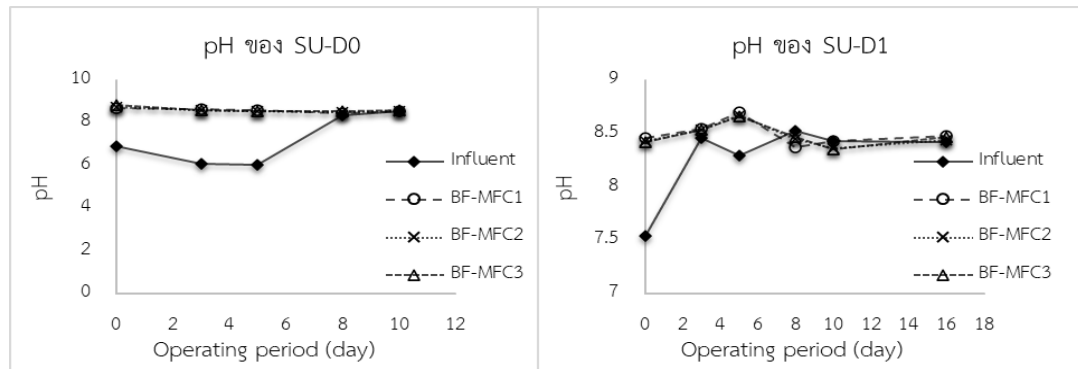
4.2 ช่วงบำบัดน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ (Operating period)

ถัดจากช่วงเริ่มต้นระบบ ผู้วิจัยได้เลิกเวียนน้ำเข้า-ออก แล้วปล่อยให้ น้ำออกจากระบบลงสู่ท่อระบายน้ำโดยบ่อน้ำปัสสาวะสังเคราะห์เข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง ช่วงของการบำบัดน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น SU-D0 ในวันที่ 17 กุมภาพันธ์ – 27 กุมภาพันธ์ 2563 เป็นระยะเวลาทั้งหมด 11 วัน และช่วงของการบำบัดน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น SU-D1 (วันที่ 2 มีนาคม – 20 เมษายน 2563) เป็นระยะเวลาทั้งหมด 19 วัน มีผลดังต่อไปนี้

4.2.1 คุณภาพน้ำ

4.2.1.1 ค่าพีเอช (pH)

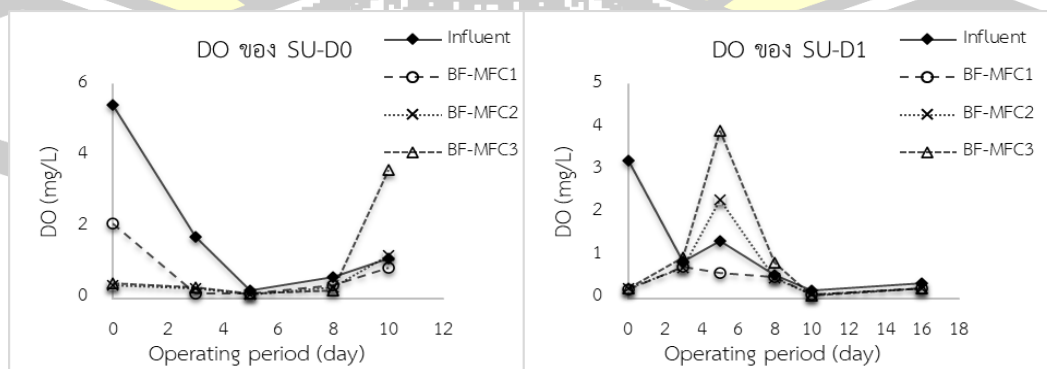
ค่า pH ของน้ำเข้าและน้ำในห้องแอนโอดมีค่าดังแสดงในภาพประกอบ 38 ค่าเฉลี่ย pH ในน้ำขาเข้าและออกกรณี SU-D0 เท่ากับ 6.07-8.57 และ 8.48-8.72, 8.51-8.73, 8.54-8.86 สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ ส่วนค่าเฉลี่ย pH ในน้ำเข้าและขาออกกรณี SU-D1 มีค่า 7.54-8.50 และ 8.37-8.70, 8.36-8.67, 8.35-8.66 สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ เห็นได้ว่าเมื่อน้ำเข้ามาอยู่ในถัง BF-MFC ทั้ง 3 ถังแล้วค่า pH มีความเป็นด่างสูงขึ้น ซึ่งมีความเหมาะสมในแง่ของการผลิตไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อห้องแอนโอดมีสภาวะ pH เป็นด่างจะมีผลช่วยให้ห้องแอนโอดมีโปรตอนไม่มากจนเกินไป ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนไหลเข้าสู่ขั้วแคโทดมากขึ้น (Jadhav and Ghangrekar, 2009)



ภาพประกอบ 38 ค่าพีเอช (pH) ของน้ำขาเข้า-ออก

4.2.1.2 ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (Dissolved Oxygen : DO)

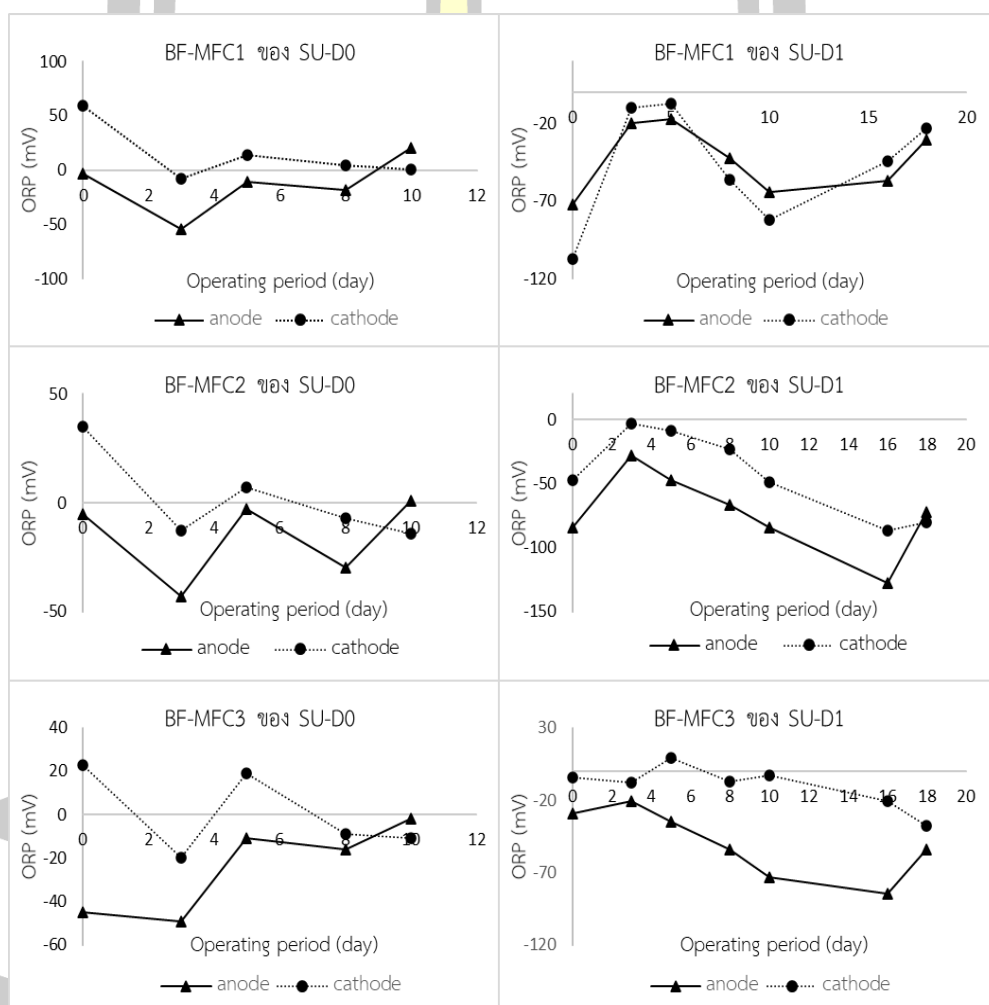
ค่า DO ของน้ำเข้าและน้ำในห้องแอโนดมีค่าดังแสดงในภาพประกอบ 39 ค่าเฉลี่ย DO ในน้ำขาเข้าและออกกรณี SU-D0 เท่ากับ 1.82 mg/l และ 0.71, 44, 0.94 mg/l สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ ส่วนค่าเฉลี่ย DO ในน้ำเข้าและขาออกกรณี SU-D1 มีค่าเท่ากับ 1.06 mg/l และ 0.40, 0.66, 0.98 mg/l สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ จากผลข้างต้น กล่าวได้ว่าน้ำในส่วนที่อยู่เหนือตัวกรองของถัง BF-MFC ทั้ง 3 ไม่ได้อยู่ในสภาวะ anaerobic หรือ anoxic อย่างเต็มที่ ทั้งนี้สาเหตุที่ค่า DO ในน้ำเข้าลดลงกะทันหันในวันที่ 5-8 นั้น คาดว่าเป็นเพราะมีการปิดถังพักน้ำเสียสังเคราะห์อยู่หลายวัน และภายในนั้นก็มิจุลินทรีย์อยู่ตามปกติเพราะไม่ได้ฆ่าเชื้อ ดังนั้นจึงมีโอกาที่จุลินทรีย์จะใช้ออกซิเจนที่เหลืออยู่ในถังย่อยสลายอาหารจน DO ลดลงมาก และสาเหตุที่ค่า DO ในน้ำเข้าเพิ่มขึ้นของกรณี SU-D0 .วันที่ 10 และกรณี SU-D1 วันที่ 3-8 เนื่องจากกระบวนการในการนำน้ำไปวัดค่า DO ที่ห้องทดลองเปิดโอกาสให้ออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 39 ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (DO) ของน้ำขาเข้า-ออก

4.2.1.3 ค่าโออาร์พี (Oxidation Reduction Potential : ORP)

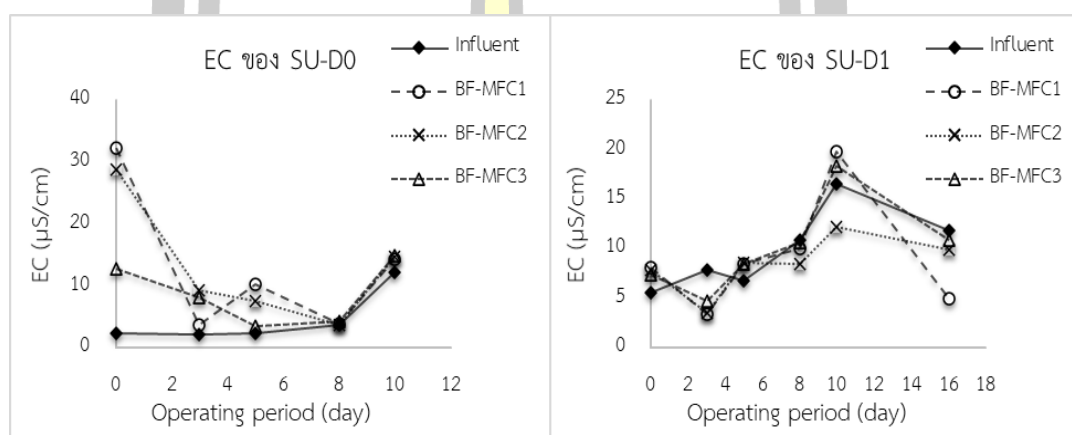
ค่าโออาร์พีในห้องแอนโนดและแคโทด กรณี SU-D0 มีค่าเท่ากับ 14 ถึง -13 mV 1.6 ถึง -16 mV และ 4 ถึง -24.6 mV สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 มีค่า -43.1 ถึง -47 mV -42.6 ถึง -72.9 mV -10.3 ถึง -50 mV สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 40 จากภาพประกอบพบว่าส่วนใหญ่ค่าโออาร์พีในห้องแอนโนดมีค่าต่ำกว่าของห้องแคโทดและติดลบด้วย ซึ่งถือว่าเป็นสภาวะที่เอื้อต่อการย่อยสลายอาหารโดยจุลินทรีย์และแล้วจ่ายอิเล็กตรอนจากขั้วแอนโนดไปยังขั้วแคโทดของ BF-MFC



ภาพประกอบ 40 ค่าโออาร์พี (Oxidation Reduction Potential : ORP)

4.2.1.4 ค่าการนำไฟฟ้า Electrical Conductivity (EC)

ค่า EC กรณี SU-D0 เท่ากับ 4.57 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 12.94 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 12.88 $\mu\text{S}/\text{cm}$, และ 8.74 $\mu\text{S}/\text{cm}$ สำหรับ น้ำขาเข้า และน้ำขาออกจาก BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ ส่วนค่าเฉลี่ย EC กรณี SU-D1 มีค่าเท่ากับ 9.84 $\mu\text{S}/\text{cm}$ และ 9.18 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 8.44 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 10.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ สำหรับ น้ำขาเข้า และน้ำขาออกจาก BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 41

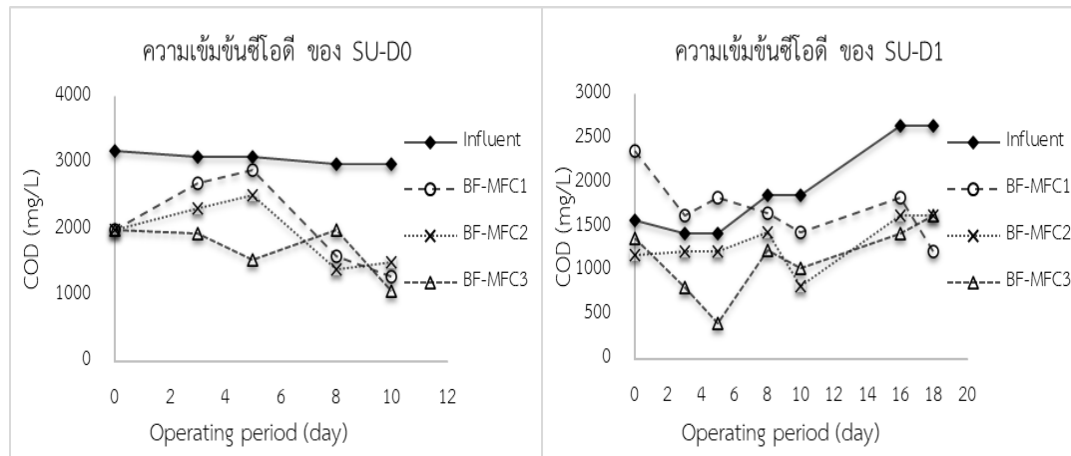


ภาพประกอบ 41 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำขาเข้า-ออก

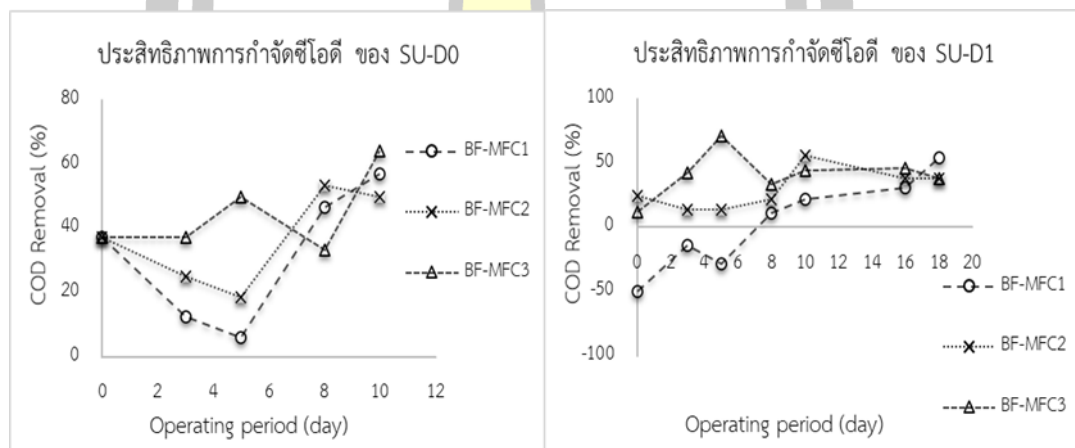
4.2.1.5 ค่าความความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand : COD)

จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นซีโอดีในน้ำขาเข้ามีมากกว่าน้ำขาออก โดยกรณี SU-D0 ความเข้มข้นซีโอดีในน้ำขาเข้าและน้ำออกจากรัง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 เท่ากับ 3,078.80 mg/l 2,099.78 mg/l 1,947.74 mg/l 1,710.97 mg/l ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 ความเข้มข้นซีโอดีในน้ำขาเข้าและน้ำออกจากรัง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 มีค่า 1,919 mg/l 1,710 mg/l 1,307 mg/l 1,132 mg/l ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 42 จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่า BF-MFC สามารถบำบัดค่าความเข้มข้นซีโอดีในน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ได้

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลค่าความเข้มข้นซีโอดีที่ลดลงในน้ำปัสสาวะสังเคราะห์นั้น อธิบายได้ว่าในถัง BF-MFC มีจุลินทรีย์ประเภท aerobic ปล่อยเอนไซม์ (Enzyme) ออกมาย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มาเกาะติดที่ผนังเซลล์เพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสารโมเลกุลเล็กที่จะสามารถซึมผ่านเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ได้ ซึ่งเป็นกระบวนการทางชีวเคมีภายในเซลล์จุลินทรีย์ เพื่อที่จะผลิตพลังงานไปใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ และการสร้างเซลล์ใหม่ดังสมการ สารอินทรีย์ + N + P \rightarrow เซลล์ใหม่ + CO₂ + H₂O + พลังงาน (สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2557)

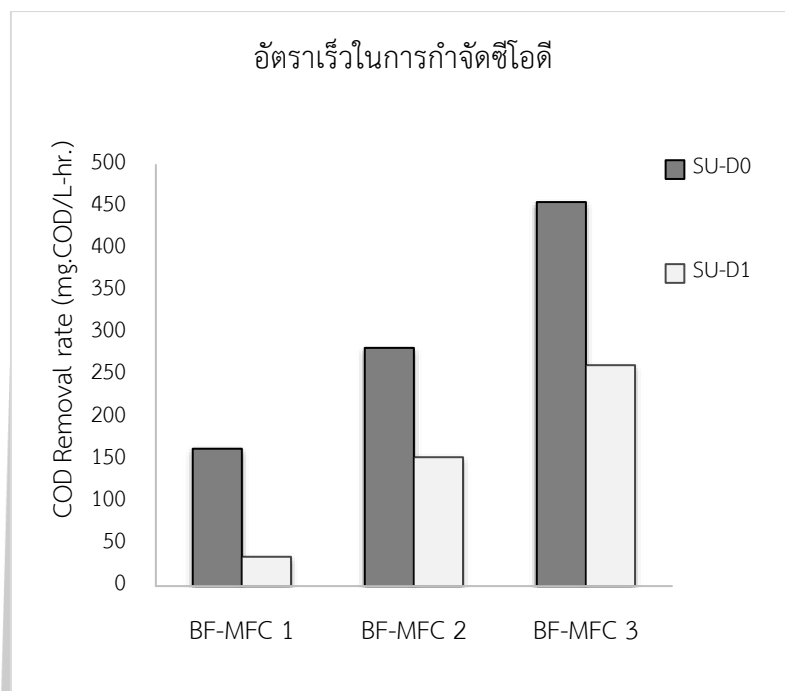


ภาพประกอบ 42 ค่าความเข้มข้นซีไอที ของน้ำขาเข้า-ออก



ภาพประกอบ 43 ประสิทธิภาพการกำจัด COD

เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปคำนวณประสิทธิภาพการกำจัด COD แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยแต่ละถัง พบว่ากรณี SU-D0 BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กำจัด COD ได้ $32 \pm 22\%$ $37 \pm 15\%$ และ $45 \pm 13\%$ ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 กำจัด COD ได้ $4 \pm 36\%$, $30 \pm 15\%$ และ $41 \pm 18\%$ สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับดังแสดงในภาพประกอบ 43



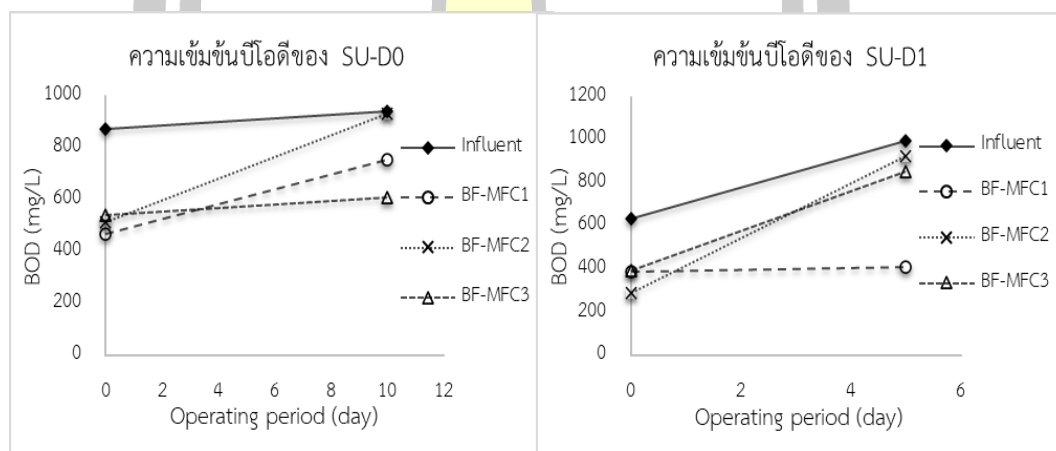
ภาพประกอบ 44 อัตราเร็วในการกำจัด COD

และเมื่อคำนวณอัตราเร็วในการกำจัด COD พบว่ากรณี SU-D0 ถึง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 มีอัตราเร็วในการกำจัด COD เท่ากับ 163, 283 และ 456 mg/L-hr ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 อัตราเร็วในการกำจัด COD เท่ากับ 35, 153 และ 262 mg/L-hr สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 44

จากผลข้างต้นเห็นได้ว่าทั้งกรณีไม่เจือจางน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ (SU-D0) และกรณีที่มีอัตราส่วนการเจือจางเท่ากับ 1 ต่อ 1 (SU-D1) BF-MFC3 ซึ่งมีอัตราการไหล 40 L/d (อัตราการระบรทุก COD SU-D0 25 kg/m³·d และ SU-D1 15 kg/m³·d ระยะเวลาพักเก็บ 3 hr) มีความสามารถในการกำจัด COD ทั้งหมดสูงที่สุด รองลงมาคือ BF-MFC2 (อัตราการระบรทุก COD SU-D0 18 kg/m³·d และ SU-D1 12 kg/m³·d ระยะเวลาพักเก็บ 4 hr) ลำดับสุดท้ายคือ BF-MFC1 (อัตราการระบรทุก SU-D0 12 kg/m³·d และ SU-D1 8 kg/m³·d ระยะเวลาพักเก็บ 6 hr) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mongkulphit et al. (2021) ที่พบว่า MFC มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าระบบสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่ออัตราการไหลเพิ่มค่าอัตราเฉือน (shear rate) ของของไหลในระบบก็เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อนุภาคน้ำเข้าไปสัมผัสตัวกลางใน MFC แบบถังกรองได้ดีขึ้น จึงย่อยสลายสิ่งสกปรกในน้ำได้ดีขึ้น

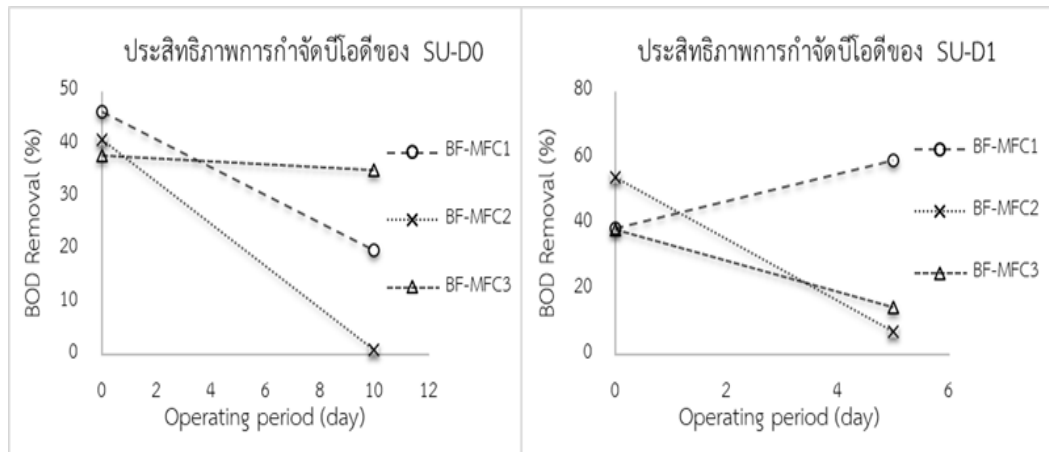
4.2.1.6 ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวภาพ (Biochemical Oxygen Demand : BOD)

พบว่าทั้งกรณี SU-D0 และ SU-D1 ความเข้มข้น BOD ในน้ำขาเข้ามีมากกว่าน้ำขาออกดังแสดงในภาพประกอบ 45 โดยความเข้มข้น BOD ในน้ำขาเข้าและออกจากถัง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กรณี SU-D0 เท่ากับ 907.17 mg/l 612.5 mg/l 724 mg/l 577.08 mg/l ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 มีค่าเท่ากับ 815.33 mg/l 399.67 mg/l 609.33 mg/l 622 mg/l ตามลำดับ จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่า BF-MFC สามารถบำบัดค่าความเข้มข้นบีโอดีในน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ได้ โดยประสิทธิภาพการกำจัด BOD เป็นดังแสดงในภาพประกอบ 46 กรณี SU-D0 ถึง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กำจัด BOD ได้ $33\pm 19\%$, $21\pm 28\%$ และ $36\pm 2\%$ ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 ถึง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กำจัด BOD ได้ $49\pm 15\%$, $30\pm 33\%$ และ $26\pm 17\%$ ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลที่ตรวจวัดได้ไปคำนวณหาอัตราเร็วในการกำจัด BOD ของ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 พบว่าผลเป็นดังแสดงในภาพประกอบ 47 กรณี SU-D0 มีค่าอัตราเร็วในการกำจัด BOD เท่ากับ 49, 46 และ 110 mg./L-hr. ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 มีค่าอัตราเร็วในการกำจัด BOD เท่ากับ 69, 52 และ 64 mg./L-hr. ตามลำดับ

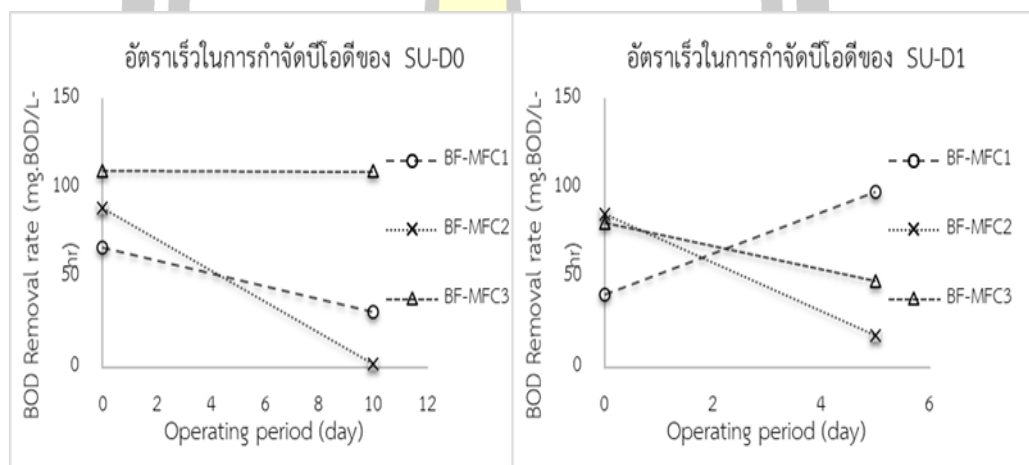


ภาพประกอบ 45 ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ BOD

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์



ภาพประกอบ 46 ประสิทธิภาพการกำจัด BOD

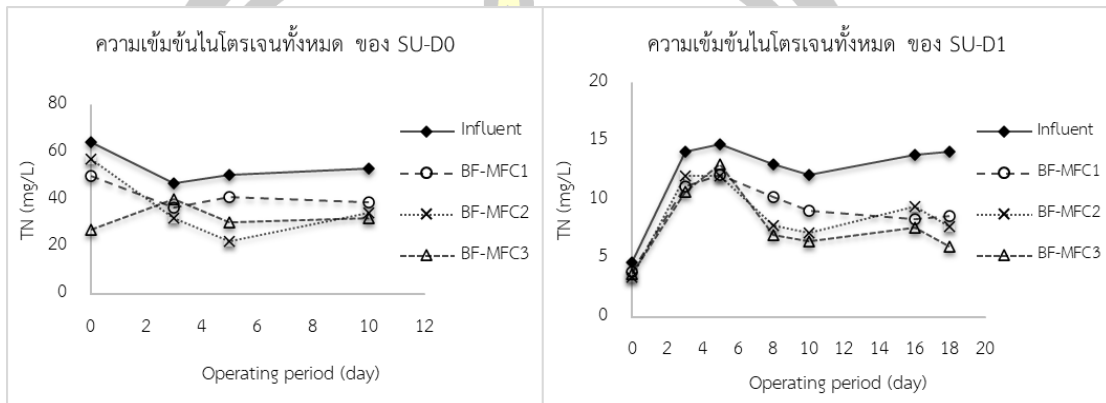


ภาพประกอบ 47 อัตราเร็วในการกำจัด BOD

4.2.1.7 ไนโตรเจนทั้งหมด (TN)

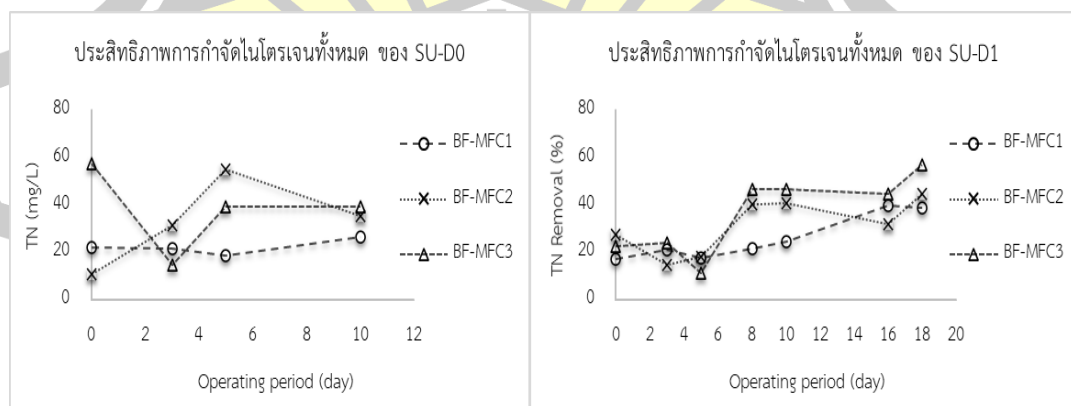
จากภาพประกอบ 48 พบว่าทั้งกรณีไม่เจือจาง (SU-D0) และเจือจางน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ 1:1 เท่า (SU-D1) ค่าความเข้มข้นไนโตรเจนทั้งหมดน้ำขาเข้ามีมากกว่าน้ำขาออก โดยค่าเฉลี่ยความเข้มข้นไนโตรเจนทั้งหมดน้ำขาเข้าและขาออกกรณี SU-D0 เท่ากับ 54 mg/l และ 42, 37, 33 mg/l สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ ส่วนค่าเฉลี่ยความเข้มข้นไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเข้าและขาออกกรณี SU-D1 มีค่าเท่ากับ 12 mg/l และ 9, 9, 8 mg/l สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่า MFC สามารถบำบัดไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ได้

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลค่าความเข้มข้นไนโตรเจนรวมลดลงจากน้ำขาเข้า สันนิษฐานได้ว่าเกิดปฏิกิริยา ANAMMOX ขึ้นในถัง BF-MFC ดังสมการ $2\text{NH}_3 + 2\text{N}_2\text{O}_4 \rightarrow 0.5\text{N}_2 + 4\text{NO} + 1\text{H}^+ + 1\text{e}^- + 2\text{H}_2\text{O}$ (Schmidt et al., 2002) และ อาจ เกิด ปฏิกิริยา Denitrification ทำให้ความเข้มข้นไนโตรเจนรวมมีค่าลดลงด้วย



ภาพประกอบ 48 ค่าความเข้มข้นไนโตรเจนทั้งหมดของน้ำขาเข้า-ออก

จากข้อมูลข้างต้นนำเสนอสามารถคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้ดังแสดงในภาพประกอบ 49 กรณี SU-D0 พบว่า BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้เท่ากับ $22 \pm 3\%$, $33 \pm 18\%$ และ $38 \pm 18\%$ ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 พบว่า BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้เท่ากับ $26 \pm 10\%$, $31 \pm 12\%$ และ $36 \pm 17\%$ ตามลำดับ

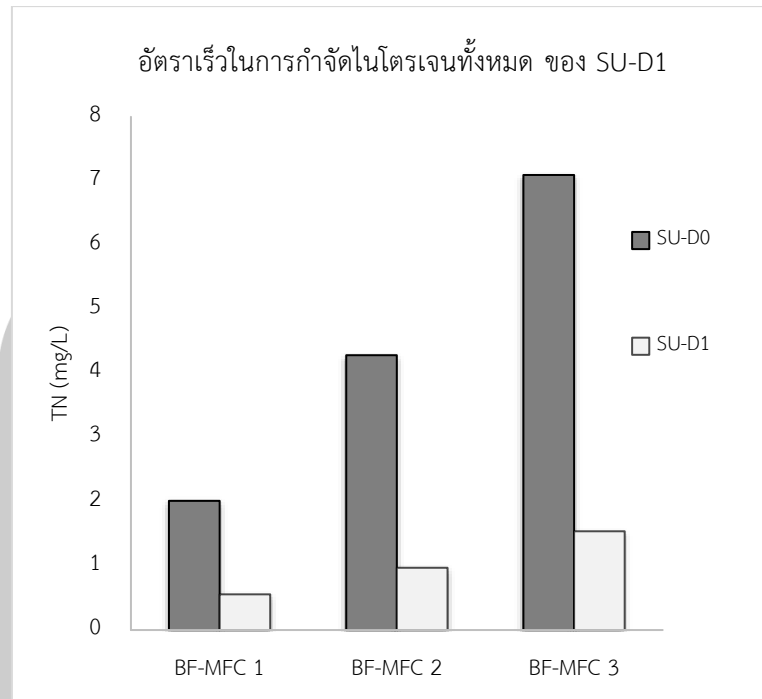


ภาพประกอบ 49 ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด

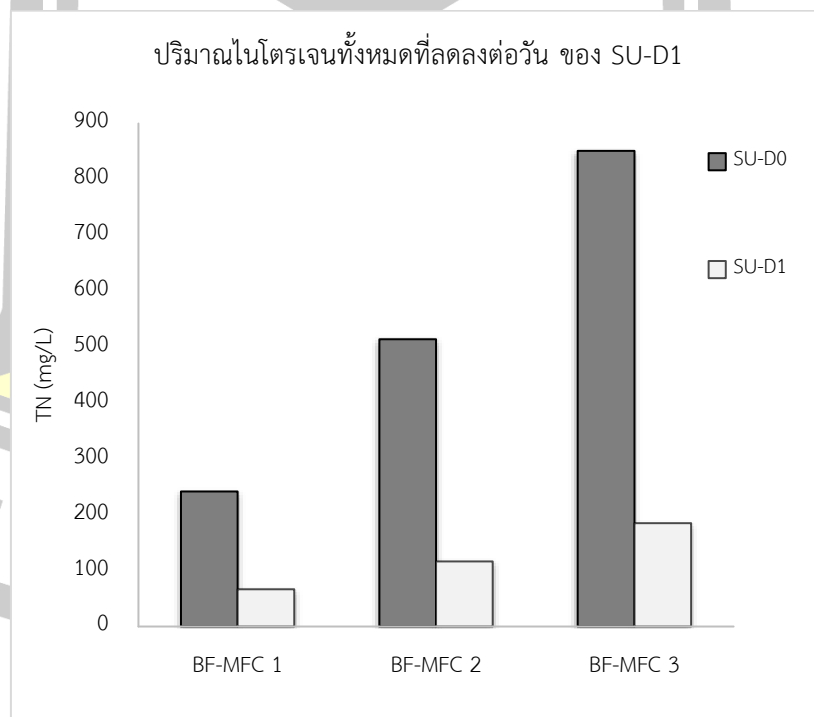
เมื่อนำข้อมูลที่มีไปคำนวณอัตราเร็วในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด พบว่าได้ผลเป็นดังแสดงในภาพประกอบ 50 สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กรณีไม่เจือจางน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ (SU-D0) อัตราเร็วในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 2.01, 4.28 และ 7.09 mg/l-hr. ตามลำดับ ส่วนค่าอัตราเร็วในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด กรณีเจือจางน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ 1:1 เท่า (SU-D1) มีค่าเท่ากับ 0.56, 0.97 และ 1.54 mg/l-hr. ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อคำนวณปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ลดลงต่อวันแล้วพบว่าเป็นดังแสดงในภาพประกอบ 51 สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กรณีไม่เจือจางน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ (SU-D0) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ลดลงต่อวันมีค่า 242, 514 และ 851 mgTN/d กรณีเจือจางน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ 1:1 เท่า (SU-D1) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ลดลงต่อวันมีค่าเท่ากับ 67, 116 และ 185 mgTN/d สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ อธิบายได้ว่าเมื่อมี BF-MFC มีอัตราการไหลสูง (BF-MFC3 > BF-MFC2 > BF-MFC1) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ลดลงต่อวันก็จะมากตาม

จากผลข้างต้นเห็นได้ว่าทั้งกรณีไม่เจือจางน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ (SU-D0) และกรณีที่มีอัตราส่วนการเจือจางเท่ากับ 1 ต่อ 1 (SU-D1) BF-MFC3 ซึ่งมีอัตราการไหล 40 l/d (อัตราการระบายทุกไนโตรเจนทั้งหมด SU-D0 เท่ากับ 0.43 kg/m³-d และ SU-D1 เท่ากับ 0.10 kg/m³-d ระยะเวลาพักเก็บ 3 hr) มีความสามารถในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดสูงสุด รองลงมาคือ BF-MFC2 (อัตราการระบายทุกไนโตรเจนทั้งหมด SU-D0 เท่ากับ 0.32 kg/m³-d และ SU-D1 เท่ากับ 0.07 kg/m³-d ระยะเวลาพักเก็บ 4 hr) ลำดับสุดท้ายคือ BF-MFC1 (อัตราการระบายทุกไนโตรเจนทั้งหมด SU-D0 เท่ากับ 0.22 kg/m³-d และ SU-D1 เท่ากับ 0.05 kg/m³-d ระยะเวลาพักเก็บ 6 hr) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Mongkulphit et al., 2021) ที่พบว่า MFC มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าระบบสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่ออัตราการไหลเพิ่ม ค่าอัตราเฉือน (shear rate) ของของไหลในระบบก็เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อนุภาคน้ำเข้าไปสัมผัสตัวกลางใน MFC แบบถ่วงกรองได้ดีขึ้น จึงย่อยสลายสิ่งสกปรกในน้ำได้ดีขึ้น

พูนุ ปณุกิตโต ชิว



ภาพประกอบ 50 อัตราเร็วในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen removal rate)



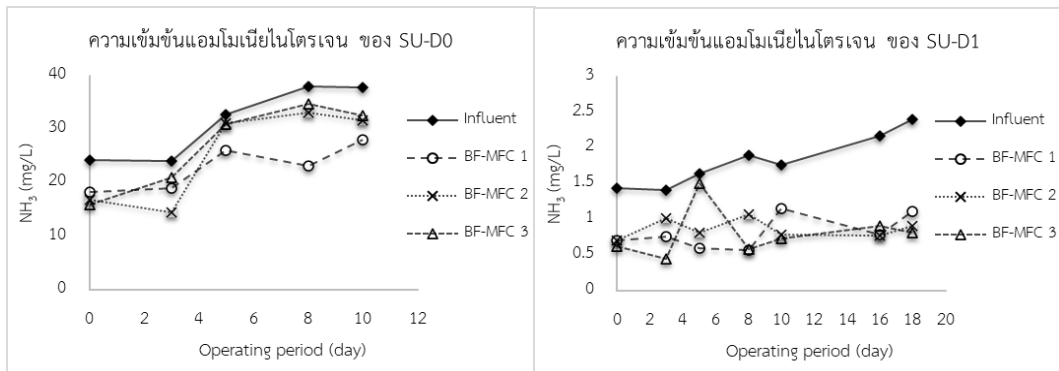
ภาพประกอบ 51 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกกำจัดรายวัน

4.2.1.8 ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (TAN : Total ammonia nitrogen)

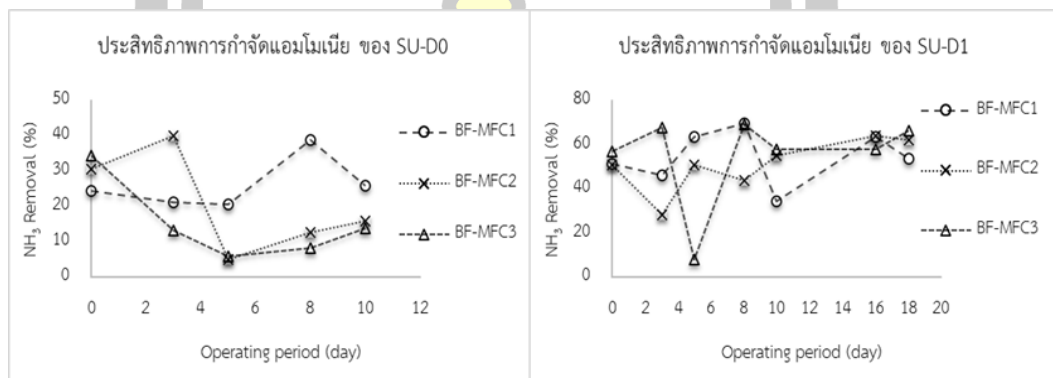
พบว่าทั้งกรณี SU-D0 และกรณี SU-D1 ความเข้มข้นแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำขาเข้ามีมากกว่าน้ำขาออกดังแสดงในภาพประกอบ 52 โดยความเข้มข้นแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำขาเข้าและออกจาก BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ในกรณี SU-D0 เท่ากับ 31 mg/l และ 23 mg/L 25 mg/L และ 27 mg/L ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 มีค่า 1.82 mg/l 0.81 mg/L 0.87 mg/L 0.80 mg/l สำหรับน้ำขาเข้าและออกจาก BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่า BF-MFC สามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ได้ เมื่อนำข้อมูลข้างต้นไปคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด พบว่าเป็นดังแสดงในภาพประกอบ 53 กรณี SU-D0 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ $26 \pm 7\%$, $21 \pm 14\%$ และ $15 \pm 11\%$ สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ $55 \pm 9\%$, $51 \pm 0.09\%$ และ $55 \pm 34\%$ สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลค่าความเข้มข้นแอมโมเนียไนโตรเจนลดลงจากน้ำขาเข้า พบว่ามี 2 กระบวนการที่สามารถลดค่าแอมโมเนียได้ คือ ปฏิกริยา Nitrification โดยแอมโมเนียจะเปลี่ยนรูปเป็นไนเตรต (มันซิน ตันทูลเวศม์, 2551) และเกิดปฏิกริยา ANAMMOX โดยแอมโมเนียจะเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซไนโตรเจน (Maurer et al., 2006) สันนิษฐานว่าอาจเป็นเพราะมีจุลินทรีย์กลุ่ม ANAMMOX อยู่ในถังซึ่งสามารถใช้นิโตรที่มิในน้ำเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในปฏิกริยา completely autotrophic nitrogen removal over nitrite process: CANON ออกซิไดซ์แอมโมเนียรวมให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจนในสภาวะ Anoxic ได้ (Perry L. McCarty, 2018) โดยสมการเคมีในการเกิดปฏิกริยาอาจแตกต่างกันไปตามชนิดจุลินทรีย์ เช่น กรณีจุลินทรีย์ B.anammoxidans เมื่อเกิด ANAMMOX แล้วความเข้มข้นไนเตรตในน้ำจะเพิ่มขึ้นดังสมการ $\text{NH}_3 + 1.3\text{HNO}_2 \rightarrow 0.3\text{HNO}_3 + 1\text{N}_2 + 1.7\text{H}_2\text{O} + 0.6\text{H}^+ + 0.6\text{e}^-$ ในขณะที่จุลินทรีย์ *Nitrosomonas* กรณีที่มีออกซิเจนต่ำก็สามารถเกิดปฏิกริยา ANAMMOX ได้ดังสมการ $2\text{NH}_3 + 2\text{N}_2\text{O}_4 \rightarrow 0.5\text{N}_2 + 4\text{NO} + 1\text{H}^+ + 1\text{e}^- + 2\text{H}_2\text{O}$ (Schmidt et al., 2002) โดยสังเกตได้จากความเข้มข้นไนเตรตในน้ำออกจากถัง BF-MFC ในวันที่ 5 และ 16 18 ของงานวิจัยนี้ก็มีค่าเพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 57

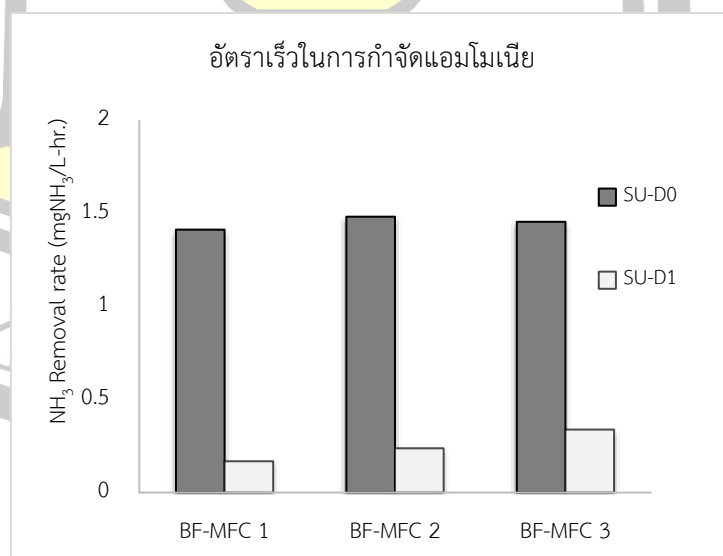
ในส่วนของอัตราเร็วในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดนั้นเป็นดังแสดงในภาพประกอบ 54 พบว่ากรณี SU-D0 มีค่า 1.41 mg./L-hr 1.48 mg./L-hr และ 1.46 mg./L-hr สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 มีค่าเท่ากับ 0.17, 0.24 และ 0.34 mg./L-hr สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 52 ค่าความเข้มข้นแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดของน้ำขาเข้า-ออก



ภาพประกอบ 53 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด

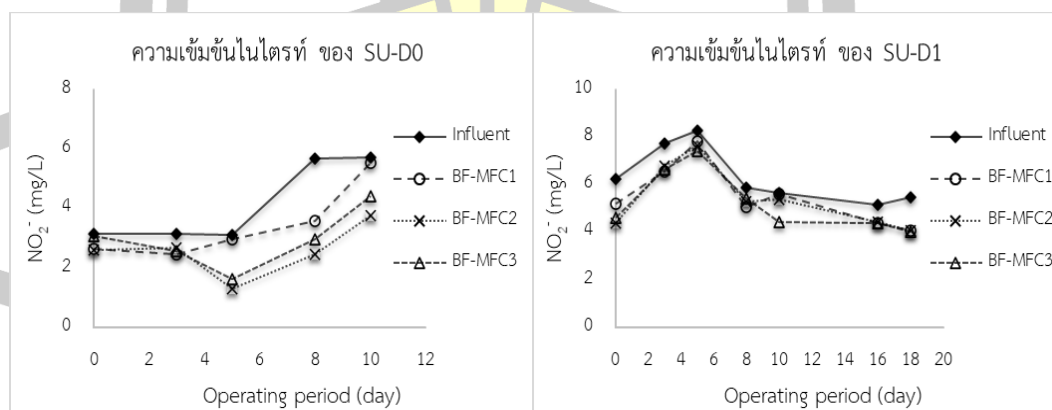


ภาพประกอบ 54 อัตราเร็วในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด

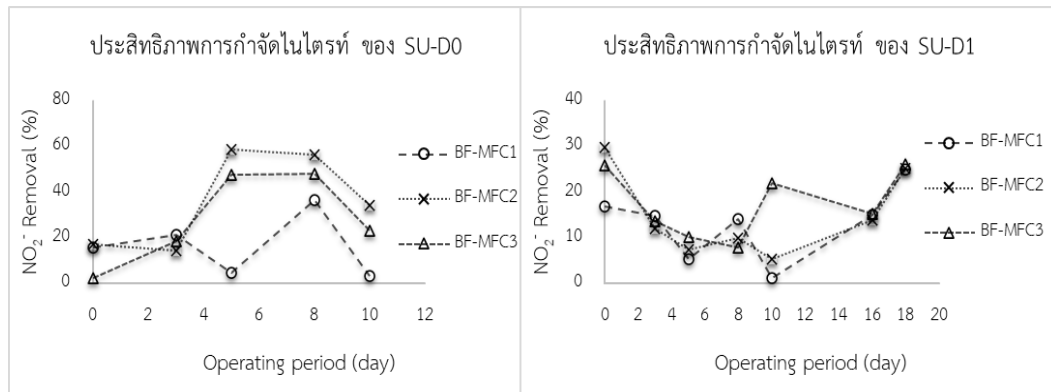
4.2.1.9 ค่าไนโตรเจน

พบว่าทั้งกรณี SU-D0 และ SU-D1 ความเข้มข้นไนโตรเจนในน้ำขาเข้ามีมากกว่าน้ำขาออกดังแสดงในภาพประกอบ 55 โดยความเข้มข้นไนโตรเจนในน้ำขาเข้าและออกจากถัง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กรณี SU-D0 เท่ากับ 4.16 mg/l 3.44 mg/l 2.56 mg/l 2.92 mg/l ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 มีค่าเท่ากับ 6.34 mg/l 5.52 mg/l 5.42 mg/l 5.27 mg/l สำหรับน้ำขาเข้าและออกจากถัง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่า MFC สามารถบำบัดค่าความเข้มข้นไนโตรเจนในน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ได้ เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจน พบว่าเป็นดังแสดงในภาพประกอบ 56 กรณี SU-D0 ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนเท่ากับ $16\pm 14\%$, $36\pm 21\%$ และ $28\pm 20\%$ สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 เท่ากับ $13\pm 8\%$, $15\pm 16\%$ และ $17\pm 11\%$ สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่าอัตราเร็วในการกำจัดไนโตรเจนของ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 เท่ากับ 0.12 mg./L-hr 0.40 mg./L-hr และ 0.41 mg./L-hr ตามลำดับในกรณี SU-D0 ส่วนในกรณี SU-D1 อัตราเร็วในการกำจัดไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 0.14 mg./L-hr 0.19 mg./L-hr และ 0.36 mg./L-hr. ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 57

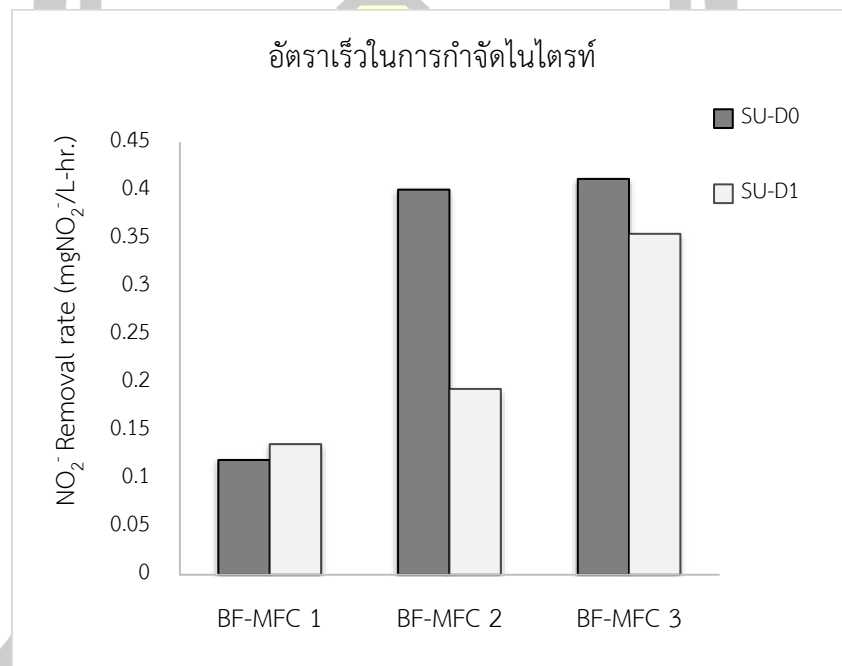
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลค่าความเข้มข้นไนโตรเจนลดลงจากน้ำขาเข้า อธิบายได้ว่าอาจเกิดปฏิกิริยา Denitrification มีผลทำให้ความเข้มข้นไนโตรเจนในถังถูกกำจัดไป พบว่าการทดลองค่าความเข้มข้นไนโตรเจนเพิ่มขึ้นในช่วงวันที่ 8 ถึง 10 ของ SU-D0 และวันที่ 0 ถึง 5 ของ SU-D1 คาดว่าเป็นเพราะเกิดปฏิกิริยา ANAMMOX ขึ้นในถัง ดังสมการ $2\text{NH}_3 + 2\text{N}_2\text{O}_4 \rightarrow 0.5\text{N}_2 + 4\text{NO} + 1\text{H}^+ + 1\text{e}^- + 2\text{H}_2\text{O}$ (Schmidt et al., 2002)



ภาพประกอบ 55 ค่าความเข้มข้นไนโตรเจน (NO_2^-) ของน้ำขาเข้า-ออก



ภาพประกอบ 56 ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรท์



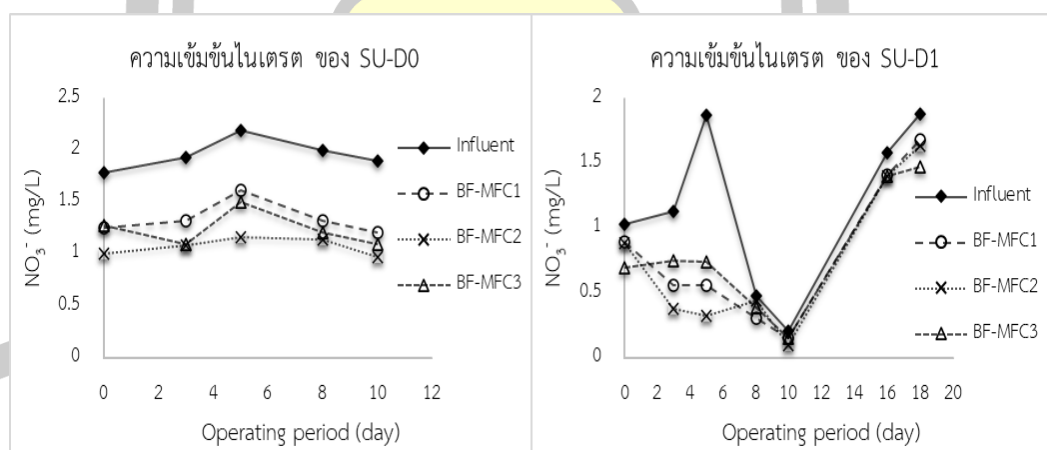
ภาพประกอบ 57 อัตราเร็วในการกำจัดไนเตรท์

4.2.1.10 ค่าไนเตรต

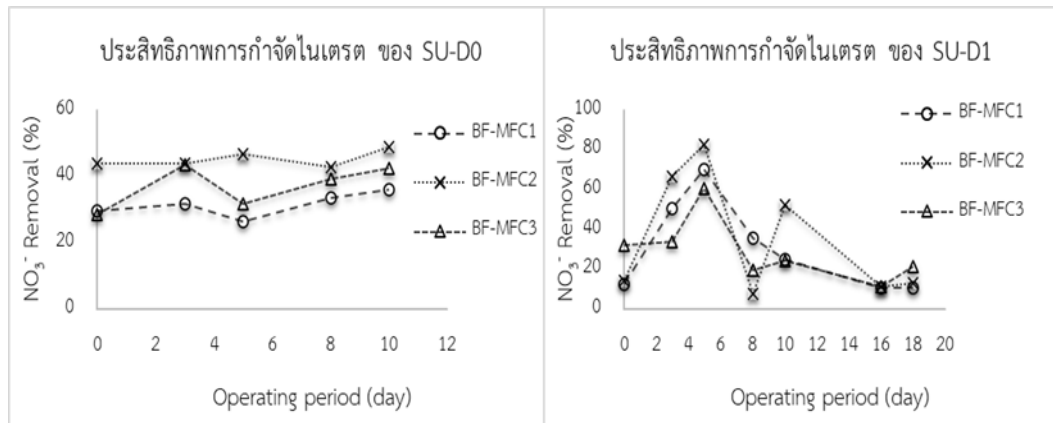
พบว่าทั้งกรณี SU-D0 และ SU-D1 ความเข้มข้นไนเตรตในน้ำขาเข้ามีมากกว่าน้ำขาออกดังแสดงในภาพประกอบ 58 โดยความเข้มข้นไนเตรตในน้ำขาเข้าและออกจากถัง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ในกรณี SU-D0 เท่ากับ 1.96 mg/l 1.35 mg/l 1.07 mg/l 1.23 mg/l ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 ความเข้มข้นไนเตรตมีค่า 1.17 mg/l 0.80 mg/l 0.74 mg/l 0.80 mg/l สำหรับน้ำขาเข้าและออกจากถัง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ จากผล

ข้างต้นแสดงให้เห็นว่า MFC สามารถบำบัดค่าความเข้มข้นไนเตรตในน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ได้ เมื่อนำข้อมูลที่ตรวจวัดได้ไปคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตของ BF-MFC พบว่าเป็นดังแสดงในภาพประกอบ 59 กรณี SU-D0 ถึง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กำจัดไนเตรตได้ 32%, 45% และ 37% ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 ถึง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กำจัดไนเตรตได้ 31%, 35% และ 29% ตามลำดับ ทั้งนี้สำหรับอัตราเร็วในการกำจัดไนเตรตสำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 นั้นเป็นดังแสดงในภาพประกอบ 60 กรณี SU-D0 มีค่า 0.10 mg./L-hr 0.22 mg./L-hr และ 0.24 mg./L-hr ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 มีค่าเท่ากับ 0.06 mg./L-hr 0.11 mg./L-hr 0.12 mg./L-hr. ตามลำดับ

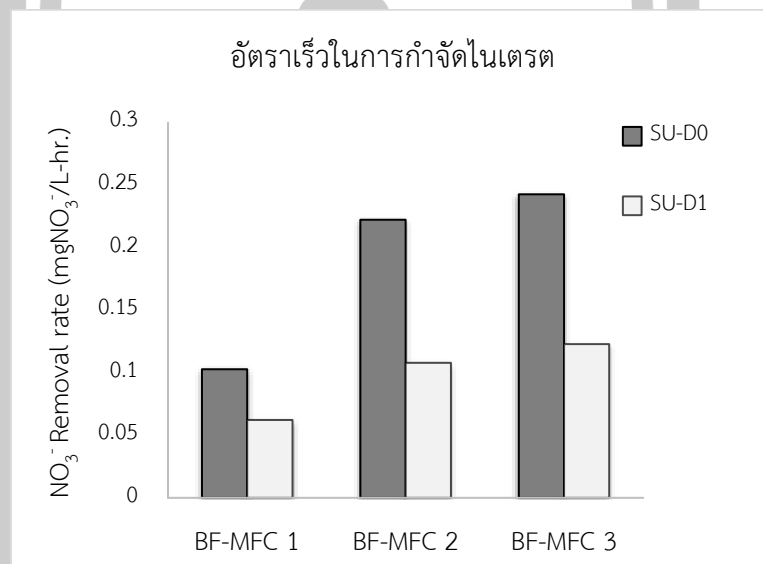
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลค่าความเข้มข้นไนเตรตขาออกจากถัง BF-MFC ถึงมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นไนเตรตขาเข้าในช่วง SU-D1 วันที่ 5 16 และ 18 สันนิษฐานว่าเกิดกระบวนการ ANNAMOX ขึ้นในถังดังสมการ $\text{NH}_3 + 1.3\text{HNO}_2 \rightarrow 0.3\text{HNO}_3 + 1\text{N}_2 + 1.7\text{H}_2\text{O} + 0.6\text{H}^+ + 0.6\text{e}^-$ และ $2\text{NH}_3 + 2\text{N}_2\text{O}_4 \rightarrow 0.5\text{N}_2 + 4\text{NO} + 1\text{H}^+ + 1\text{e}^- + 2\text{H}_2\text{O}$ (Schmidt et al., 2002) ส่วนในช่วง SU-D0 นั้นพบว่าถัง BF-MFC กำจัดไนเตรตได้ สันนิษฐานว่าเกิดกระบวนการ Denitrification ควบคู่ไปกับอีกหลายกระบวนการ ทำให้ไนเตรตกลายเป็นก๊าซไนโตรเจนหายไปจากน้ำได้



ภาพประกอบ 58 ค่าความเข้มข้นไนเตรตของน้ำขาเข้า-ออก



ภาพประกอบ 59 ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรต



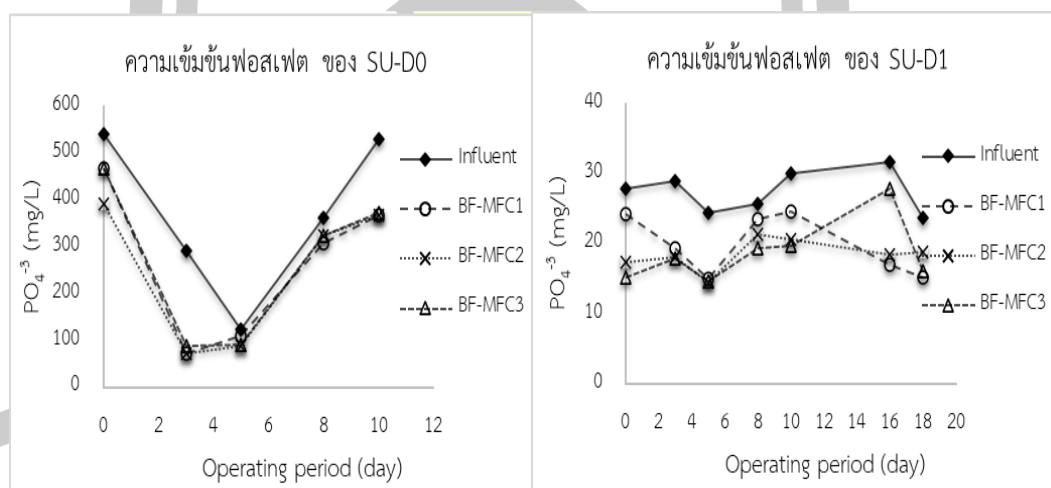
ภาพประกอบ 60 อัตราเร็วในการกำจัดไนเตรตของน้ำขาออก

4.2.1.11 ค่าฟอสเฟต

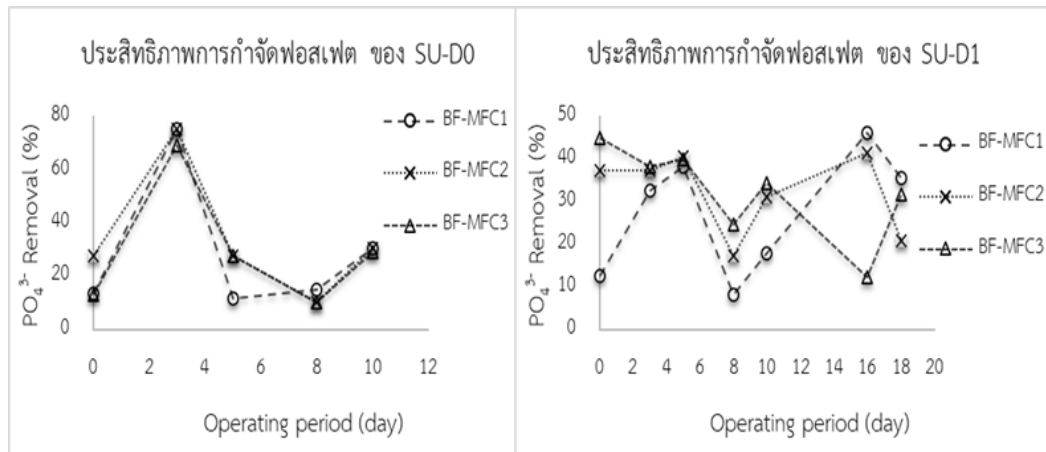
พบว่าทั้งกรณี SU-D0 และ SU-D1 ค่าความเข้มข้นฟอสเฟตน้ำขาเข้ามีมากกว่าน้ำขาออกดังแสดงในภาพประกอบ 61 โดยความเข้มข้นฟอสเฟตน้ำขาเข้าและขาออกจากถัง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กรณี SU-D0 มีค่าเท่ากับ 368 mg/l 264 mg/l 248 mg/l 269 mg/l ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 มีค่าเท่ากับ 27 mg/l 20 mg/l 18 mg/l 19 mg/l ตามลำดับ จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่า BF-MFC สามารถกำจัดฟอสเฟตในน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ได้ เมื่อนำข้อมูลที่ตรวจวัดได้ไปคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตของ BF-MFC พบว่าเป็นดังแสดงใน

ภาพประกอบ 62 กรณี SU-D0 ถึง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กำจัดฟอสเฟตได้ $29\pm 27\%$, $34\pm 24\%$ และ $30\pm 24\%$ สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 ถึง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กำจัดฟอสเฟตได้ $27\pm 14\%$, $32\pm 10\%$ และ $32\pm 11\%$ ตามลำดับ ทั้งนี้อัตราเร็วในการกำจัดฟอสเฟต สำหรับ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 นั้นเป็นดังแสดงในภาพประกอบ 63 กรณี SU-D0 มีค่า 17.40, 30.04 และ 33.23 mg/L-hr ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 มีค่าเท่ากับ 1.26, 2.24 และ 2.94 mg/L-hr ตามลำดับ

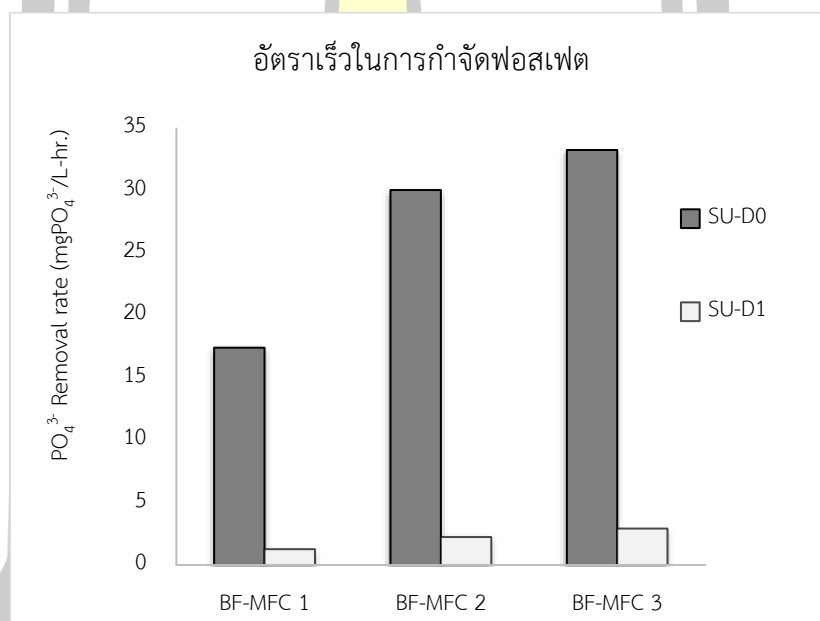
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลค่าความเข้มข้นฟอสเฟตลดลง สันนิษฐานว่าเกิดจากวิสัยของจุลินทรีย์จำพวก PAOs ที่หายใจโดยใช้ออกซิเจน แล้วใช้พลังงานจากการหายใจนั้นดึงฟอสเฟตจากน้ำเข้าไปในเซลล์แล้วนำไปสังเคราะห์เป็น Polyphosphate เก็บไว้เพื่อใช้ย่อยเป็นพลังงานเมื่อต้องเผชิญหน้ากับสภาวะที่ออกซิเจนต่ำ (Gebremariam et al., 2011) และพบว่าถึง BF-MFC สามารถกำจัดฟอสเฟตได้ โดยที่มีค่าออกซิเจนละลายน้ำในถัง BF-MFC น้อย (0.09 และ 0.07 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ) และค่าไนเตรต ดังภาพประกอบ 58 สันนิษฐานว่าจุลินทรีย์จำพวก PAOs ที่อยู่ในถังน่าจะ เป็นชนิด DNPAOs เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสามารถใช้ไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนในการหายใจ จึงสามารถกำจัดได้ทั้งฟอสเฟตและไนเตรต (Gebremariam et al., 2011)



ภาพประกอบ 61 ค่าความเข้มข้นฟอสเฟตของน้ำขาเข้า-ออก



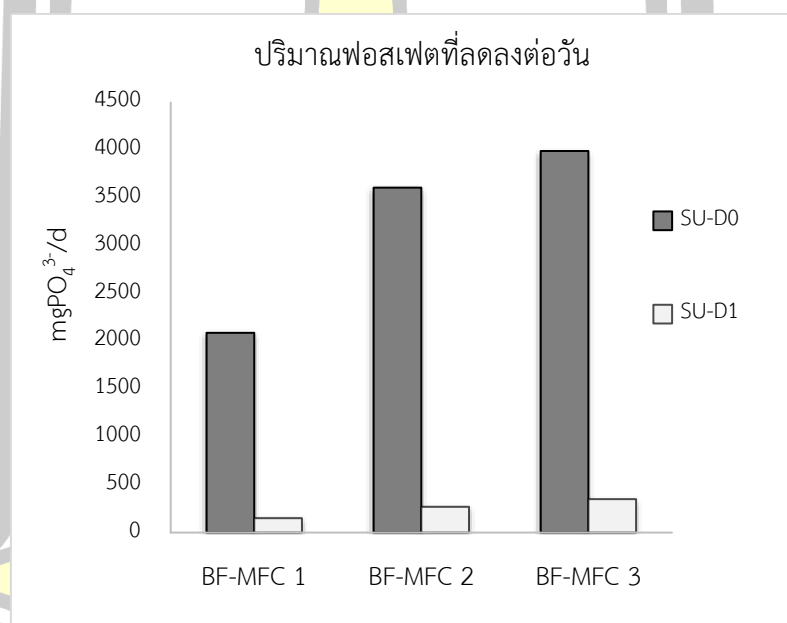
ภาพประกอบ 62 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต



ภาพประกอบ 63 อัตราเร็วในการกำจัดฟอสเฟต

เมื่อคำนวณปริมาณฟอสเฟตที่ถูก BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กำจัดรายวัน พบว่าเป็นดังแสดงในภาพประกอบ 64 กรณี SU-D0 ถึง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กำจัดฟอสเฟตได้ 2,087 mgPO₄³⁻/d 3,605 mgPO₄³⁻/d และ 3,988 mgPO₄³⁻/d ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 ถึง BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 กำจัดฟอสเฟตได้ 151 mgPO₄³⁻/d 269 mgPO₄³⁻/d และ 351 mgPO₄³⁻/d ตามลำดับ

จากผลข้างต้นเห็นได้ว่าทั้งกรณีไม่เจือจางน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ (SU-D0) และกรณีที่มีอัตราส่วนการเจือจางเท่ากับ 1 ต่อ 1 (SU-D1) ถึง BF-MFC3 ซึ่งมีอัตราการไหล 40 l/d (อัตราการระบรทุกฟอสเฟต SU-D0 2.95 kg/m³-d และ SU-D1 0.22 kg/m³-d ระยะเวลาพักเก็บ 3 hr) มีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตทั้งหมดสูงที่สุด รองลงมาคือ BF-MFC2 (อัตราการระบรทุกฟอสเฟต SU-D0 2.21 kg/m³-d และ SU-D1 0.16 kg/m³-d ระยะเวลาพักเก็บ 4 hr) ลำดับสุดท้ายคือ BF-MFC1 (อัตราการระบรทุกฟอสเฟต SU-D0 1.47 kg/m³-d และ SU-D1 0.11 kg/m³-d ระยะเวลาพักเก็บ 6 hr) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mongkulphit et al. (2021) ที่พบว่า MFC มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าระบบสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่ออัตราการไหลเพิ่ม ค่าอัตราเฉือน (Shear rate) ของของไหลในระบบก็เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้นุภาคน้ำเข้าไปสัมผัสตัวกลางใน MFC แบบถ่วงกรองได้ดีขึ้น จึงมีความสามารถในการย่อยสลายสิ่งสกปรกในน้ำเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 64 ปริมาณฟอสเฟตที่ถูกบำบัดรายวัน

ตาราง 8 เปรียบเทียบผลการทดสอบคุณภาพน้ำ กับงานวิจัยอื่นๆ

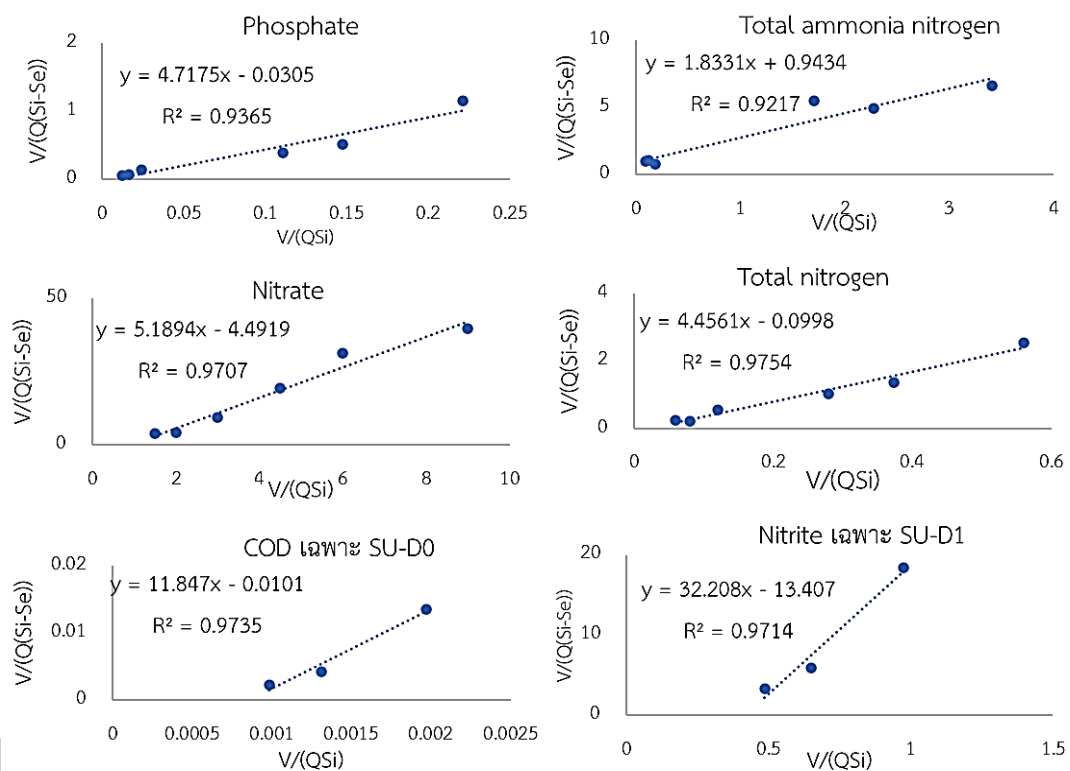
ระบบ	ประสิทธิภาพการบำบัด ค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด (เปอร์เซ็นต์)					ที่มา
	บีโอดี	ซีโอดี	ฟอสเฟต	แอมโมเนีย รวม	ไนโตรเจน รวม	
BF-MFC	1-59	-50-71	8-75	5-70	11-58	งานวิจัยนี้
Coupled MFC	-	-	-	-	58	Chen et al., 2019
SNAD-MFC	-	40	-	-	99	Li et al., 2016
MFC	-	93	-	-	-	Sharma et al., 2020
EFB-MFC	-	-	-	16	16	Yang et al., 2021
AEB-MFC	-	52	-	86	62	Yang et al., 2020
SC-MFC	-	71	-	-	-	Fernández et al., 2020
SSM-MFC	-	88	-	-	29	Walter et al.,2018
MFC	-	23	-	-	-	García et al., 2017
MFC	-	79	-	-	-	Jadhav et al., 2016
MFC	-	97	37	-	42	Lu et al., 2019

จากตาราง 8 แสดงเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณภาพน้ำ กับงานวิจัยอื่นๆ จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในงานวิจัยนี้มีค่าหลากหลายตั้งแต่ต่ำไปจนถึงสูง โดยในกรณีที่พิจารณา ค่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสูงสุดกล่าวได้ว่า BF-MFC บำบัดน้ำเสียได้ค่อนข้างดี

4.2.2 สัมประสิทธิ์จลพลศาสตร์ในการบำบัดน้ำเสียด้วย BF-MFC

เมื่อนำค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์แสดงคุณภาพน้ำของทั้ง 3 ถึง (SU-D0 จำนวน 3 ข้อมูล SU-D1 จำนวน 3 ข้อมูล รวมเป็น 6 ข้อมูล) ไปทดลองคำนวณและพล็อตกราฟเพื่อหาแบบจำลองจลพลศาสตร์ที่สามารถแสดงปฏิกิริยาการบำบัดน้ำของ BF-MFC พบว่าปฏิกิริยาการกำจัดฟอสเฟต กำจัดไนเตรต กำจัดแอมโมเนีย และกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบจำลองจลพลศาสตร์ Modified Stover-Kincannon model ได้ดังแสดงในภาพประกอบ 65 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.92-0.98 ดังแสดงในตาราง 9

ทั้งนี้สำหรับค่าซีโอดีและไนโตรเจนนั้น พบว่ากรณีใช้ทั้ง 6 ข้อมูลจะไม่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองจลพลศาสตร์ Modified Stover-Kincannon ได้ (ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.0072 และ 0.5224) แต่เมื่อแยกพล็อตทีละ 3 ข้อมูล พบว่าปฏิกิริยาการกำจัดซีโอดีในกรณีใช้น้ำเสีย SU-D0 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองจลพลศาสตร์ Modified Stover-Kincannon ได้ และปฏิกิริยาการกำจัดไนโตรเจนในกรณีใช้น้ำเสีย SU-D1 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองจลพลศาสตร์ Stover-Kincannon ได้ดังแสดงในภาพประกอบ 65 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราภาระบรรทุกสารมลพิษต่างๆที่เข้าระบบ BF-MFC มีผลต่อความเร็วในการกำจัดมลพิษ โดยส่วนใหญ่เป็นไปตามแบบจำลองจลพลศาสตร์ Modified Stover-Kincannon



ภาพประกอบ 65 แบบจำลองจลพลศาสตร์ Modified Stover-Kincannon ของการกำจัดฟอสเฟต ไนเตรต แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด ไนโตรเจนทั้งหมด ซีโอดี และไนโตรเจนด้วย BF-MFC

ตาราง 9 ค่าสัมประสิทธิ์จลพลศาสตร์ของแบบจำลองจลพลศาสตร์ Modified Stover–Kincannon ของการกำจัดฟอสเฟต ไนเตรต แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด ไนโตรเจนทั้งหมด ซีโอดี และไนไตรท์ ด้วย BF-MFC

รายการ	PO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	TAN	TN	COD	NO ₂ ⁻
K _B /U _{max}	4.7175	5.1894	1.8331	4.4561	11.847	32.208
1/U _{max}	-0.0305	-4.4919	0.9434	-0.0998	-0.101	-13.407
U _{max}	-32.787	-0.2226	1.06	-10.02	-9.901	-0.0746
K _B	-154.67	-1.1553	1.94308	-44.65	-117.3	-2.4023
n	6	6	6	6	3	3
r ²	0.9365	0.9707	0.9217	0.9754	0.9735	0.971

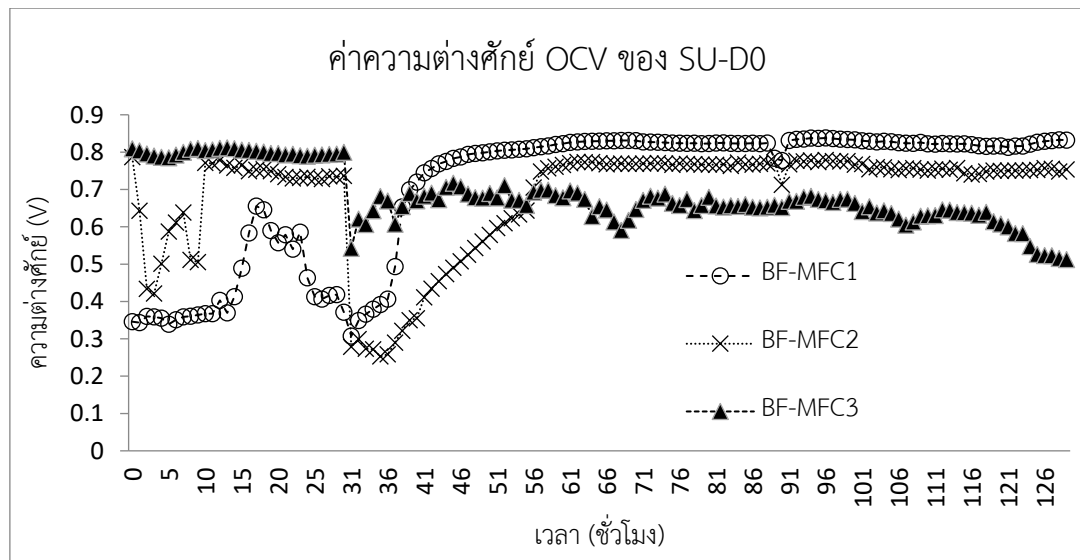
หมายเหตุ U_{max} คืออัตราเร็วสูงสุดในการกำจัดมลพิษ (mg/L-hr) K_B คือค่าคงที่ของความอิ่มตัว (mg/L-hr) เป็นค่าสัมประสิทธิ์จลพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองนี้ n คือจำนวนข้อมูลที่ใช้พล็อต r² คือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

เมื่อทดลองใช้สมการจลพลศาสตร์ที่ได้ในตาราง 9 มาพิจารณาในกรณีที่ต้องการกำจัด TN ในน้ำปัสสาวะขาเข้า จาก 64.49 มก./ล. ให้เหลือ 20 มก./ล. ตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน กำหนดไว้ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553) โดยใช้อัตราการไหล 30 ล./วัน (BF-MFC2) ผลการคำนวณ (แทนค่า Q = 1.25 ล./ชม. S_i = 64.49 มก./ล. S_e = 20.00 มก./ล. ลงใน แบบจำลองจลพลศาสตร์ Modified Stover–Kincannon แล้วแก้สมการ
$$\frac{V}{1.25 \times (64.49 - 20)} = \frac{4.561V}{1.25 \times 64.49} - 0.0998$$
 เพื่อหาค่า V) พบว่าใช้ถัง BF-MFC ที่มีปริมาตรเพียง 2.586 ล. หรือ HRT 2.07 ชม. ก็เพียงพอ (ถังเดิมมีปริมาตร 5 ล.) เมื่อเปรียบเทียบผลนี้กับงานวิจัยของ Ni et al. (2011) ซึ่งใช้ระบบยูเอเอสบี (up-flow anaerobic sludge blanket : UASB) กำจัด TN โดยมี K_B เท่ากับ 3.9 kg/m³-d (116.67 mg/L-hr) และ U_{max} เท่ากับ 2.4 kg/m³-d (145.83 mg/L-hr) ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าที่อัตราการไหล 30 ล./ว. ถัง UASB ขนาดเพียง 0.85 ล. หรือ HRT 0.68 ชม. สามารถกำจัด TN ในน้ำขาเข้า จาก 64.49 มก./ล. ให้เหลือ 20 มก./ล. ได้ กล่าวได้ว่าอัตราเร็วในการกำจัดไนโตรเจนรวมของ BF-MFC ในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าระบบกำจัดไนโตรเจนในงานวิจัยอื่น

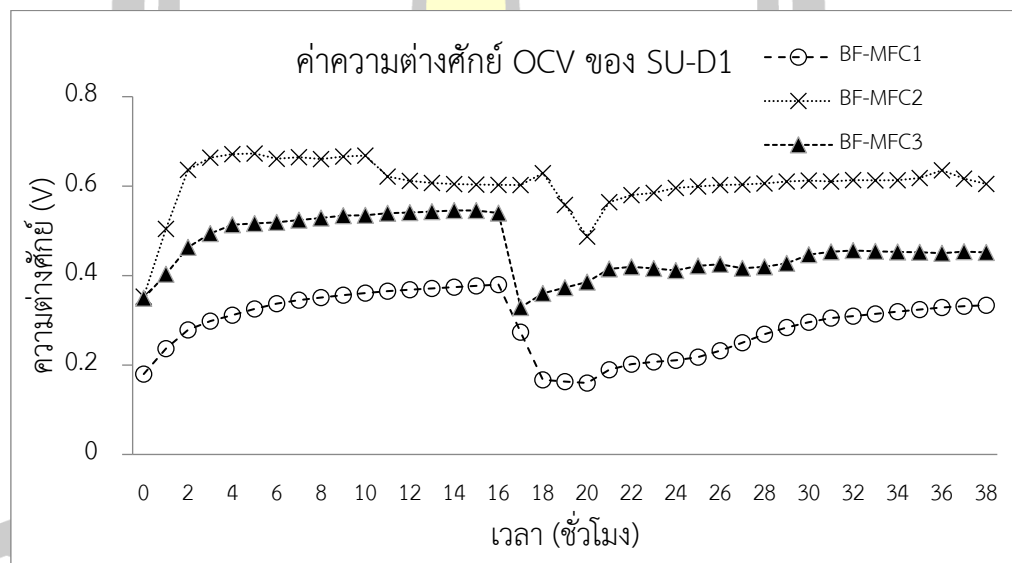
4.2.3 ค่าทางไฟฟ้า

ในการตรวจวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของในช่วงแรกๆ นั้นวัดแบบ Open circuit voltage (OCV) คือไม่ต่อตัวต้านทาน พบว่ากรณี SU-D0 นั้น BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 มีค่าเฉลี่ย OCV เท่ากับ 0.700 V 0.678 V และ 0.681 V ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 66 ส่วนกรณี SU-D1 นั้น BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 มีค่าเฉลี่ย OCV เท่ากับ 0.280 V 0.567 V และ 0.451 V ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 67

เมื่อทำการทดลอง Polarization พบว่า กรณี SU-D0 ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) ที่ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ผลิตได้ใน 5 นาทีมีค่า 58.06, 500.99 และ 216.88 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ที่ต่อกับความต้านทานภายนอกคงที่ 10,000, 10,000 และ 10,000 โอห์ม ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 นั้น ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) ที่ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 ผลิตได้ใน 5 นาทีมีค่าเท่ากับ 10.33, 100.53 และ 75.37 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ที่ต่อกับความต้านทานภายนอกคงที่ 10,000, 10,000 และ 10,000 โอห์ม ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 68 ผู้วิจัยจึงนำค่าความต้านทานภายนอกดังกล่าวเหล่านั้นมาเชื่อมขั้วแอโนดและขั้วแคโทดของ BF-MFC แต่ละถึงเข้าด้วยกัน จากนั้นจึงวัดความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทานภายนอกที่นำมาต่อ ซึ่งค่าความต่างศักย์นี้เรียกว่าค่าความต่างศักย์แบบต่อตัวต้านทาน หรือ Closes circuit voltage (CCV) พบว่ากรณี SU-D0 นั้น BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 มีค่าเฉลี่ย CCV เท่ากับ 0.036 V 0.072 V และ 0.031 V ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 69 ส่วนกรณี SU-D1 นั้น BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 มีค่าเฉลี่ย CCV เท่ากับ 0.018, 0.053, และ 0.025 (V) ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 70 สังเกตเห็นว่ากรณีที่น้ำเสียมีความเข้มข้นมาก (SU-D0) ถึงที่มีความต่างศักย์มากที่สุดคือ BF-MFC2 ส่วนกรณีที่น้ำเสียมีความเข้มข้นน้อย (SU-D1) ถึงที่มีความต่างศักย์มากที่สุดคือ BF-MFC2 เช่นกัน

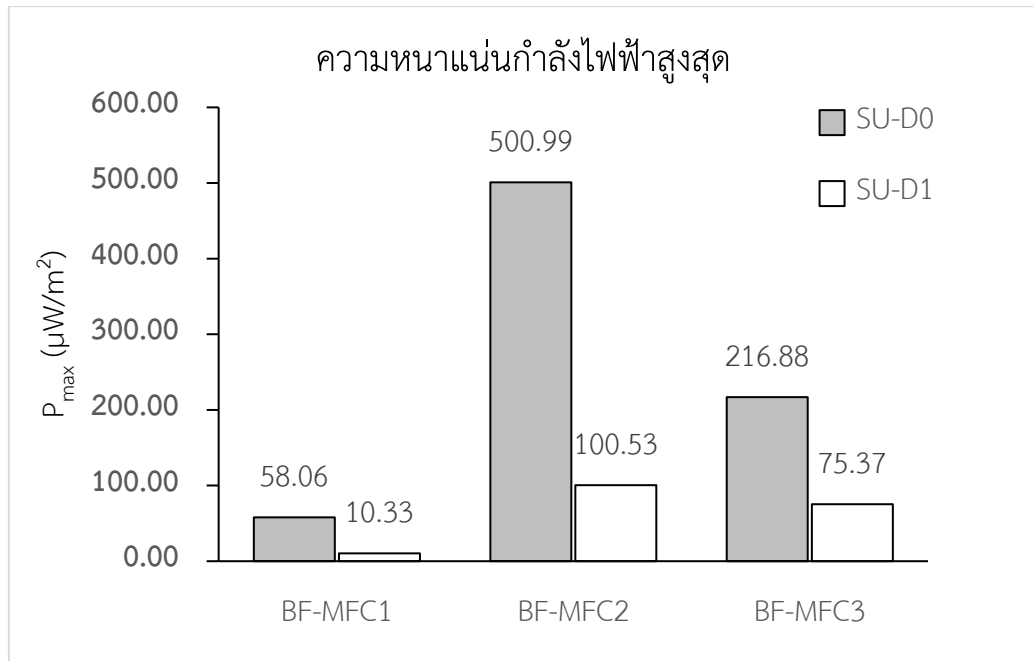


ภาพประกอบ 66 ค่าความต่างศักย์ OCV ของ SU-D0

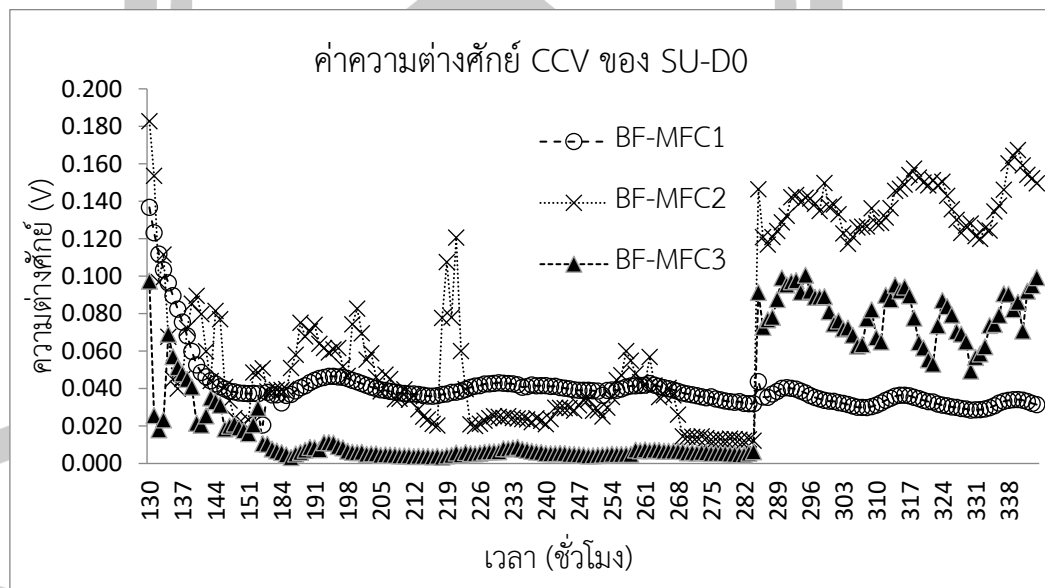


ภาพประกอบ 67 ค่าความต่างศักย์ OCV ของ SU-D0

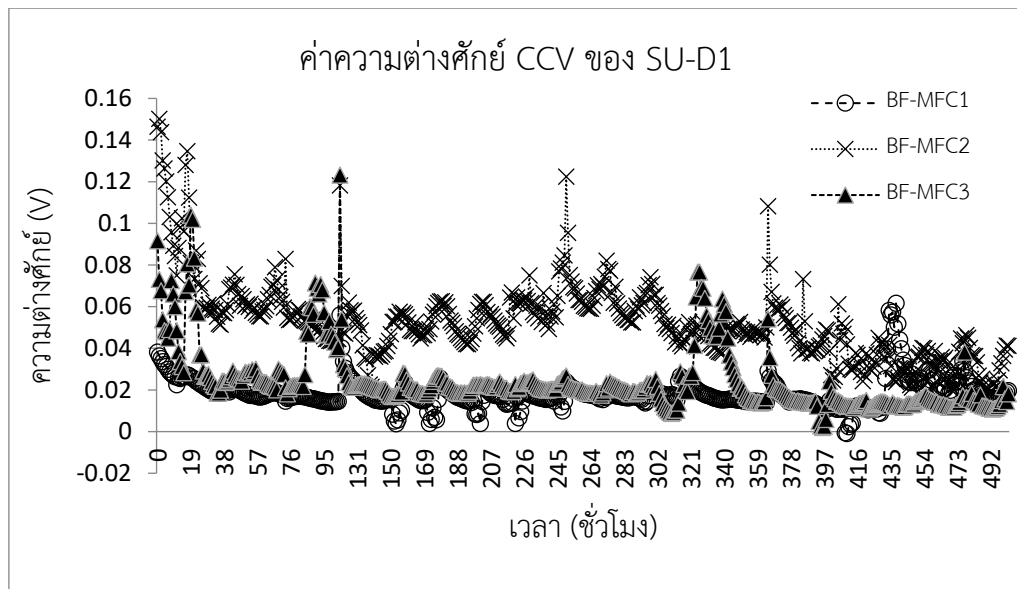
พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบ 68 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด Maximum power density (P_{\max})



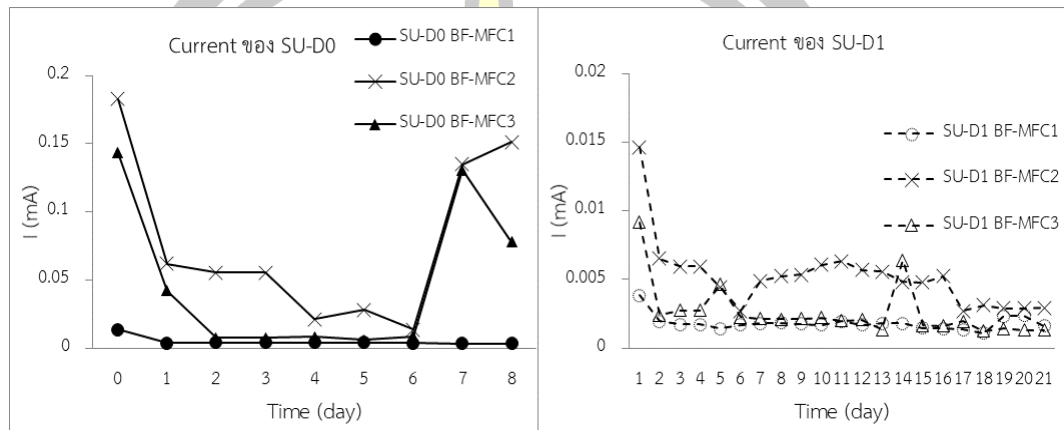
ภาพประกอบ 69 ค่าความต่างศักย์ CCV ของ SU-D0



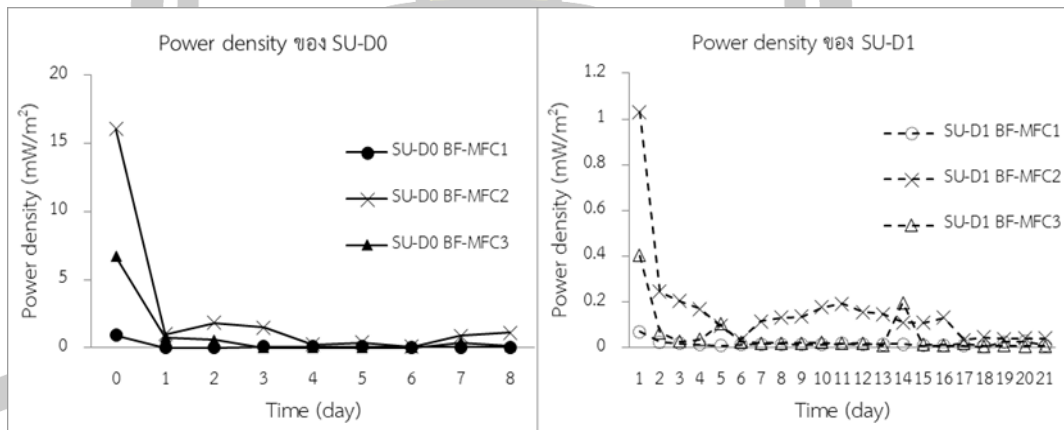
ภาพประกอบ 70 ค่าความต่างศักย์ CCV ของ SU-D0

ขณะที่มีการต่อตัวต้านทานภายนอก ถือว่า BF-MFC แต่ละถังมีการบำบัดน้ำเสียและผลิตไฟฟ้าจริง (กระแสไฟฟ้าเกิดจริง) อย่างเต็มรูปแบบโดยค่ากระแสไฟฟ้าที่แต่ละถังผลิตได้นั้นเป็นดังแสดงในภาพประกอบ 71 พบว่ากรณี SU-D0 กระแสไฟฟ้าที่ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 จ่ายจริงตลอดระยะเวลาเดินระบบมีค่าอยู่ในช่วง 0.04-0.140 mA 0.072-0.183 mA และ 0.046-0.148 mA ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 กระแสไฟฟ้า BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 จ่ายจริงตลอดระยะเวลาเดินระบบมีค่าอยู่ในช่วง 0.002-0.006 mA 0.005-0.015 mA และ 0.002-0.012 mA ตามลำดับ และขณะนั้นสามารถคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่แต่ละถังผลิตได้ดังแสดงในภาพประกอบ 72 พบว่ากรณี SU-D0 กำลังไฟฟ้าที่ BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 จ่ายจริงตลอดระยะเวลาเดินระบบมีค่าอยู่ในช่วง 0.00-0.09 mW/m², 0.07-16.06 mW/m² และ 0.01-6.71 mW/m² ตามลำดับ ส่วนกรณี SU-D1 กำลังไฟฟ้า BF-MFC1, BF-MFC2 และ BF-MFC3 จ่ายจริงตลอดระยะเวลาเดินระบบมีค่าอยู่ในช่วง 0.00-0.18 mW/m², 0.02-1.08 mW/m² และ 0.00-0.73 mW/m² ตามลำดับ และเมื่อนำกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้รายชั่วโมง มาคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ BF-MFC แต่ละถังผลิตได้ (ผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟในภาพประกอบ 72) ได้ผลดังแสดงในภาพประกอบ 73 พบว่า SU-D0 ให้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่า SU-D1 ทั้ง 3 ถัง อธิบายได้ว่าเมื่อมีความเข้มข้นสารตั้งต้นมาก ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาก็จะมากตามไปด้วย จึงเกิดการจ่ายอิเล็กตรอนได้ดีกว่ากรณีความเข้มข้นสารตั้งต้นน้อย ทั้งนี้เมื่อเทียบ ระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่แต่ละถังผลิตได้ พบว่าถึง BF-MFC2 ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่าอีก 2 ทั้งในกรณี SU-D0 และ SU-D1 กล่าวได้ว่า ค่าอัตราการระบรทุก

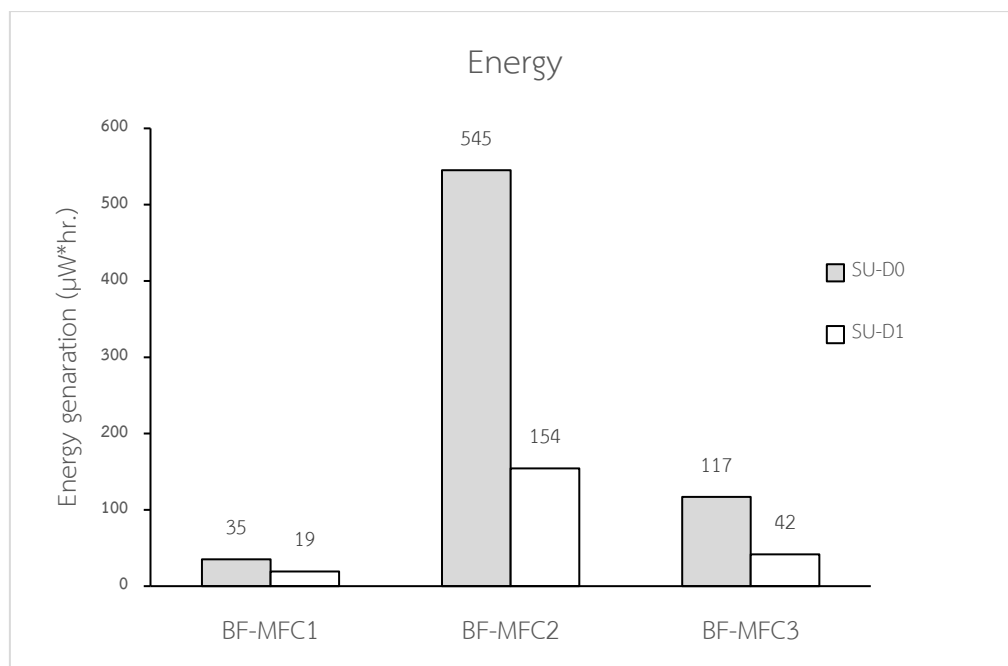
ไนโตรเจนทั้งหมดของน้ำปัสสาวะ $0.32 \text{ kg/m}^3\cdot\text{d}$ และ $0.07 \text{ kg/m}^3\cdot\text{d}$ ระยะเวลาเก็บ 4 hr เหมาะสำหรับการผลิตไฟฟ้ามากกว่า ค่าอัตราการระบรทุกไนโตรเจนทั้งหมดของน้ำปัสสาวะ $0.43 \text{ kg/m}^3\cdot\text{d}$ และ $0.10 \text{ kg/m}^3\cdot\text{d}$ ระยะเวลาเก็บ 3 hr และ ค่าอัตราการระบรทุกไนโตรเจนทั้งหมดของน้ำปัสสาวะ $0.22 \text{ kg/m}^3\cdot\text{d}$ กับ $0.05 \text{ kg/m}^3\cdot\text{d}$ ระยะเวลาเก็บ 6 hr



ภาพประกอบ 71 กระแสไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จริง



ภาพประกอบ 72 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จริง



ภาพประกอบ 73 พลังงานไฟฟ้า Energy ที่แต่ละถังผลิตได้ตลอดการทดลอง

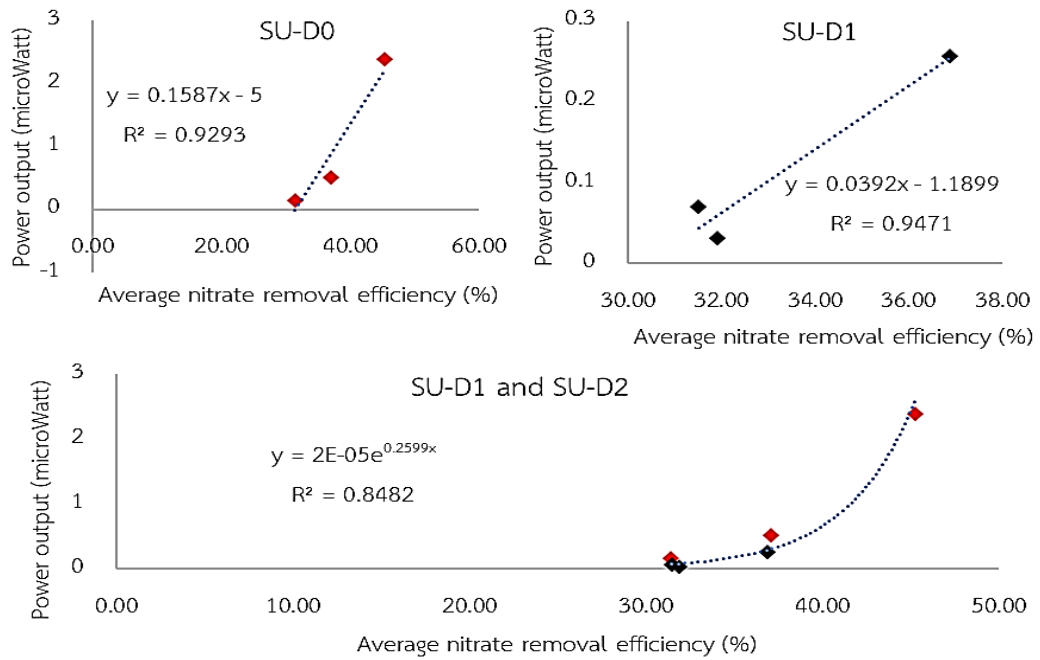
ตาราง 10 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่าทางไฟฟ้า กับงานวิจัยอื่นๆ

ระบบ	ความต่างศักย์รายชั่วโมง OCV (มิลลิโวลต์)	ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ายาขั้วโม่ง (มิลลิวัตต์/ตารางเมตร)	กำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์)	ที่มา
Urine-BF-MFC	196-838*	0.05-12.0**	0.00014-0.033	งานวิจัยนี้
Urine- stack-MFC	329±68	14.5	0.361	Sharma et al., 2021
SNAD-MFC	-	294.9	-	Li et al., 2016
Urine- MFC	-	111-361	0.1-0.325	Zang et al., 2012
MFC	425	2.7	-	Walter et al., 2018
MFC	136	5.2	-	Jadhav et al., 2016

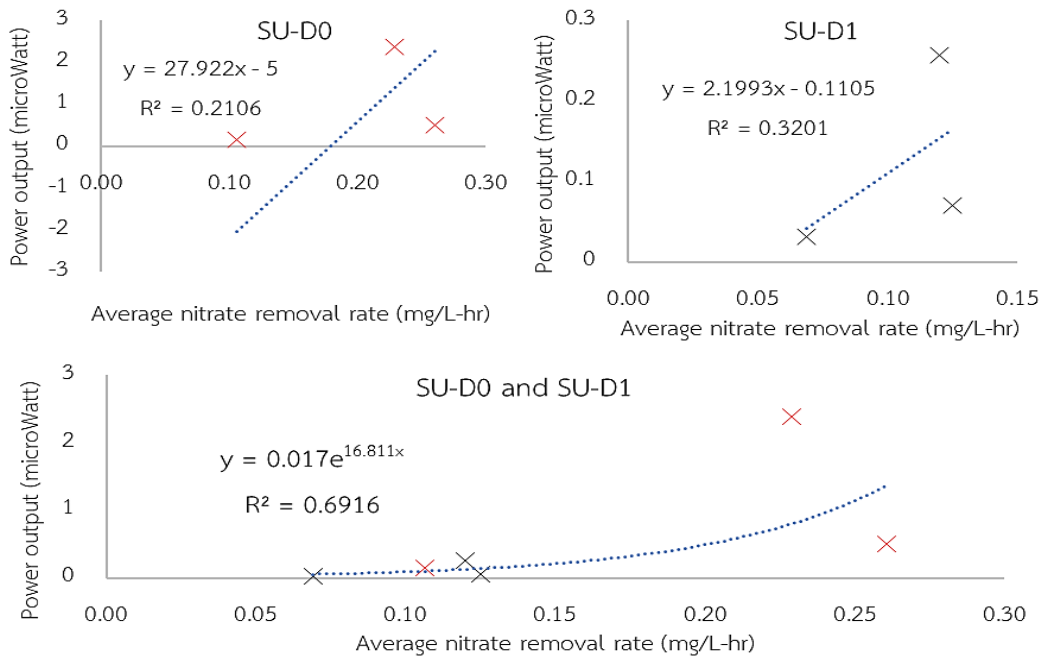
หมายเหตุ * คือข้อมูลของ BF-MFC1 กรณี SU-D0 และ ** คือข้อมูลของ BF-MFC2 กรณี SU-D0

จากตาราง 15 แสดงเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าทางไฟฟ้า กับงานวิจัยอื่นๆ จะเห็นได้ว่า งานวิจัยนี้ผลิตไฟฟ้าได้ค่อนข้างต่ำแต่ก็มีบางชั่วโมงที่ผลิตได้เทียบเท่าหรือสูงกว่าบางงาน สาเหตุที่ผลิตไฟได้น้อยนั้นอาจเป็นเพราะ BF-MFC ในงานวิจัยนี้มีค่าความต้านทานภายในสูง (จากผลการทดลอง Polarization ที่ได้ค่าความต้านทานภายนอกที่มีค่าสูง) ทำให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าผลิตได้น้อย ตลอดจนการที่ใช้อิเล็กโทรดที่ไม่ได้ดัดแปลงกล่าวคือการนำลวดทองแดงธรรมดาต่อเข้ากับแผ่นกราฟไฟต์ไม่ได้มีเหล็กหรือ เคลือบสารเคมีใดๆ

เมื่อทดลองหาความเชื่อมโยงระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่ BF-MFC ผลิตได้กับประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตเพื่อพิจารณาสมการจลพลศาสตร์ที่ใช้ทำนายความเร็วในการผลิตพลังงานไฟฟ้า (ในที่นี้ก็คือกำลังไฟฟ้า) พบว่าสามารถแสดงได้ในรูปสมการเชิงเส้น โดยแบ่งเป็นกรณี SU-D0 (ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9278) และ SU-D0 (ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9471) ดังแสดงในภาพประกอบ 74 ทั้งนี้หากต้องการรวมข้อมูลทั้ง 2 ชุดให้อยู่ในสมการเดียวกัน จำเป็นต้องใช้สมการชนิดอื่น เช่น สมการเอ็กโพเนนเชียล ดังแสดงในภาพประกอบ 74 กล่าวได้ว่าเมื่อระบบสามารถทำให้ความเข้มข้นไนเตรตระหว่างน้ำขาเข้าและออกต่างกันมาก (ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตสูง) จะส่งผลให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงไปด้วย สำหรับกลไกความเชื่อมโยงระหว่างการกำจัดไนเตรตกับกำลังไฟฟ้านั้น อธิบายได้ว่าการกำจัดไนเตรตในน้ำเกิดได้จากปฏิกิริยา Denitrification ตามปกติของจุลินทรีย์ในห้องแอโนดที่สภาวะ anoxic และปฏิกิริยา Denitrification ของจุลินทรีย์บางชนิด เช่น *Geobacter* ที่เกาะอยู่บนผิวขั้วแคโทด (Sun et al., 2016) ดังนั้น การกำจัดไนเตรตได้มาก อิเล็กตรอนถูกถ่ายเทออกจากขั้วแคโทดมาก ทำให้ MFC มีกำลังไฟฟ้ามากขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เป็นที่น่าสนใจว่า กรณีที่พิจารณาอัตราเร็วในการกำจัดไนเตรต พบว่ามีรูปแบบความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 75 โดย BF-MFC3 ซึ่งมีอัตราเร็วในการกำจัดไนเตรตสูงที่สุดกลับมีกำลังไฟฟ้าเป็นรอง BF-MFC2 ทั้งในกรณี SU-D0 และ กรณี SU-D1 จากผลดังกล่าวสันนิษฐานได้ว่า อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยากำจัดไนเตรตอาจจะรับอิทธิพลจากปัจจัยอื่น เช่น ความเร็วเกรเดียนท์ในถัง แรงเฉือนในถัง ฯลฯ ในขณะที่เปอร์เซ็นต์ของไนเตรตที่ถูกกำจัด (ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรต) บ่งบอกภาพรวมที่ใช้อธิบายกำลังไฟฟ้าได้ดีในงานวิจัยนี้



ภาพประกอบ 74 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตของ BF-MFC



ภาพประกอบ 75 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับอัตราเร็วในการกำจัดไนเตรตของ BF-MFC

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 การบำบัดน้ำเสียและค่าสัมประสิทธิ์จลพลศาสตร์ในการบำบัดน้ำเสียของ BF-MFC

BF-MFC ในงานวิจัยนี้สามารถบำบัดน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ได้โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีอยู่ในช่วง 64-71% ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีอยู่ในช่วง 46-59% ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดอยู่ในช่วง 57-58% ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด อยู่ใน ช่วง 40-70% ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรต อยู่ใน ช่วง 49-83% ประสิทธิภาพการกำจัดไนไตรท์ อยู่ใน ช่วง 26-59% ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตอยู่ในช่วง 46-75% มีข้อสังเกตว่า BF-MFC ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นถังที่มีอัตราการไหลสูงและ HRT ต่ำ สามารถบำบัดน้ำเสียดีกว่าถังที่มีอัตราการไหลต่ำและระยะเวลาพักเก็บสูงได้ในหลายพารามิเตอร์ (ฟอสเฟต ไนเตรต แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด ไนโตรเจนทั้งหมด ซีโอดี และไนไตรท์) ผลการทดลองพบว่าค่าอัตราการระบรทุกสารมลพิษเข้าระบบ BF-MFC มีผลต่ออัตราเร็วในการกำจัดสิ่งเจือปนดังกล่าวโดยมีความสัมพันธ์ทั้งในกรณีที่มีความเข้มข้นน้ำเสียสูง (SU-D0) และต่ำ (SU-D1) ตามแบบจำลองจลพลศาสตร์ Modified Stover-Kincannon โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.92-0.98 ยกเว้นกรณีของการกำจัด COD ที่มีเฉพาะกรณี SU-D0 และการกำจัดไนไตรท์ที่มีเฉพาะกรณี SU-D1 ที่เป็นไปตามแบบจำลองจลพลศาสตร์ Modified Stover-Kincannon

5.2 การผลิตไฟฟ้าของ BF-MFC

BF-MFC ในงานวิจัยนี้สามารถผลิตไฟฟ้าขณะบำบัดน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ได้โดยมีค่าความต่างศักย์วงจรปิดอยู่ในช่วง 0.15-0.18 V ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 1.08-16.07 mW/m² คิดเป็นค่าความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดระยะเวลา 8-20 วันอยู่ในช่วง 74-262 mWhr/m² มีข้อสังเกตว่า BF-MFC ผลิตไฟฟ้าได้ดีที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจนทั้งหมด 0.32 kg/m³-d ระยะเวลาพักเก็บ 4 hr (BF-MFC2) เทียบกับที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจนทั้งหมด 0.43 kg/m³-d และ 0.22 kg/m³-d ระยะเวลาพักเก็บ 3 hr และ 6 hr ซึ่งอัตราการระบรทุกไนโตรเจนในน้ำปัสสาวะสังเคราะห์ที่เหมาะสมในการผลิตไฟฟ้ากับการบำบัดน้ำไม่จำเป็นต้องเป็นค่าเดียวกันเสมอไป ซึ่งแนวโน้มของลำดับค่ากำลังไฟฟ้านี้ (BF-MFC2 > BF-MFC3 > BF-MFC1) สอดคล้องกับลำดับค่าความต้านทานภายในเซลล์จากการนำผลการทดลองโพลาริเซชันมา normalize แล้วพล็อตกราฟ นอกจากนี้พบว่า การกำจัดไนเตรตกับกำลังไฟฟ้ามีความเชื่อมโยงกัน โดยประสิทธิภาพการกำจัดไน

เตรตแปรผันตามกำลังไฟฟ้า เป็นไปได้ว่ากระบวนการกำจัดไนเตรตในส่วนที่เกิดจากปฏิกิริยา denitrification ของจุลินทรีย์บางชนิดที่เกาะอยู่บนผิวขั้วแคโทดนั้น มีนัยสำคัญมากพอที่จะส่งผลต่อกำลังไฟฟ้า

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาช่วงเริ่มต้นระบบในการเลี้ยงเชื้อให้นานกว่านี้ และช่วงเดินระบบบำบัดในระยะยาว เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย และการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มและดียิ่งขึ้น (เนื่องจากเหตุการณ์ COVID-19 ทำให้ยุติการเดินระบบ)
2. ศึกษาชนิดขั้วแอโนดและแคโทดเพื่อการผลิตค่าทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น
3. ควรทดสอบเพิ่มค่าความต้านทานภายนอกเพื่อให้ได้ค่าความต้านทานภายนอกที่เหมาะสมมาต่อกับระบบ
4. ควรติดตั้งอุปกรณ์ในการกวนผสมสารเคมีให้ละลายเข้ากัน เพื่อไม่ให้ระบบทางน้ำเข้าเกิดการอุดตันจากการตกตะกอนของสารเคมี (ฟอสเฟต) ในระหว่างการเดินระบบทำให้อัตรากาไรโหลมีความคลาดเคลื่อนตาม และต้องเสียเวลาในการปรับอัตราโหลใหม่



บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. (2560). คู่มือระบบบำบัดน้ำเสียในชุมชน. สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 25-42.
- กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2553). กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน. ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป, ตอนพิเศษ 127(69ง).
- เกรียงศักดิ์ อุทมนสินโรจน์. (2537). วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มิตรนราการพิมพ์.
- ชนิษฐา หมูโสภิญ. (2554). เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์: แนวทางใหม่เพื่อการผลิตพลังงาน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 1(13), 20-28.
- ชลธิศา สุขเกษม. (2554). เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ : เทคโนโลยีนวัตกรรม “แปลงน้ำเสียเป็นไฟฟ้า.” วิศวกรรมสาร มช., 3(38), 347-362.
- ทรงยศ มงคลพิศ และ เพชร เฟิงชัย. (2560). ค่าพารามิเตอร์ทางจลนของการกำจัดซีโอดีโดยถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้นที่ใช้จุลินทรีย์จาวปลวกเป็นหัวเชื้อ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์, 24(2), 54-65.
- ทวีทย์ จันทร์สดี. (2551). การเพิ่มกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ทวีทรัพย์ เจียรนัยขจร. (2545). การใช้ถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้นบำบัดน้ำเสียที่มีไนโตรเจนและความเค็มสูง. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และ คณะสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. (2530). น้ำเสียชุมชนและปัญหามลภาวะทางน้ำในเขต กทม. และปริมณฑล. สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.
- ธนรัฐ เข้มเพชร. (2558). การบำบัดน้ำปัสสาวะด้วยระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบ ห้องเดี่ยวโดยไม่ใช้เมมเบรน. วิทยานิพนธ์ วท.ม. เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ฉันทน์นัท ไชยอินปัน และ ณัฐวุฒิ เชื้อนแก้ว. (2553). การผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดย
กระบวนการเติบโตของพืชในสวนราก. *ปริญญาพนธ์ วศ.บ. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.*

พรพิมล ยิ้มห้อย. (2552). การเกาะตัวของเชื้ออณามือกซ์บนตัวกลางพลาสติกชนิดต่าง ๆ ในระบบกึ่ง
ต่อเนื่อง. *วิทยานิพนธ์ วศ.ม. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.*

มันสิน ตัณกุลเวศม์. (2542). การบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ. *โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.*

มันสิน ตัณกุลเวศม์. (2551). คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. *โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.*

เว็บไซต์: baanlaesuan.com. (2019). *baanlaesuan.com*.

<https://www.baanlaesuan.com/63179/maintenance/flush-water>

สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2540). คำกำหนดการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย. *สมาคม
วิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.*

สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์. (2557). ระบบบำบัดน้ำเสีย (Wastewater treatment system). *ท้อป.*

สุทธิพร วารีสุงเนิน. (2550). การผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียว
โดยไม่ใช้เมดิเอเตอร์. *วิทยานิพนธ์ วศ.ม. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.*

เสริมพล รัตสุข และ ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. (2524). การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่ง
ชุมชน. *สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.*

Abbas, G., Wang, L., Li, W., Zhang, M., & Zheng, P. (2015). Kinetics of nitrogen removal in
pilot-scale internal-loop airlift bio- particle reactor for simultaneous partial nitrifi
cation and anaerobic ammonia oxidation. *Ecological Engineering*, 74, 356–363.

Bruce E. Logan. (2008). *Microbial fuel cells*. Hoboken, N.J. : Wiley-Interscience.

Chontisa Sukkasem, Sunee Laehlah, Adilan Hniman, Sompong O'thong, Piyarat

Boonsawang, Athirat Rarnngarong, Mudtorlep Nisoa, Pansak Kirdtongmee. (2011).

Upflow bio-filter circuit (UBFC): Biocatalyst microbial fuel cell (MFC) configuration

and application to biodiesel wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 102(22), 10363–10370.

Choudhury P, Prasad Uday U, Bandyopadhyay T, Ray R, Bhunia B. (2017). Performance improvement of microbial fuel cell (MFC) using suitable electrode and Bioengineered organisms: A review. *Bioengineered*, 8(5), 1–17.

Chouler, J., Padgett, G. A., Cameron, P. J., Preuss, K., Titirici, M. M., Ieropoulos, I., & Di Lorenzo, M. (2016). Towards effective small scale microbial fuel cells for energy generation from urine. *Electrochimica Acta*, 192, 89–98.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.01.112>

Christiaens, M. E. R., Vrieze, J. De, Clinckemillie, L., & Ganigu, R. (2019). Anaerobic ureolysis of source-separated urine for NH₃ recovery enables direct removal of divalent ions at the toilet. *Water Research*, 148, 97–105.

Cid, C. A., Stinchcombe, A., Ieropoulos, I., & Ho, M. R. (2018). Urine microbial fuel cells in a semi-controlled environment for onsite urine pre-treatment and electricity production. *Journal of Power Sources*, 400(June), 441–448.

Drapcho C, Nghiem J, Walker T. (2008). Investigation of a Photosynthetically Aerated Cathode in a MFC. *Biofuels Engineering Process Technology*.

Ecke and Lagerkvist. (2000). Anaerobic treatment of prestiscible refuse (ATPR). In *Division of Waste Science and Technology*, 1–47.

Fei Zhang and Zhen He. (2015). Scaling up microbial desalination cell system with a post-aero-bic process for simultaneous wastewater treatment and seawater desalination. *Desalina-Tion*, 360, 28–34.

Gebremariam, S.Y., Beutel, M.W., Christian, D., Hess, T.F. (2011). Research advances and

challenges in the microbiology of enhanced biological Phosphorus removal: a critical review. *Water Environ*, 83(3), 195–219.

George Papaharalabos, John Greenman, Chris Melhuish, Ioannis Ieropoulos. (2015). A novel small scale Microbial Fuel Cell design for increased electricity generation and waste water treatment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(11), 4263–4268.

Grady, C.P.L., Daigger, G.T., and Lim, H.C. (1999). Biological wastewater treatment. *Marcel Dekker*.

GS Jadhav and MM Ghangrekar. (2009). Performance of microbial fuel cell subjected to variation in pH, temperature, external load and substrate concentration. *Bioresource Technology*, 100(2), 717–723.

Ieropoulos, I. A., Greenman, J., & Melhuish, C. (2013a). Miniature microbial fuel cells and stacks for urine utilisation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(1), 492–496.

Ioannis A. Ieropoulos, Pablo Ledezma, Andrew Stinchcombe, George Papaharalabos, Chris Melhuish and John Greenman. (2013b). Waste to real energy: the first MFC powered mobile phone. *Journal Physical Chemistry Chemical Physics*, 15(37).

Irene Keller. (2008). Annual Report. In *Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology*.

Isik M and Sponza D. (2005). Substrate removal kinetics in an up flow anaerobic sludge blanket reactor Decolorizing simulated textile wastewater. *Process Biochem*, 40(3–4), 1189–1198.

Jadhav, D. A., Jain, S. C., & Ghangrekar, M. M. (2016). Cow's urine as a yellow gold for

bioelectricity generation in lowcost clayware microbial fuel cell. *Energy*, 113, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.025>

Jeffrey R. McCutcheon and Menachem Elimelech (2006). Influence of concentrative and dilutive internal concentration polarization on flux behavior in forward osmosis. *Journal of Membrane Science*, 284(1–2), 237–247.

John Greenman and Ioannis A. Ieropoulos. (2017). Allometric scaling of microbial fuel cells and stacks: The lifeform case for scale-up. *Journal of Power Sources*, 356, 365–370.

John Greenman, Antonia Gálvez, Lorenzino Giusti, Ioannis Ieropoulos. (2009). Electricity from landfill leachate using microbial fuel cells: Comparison with a biological aerated filter. *Enzyme and Microbial Technology*, 44(2), 112–119.

Kamau JM, Mbui DN, Mwaniki JM, Mwaura FB, Kamau GN. (2017). Microbial Fuel Cells: Influence of External Resistors on Power, Current and Power Density. *Journal of Thermodynamics & Catalysis*, 8(1).

Kim, J. R., Min, B. and Logan, B. E. (2005). Evaluation of procedures to acclimate a microbial fuel cell for electricity production. *Appl Microbiol Biotechnol*, 68(1), 23–30.

Kuntke, P., Smiech, K. M., Bruning, H., Zeeman, G., Saakes, M., Sleutels, T. H. J. A., Buisman, C. J. N. (2012). Ammonium recovery and energy production from urine by a microbial fuel cell. *Water Research*, 46(8), 2627–2636.

Lawrence, A.W. and P.L. McCarty. (1969). Kinetic of Methane fermentation in anaerobic waste Treatment Fundamental. *Water Pollution Control Federation*, 41(2), 1–17.

M. Maurer, W. Pronk, T. A. Larsen. (2006). Treatment processes for source-separated

urine. *Water Research*, 40(17), 3151–3166.

McLean, R., Nickel, C., Cheng, K., Costerton, W. (1988). The Ecology and Pathogenicity of Urease-Producing Bacteria in the Urinary Tract. *CRC Critical Reviews in Microbiolog*, 16(1), 37–79.

Metcalf and Eddy. (1991). Wastewater engineering treatment disposal and reuse. *McGraw-Hill*.

Ming Xie, Long D. Nghiem, William E. Price, and Menachem Elimelech. (2013). A Forward Osmosis–Membrane Distillation Hybrid Process for Direct Sewer Mining: System Performance and Limitations. *Environmental Science & Technology*, 47(23), 13486–13493.

Ni, S. Q., & Meng, J. (2011). Performance and inhibition recovery of anammox reactors seeded with different types of sludge. *Water Science and Technology*, 63(4), 710–718.

Padilla-gasca, E., & López, A. L. (2010). Kinetics of Organic Matter Degradation in an Up-flow Anaerobic Filter Using Slaughterhouse Wastewater. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 1, 106.

Perry L. Mccarty. (2018). What is the Best Biological Process for Nitrogen Removal - When and Why? *Environmental Science and Technology*, 52(7), 3835–3841.

Qianliang Liu, Caihong Liu, Lei Zhao, Weichao Ma, Huiling Liu, Jun Ma. (2016). Integrated forward osmosis-membrane distillation process for human urine treatment. *Water Research*, 91, 45–54.

Rabaey, K. a. V., W. (2005). Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology*, 23(6), 291–298.

Rabaey, K., Lissens, G., Siciliano, S. D. and Verstraete, W. (2003). A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency.

Biotechnology Letters, 25, 1531–1535.

S.J. You, Q.L. Zhao, J.Q. Jiang, J.N. Zhang, S.Q. Zhao. (2006). Sustainable approach for leachate treatment: electricity generation in microbial fuel cell. *J. Environ. Sci.*

Health A., 41(12), 2721–2734.

SangEun Oh, Booki Min, and Bruce E. Logan. (2004). Cathode Performance as a Factor in Electricity Generation in Microbial Fuel Cells. *Environmental Science and*

Technology, 38(18), 4900–4904.

Santoro, C., Ieropoulos, I., Greenman, J., Cristiani, P., Vadas, T., Mackay, A., & Li, B.

(2013). Current generation in membraneless single chamber microbial fuel cells (MFCs) treating urine. *Journal of Power Sources*, 238, 190–196.

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.03.095>

Schmidt I, Sliekers O, Schmid M, Cirpus I, Strous M, Bock E, Kuenen J, Jetten M. (2002).

Aerobic and anaerobic ammonia oxidizing bacteria - competitor or natural partners? *FEMS Microbiology Ecology*, 39(3), 175–181.

Songyot Mongkulphit, Supawadee Siripratum, Warista Chumroen, and Petch Pengchai.

(2021). Roles of Packed Bed Porosity on Performance of Biofilter Microbial Fuel Cell in Synthetic Landfill Leachate Treatment. *GMSARN International Journal*, 15, 360–365.

Stefanos Giannakis , Barbara Androutaki, Christos Comninellis, Cesar Pulgarin. (2018).

Wastewater and urine treatment by UVC-based advanced oxidation processes:

Implications from the interactions of bacteria, viruses, and chemical contaminants.

Chemical Engineering Journal, 343, 270–282.

Stover E and Kincannon D. (1982). Rotating biological contactor scale-up and design.

Proceedings: Of the 1st International Conference on Fixed Film Biological Process, 2.

Sui Zhang, Peng Wang, Xiuzhu Fu, Tai-Shung Chung. (2014). Sustainable water recovery from oily wastewater via forward osmosis-membrane distillation (FO-MD). *Water Research*, 52, 112–121.

Sun, Y., Shen, D., Zhou, X., Shi, N., Tian, Y. (2016). Microbial diversity and community structure of denitrifying biological filters operated with different carbon sources. *SpringerPlus*, 5(1).

Sunny Aiyuk, Ilse Forrez, De Kempeneer Lieven, Adrianusvan Haandel, Willy Verstraete. (2006). Anaerobic and complementary treatment of domestic sewage in regions with hot climates—A review. *Bioresource Technology*, 97(17), 2225–2241.

Tanaka, Y., Fukumori, Y. and Yamanaka, T. (1983). Purification of cytochrome a₁c₁ from *Nitrobacter agilis* and characterization of nitrite oxidation system of the bacterium. *Archives of Microbiology*, 135(4), 265–271.

Walter, X. A., Merino-Jiménez, I., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2018). PEE POWER@urinal II - Urinal scale-up with microbial fuel cell scale-down for improved lighting. *Journal of Power Sources*, 392(May), 150–158.

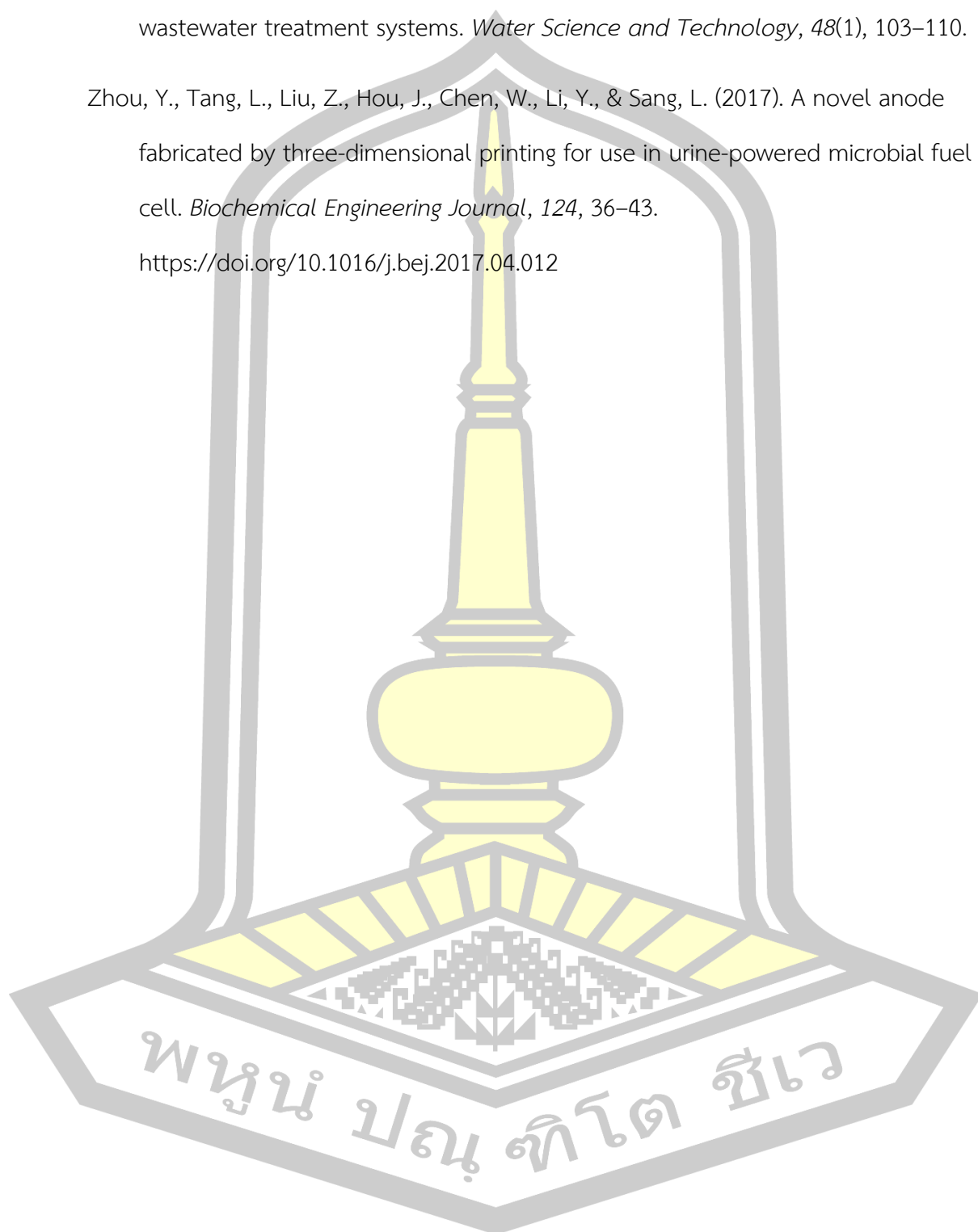
Walter, X. A., Stinchcombe, A., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2017). Urine transduction to usable energy: A modular MFC approach for smartphone and remote system charging. *Applied Energy*, 192, 575–581.

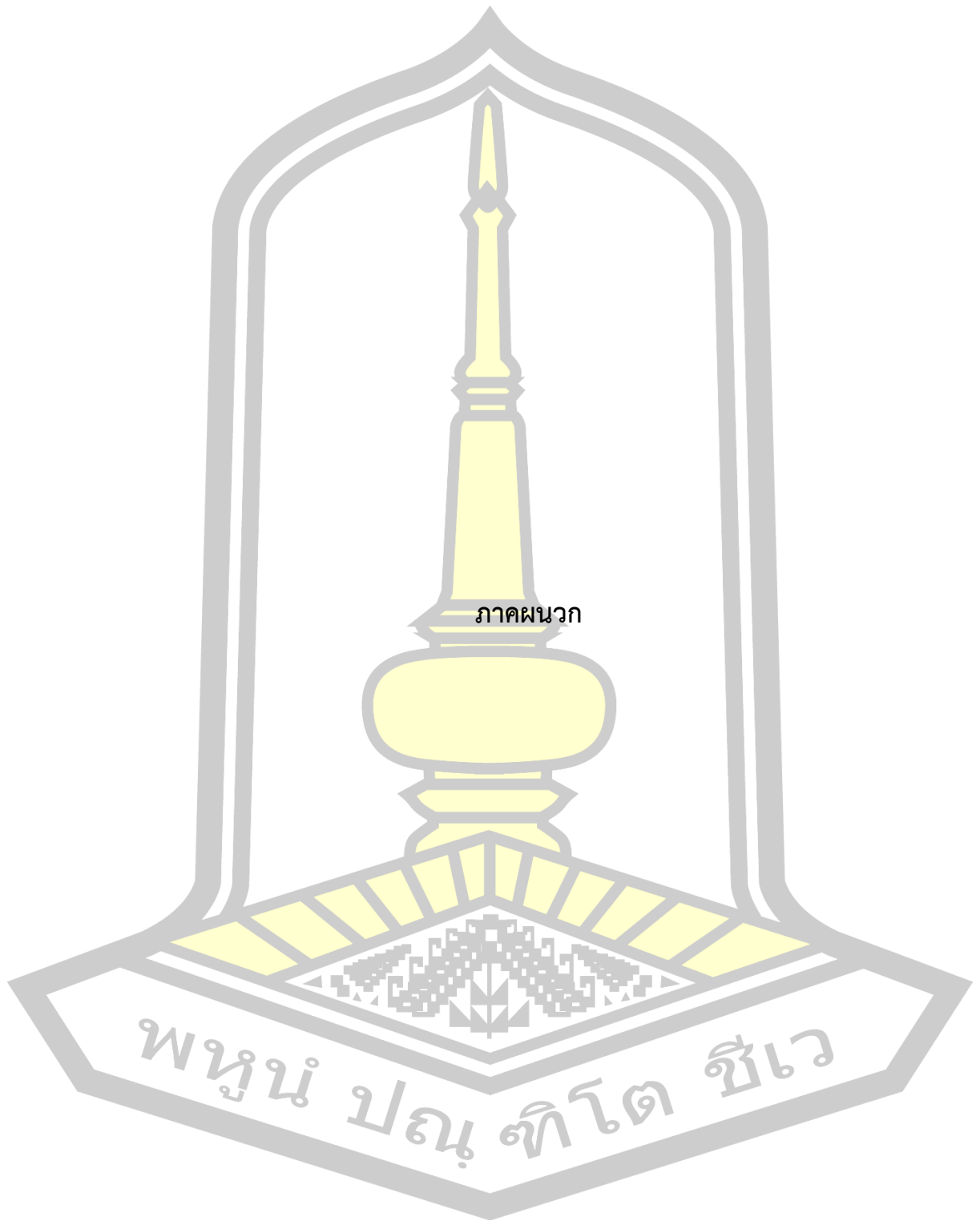
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.006>

Wilsenach, J., & van Loosdrecht, M. (2003). Impact of separate urine collection on wastewater treatment systems. *Water Science and Technology*, 48(1), 103–110.

Zhou, Y., Tang, L., Liu, Z., Hou, J., Chen, W., Li, Y., & Sang, L. (2017). A novel anode fabricated by three-dimensional printing for use in urine-powered microbial fuel cell. *Biochemical Engineering Journal*, 124, 36–43.

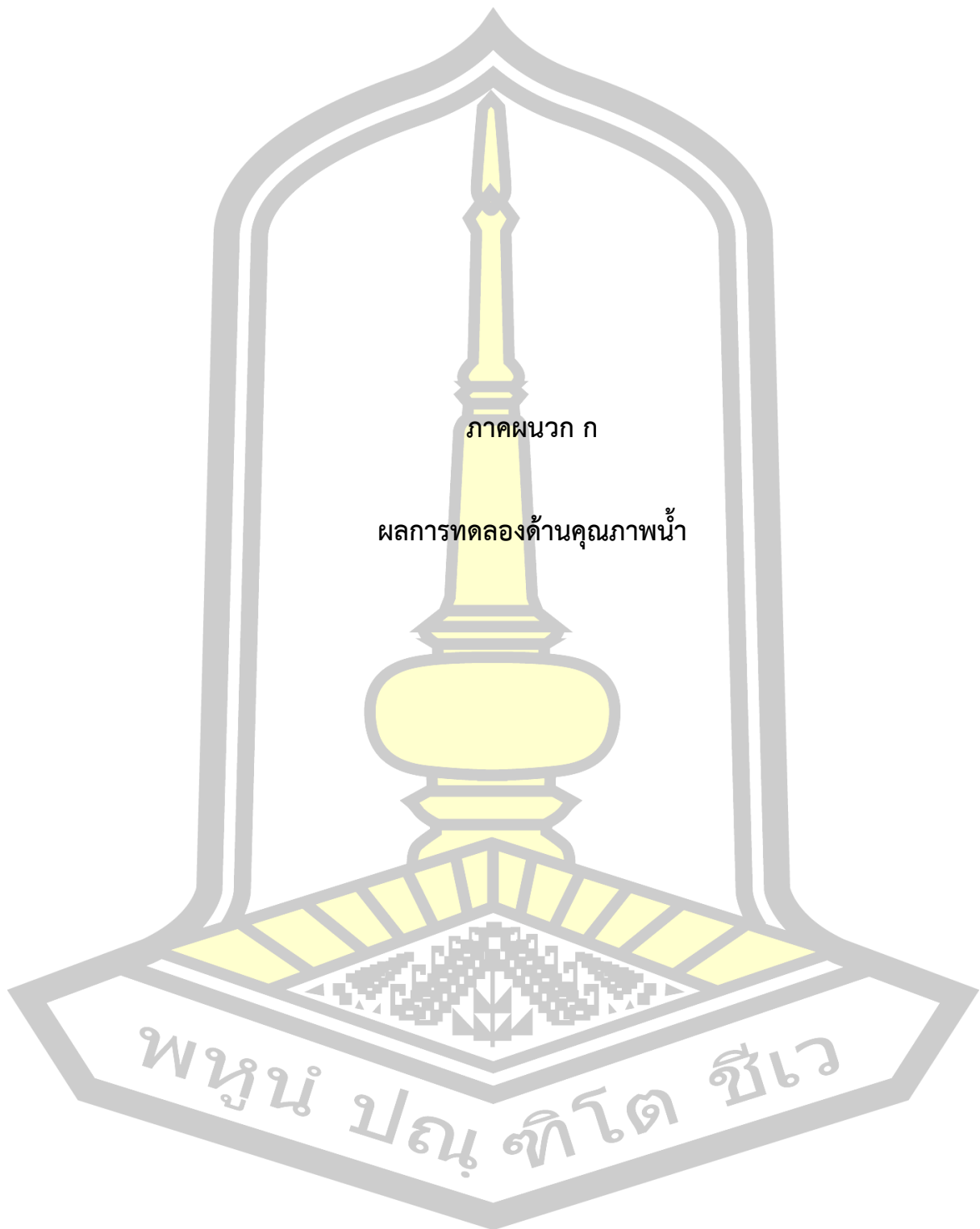
<https://doi.org/10.1016/j.bej.2017.04.012>





ภาคผนวก

พหุบัณฑิตยาลัย



ตาราง ก1 ค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ของ SU-D0

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	TN (mg/L)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
17/2/2563	0	64.49	50.05	57.37	27.34
20/2/2563	3	46.99	36.80	32.29	40.13
22/2/2563	5	50.51	41.01	22.66	30.52
27/2/2563	10	53.34	39.18	34.47	32.23

ตาราง ก2 ค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ของ SU-D0

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	TN (mg/L)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
2/3/2563	0	4.69	3.87	3.40	3.63
5/3/2563	3	14.17	11.17	12.04	10.71
7/3/2563	5	14.73	12.12	12.03	13.02
10/3/2563	8	13.08	10.26	7.81	6.97
12/3/2563	10	12.15	9.12	7.15	6.44
18/3/2563	16	13.90	8.34	9.45	7.67
20/3/2563	18	14.11	8.60	7.77	6.03

ตาราง ก3 ค่าแอมโมเนีย (NH_3) ของ SU-D0

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	NH_3 (mg/L)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
17/2/2563	0	24	18	17	16
20/2/2563	3	24	19	14	21
22/2/2563	5	33	26	31	31
25/2/2563	8	38	23	33	35
27/2/2563	10	38	28	32	33

ตาราง ก4 ค่าแอมโมเนีย (NH_3) ของ SU-D1

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	NH_3 (mg/L)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
2/3/2563	0	1.44	0.70	0.71	0.62
5/3/2563	3	1.41	0.76	1.01	0.45
7/3/2563	5	1.64	0.59	0.81	1.51
10/3/2563	8	1.90	0.57	1.07	0.58
12/3/2563	10	1.76	1.15	0.79	0.73
18/3/2563	16	2.17	0.79	0.77	0.91
20/3/2563	18	2.41	1.11	0.91	0.81

ตาราง ก5 ค่าไนไตรท์ (NO_2^-) ของ SU-D0

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	NO_2^- (mg/L)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
17/2/2563	0	3.14	2.65	2.59	3.07
20/2/2563	3	3.14	2.47	2.69	2.56
22/2/2563	5	3.12	2.98	1.29	1.63
25/2/2563	8	5.67	3.59	2.45	2.95
27/2/2563	10	5.73	5.54	3.76	4.41

ตาราง ก6 ค่าไนไตรท์ (NO_2^-) ของ SU-D1

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	NO_2^- (mg/L)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
2/3/2563	0	6.24	5.18	4.37	4.62
5/3/2563	3	7.71	6.56	6.78	6.65
7/3/2563	5	8.27	7.83	7.65	7.42
10/3/2563	8	5.88	5.05	5.30	5.42
12/3/2563	10	5.66	5.59	5.36	4.42
18/3/2563	16	5.15	4.37	4.43	4.36
20/3/2563	18	5.46	4.09	4.07	4.03

ตาราง ก7 ค่าไนเตรต (NO_3^-) ของ SU-D0

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	NO_3^- (mg/L)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
17/2/2563	0	1.79	1.26	1.00	1.28
20/2/2563	3	1.94	1.32	1.09	1.10
22/2/2563	5	2.20	1.61	1.17	1.50
25/2/2563	8	2.00	1.33	1.14	1.21
27/2/2563	10	1.90	1.21	0.97	1.09

ตาราง ก8 ค่าไนเตรต (NO_3^-) ของ SU-D1

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	NO_3^- (mg/L)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
2/3/2563	0	1.03	0.90	0.88	0.70
5/3/2563	3	1.13	0.56	0.38	0.75
7/3/2563	5	1.88	0.56	0.33	0.74
10/3/2563	8	0.48	0.31	0.44	0.39
12/3/2563	10	0.21	0.15	0.10	0.16
18/3/2563	16	1.58	1.41	1.40	1.41
20/3/2563	18	1.88	1.69	1.64	1.47

ตาราง ก9 ค่าฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ของ SU-D0

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	PO_4^{3-} (mg/L)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
17/2/2563	0	540	467	391	468
20/2/2563	3	290	72	71	89
22/2/2563	5	142	110	90	90
25/2/2563	8	359	307	322	324
27/2/2563	10	528	366	367	373

ตาราง ก10 ค่าฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ของ SU-D1

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	PO_4^{3-} (mg/l)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
2/3/2563	0	28	24	17	15
5/3/2563	3	29	19	18	18
7/3/2563	5	24	15	14	15
10/3/2563	8	26	24	21	19
12/3/2563	10	30	25	21	20
18/3/2563	16	32	17	19	28
20/3/2563	18	24	15	19	16

ตาราง ก11 ค่า COD ของ SU-D0

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	COD (mg/l)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
17/2/2563	0	3,200	2,000	2,000	2,000
20/2/2563	3	3,097	2,710	2,323	1,935
22/2/2563	5	3,097	2,903	2,516	1,548
25/2/2563	8	3,000	1,600	1,400	2,000
27/2/2563	10	3,000	1,286	1,500	1,071

ตาราง ก12 ค่า COD ของ SU-D1

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	COD (mg/l)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
2/3/2563	0	1,424	1,627	1,220	814
5/3/2563	3	1,424	1,831	1,220	407
7/3/2563	5	1,574	2,361	1,180	1,377
10/3/2563	8	1,424	1,627	1,220	814
12/3/2563	10	1,424	1,831	1,220	407
18/3/2563	16	1,862	1,655	1,448	1,241
20/3/2563	18	1,862	1,448	828	1,034

ตาราง ก13 ค่า BOD ของ SU-D0

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	BOD (mg/l)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
17/2/2563	0	872	470	515	542
27/2/2563	10	942	755	933	612

ตาราง ก14 ค่า BOD ของ SU-D1

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	BOD (mg/l)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
2/2/2563	0	634	391	293	393
7/2/2563	5	996	409	926	851

ตาราง ก15 ค่า ORP ของ SU-D0

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	ORP (mV)					
		BF-MFC 1		BF-MFC 2		BF-MFC 3	
		anode	cathode	anode	cathode	anode	cathode
17/2/2563	0	-3	59	-5	35	-45	23
20/2/2563	3	-54	-8	-43	-13	-49	-20
22/2/2563	5	-11	14	-3	7	-11	19
25/2/2563	8	-18	4	-30	-7	-16	-9
27/2/2563	10	21	1	1	-14	-2	-11

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตาราง ก16 ค่า ORP ของ SU-D1

วัน/เดือน/ปี	วันเดือนระบบ	ORP (mV)					
		BF-MFC 1		BF-MFC 2		BF-MFC 3	
		anode	cathode	anode	cathode	anode	cathode
2/3/2563	0	-72	-107	-84	-47	-29	-4
5/3/2563	3	-20	-10	-28	-3	-21	-8
7/3/2563	5	-17	-7	-47	-9	-35	9
10/3/2563	8	-42	-56	-67	-23	-54	-7
12/3/2563	10	-64	-82	-84	-49	-73	-3
18/3/2563	16	-57	-44	-128	-87	-85	-21
20/3/2563	18	-30	-23	-72	-80	-54	-38

ตาราง ก17 ค่า pH ของ SU-D0

วัน/เดือน/ปี	วันเดือนระบบ	pH			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
17/2/2563	0	6.91	8.72	8.73	8.86
20/2/2563	3	6.09	8.65	8.62	8.61
22/2/2563	5	6.07	8.6	8.54	8.56
25/2/2563	8	8.34	8.48	8.51	8.54
27/2/2563	10	8.57	8.56	8.55	8.58

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

ตาราง ก18 ค่า pH ของ SU-D1

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	pH			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
2/3/2563	0	7.54	8.46	8.43	8.42
5/3/2563	3	8.46	8.55	8.54	8.54
7/3/2563	5	8.30	8.70	8.67	8.66
10/3/2563	8	8.53	8.37	8.45	8.47
12/3/2563	10	8.43	8.43	8.36	8.35
18/3/2663	16	8.50	8.48	8.44	8.47

ตาราง ก19 ค่า DO ของ SU-D0

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	DO (mg/l)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
17/2/2563	0	5.43	2.09	0.35	0.42
20/2/2563	3	1.73	0.14	0.28	0.31
22/2/2563	5	0.23	0.13	0.09	0.14
25/2/2563	8	0.59	0.37	0.29	0.23
27/2/2563	10	1.12	0.84	1.21	3.61



ตาราง ก20 ค่า DO ของ SU-D1

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	DO (mg/l)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
2/3/2563	0	3.21	0.20	0.22	0.24
5/3/2563	3	0.85	0.74	0.70	0.96
7/3/2563	5	1.35	0.58	2.31	3.92
10/3/2563	8	0.54	0.55	0.46	0.43
12/3/2563	10	0.14	0.09	0.08	0.07
18/3/2663	16	0.24	0.22	0.21	0.23

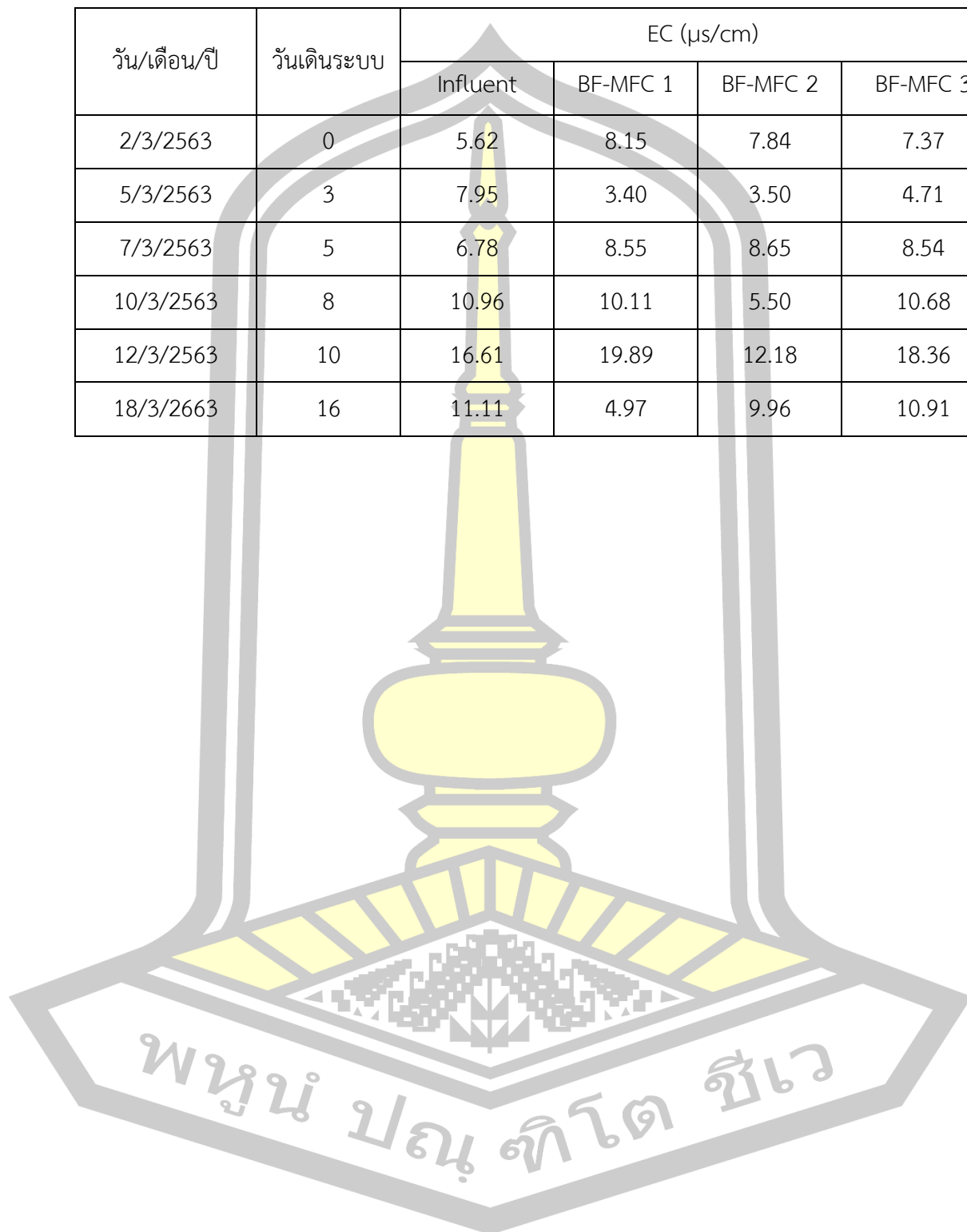
ตาราง ก21 ค่า EC ของ SU-D0

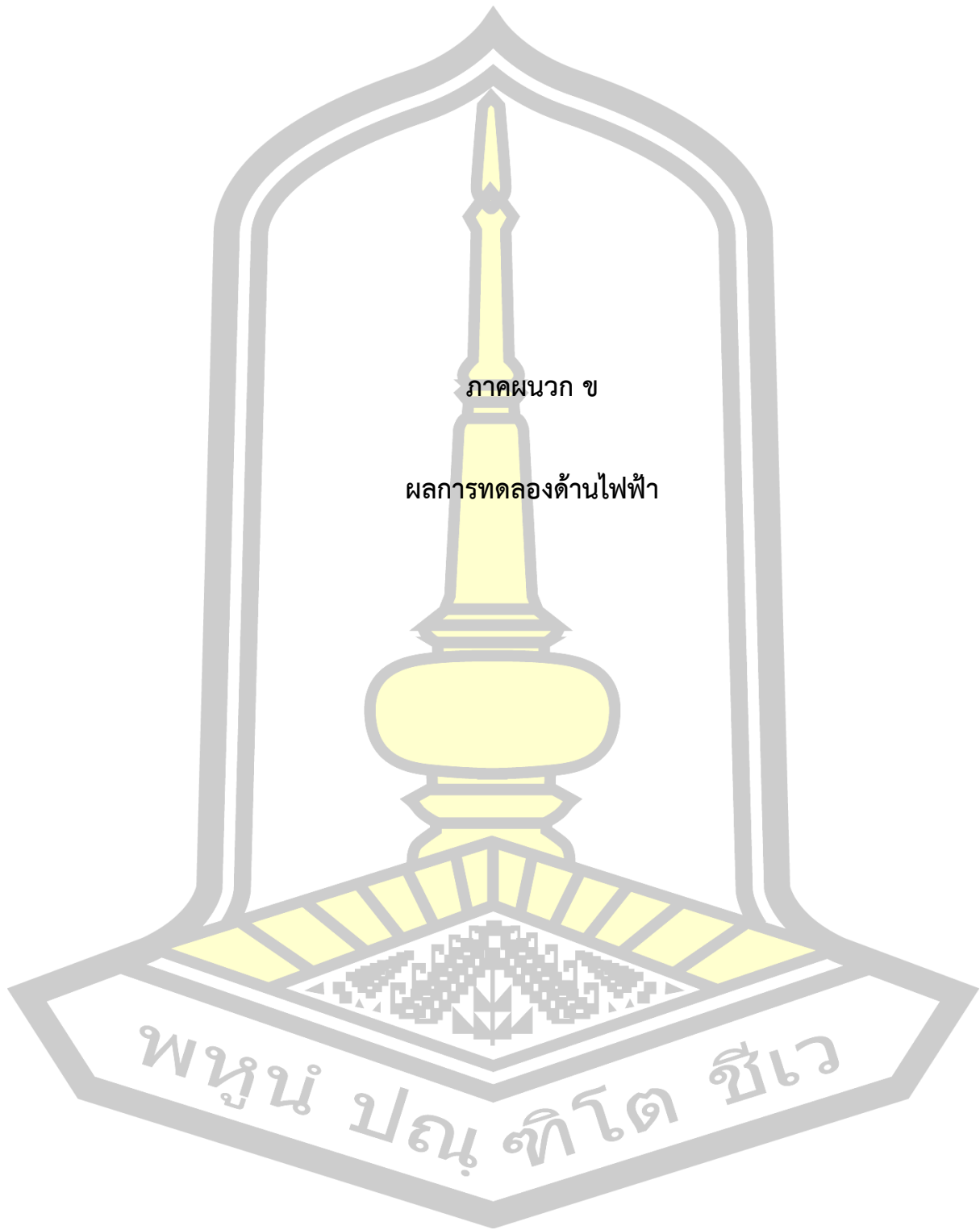
วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
17/2/2563	0	2.32	32.3	28.9	12.79
20/2/2563	3	2.13	3.72	9.36	8.12
22/2/2563	5	2.45	10.4	7.57	3.47
25/2/2563	8	3.77	3.86	3.84	4.43
27/2/2563	10	12.18	14.44	14.75	14.91



ตาราง ก22 ค่า EC ของ SU-D1

วัน/เดือน/ปี	วันเดินระบบ	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)			
		Influent	BF-MFC 1	BF-MFC 2	BF-MFC 3
2/3/2563	0	5.62	8.15	7.84	7.37
5/3/2563	3	7.95	3.40	3.50	4.71
7/3/2563	5	6.78	8.55	8.65	8.54
10/3/2563	8	10.96	10.11	5.50	10.68
12/3/2563	10	16.61	19.89	12.18	18.36
18/3/2663	16	11.11	4.97	9.96	10.91





ภาคผนวก ข

ผลการทดลองด้านไฟฟ้า

พหุบัน ปณฺ ทิโต ชีเว

ตาราง ข1 ค่า Polarization ของ SU-D0

SU-D0 BF-MFC1			
R (Ω)	V	P (μ W)	mA
10000	0.015551720	0.024186	0.0016
10000	0.008099557	0.006560	0.0008
10000	0.005753228	0.003310	0.0006
10000	0.005762658	0.003321	0.0006
10000	0.004888968	0.002392	0.0005
10000	0.023546750	0.055445	0.0024
10000	0.039621592	0.156987	0.0040
10000	0.041402156	0.171414	0.0041
10000	0.042071796	0.177004	0.0042
10000	0.040304771	0.162447	0.0040
SU-D0 BF-MFC2			
R (Ω)	V	P (μ W)	mA
10000	0.184866	3.417529	0.0185
10000	0.13389	1.792655	0.0134
10000	0.111386	1.240684	0.0111
10000	0.095684	0.915534	0.0096
10000	0.082932	0.687765	0.0083
10000	0.052987	0.280759	0.0053
10000	0.04697	0.220621	0.0047
10000	0.051674	0.267025	0.0052
10000	0.050111	0.251115	0.0050
10000	0.044967	0.202205	0.0045

ตาราง ข1 ค่า Polarization ของ SU-D0 (ต่อ)

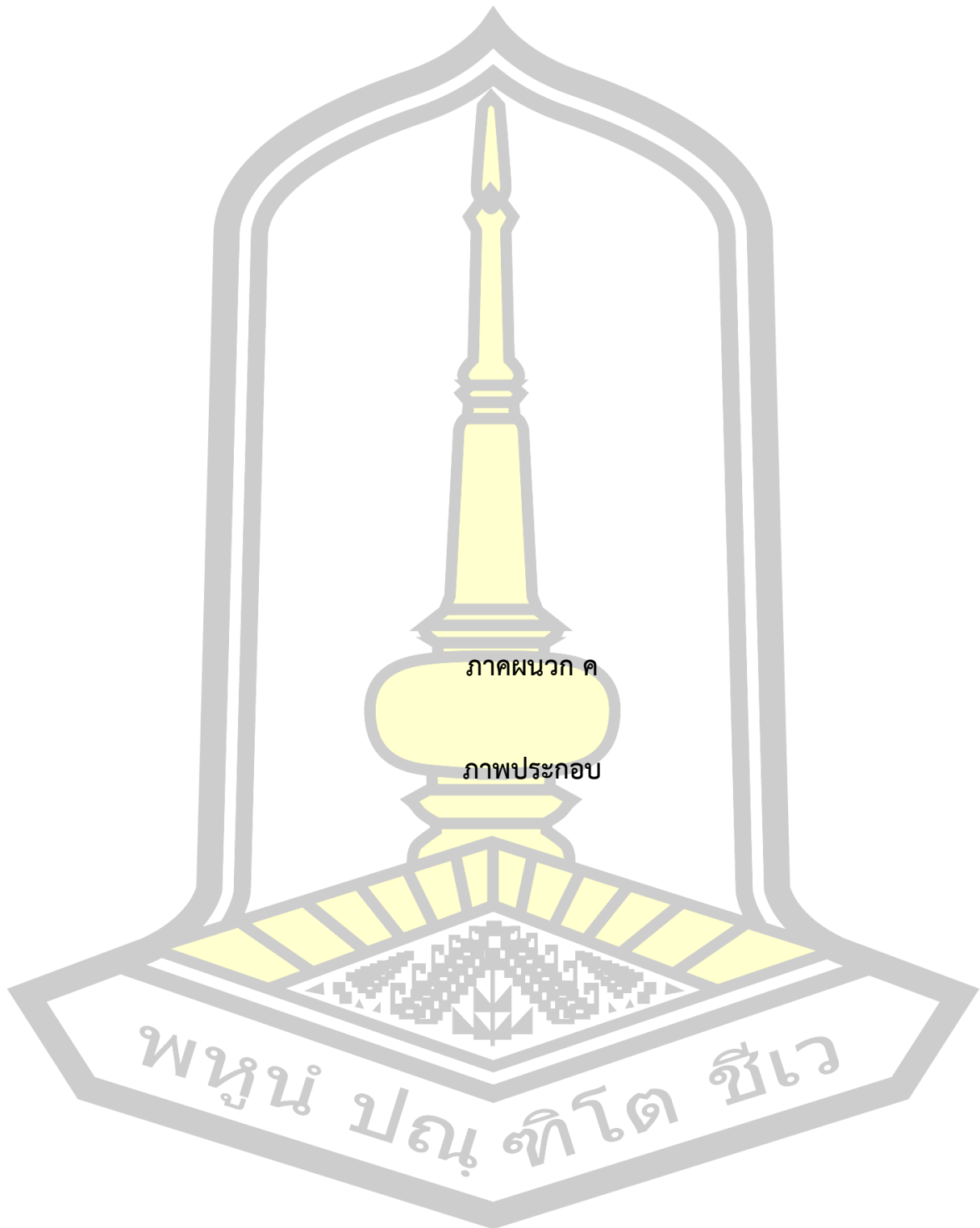
SU-D0 BF-MFC3			
R (Ω)	V	P (μ W)	mA
10000	0.079948	0.639169	0.0080
10000	0.043795	0.191797	0.0044
10000	0.01701	0.028936	0.0017
10000	0.018886	0.035666	0.0019
10000	0.062781	0.394151	0.0063
10000	0.002254	0.00191	0.0002
10000	0.00481	0.002314	0.0005
10000	0.006055	0.003667	0.0006
10000	0.00703	0.004943	0.0007
10000	0.006688	0.004473	0.0007

ตาราง ข2 ค่า Polarization ของ SU-D1

SU-D1 BF-MFC1			
R (Ω)	V	P (μ W)	mA
10000	0.030288596	0.091739907	0.0030
10000	0.025506447	0.065057885	0.0026
10000	0.016724957	0.027972419	0.0017
10000	0.016277206	0.026494745	0.0016
10000	0.02915215	0.084984787	0.0029
10000	0.019360075	0.03748125	0.0019
10000	0.018642807	0.034755424	0.0019
10000	0.016161463	0.026119287	0.0016
10000	0.016451123	0.027063945	0.0016
10000	0.014523758	0.021093954	0.0015

ตาราง ข2 ค่า Polarization ของ SU-D1 (ต่อ)

SU-D1 BF-MFC2			
R (Ω)	V	P (μ W)	mA
10000	0.112169	1.258195	0.0112
10000	0.104295	1.087741	0.0104
10000	0.055598	0.309118	0.0056
10000	0.053244	0.283495	0.0053
10000	0.056952	0.32435	0.0057
10000	0.040577	0.164653	0.0041
10000	0.053601	0.287308	0.0054
10000	0.046272	0.214113	0.0046
10000	0.058516	0.342418	0.0059
10000	0.073504	0.540285	0.0074
SU-D1 BF-MFC3			
R (Ω)	V	P (μ W)	mA
10000	0.057684	0.332742	0.0058
10000	0.054926	0.301684	0.0055
10000	0.023074	0.053239	0.0023
10000	0.044744	0.200202	0.0045
10000	0.028631	0.081973	0.0029
10000	0.022324	0.049837	0.0022
10000	0.021084	0.044454	0.0021
10000	0.019281	0.037175	0.0019
10000	0.021888	0.04791	0.0022
10000	0.023193	0.05379	0.0023





ภาพประกอบ ค1 เก็บปัสสาวะจากห้องน้ำชาย



ภาพประกอบ ค2 เตรียมหัวเชื้อ

พหุบัน ปณ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ ค3 เพาะเลี้ยงเชื้อให้เกาะกับวัสดุกรอง



ภาพประกอบ ค4 เก็บน้ำตัวอย่างทำการวัดค่าต่างๆ

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์ ชีวะ



ภาพประกอบ ค 5 สารเคมีที่ใช้ทำน้ำปัสสาวะสังเคราะห์



ภาพประกอบ ข 6 เตรียมทำน้ำปัสสาวะสังเคราะห์

พหุบัน ปณุ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ ค7 วัดอัตราการไหล



ภาพประกอบ ข 8 เตินระบบบำบัดน้ำปัสสาวะสังเคราะห์



ภาพประกอบ ข 9 วัดพารามิเตอร์ต่างๆ



ภาพประกอบ ข 10 ทำ Polarization

พหุบัน ปณุ ทักโต ชิว

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาววิรัชญา จำเริญ
วันเกิด วันที่ 26 ตุลาคม พ.ศ. 2537
สถานที่เกิด อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 58/1 ถนนเทศบาล 17 ตำบลวารินชำราบ อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี รหัสไปรษณีย์ 34190
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2555 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนกาญจนาภิเษกวิทยาลัยชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ
พ.ศ. 2559 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
พ.ศ. 2564 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนุ่ ปณุ่ ทิโต ชีเว