



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ภาควิชา

เรื่อง การผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

Production of Electricity from Wastewater Using Microbial Fuel Cell

نامผู้วิจัย นายณัฐสิริ แสงธรรมธร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นฤมล วงศ์นาสุนทร, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล คำรงค์ศรี, Dr.Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

Production of Electricity from Wastewater Using Microbial Fuel Cell

โดย

นายณัฐศิริ แสงธรรมธร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2552

ณัฐสิริ แสงธรรมธร 2552: การผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ปริญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วังศันนาสุนทร, D.Eng.
92 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสีย 3 ชนิดในการทดลอง คือ น้ำเสียสังเคราะห์ น้ำกากส่า
และน้ำเสียโรงอาหาร โดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่ ในการทดลองได้ทำการแปรผันความเข้มข้นค่าบี
โอดีของน้ำเสียเริ่มต้น คือ 125, 250, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้น
เท่ากับ 7 อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าเครื่องเซลล์แอโนดตลอดการทดลองเท่ากับ 0.35 มิลลิตรต่อนาที ส่วนน้ำที่
อิมตัวด้วยออกซิเจนถูกป้อนเข้าเครื่องเซลล์แคโทดที่อัตราการไหล 5 มิลลิตรต่อนาที ความต้านทานใน
วงจรไฟฟ้ากำหนดคงที่เท่ากับ 10 โอห์ม ผลการทดลองพบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าผลิตได้สูงที่สุด จากน้ำเสีย
สังเคราะห์ รองลงมาคือน้ำกากส่า และน้ำเสียโรงอาหาร ที่ความเข้มข้นของบีโอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย
ค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้เท่ากับ 0.92, 0.78 และ 0.70 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้
แปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นบีโอดีของน้ำเสียเริ่มต้นที่ป้อนเข้าสู่เครื่องเซลล์แอโนดสำหรับน้ำเสียทั้ง 3 ชนิด
สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดค่าบีโอดีและซีโอดีในน้ำเสียแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน โดยน้ำเสีย
สังเคราะห์มีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีสูงที่สุด คือประมาณ 76 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ น้ำเสียโรงอาหาร
และน้ำกากส่า เท่ากับ 67 และ 63 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในส่วนของการกำจัดซีโอดี น้ำเสียสังเคราะห์มี
เปอร์เซ็นต์การกำจัดสูงที่สุด รองลงมาคือ น้ำเสียโรงอาหาร และน้ำกากส่า ได้ค่าเท่ากับ 76, 50 และ 30
เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปตามลำดับ เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้ 0.145 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

Natsiri Sangthammathorn 2009: Production of Electricity from Wastewater Using Microbial Fuel Cell. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Narumol Vongthanasunthorn, D.Eng. 92 pages.

The study investigated the electrical current generation from 3 types of wastewaters including synthetic, distillery and canteen wastewater, using double chamber microbial fuel cells (MFCs). The biochemical oxygen demand (BOD) concentrations of influent were varied as 125, 250, 400, 600, 800 and 1000 mg L⁻¹. pH of influent was fixed at 7. The wastewater was fed into a half-cell anode chamber with fixed flow rate of 0.35 mL min⁻¹, while the oxygen-saturated distilled water was fed into a half-cell cathodic chamber with a fixed flow rate of 5 mL min⁻¹. The circuit resistance was fixed at 10 ohms. The results showed that maximum current output obtained from the synthetic wastewater, distillery wastewater and canteen wastewater of King Mongkut' University of Technology North Bangkok with the BOD concentration of 1000 mg L⁻¹ were 0.92 0.78 and 0.7 mA, respectively. The produced electrical currents were directly proportional to the BOD concentrations in the influent for all types of wastewater, whereas BOD and COD removal efficiencies were dependent on the types of wastewater. The BOD removal efficiencies of synthetic, canteen and distillery wastewaters were 76, 67 and 63%, respectively, while removal efficiencies of synthetic, canteen and distillery wastewaters were 76, 50 and 30%, respectively. In this study, MFCs can produce the electrical energy of 0.145 kW – hr.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤมล วงศ์นาสุนทร ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย และเสียสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ภัทราภรณ์ สุวรรณวิทยา ประธานการสอบ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะอันมีประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้วิจัย อีกทั้งได้กรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ผู้วิจัยขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโททุกท่าน และเพื่อนร่วมรุ่นปริญญาโทเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในการวิจัยครั้งนี้

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่สาว และน้องชายผู้ซึ่งสร้างครอบครัวที่อบอุ่น ผู้เป็นความรักและกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ให้แก่ข้าพเจ้า โดยเฉพาะคุณพ่อและคุณแม่ผู้ซึ่งเป็นแรงบันดาลใจให้การสนับสนุนข้าพเจ้าเสมอมา

ณัฐสิริ แสงธรรมธร

มีนาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	39
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	42
สรุปและข้อเสนอแนะ	62
สรุป	62
ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	64
ภาคผนวก	70
ภาคผนวก ก น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง	71
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ซีไอดี	73
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์บีไอดี	77
ภาคผนวก ง ตารางบันทึกผลการทดลอง	82
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	92

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ธาตุอาหารเสริมที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน	7
2	ข้อแตกต่างของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียวและห้องคู่	11
3	ค่า power output ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์โดยไม่ใช้สารตัวกลาง (Mediator-less microbial fuel cell)	27
4	การเลือกขนาดตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วงบีโอดีต่างๆ	37
5	ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดยใช้น้ำเสียชนิดต่างๆ	49
6	อัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดีของน้ำเสียเข้าและออกจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพในช่วงความเข้มข้นบีโอดีต่างๆ	53
7	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การกำจัดบีโอดีและซีโอดีของน้ำเสีย	54
8	พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากน้ำเสียชนิดต่างๆผ่านเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ	60

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน	5
2 รูปแบบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ชนิดสองถังและถังเดียว (two chamber และ single chamber)	10
3 การเปรียบเทียบผลกระทบของเมมเบรนที่มีต่อความหนาแน่นกำลัง และ ประสิทธิภาพคลูลอมบิก	10
4 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบต่อเนื่อง (continuous Upflow MFC)	12
5 การเปรียบเทียบลักษณะของแกรไฟต์ทั้ง 3 แบบที่มีผลต่อกำลัง (Power output)	13
6 ผลกระทบของวัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรดที่มีผลต่อความต่างศักย์	14
7 ตัวอย่างของการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน และความหนาแน่นของกำลัง (Power density)	15
8 ตัวอย่างกระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolism) ก) Aerobic Heterotrophic ข) Aerobic Autotrophic ค) Anaerobic Heterotrophic	16
9 การทำงานของสารตัวกลางในการขนส่งอิเล็กตรอน	24
10 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์	25
11 การทำงานของแบคทีเรีย <i>R. ferrireducens</i> ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์	26
12 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่	29
13 ถังป้อนน้ำเสีย	30
14 ถังบรรจุแก๊สไนโตรเจน	30
15 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (incubator)	31
16 เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (Multi meter)	31
17 peristaltic pump	32
18 น้ำเสียสังเคราะห์	33
19 น้ำกากส่า	33
20 น้ำเสียโรงอาหาร	34
21 ตะกอนจุลินทรีย์	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	การเดินระบบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ	35
23	แผนภูมิการทดลอง	39
24	แนวโน้มกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร	43
25	ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ	44
26	แนวโน้มกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากน้ำกากส่าที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ	45
27	ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากน้ำกากส่าที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ	45
28	แนวโน้มกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียโรงอาหารที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ	46
29	ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียโรงอาหารที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ	47
30	การเปรียบเทียบระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากน้ำเสียสังเคราะห์, น้ำกากส่า และ น้ำเสียโรงอาหาร	49
31	ค่าพีเอชที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1000 ตามลำดับ	50
32	แนวโน้มกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากน้ำกากส่าที่ไม่ได้ผสมบัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ	51
33	ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากน้ำกากส่าที่ไม่ได้ผสมบัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ	52
34	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดบีโอดีของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์, น้ำกากส่า และน้ำเสียโรงอาหารที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
35	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดชีโอดีของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์, น้ำกากส่า และน้ำเสียโรงอาหารที่ความเข้มข้น 125, 250, 400, 600, 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ	56
36	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกำจัดบีโอดีและชีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์	57
37	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกำจัดบีโอดีและชีโอดีของน้ำเสียโรงอาหาร	58
38	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกำจัดบีโอดี และชีโอดีของน้ำกากส่า	59

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ATP	=	Adenosine Tri Phosphate
BOD	=	บีโอดี
COD	=	ซีโอดี
PEM	=	Permeable Proton Exchange Membrane
EAB	=	Electrochemically-active bacteria
PFR	=	Plug Flow Reactor
CSTR	=	Continuous-flow Stirred-tank Reactor
UASB	=	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
KHP	=	โปแตสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต

การผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

Production of Electricity from Wastewater using Microbial Fuel Cell

คำนำ

ปัจจุบันปัญหาราคาเชื้อเพลิงที่นำเข้าจากต่างประเทศ เช่น ถ่านหิน ปิโตรเลียม และแก๊สธรรมชาติได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การขยับตัวของราคาเชื้อเพลิงเหล่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อเศรษฐกิจโดยตรงต่อประเทศที่ต้องพึ่งพาแหล่งเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ นอกจากนี้แหล่งเชื้อเพลิงดังกล่าวยังเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป และมีผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเหล่านี้ปลดปล่อยแก๊สมลพิษที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจก ซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สที่มีความเป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจและผิวหนังของมนุษย์ จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงก่อให้เกิดแนวคิดในการหาแหล่งเชื้อเพลิงที่เป็นแหล่งพลังงานแบบยั่งยืนเพื่อทดแทนแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปซึ่งแหล่งพลังงานทดแทนใหม่นั้นจะต้องเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วไม่หมดไปและไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจาก น้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรมและภาคการเกษตรที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงจะมีพลังงานสะสมอยู่ในรูปของพลังงานพันธะเคมีซึ่งพลังงานนี้สามารถสกัดออกมาใช้ในรูปกระแสไฟฟ้า (อิเล็กตรอน) โดยจุลินทรีย์ชนิดเฉพาะ การผลิตกระแสไฟฟ้าวิธีนี้มีข้อดี เนื่องจากแหล่งวัตถุดิบคือน้ำเสียเป็นวัตถุดิบที่ปราศจากต้นทุน และการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียนอกจากจะให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือกระแสไฟฟ้าซึ่งนำมาใช้ประโยชน์ได้แล้วยังเป็นการบำบัดน้ำเสียไปพร้อมกัน ในปัจจุบันการค้นคว้าและวิจัยเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย แต่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้ก็ยังมีปริมาณน้อย ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพให้มีความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากสารอินทรีย์ในน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น และออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพให้เป็นต้นแบบสำหรับใช้ในประเทศต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้า จากน้ำเสียชนิดต่างๆ ภายใต้สภาวะการแปรผันค่าความเข้มข้นของน้ำเสีย
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีของสารอินทรีย์ในน้ำเสียสังเคราะห์ให้เป็นกระแสไฟฟ้า
3. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดยใช้น้ำเสียชนิดต่างๆเป็นแหล่งอาหาร ในสภาวะการทดลองที่กำหนดขึ้น
4. เพื่อศึกษาแนวโน้มความเป็นไปได้ในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงในการเป็นเครื่องมือตรวจวัดความสกปรกในแหล่งน้ำ

การตรวจเอกสาร

1. การบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยวิธีชีวภาพ แบ่งออกเป็น 2 วิธี หลักๆ (กิตติ, 2538) คือ

1.1 การบำบัดแบบใช้อากาศ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศเป็นวิธีบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีววิทยา โดยใช้แบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) เป็นตัวหลักในการย่อยสลายจุลินทรีย์ เช่น ระบบแอกทิเวเต็ด สลัดจ์ เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย สามารถบำบัดได้ทั้งน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม แต่การเดินระบบประเภทนี้มีความยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจากจำเป็นจะต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อม และลักษณะทางกายภาพต่างๆ ให้เหมาะสมแก่การทำงานและการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.2 การบำบัดแบบไร้อากาศ

1.2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ มีลักษณะเฉพาะคือเป็นระบบที่ก่อให้เกิดแก๊สมีเทนจากผลสุดท้ายของปฏิกิริยาแก๊สมีเทน จะแยกตัวออกจากระบบอย่างรวดเร็วเพราะมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ จึงทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีความคงตัวสูง การบำบัดแบบไร้อากาศจึงมีหน้าที่ในการสร้างเสถียรภาพให้กับตะกอนและทำลายสารอินทรีย์ทั้งที่เป็นของแข็งและสารละลายในน้ำเสีย นอกจากนี้ยังมีข้อดีหลายประการ เช่น กากตะกอนของแข็งที่เหลือจากกระบวนการย่อย ไม่ต้องทำการหมักเวียนตะกอน ต้องการสารอาหารเสริมต่ำ ไม่ต้องการพลังงานในการเติมอากาศให้กับระบบ สามารถเก็บตะกอนแบคทีเรียไว้ได้นานหลายเดือนในสถานะที่ไม่มีสิ่งปนเปื้อนและเหมาะสำหรับบำบัดน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นสูง

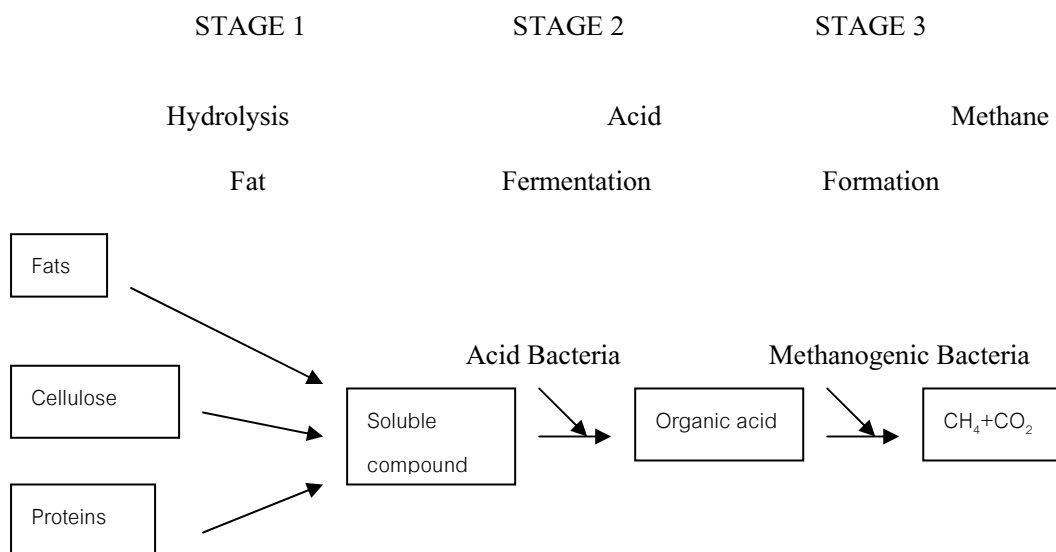
1.2.2 ปฏิกิริยาชีวเคมีในระบบหมักแบบไร้อากาศประกอบด้วย ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ (anaerobic digestion) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

ก) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) หรือการแตกสลายพอลิเมอร์ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารอินทรีย์อย่างง่าย ไม่ซับซ้อนและละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาล กลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน

ข) ปฏิกิริยาการสร้างกรดอินทรีย์ (acidogenesis) โดยสารอินทรีย์ขนาดเล็กจากขั้นตอนไฮโดรไลซิสจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทิริก กรดวาเลอริก

ค) ปฏิกิริยาการสร้างมีเทน (methanogenesis) กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะถูกแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (methane producing bacteria) ย่อยสลายเป็นแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์

การที่แบคทีเรียกลุ่มต่างๆย่อยสลายสารอินทรีย์ เพื่อให้ได้พลังงานสำหรับการเจริญเติบโต ซึ่งปฏิกิริยาการสร้างพลังงานส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ พลังงานที่แบคทีเรียนำไปใช้จะอยู่ในรูป ATP (adenosine Tri Phosphate) ซึ่งพลังงานที่แบคทีเรียได้รับจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารอาหารและผลิตภัณฑ์ที่ได้ และสภาวะทางกายภาพและทางชีวเคมีของระบบ (บุษบา, 2537) ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน

ที่มา: บุญบา (2537)

2. สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อระบบการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศ

เนื่องจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศประกอบด้วยจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม ได้แก่ จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด และ จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน จุลินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดนี้ทำงานอย่างต่อเนื่องกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาสภาวะแวดล้อมให้มีสภาพที่เหมาะสมที่จะทำให้จุลินทรีย์เหล่านี้อยู่ด้วยกันได้เป็นอย่างดี ซึ่งนอกจากจะต้องรักษาระบบให้อยู่ในสภาพที่ไร้อากาศแล้ว ยังต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้คือ

2.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อแบคทีเรียเป็นอย่างมาก โดยอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือปฏิกิริยาทางชีวเคมีของแบคทีเรียจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ โดยทั่วไปมักนิยมควบคุมอุณหภูมิในถังหมักให้อยู่ในอุณหภูมิปานกลาง (35-37 องศาเซลเซียส) เนื่องจากในช่วงอุณหภูมินี้มีอัตราการย่อยสลายที่สูงกว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำ (5-15 องศาเซลเซียส) และไม่ต้องใช้พลังงานสูงมากในการให้ความร้อนและการควบคุมเหมือนในช่วงอุณหภูมิสูง (50-60 องศาเซลเซียส)

2.2 พีเอช

ความเป็นกรดต่างมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์มาก ช่วงพีเอชที่มีความเหมาะสมกับอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียคือ ช่วงที่เป็นกลาง (6.5-7.8) ถ้าค่าพีเอชในระบบหมักมีค่าต่ำกว่า 6.2 ประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียจะต่ำลง ดังนั้นค่าพีเอชที่นิยมใช้ในการควบคุมระบบแบบไร้อากาศอยู่ในช่วง 6.8-7.2

2.3 ค่าสภาพความเป็นด่าง

ค่าสภาพความเป็นด่าง คือ ความสามารถของน้ำในการรับอนุภาคโปรตอน โดยค่าสภาพความเป็นด่างในน้ำจะอยู่ในรูปไบคาร์บอเนต คาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์ จำนวนอนุโมลเหล่านี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของระบบ ดังนั้นค่าสภาพความเป็นกรดต่างในระบบหมักจึงเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของระบบ โดยเฉพาะสภาพความเป็นด่างในรูปของไบคาร์บอเนต ถ้าระบบมีสภาพความเป็นด่างสูงแสดงว่าระบบหมักมีความสามารถในการรักษาสภาพความเป็นกรดต่างสูงโดยการรักษาค่าพีเอชให้คงตัวอยู่ได้ต่อการเพิ่มปริมาณกรดใดๆ แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าระบบหมักมีสภาพความเป็นด่างต่ำแสดงว่ามีการสะสมของกรดอินทรีย์ในระบบค่อนข้างสูง จำเป็นต้องเพิ่มความระมัดระวังในการควบคุมการทำงานของระบบหมักเพราะมีความโน้มเอียงที่จะเป็นกรดได้ง่าย

2.4 กรดไขมันระเหย

กระบวนการย่อยสารอินทรีย์แบบไร้อากาศมีแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กลุ่มโดยกลุ่มแรกทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วปล่อยกรดไขมันระเหยเป็นของเสีย จากนั้นแบคทีเรียกลุ่มที่สองจะใช้กรดไขมันระเหยเหล่านี้เป็นอาหารโดยให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์นี้จะมีกรดไขมันระเหยเป็นสารกึ่งปฏิกริยา กรดไขมันระเหยนี้อาจเกิดการสะสมได้ในกรณีที่ระบบไม่อยู่ในสมดุลคือมีการสร้างกรดมากกว่าการใช้กรด ถ้ามีการสะสมกรดไขมันระเหยเกิดขึ้นในระบบ ในช่วงแรกจะลดค่าสภาพความเป็นด่างก่อนและค่าพีเอชจะลดลงในที่สุด ถ้าค่าพีเอชในระบบต่ำกว่า 6.5 จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย

2.5 ธาตุอาหารเสริม

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศโดยแบคทีเรียนั้น ธาตุที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียมากได้แก่ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส อัตราส่วนที่เหมาะสมในระบบหมักควรมีอัตราส่วน COD: N: P เป็น 100: 2: 0.4 หรือ BOD: N: P เป็น 100: 1.1: 0.2 ถ้ามีธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำกว่าอัตราส่วนที่เหมาะสม ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตแก๊สชีวภาพจะต่ำลง แต่ตรงกันข้ามถ้ามีธาตุไนโตรเจนมากเกินไปก็จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ เช่น ทำให้ตะกอนแบคทีเรียเกิดการลอยตัวออกจากระบบ ความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของแบคทีเรียมีค่าดังแสดงในตารางที่ 1 นอกจากธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสแล้ว ธาตุอื่นๆที่มีความจำเป็นต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้แก่ Ca Mg Mo Co และ Fe แต่แบคทีเรียต้องการในปริมาณน้อยมาก

ตารางที่ 1 ธาตุอาหารเสริมที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

ธาตุอาหาร	ความเข้มข้นที่ศึกษา (ก./ม ³)	ผลกระทบ
Fe ⁺²	0.2	ช่วยตกตะกอนซัลไฟด์และเป็นโครงสร้างฟิล์มชีวภาพ
Mo ⁺²	0.017	สร้างโคแฟกเตอร์ F430 ในแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน
	0.006	เพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลาย
Mg ⁺²	0.01-0.02	ช่วยในการสร้างตะกอน
Ca ⁺²	0.01-0.04	ช่วยในการสร้างตะกอน
Ba ⁺²	0.01-0.1	ช่วยในการสร้างตะกอน
Co ⁺²	0.01	วิตามิน B 12
	0.003	เพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลาย
So ₄ ⁻	0.02	เพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลาย

ที่มา: กิตติ (2538)

3. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (Microbial fuel cell)

3.1 หลักการทำงาน และกระบวนการไฟฟ้าเคมี

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานเคมีไปเป็นกระแสไฟฟ้าโดยใช้จุลินทรีย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Allen and Bennetto, 1993; Akiba *et al.*, 1985) เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ประกอบด้วยครึ่งเซลล์ไฟฟ้าแอโนดและแคโทดซึ่งถูกแยกออกจากกัน กันด้วย PEM โดยทั่วไปแล้วชั้นสเตรทจะถูกปูอย่างต่อเนื่องในลักษณะจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยจุลินทรีย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอิเล็กตรอนและโปรตอนจะถูกปลดปล่อยจากปฏิกิริยาที่แอโนด (Gil *et al.*, 2003) ดังสมการที่ 1



อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปยังวงจรภายนอกไปสู่ครึ่งเซลล์แคโทด ในขณะที่โปรตอนแพร่ผ่าน PEM ในครึ่งเซลล์แคโทดจะมีน้ำที่อิ่มตัวด้วยออกซิเจนหล่อเลี้ยงอิเล็กตรอนและโปรตอนจะรวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นโมเลกุลของน้ำตามปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ (Gil *et al.*, 2003) ดังสมการที่ 2



การถ่ายเทอิเล็กตรอนโดยตรงจากจุลินทรีย์ไปยังขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นแบบไร้ประสิทธิภาพ สารที่เป็นตัวกลางในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ถูกนำมาใช้เพื่อเร่งการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากเซลล์แบคทีเรียไปยังขั้วไฟฟ้า เนื่องจากเซลล์แบคทีเรียส่วนใหญ่ไม่มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (electrochemically-active bacteria, EAB)

3.2 ชนิดของถังปฏิกิริยา และลักษณะการไหล

ในระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปแบ่งลักษณะของถังปฏิกิริยา (reactor) ได้เป็น 2 แบบ คือ

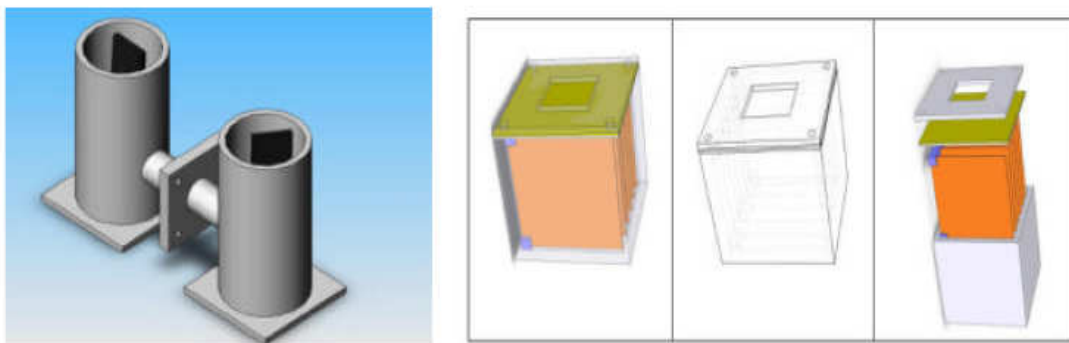
3.2.1 แบบทีละเท (batch) ไม่มีการไหลของน้ำเข้าและออกจากถังปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปจะมีการกวนผสม

3.2.2 แบบมีการไหลต่อเนื่อง (continuous Flow) มีการไหลของน้ำเข้าและออกจากถังปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีโอกาสที่จะดำเนินระบบจนระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) ได้

3.3 รูปแบบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

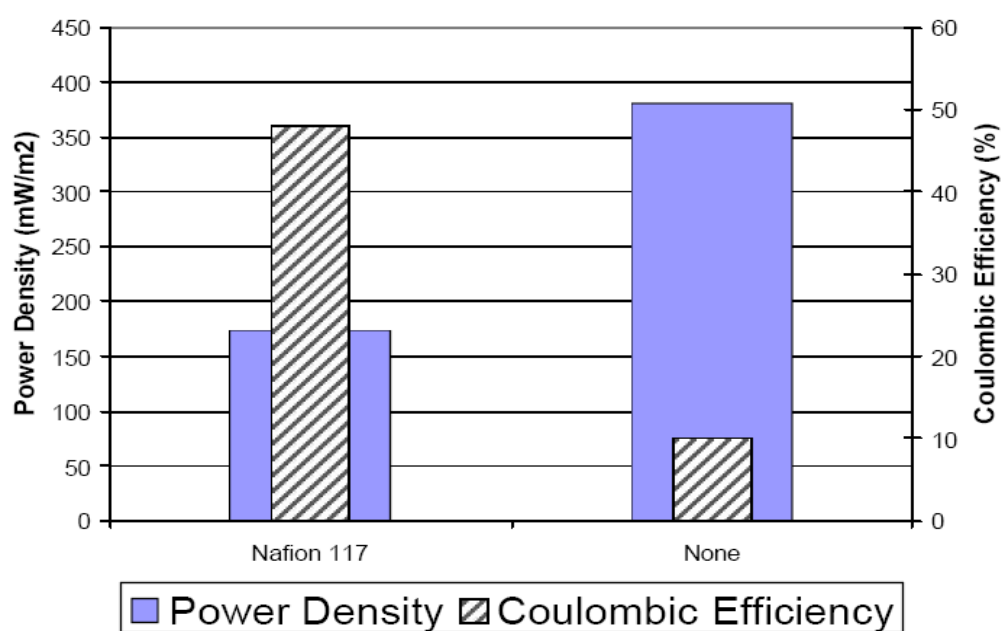
เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือเซลล์แบบห้องเดียว (single chamber) และแบบห้องคู่ (double chamber) ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยประกอบด้วย ขั้วแอโนดและแคโทด ข้อแตกต่างระหว่าง ห้องเดียว และห้องคู่ คือการมี PEM นั้น โดยในเซลล์แบบห้องเดียวจะไม่มี PEM ซึ่งด้านแอโนดของทั้งสองแบบจะสัมผัสกับสารละลาย ส่วนด้านแคโทดแบบห้องคู่จะสัมผัสกับสารละลายและแบบห้องเดียวจะสัมผัสกับอากาศภายนอก ในส่วนของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่จะมีสถานะต่างๆ เช่น anaerobic, aerobic ซึ่งสามารถกำหนดได้ในแต่ละด้าน อัตราการแพร่ของออกซิเจนสู่ขั้วแอโนดที่ไม่มี PEM จะสูงกว่าเซลล์แบบห้องคู่ที่ใช้ PEM (Liu and Logan, 2004).

ข้อดีของเซลล์แบบห้องเดียว คือสามารถลดค่าใช้จ่ายในตอนเริ่มกระบวนการ โดยไม่ต้องใช้ PEM ซึ่งมีราคาแพง และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ได้สูงกว่าแบบห้องคู่ ในส่วนข้อเสียของเซลล์แบบห้องเดียว คือประสิทธิภาพของคูลอมบิก (coulombic efficiency) จะลดลงซึ่งทั่วไปเป็นผลมาจากการแพร่ของออกซิเจนสู่บริเวณขั้วแอโนดดังแสดงในภาพที่ 3 โดยแบคทีเรียที่สามารถใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน (facultative anaerobic bacteria) สามารถพาอิเล็กตรอนผ่านโปรตีนตัวกับออกซิเจนในผนังตรงข้ามทางผิวของอิเล็กโตรดถ้ายังมีออกซิเจนเหลืออยู่ จะไปลดประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ (ตารางที่ 2)



ภาพที่ 2 รูปแบบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ชนิดห้องคู่และห้องเดี่ยว (two chamber และ single chamber)

ที่มา: Bettin (2006)



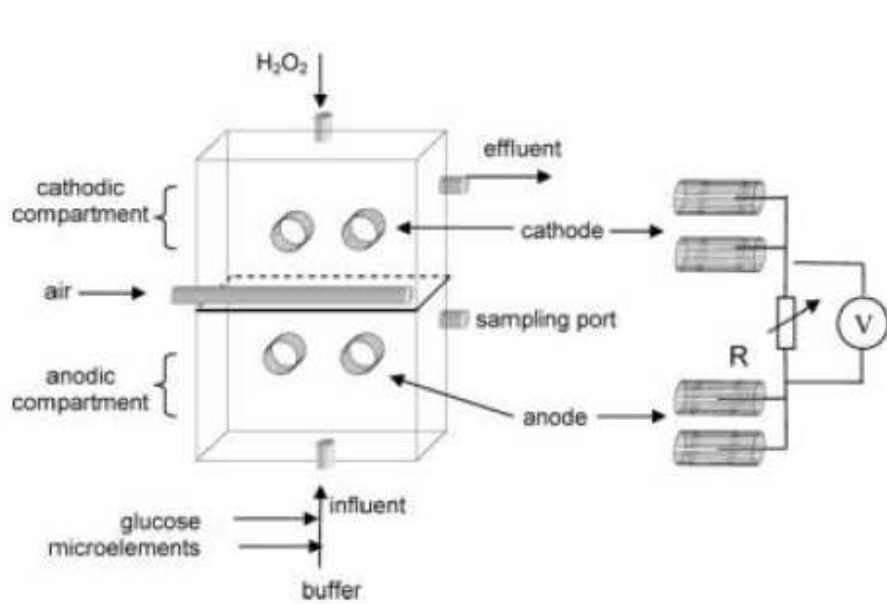
ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบผลกระทบของเมมเบรนที่มีต่อความหนาแน่นกำลัง และประสิทธิภาพคูลอมบิก

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Liu and Logan (2004)

ตารางที่ 2 ข้อแตกต่างของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียวและห้องคู่

ข้อแตกต่างของเซลล์เชื้อเพลิง	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ	
	ห้องเดียว	ห้องคู่
จุลชีพ		
เมมเบรน	ไม่มี	มี
สถานะในด้านแอโนด	aerobic	aerobic, anaerobic
ความหนาแน่นกำลัง	สูง	ต่ำ
อัตราการแพร่ของออกซิเจนสู่		
ขั้วแอโนด	สูง	ต่ำ
ประสิทธิภาพคลูลอมบิก	ต่ำ	สูง

จากการทบทวนเอกสารพบว่ามีการศึกษาในการผสมรูปแบบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดห้องเดียวและห้องคู่โดย Tartakovsky และ Guiot (2006) ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งเป็นรูปแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ปล่อยขับเคลื่อนจากด้านล่างขึ้นบนโดยใช้เป็นแบบห้องคู่ และใช้ฟองน้ำเป็น PEM ขับเคลื่อนจะผ่านจากด้านล่างเข้าสู่ขั้วแอโนด และออกทางด้านแคโทดซึ่งอยู่ด้านบน ไอออนและของเหลวจะสามารถแพร่ผ่านฟองน้ำ โดยฟองน้ำจะแยกทั้งสองห้องและคงสภาพของทั้งสองฝั่งให้มีความคงที่ตามสภาพแวดล้อมนั้นๆ โดยที่ด้านแอโนดจะถูกรักษาอยู่ในสภาพไร้อากาศ (anaerobic) มากกว่าด้านแคโทดซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจะทดลองได้ทั้งแบบทีละเท (batch) และแบบต่อเนื่อง (continuous) โดยแบบทีละเท (batch) จะต้องดูแลควบคุมถึงขีดสุด โดยการดูแลจะควบคุมสถานะของขีดสุดด้วยตัวเอง ในขณะที่ระบบแบบต่อเนื่องจะใช้เครื่องสูบน้ำในการเพิ่มขีดสุดและดูดของเสียออกจากระบบ ได้มีการทดลองในการเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยไม่ใช้ตัวพาน้ำ (mediator) พบว่ากำลังที่ได้ (Power output) ลดลงจาก 479 วัตต์ต่อตารางเมตร ในแบบกะ (batch) เหลือ 49 วัตต์ต่อตารางเมตร อย่างไรก็ตามถึงแม้กำลังที่ได้ (Power output) จะลดลงแต่ในการประยุกต์ที่ใช้งานในระบบต่อเนื่องจะทำได้กว้างขวางกว่าและการบำรุงรักษาดำรง (Rabaey *et al.*, 2005)

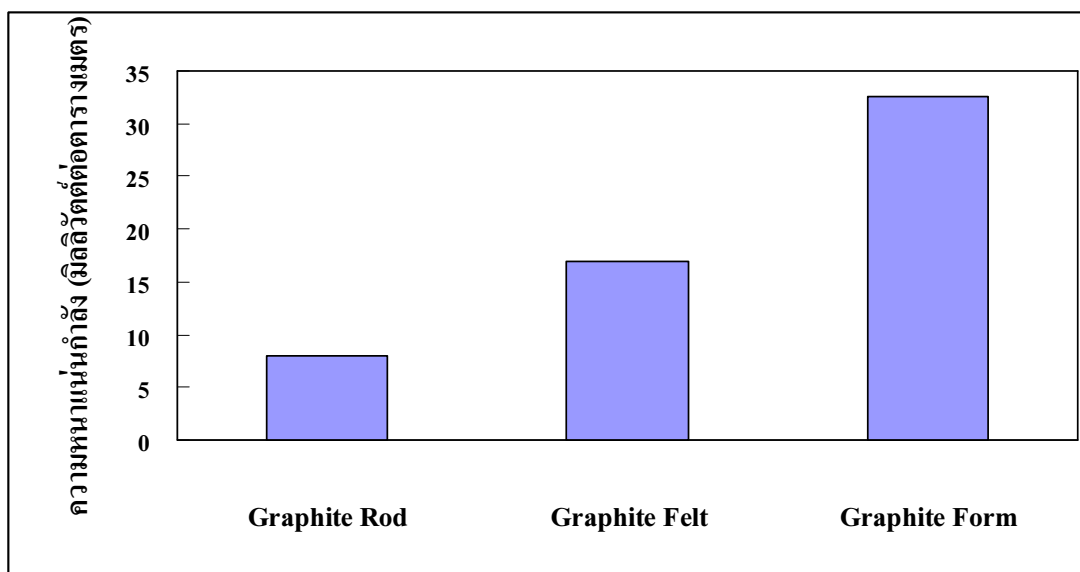


ภาพที่ 4 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบต่อเนื่อง (continuous Upflow MFC)

ที่มา: Tartakovsky and Guiot (2006)

3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้

3.4.1 ขั้วอิเล็กโทรด วัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรดนั้นถือว่ามีความสำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของกำลัง โดยทั่วไปขั้วแอโนดจะนิยมใช้แกรไฟต์ (graphite) แต่จะแตกต่างกันตามลักษณะทางกายภาพซึ่งจะครอบคลุมทั้งพวกโลหะ กระดาษ สักหลาด และโฟม โดยทั่วไปวัสดุที่มีความพรุนสูงจะให้ความหนาแน่นของกำลังที่สูง เพราะทำให้จุลินทรีย์ที่มาเกาะมีประสิทธิภาพ โดยปัจจัยที่มีผลต่อกำลัง (Power output) คือพื้นที่ผิวของแอโนดนั่นเอง (Bond *et al.*, 2002) ในส่วนของพื้นที่ผิวด้านแคโทดจะมีผลต่อกำลังเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (Logan *et al.*, 2004) ภาพที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของแกรไฟต์ทั้ง 3 แบบที่มีผลต่อกำลัง (Power output) (Chaudhuri and Lovley, 2003)

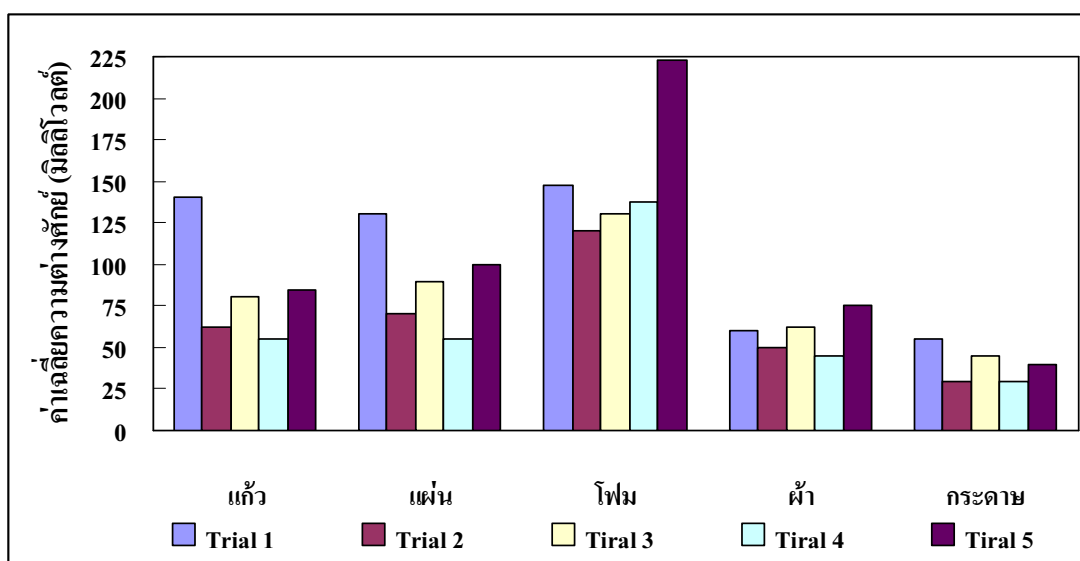


ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบลักษณะของแกรไฟต์ทั้ง 3 แบบที่มีผลต่อกำลัง (Power output)

ที่มา: คัดแปลงมาจาก Chaudhuri and Lovlay (2003)

โดยก่อนที่จะนำขั้วอิเล็กโทรดไปใช้งานจริงได้นั้นต้องมีการทดลองถึงผลกระทบของวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดที่มีผลต่อกำลัง (Power output) ในสถานะต่างๆ ซึ่งการจะได้มาซึ่งความถูกต้อง ต้องมีการทดลองหลายต่อหลายครั้งดังภาพที่ 6 (Henslee *et al.*, 2005)

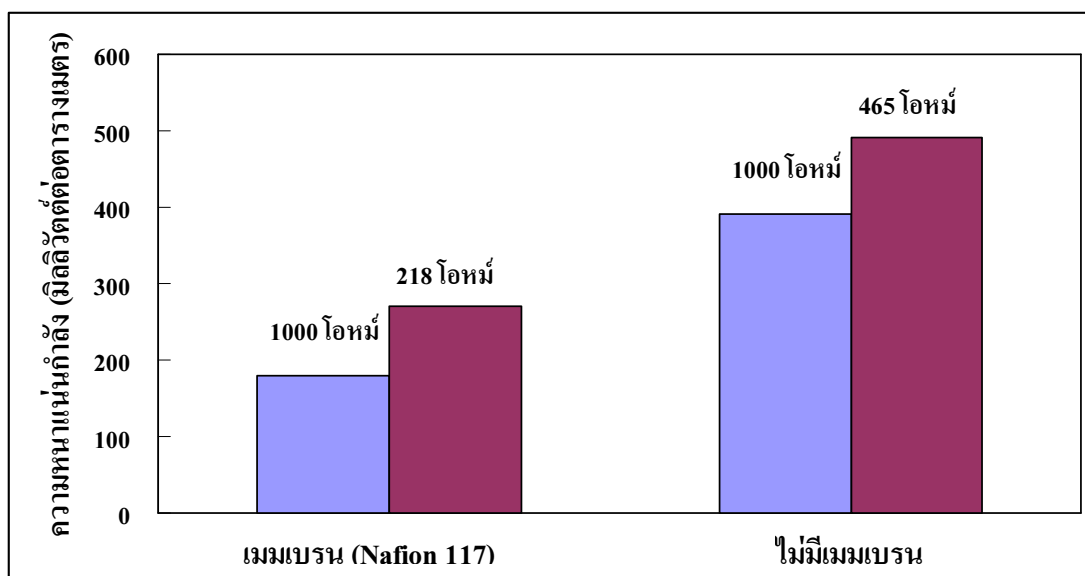
นอกจากนี้ การใช้ ทองคำขาว (platinum) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ในด้านแคโทดก็เป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มกำลัง (Power output) โดยการขาด ทองคำขาว (platinum) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในด้านแคโทดนั้นทำให้ความหนาแน่นของกำลังลดลงถึง 78 เปอร์เซ็นต์ (Logan *et al.*, 2004) อีกปัจจัยหนึ่งคือ สารตัวกลาง (mediator) เช่น โพแทสเซียมเฟอร์ริกไซยาไนด์ สามารถช่วยทำให้การย้ายของอิเล็กตรอนของในด้านแคโทดเพื่อรวมตัวกับออกซิเจนได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม สารตัวกลางนั้นมีราคาแพง มีความเป็นพิษสูง และสลายไปตามระยะเวลา



ภาพที่ 6 ผลกระทบของวัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรดที่มีผลต่อความต่างศักย์

ที่มา: คัดแปลงมาจาก Henslee *et al.* (2005)

3.4.2 ความต้านทาน (Resistance) จูลินทรีย์จะออกซิไดซ์สารตั้งต้นและปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกสู่ที่ผิวอิเล็กโทรด และควรมีการพิจารณาถึงแหล่งที่ให้กระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตามถึงแหล่งให้กระแสไฟฟ้าจะไม่คงที่ แต่ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะคิดเป็นความต้านทานของระบบ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและกระแสไฟฟ้าจะไม่เป็นในรูปเส้นตรง ความต้านทานที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆมากมาย ครอบคลุมถึงวิธีการประยุกต์ใช้ สารตั้งต้นเชื้อจุลินทรีย์ และประเภทของถังปฏิกรณ์ดังภาพที่ 7

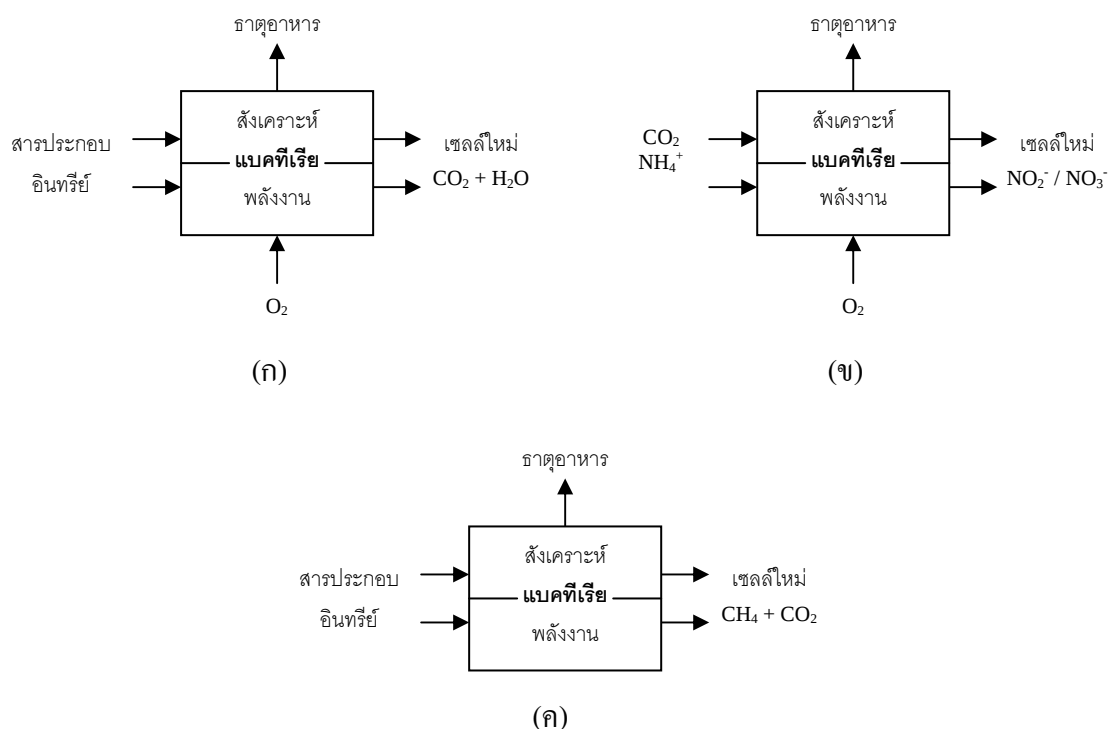


ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (Resistance) ที่มีผลต่อความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Power density)

ที่มา: คัดแปลงจาก Liu and Logan (2004)

3.4.3 จุลินทรีย์ เป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ใช้สารอาหารที่ละลายน้ำได้ แบคทีเรียชนิดที่เป็นพวกผู้ย่อยสลาย (Decomposer) จัดเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในระบบนิเวศวิทยา โดยมีบทบาทในการย่อยสลายสารอินทรีย์ทั้งที่อยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติ และในระบบบำบัดน้ำเสีย แบคทีเรียโดยทั่วไปมีขนาดประมาณ 0.5 ถึง 5 นาโนเมตร และสามารถมองเห็นได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์เท่านั้น

ในที่นี้สามารถแบ่งแบคทีเรียออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ Heterotrophic Bacteria และ Autotrophic Bacteria ขึ้นอยู่กับแหล่งคาร์บอน (แหล่งอาหาร) ที่ใช้ในการสร้างเนื้อเยื่อหรือเซลล์ใหม่ตามภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ตัวอย่างกระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolism) ก) Aerobic Heterotrophic ข) Aerobic Autotrophic ค) Anaerobic Heterotrophic

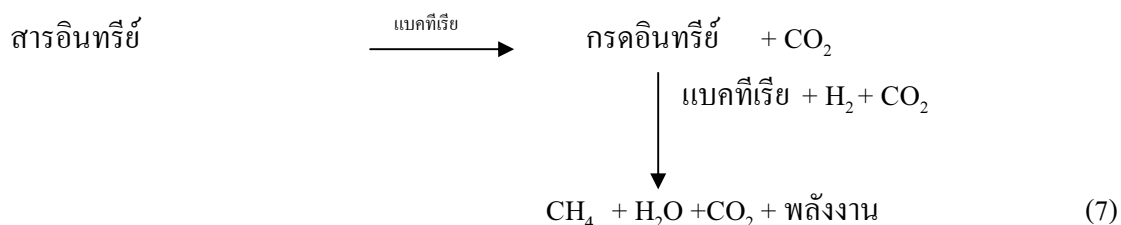
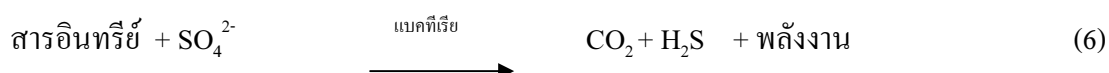
ที่มา: สุเทพ (2549)

กลุ่มของ Heterotrophic Bacteria เป็นพวกที่ใช้คาร์บอนในสารประกอบอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนในการสร้างเซลล์ สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 กลุ่ม ตามด้วยความต้องการออกซิเจนอิสระ ได้แก่ Aerobic Bacteria, Anaerobic Bacteria และ Facultative Bacteria กลุ่ม Aerobic Bacteria ต้องการใช้ออกซิเจนอิสระ (แก๊สออกซิเจน และออกซิเจนที่ละลายในน้ำ) ในการย่อยสลาย (ออกซิไดซ์) สารอินทรีย์เพื่อให้ได้พลังงานสำหรับการเจริญเติบโตและการเพิ่มจำนวนแบคทีเรียดังสมการที่ 4 สำหรับกลุ่ม Anaerobic Bacteria สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้โดยไม่ต้องใช้ออกซิเจนอิสระ แต่ใช้ออกซิเจนจากสารประกอบอื่น เช่น ไนเตรต และซัลเฟต ดังสมการที่ 5 และ 6 และกลุ่ม Facultative Bacteria ในสภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจนอิสระละลายในน้ำจะดำรงชีพแบบ Aerobic Bacteria หากไม่มีออกซิเจนอิสระจะดำรงชีพแบบ Anaerobic Bacteria

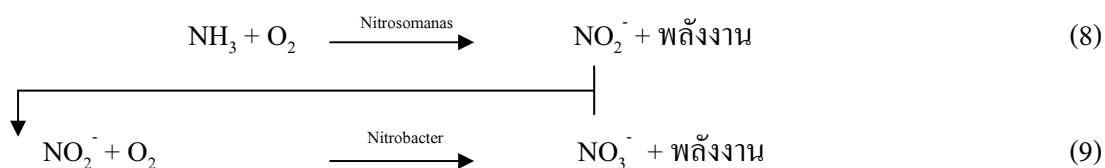
Aerobic:



Anaerobic:



กลุ่ม Autotrophic Bacteria ใช้คาร์บอนจากสารประกอบอนินทรีย์ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบกลุ่มคาร์บอนเนต เป็นแหล่งคาร์บอนในการสร้างเซลล์ สมการที่ 7 เป็นตัวอย่างของกระบวนการสร้าง CH_4 โดย Autotrophic Bacteria เรียกว่ากลุ่ม Methanogen ถึงแม้ว่าในสมการที่ 7 จะมีการสลายกรดอินทรีย์ (ที่เป็นผลมาจากการย่อยสลายของ สารอินทรีย์โดยกระบวนการอื่นๆ) แต่ธาตุคาร์บอนในสารอินทรีย์ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในเซลล์ ดังนั้น Methanogen จึงไม่จัดเป็น Heterotrophic Bacteria นอกจาก Methanogens ยังมีกลุ่ม Nitrifying Bacteria, Sulfur Bacteria และ Iron Bacteria ซึ่งได้พลังงานจากการออกซิไดส์สารอนินทรีย์ กระบวนการ Nitrification แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือดังแสดงในสมการ 8 และ 9 โดยแบคทีเรียสกุล Nitrosomanas และ Nitrobacter ตามลำดับ



กระบวนการ Nitrification สามารถเกิดขึ้นในระบบบำบัดทางชีวภาพชั้นทุติยภูมิโดยต้องอยู่ในสถานะที่มีปริมาณสารอินทรีย์เข้ามาต่ำและมีอุณหภูมิพอเหมาะ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยา Nitrification จะเพิ่มปริมาณการใช้ออกซิเจนในน้ำอาจมีผลต่อการลอยตัวของตะกอนจุลินทรีย์ในถังตกตะกอนสุดท้าย โดยการลอยของตะกอนจุลินทรีย์เกิดฟองแก๊สไนโตรเจนอันเกิดจากรีดิคซ์ Nitrate หรือเรียกว่ากระบวนการ Denitrification ดังสมการที่ 5

Sulfur Bacteria ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิด Crown Corrosion ในระบบระบายน้ำเสีย ดังที่ได้กล่าวมาแล้วออกซิไดซ์แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นกรดซัลฟูริกดังสมการ 10



Iron Bacteria เป็นแบคทีเรียพวก Autotroph ที่ทำการออกซิไดซ์ Inorganic Ferrous Ion ที่ละลายน้ำให้กลายเป็น Ferric ที่ไม่ละลายน้ำดังสมการ 11



4. ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์และกระบวนการทางชีวเคมีของจุลินทรีย์

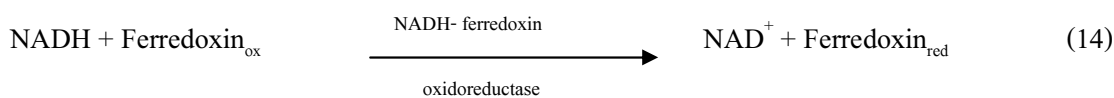
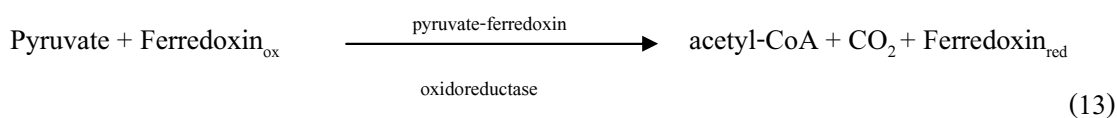
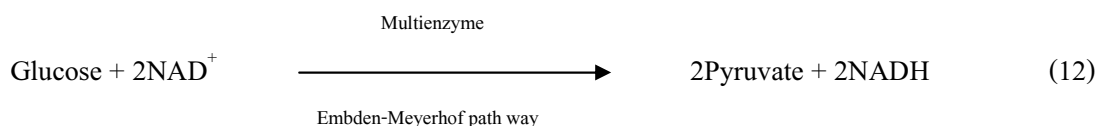
เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ปฏิกิริยาทางชีวภาพปกติแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์และเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เอนไซม์ ซึ่งในการทดลองนี้จะศึกษานั่นเฉพาะทางด้านเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์โดยใช้จุลินทรีย์ในการทำปฏิกิริยาทางชีวภาพในเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้า โดยแบ่งเป็น 4 แนวทาง

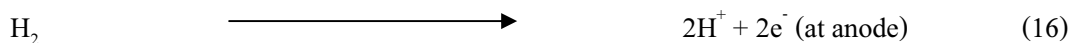
4.1 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบแยกถัง (Microbial-system producing hydrogen as fuel for conventional fuel cell) ในรูปแบบนี้จะใช้จุลินทรีย์ในการผลิตไฟฟ้าเคมีผ่านกระบวนการหมักหรือการย่อยสลายเพื่อให้เกิดพลังงาน โดยถังปฏิกิริยาและเซลล์เชื้อเพลิงจะแยกออกจากกัน

จุลินทรีย์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนสามารถใช้ได้ทั้งพวกแบคทีเรียและสาหร่าย เช่น *Escherichia coli*, *Enterobacter aerogenes*, *C. butyricum*, *Clostridium acetobutylicum* และ *Clostridium perfringens* ซึ่งจุลินทรีย์พวกนี้จะสามารถผลิตไฮโดรเจนภายใต้

สภาวะไร้อากาศ (Gottschalk *et al.*, 1979; Heyndrickx *et al.*, 1990) โดยประสิทธิภาพของการผลิตไฮโดรเจนจากจุลินทรีย์ *C.butyricum* (Suzuki *et al.*, 1983), *E. coli* และ *Enterobacter aerogenes* เป็นพวกที่อยู่ในสภาวะที่ออกซิเจนหรือไม่มีก็ได้ (Facultative anaerobes) และการหมักใช้ทั้งกลูโคสและแลคโตสเป็นแหล่งคาร์บอนในการผลิตไฮโดรเจน

ในการเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นซับสเตรตในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เพื่อไปผลิตไฮโดรเจนต้องใช้เอนไซม์หลายตัว โดยในแบคทีเรียจะเปลี่ยนโมเลกุลของกลูโคสเป็น 2 โมลของ NADH จะมีการรีดิวซ์รูปของโคเอนไซม์ (coenzyme) ที่ชื่อว่า β -nicotinamide adenine dinucleotide ของวิตามิน niacin และจะได้ 2 โมลในรูปของไพรูเวต (Pyruvate) จากกระบวนการ Embden-Meyerhof path way ต่อมาไพรูเวต (Pyruvate) จะถูกออกซิไดส์กลายเป็น อะซิไทลโคเอ (acetyl-CoA), CO_2 และ ตัวรีดิวซ์ของ ferredoxin โดย pyruvate-ferredoxin oxidoreductase และ NADH-ferredoxin oxidoreductase จะออกซิไดส์ NADH และรีดิวซ์ ferredoxin โดยการรีดิวซ์ ferredoxin คือการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปไฮโดรเจนจากเอนไซม์ไฮโดรจีเนส (Hydrogenase) สุดท้ายผลที่ได้คือ 2 โมลไฮโดรเจน ที่ได้จากการผลิตของกลูโคส 1 โมล ภายใต้สภาวะในอุดมคติแสดงดังสมการ 12-16 อย่างไรก็ตาม yield ของไฮโดรเจนในทางปฏิบัติที่ได้จะประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ของทฤษฎี (Suzuki *et al.*, 1983) การเพิ่มผลผลิตของไฮโดรเจนสามารถเป็นไปได้โดยใช้เทคนิคทางวิศวกรรมไฟฟ้าและการใช้แบคทีเรียที่สามารถผลิตไฮโดรเจนตัวใหม่





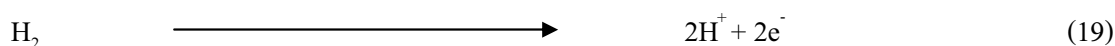
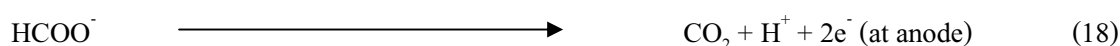
เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ผลิตไฮโดรเจนและใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (H_2/O_2 Fuel cell) จะประกอบด้วย platinum – black - nickel นำมาทำให้มีลักษณะเป็นแหประกอบเข้าด้วยกันในด้านแอโนด และใช้ palladium – black – nickel ในส่วนของด้านแคโทด และแบ่งทั้ง 2 ฝั่งด้วยตัวกรองไนลอน (nylon filter) โดยการเดินระบบของถังปฏิกิริยาชีวภาพจะกระทำที่อุณหภูมิห้อง (Suzuki *et al.*, 1980; Karube *et al.*, 1981) กระแสและโวลต์ที่ได้จะขึ้นกับอัตราการผลิตไฮโดรเจนของกระบวนการหมักตัวอย่างเช่น ในการให้อัตราการไหลของไฮโดรเจน 40 มิลลิลิตรต่อนาที โดยในช่วง open - circuit จะได้โวลต์ (V_{oc}) เท่ากับ 0.95 โวลต์ และในช่วง short – circuit จะให้ความหนาแน่นของกระแสเท่ากับ 40 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในการเดินระบบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จะทำการได้สภาวะที่คงตัว (steady state) โดยในหนึ่งอาทิตย์เดินระบบอย่างต่อเนื่องสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 500 และ 550 มิลลิแอมแปร์

การทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพมีความเสถียรคงตัวถือเป็นความสำคัญระดับแรกของถังปฏิกิริยาชีวภาพ โดยในส่วนประกอบก็ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น ในส่วนของการจะทำให้ระบบที่มีการผลิตไฮโดรเจนของแบคทีเรียมีความเสถียรนั้น แบคทีเรีย *C. butyricum* มีความคงตัวที่ดีแต่มีความสัมพันธ์ ที่จะทำให้ระบบผลิตไฮโดรเจนไม่คงตัว โดยการทำให้ระบบมีความคงตัวนั้นจะต้องสามารถกักจับจุลินทรีย์ให้สามารถอยู่ในระบบได้ โดยอาจใช้โพลิเมอร์ เช่นพวก polyacrylamide (Suzuki and Karube, 1983), agar gel (Suzuki *et al.*, 1980; Karube *et al.*, 1981) หรือการใช้กระดาษกรอง (Suzuki and Karube, 1983) และการทำให้ระบบสามารถรักษาสภาวะไร้อากาศ (anaerobic) ไว้ได้ในหลายสัปดาห์เพื่อการผลิตไฮโดรเจนอย่างต่อเนื่อง ในทางตรงกันข้ามถ้าไม่สามารถรักษาสภาวะให้ระบบมีความคงตัวได้แบคทีเรียทั้งหมดจะไม่ตอบสนองในระยะเวลาประมาณ 2 วัน

4.2 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่เกิดไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดโดยตรง (Microbial system producing electrochemically active metabolites in the anodic compartment of biological fuel cell) ในรูปแบบนี้กระบวนการหมักของจุลินทรีย์จะเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดโดยตรง

ระบบของจุลินทรีย์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจะเกิดในฝั่งด้านแอโนดโดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อให้ได้พลังงาน โดยการเกิดไฮโดรเจนในเซลล์

เชื้อเพลิงนั้นจะเกิดกระบวนการหมัก (fermentation) ที่ด้านของฝั่งแอโนด โดยผลิตภัณฑ์จากกระบวนการหมักคือ กรดฟอร์มิก (formic acid) กรดอะซิติก (acetic acid) และกรดแลกติก (lactic acid) จะถูกใช้ประโยชน์ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (Karube *et al.*, 1977) ดังสมการที่ 17-19 และอีกด้านหนึ่งซับสเตรดหลักที่ใช้ในกระบวนการหมักก็คือกลูโคส ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปสมทบในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป สมการข้างล่างจะแสดงถึงการการผลิตไฮโดรเจนจากแหล่งต่างๆที่เกิดขึ้นในแอโนดเพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า



ในสภาวะการเกิดไฮโดรเจนนั้นสามารถผลิตได้จากกรดฟอร์มิก (formic acid), กรดแลกติก (lactic acid) และซัลเฟตประกอบอยู่ด้วยโดยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการย่อยสลายเพื่อให้ได้พลังงานของ ซึ่งสามารถผลิตได้ในระหว่างกระบวนการหมักแลกเตส (Lactase) โดยแบคทีเรีย *Desulfovibrio desulfuricans* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (sulphate-reducing bacteria) แสดงดังสมการที่ 20, 21 และ 22



โดยซัลไฟด์ในช่วงกลางของปฏิกิริยาจะเป็นตัวยับยั้งการย่อยสลายเพื่อให้ได้พลังงานของแบคทีเรีย เพราะไปทำปฏิกิริยากับเหล็กในโปรตีนเช่น ไปขัดขวางระบบขนส่งอิเล็กตรอน (electron transport system) ในไซโตโครม (cytochrom) ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีธาตุเหล็กอยู่ในโมเลกุล ซัลเฟตจะมีผลเป็นพิษต่อโลหะที่ขั้วอิเล็กโทรดหลายประการเช่น เป็นตัวทำปฏิกิริยาที่รุนแรงและสามารถดูดซับกับอิเล็กโทรดได้และเมื่อถูกดูดซับจะไม่สามารถเอาออกจากขั้วอิเล็กโทรดได้ ใน

การทดลองหนึ่งได้ใช้ แกรไฟต์ (graphite) ที่มีรูพรุนเป็นขั้วอิเล็กโทรด และใส่โคบอลต์ไฮดรอกไซด์ (cobalt hydroxide) เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งโคบอลต์จะทำปฏิกิริยาที่รุนแรงกับซัลเฟอร์ทำให้ในสารละลายเป็นของผสมระหว่างโคบอลต์ไฮดรอกไซด์กับโคบอลต์ซัลไฟด์ (cobalt hydroxide/cobalt sulphide mixture) เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีโครงสร้างประกอบไปด้วยด้านแอโนดที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในส่วนของด้านแคโทดที่ใช้แกรไฟต์ (graphite) เป็นขั้วอิเล็กโทรดโดยใช้ iron(II)phthalocyanins และสารประกอบ vanadium (V) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ด้านแอโนดและแคโทดจะถูกแยกออกจากกันโดยรักษาสภาพไร้อากาศ (anaerobic) ที่ด้านแอโนดให้คงที่ โดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจะมีลักษณะโดยคร่าวๆคือ $V_{oc} = 2.8$ โวลต์ และ $I_{sc} = 2.5-4$ แอมแปร์ โดยจะเดินระบบเป็นระยะเวลา 18 เดือนและใช้ระยะเวลาประมาณ 40-60 นาทีในหนึ่งวัน (Habermann and Pommer, 1991; Coony *et al.*, 1996) การเดินระบบที่ล้มเหลวของเซลล์เชื้อเพลิงจะเกิดระหว่างการดูดซับของผลิตภัณฑ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดจากการเพิ่มอิเล็กโทรดจากการปรับปรุงกระบวนการ จุลินทรีย์ในระบบจะเริ่มกระบวนการย่อยสลายกลูโคสในถังปฏิกิริยา โดยกระบวนการหมัก ของเหลวจะถูกฉีดอย่างต่อเนื่องโดยปั๊มผ่านช่องว่างทางฝั่งอิเล็กโทรด ในการแบ่งฝั่งทั้ง 2 ด้านจะมีเยื่อเลือกผ่าน (semi-permeable membrane) เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพอีกประเภทหนึ่งคือมีการปรับเปลี่ยนทางด้านแอโนด โดยใช้ platinum หรือ platinumized graphite เป็นขั้วอิเล็กโทรดหุ้มผิวด้วยตัวนำไฟฟ้าพวก polyaniline และจะมีทั้งตัวประสานทางชีวภาพและตัวกระตุ้นทางไฟฟ้าประกอบอยู่ด้วย ในการดูดซับอิเล็กตรอนจากกระบวนการย่อยสลายเพื่อให้ได้พลังงานของแบคทีเรียจะถูกขนส่งจากทางด้านฝั่งแอโนด ในระหว่างการเดินระบบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายเพื่อให้ได้พลังงานของแบคทีเรีย จะเกิดขึ้นตามกระบวนการออกซิเดชัน โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าบนขั้วแอโนด และไม่ถูกเร่งปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว โดยโพลิเมอร์จะสามารถลดความเร็วของกระบวนการได้พอสมควร ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่มีการเดินระบบต่อเนื่องจะได้กระแสสูงกว่า 1.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร (Schroder *et al.*, 2003)

4.3 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพชนิดที่ใช้สารตัวกลาง (Mediator-coupled microbial fuel cell) ในรูปแบบนี้จะมีการใช้สารตัวกลางในการขนส่งอิเล็กตรอนระหว่างเซลล์ของจุลินทรีย์กับขั้วอิเล็กโทรด โดยสารตัวกลางจะรับอิเล็กตรอนจากกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอนของเซลล์จุลินทรีย์ (electron transport chain) และขนส่งอิเล็กตรอนไปสู่ขั้วแอโนดในเซลล์เชื้อเพลิง

สารตัวกลาง (mediator) คือตัวกลางที่ใช้ในการรับอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอาหารเพื่อให้ได้พลังงานของจุลินทรีย์ เพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า โดยที่ตัวกลางจะมี

หน้าที่ในการติดต่อระหว่างเซลล์ของจุลินทรีย์กับตัวอิเล็กโทรด โดยจะรับอิเล็กตรอนที่ผิวของเมมเบรนของจุลินทรีย์ขนส่งเข้าไปให้ตัวอิเล็กโทรด โดยพื้นที่ผิวของลวดตัวนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรดมีส่วนช่วยการทำงานของสารตัวกลาง สารตัวกลางที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆจะสามารถพาอิเล็กตรอนผ่านระหว่างภายในเซลล์ของแบคทีเรียและตัวอิเล็กโทรดได้ โดยการทำงานของสารตัวกลางดังแสดงในภาพที่ 9 และตัวกลางที่ดีต้องมีความสามารถดังต่อไปนี้

ก) สารตัวกลางที่ออกซิไดซ์ควรสามารถผ่านเข้าไปรับอิเล็กตรอนที่เซลล์เมมเบรนของแบคทีเรีย และเมื่อรับอิเล็กตรอนแล้วสามารถผ่านออกจากเซลล์ได้

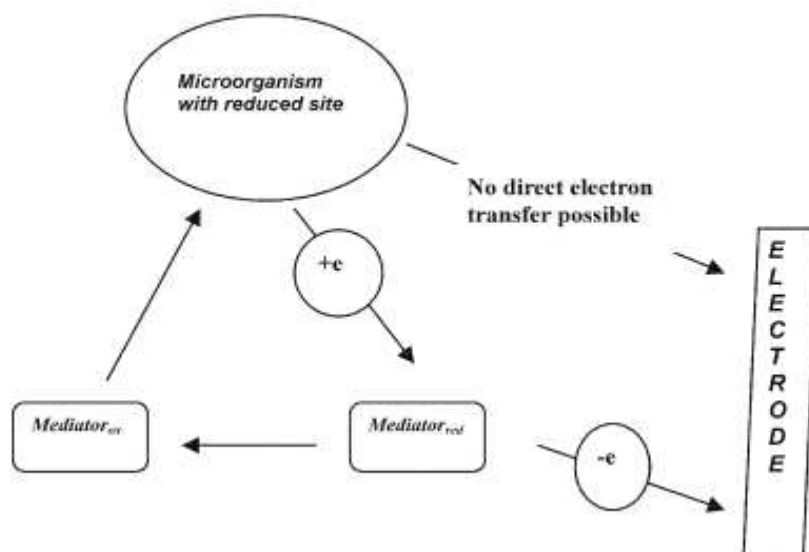
ข) ค่า redox potential ของสารตัวกลางควรจะเหมาะสมกับค่า potential ของ reductive metabolite

ค) สารตัวกลางในสถานะออกซิเดชันต้องไม่รบกวนกระบวนการย่อยสลายเพื่อให้ได้พลังงาน (metabolic process)

ง) สารตัวกลางที่รับอิเล็กตรอนแล้วควรสามารถผ่านเซลล์เมมเบรนของแบคทีเรียออกมาได้

จ) ในสถานะทั้งของการออกซิไดซ์และรีดิวซ์ของสารตัวกลางควรจะไม่ทำปฏิกิริยาในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ละลายง่าย และไม่ถูกดูดซับไม่ว่าโดยเซลล์แบคทีเรียหรือที่ผิวของอิเล็กโทรด

ช) การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของกระบวนการออกซิเดชันที่ผิวอิเล็กโทรดของสารตัวกลางที่รับอิเล็กตรอน (mediator-reduce) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 9 การทำงานของสารตัวกลางในการขนส่งอิเล็กตรอน

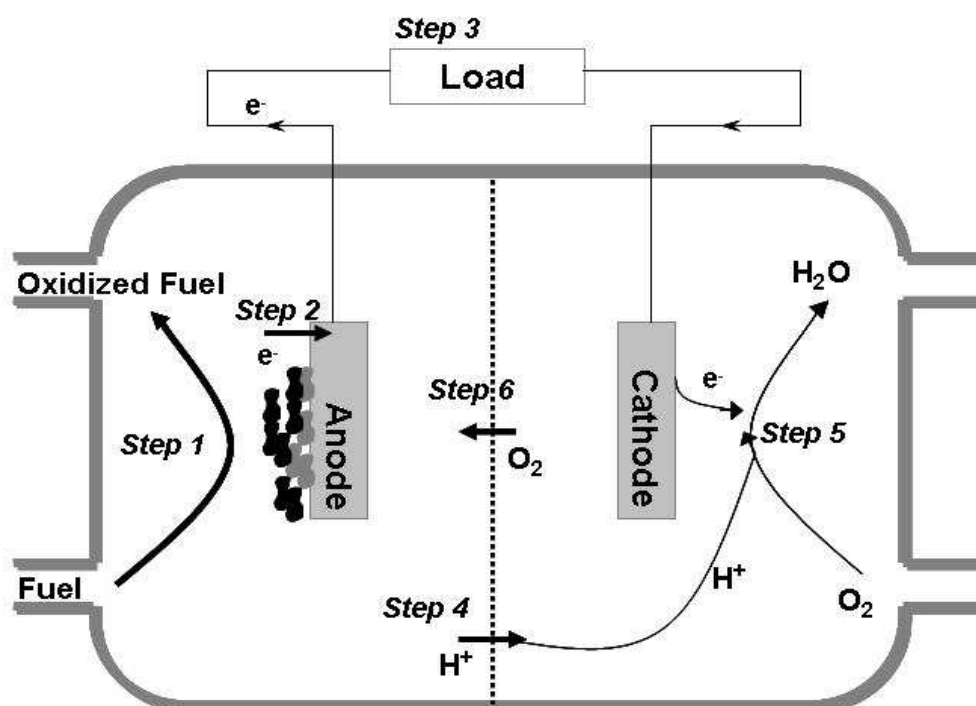
ที่มา: Shukla *et al.* (2004)

4.4 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ปราศจากสารตัวกลาง (Mediator-less microbial fuel cell) ในรูปแบบนี้จะใช้จุลินทรีย์ที่มีความสามารถรับอิเล็กตรอนได้ เป็นตัวพาอิเล็กตรอน โดยที่ผิวชั้นนอกของเซลล์จุลินทรีย์จะมีไซโตโครม (cytochromes) มีความสามารถในการติดต่อกับขั้วอิเล็กโทรดได้โดยตรงโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารตัวกลาง

ในปัจจุบันได้มีการใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ใช้แบคทีเรียที่มีความสามารถเร่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (electronchemically-active bacteria, EAB) และมีความสามารถที่จะถ่ายทอดอิเล็กตรอนจากขั้วสเตรตไปยังขั้วไฟฟ้าโดยตรงโดยไม่ต้องใช้สารตัวกลาง (Chang *et al.*, 2006) เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ใช้จุลินทรีย์ประเภทนี้เรียกว่า mediator-less MFC แบคทีเรียประเภท dissimilatory metal reducing bacteria ซึ่งมีความสามารถในการรีดิวซ์โลหะออกไซด์จะมีความสามารถในการใช้งานด้วย ในปัจจุบันได้ค้นพบแบคทีเรียประเภท EAB หลายชนิด ได้แก่ *Aeromonas hydrophila* (Cuong *et al.*, 2003), *Clostridium butyricum* (Park *et al.*, 2001), *Desulfobulbus prooinicus* (Holmes *et al.*, 2004), *Enterococcus gallinarum* (Kim *et al.*, 2005), *Shewanella putrefaciens* (Kim *et al.*, 1999, 2005), *Geobacter sulfurreducens* (Bond and Lovley, 2003) และ *Geobacter metallireducens* (Myers *et al.*, 1992; Lovley *et al.*, 1993; Dichristina and

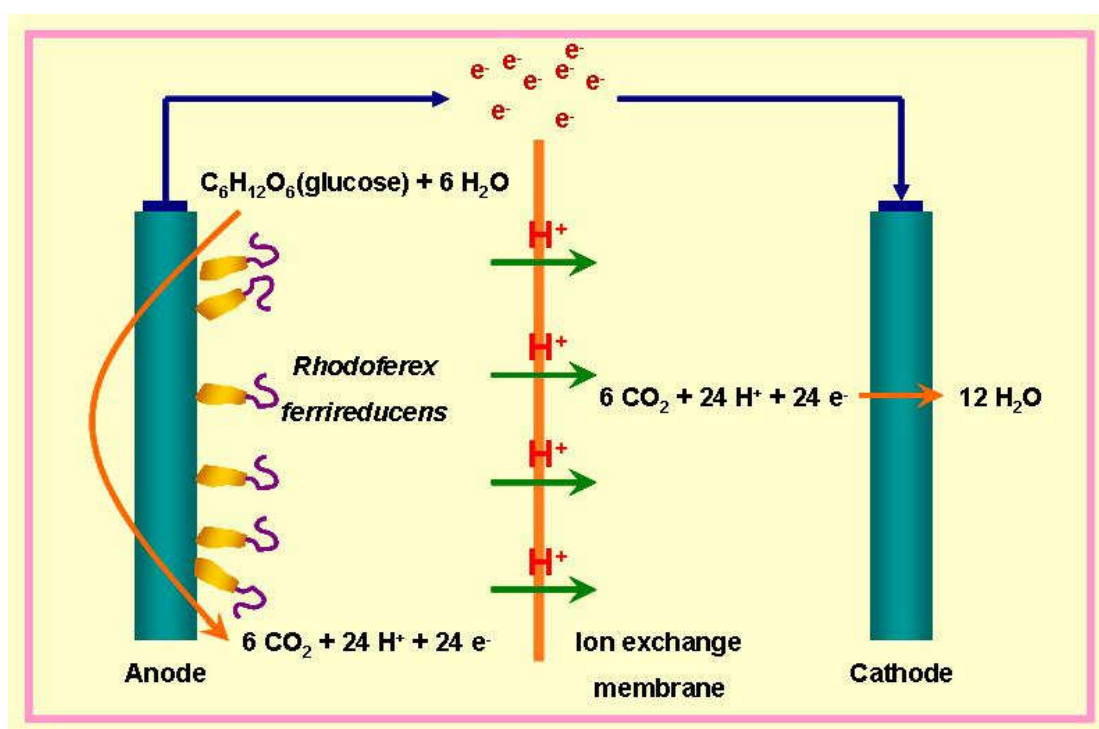
Delong, 1994) ได้มีการศึกษาพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารตัวกลาง โดยแบคทีเรียพวก *Shewanella putrefaciens* IR-1 เป็นแบคทีเรียชนิดแรกที่สามารถถ่ายทอดอิเล็กตรอนไปสู่ขั้วไฟฟ้าได้โดยตรงที่ถูกศึกษาโดย Kim *et al.* (2002) กระบวนการด้านไฟฟ้าเคมีเชื่อว่าเกี่ยวข้องกับตัวถ่ายอิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณพื้นผิวของเซลล์และเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยารีดักชันของตัวรับอิเล็กตรอนในธรรมชาติประเภทที่ไม่ละลายน้ำคือ Fe(III)

ในงานวิจัยดังกล่าวได้แสดงให้เห็นถึงการทำงานของ mediator-less MFC ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆหลายประการ (ภาพที่ 10) คือ 1) การออกซิไดซ์ซับสเตรตของจุลินทรีย์ในครึ่งเซลล์ของแอโนด 2) อัตราการไหลที่ไม่สม่ำเสมอของซับสเตรตเข้าสู่ครึ่งเซลล์แอโนด 3) การถ่ายทอดอิเล็กตรอนจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ไปยังขั้วไฟฟ้าแอโนด 4) การถ่ายเทโปรตอนจากครึ่งเซลล์แอโนดไปยังครึ่งเซลล์แคโทดผ่านทาง cation-specific membrane 5) ความต้านทานของวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด 6) การทำปฏิกิริยาของออกซิเจนในครึ่งแคโทด (gill *et al.*, 2003) และ 7) การแพร่ของโมเลกุลออกซิเจนจากครึ่งเซลล์แคโทดไปยังครึ่งเซลล์แอโนดผ่านทาง cation-specific membrane



ภาพที่ 10 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จะเกิดขึ้น โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ และเจริญเติบโตภายใต้สภาวะไร้อากาศ (anaerobic) ถึงอย่างไรก็ตามไม่พบว่ากิจกรรมของจุลินทรีย์จะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีอากาศ (aerobic) จากการสังเกตการเดินระบบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์โดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบ sequential batch พบว่าค่าคูลอมบิก (coulombic yield) และค่ากระแสสูงสุด (maximum current) จะค่อยๆเปลี่ยนแปลงลดลง แบบที่เรียกอีกชนิดหนึ่งที่พบว่าสามารถใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องใช้ตัวกลาง (mediator) คือ *Rhodofex ferrireducens* (Chaudhuri and Lovley, 2003) ซึ่งพบได้จากการแยกจากชั้นล่างของพื้ตะกอนของอ่าว Oyster ในรัฐเวอร์จิเนียประเทศสหรัฐอเมริกา โดยแบคทีเรีย *Rhodofex ferrireducens* จะแตกต่างจากแบคทีเรียที่ใช้ Fe(III) เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Fe(III) reducing bacteria) *R. ferrireducens* จะเจริญเติบโตโดยใช้กลูโคส (ภาพที่ 11) โดยสมการที่ 23 แสดงถึงปริมาณสัมพันธ์ (stoichiometry) ของกลูโคสและการรับอิเล็กตรอนของ Fe(III)



ภาพที่ 11 การทำงานของแบคทีเรีย *R. ferrireducens* ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

ที่มา: Scholz and Schroder (2003)

ในการทดสอบระบบจะประกอบไปด้วยถังปฏิกริยาภายในบรรจุ *E.coli* K12 ในสารอาหารมาตรฐานกลูโคส (55 มิลลิโมลลาร์กลูโคส) ที่เจริญเติบโตภายใต้สภาวะไร้อากาศ (anaerobic) และเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จะประกอบด้วยด้านแอโนดจะมีการบรรจุแบคทีเรียโดยผ่านปัม ส่วนในด้านแคโทดจะประกอบด้วยแท่งแกรไฟต์ทอ และสารเร่งปฏิกริยา 50 มิลลิโมลลาร์ของสารละลาย Ferric cyanide ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

การนำกลับของอิเล็กตรอนจากปฏิกริยาออกซิเดชันของกลูโคส 83 เปอร์เซ็นต์ ของทฤษฎีพบว่าใช้ได้ โดยการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะรองรับกับพลังงานที่ได้มาจากการขนถ่ายอิเล็กตรอน (electron transfer) ของตัวมันเอง และการวัดกำลังในระยะยาวผลที่ได้ค่อนข้างจะคงที่ โดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ประเภทนี้ก็มีข้อดีที่แตกต่างกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ประเภทอื่นครอบคลุมถึงความเหมาะสมต่อวงจรชีวิต และการสูญเสียความจุที่ต่ำในสภาวะ open-circuit นอกจากนี้ยังอยู่ภายใต้สภาวะอุดมคติ ดังที่ได้กล่าวมาการใช้สารตัวกลาง (mediator) ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เป็นการประยุกต์ใช้ที่ช่วยประหยัดในเรื่องค่าใช้จ่ายและความเป็นพิษของสารตัวกลาง (mediator) ที่เกิดขึ้น ในการใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบที่ไม่ใช้สารตัวกลาง (mediator) ถ้าระบบมีความสมบูรณ์ก็จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการขนถ่ายอิเล็กตรอนได้ (electron transfer) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 3 ค่า power output ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์โดยไม่ใช้สารตัวกลาง (Mediator-less microbial fuel cell)

Micro-organism	Substrate	Anode	Current (mA)	Power (mW/m ²)	Reference
<i>Shewanella putrefaciens</i>	lactate	Woven graphite	0.031	0.19	Kim <i>et al.</i> 2002
<i>Geobacter sulfurreducens</i>	acetate	graphite	0.40	13	Bond and lovley. 2003
<i>Rhodoferrax ferrireducens</i>	glucose	graphite	0.2	8	Chaudhuri and Lovley. 2003
	glucose	Woven graphite	0.57	17.4	Chaudhuri and Lovley. 2003

ตารางที่ 3 (ต่อ)

Micro- organism	Substrate	Anode	Current (mA)	Power (mW/m ²)	Reference
	glucose	Porous graphite	74	33	Chaudhuri and Lovley. 2003
Mixed seawater culture	acetate	graphite	0.23	10	Bond <i>et al.</i> 2002
	Sulphide / actate	graphite	60	32	Tender <i>et al.</i> 2002
Mixed active sludge culture	acetaet	graphite	5	-	Lee <i>et al.</i> 2003
	glucose	graphite	30	3600	Rabaey <i>et al.</i> 2003
	sewage	Woven graphite	0.2	8	Kim <i>et al.</i> 2004

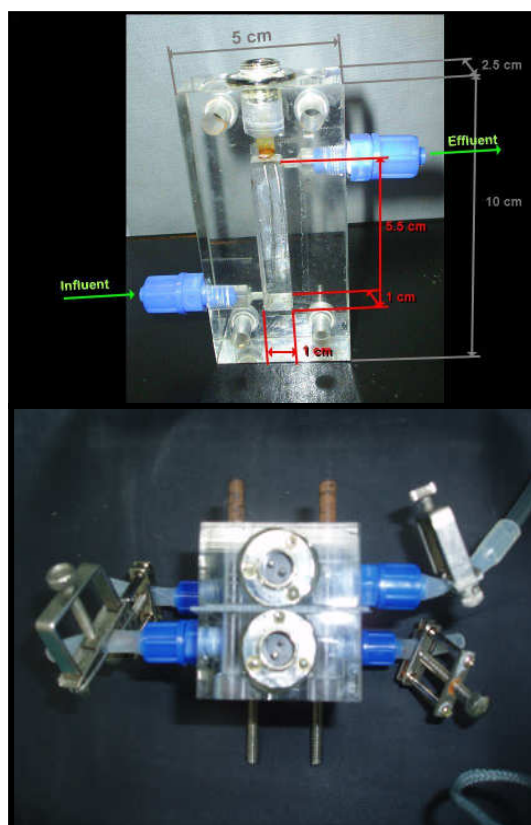
ที่มา: คัดแปลงมาจาก Rabaey *et al.*, (n.d.)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ในระบบการผลิตกระแสไฟฟ้า

1.1 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ประกอบด้วยด้านแคโทดและแอโนด ซึ่งในแต่ละด้านจะประกอบด้วยแผ่นคาร์บอนทำหน้าที่ให้จุลินทรีย์เกาะ ปริมาตรภายในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเท่ากับ 5.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยน้ำเสียจะไหลผ่านทางด้านแอโนดและน้ำที่อิ่มตัวด้วยออกซิเจนจะไหลผ่านทางด้านแคโทด โดยด้านบนของเซลล์จะเป็นขั้วสำหรับต่อสายเข้ากับเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (ภาพที่ 12)



ภาพที่ 12 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่ (Two Chamber Compartment)

1.2 ถังป้อนน้ำเสีย ประกอบด้วยขวดแก้วปริมาตร 10 ลิตร ด้านบนปิดด้วยจุกซิลิโคน เจาะรูเพื่อใส่สายยางต่อกับปั๊ม (ภาพที่ 13)



ภาพที่ 13 ถังป้อนน้ำเสีย

1.3 ถังบรรจุแก๊สไนโตรเจน ทำจากวัสดุประเภทพลาสติกเพื่อใช้เก็บแก๊สไนโตรเจนใช้ในการแทนที่น้ำในการทดลอง (ภาพที่ 14)



ภาพที่ 14 ถังบรรจุแก๊สไนโตรเจน

1.4 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (incubator) โดยสามารถควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25-70 องศาเซลเซียส (ภาพที่15)



ภาพที่ 15 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (incubator)

1.5 เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (Multi meter) ยี่ห้อ Keithley รุ่น 2701 (ภาพที่ 16)



ภาพที่ 16 เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (Multi meter)

1.6 peristaltic pump ยี่ห้อ Master flex ประกอบด้วย ปั๊มรุ่น 07524-40 และ หัวจ่ายรุ่น Easy-Load II Pump Head (ภาพที่ 17)



ภาพที่ 17 peristaltic pump

2. น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองแบ่งเป็น 3 ชนิดคือ

2.1 น้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ เตรียมได้จากการนำสารละลายเข้มข้นชนิดที่ 1 ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร และสารละลายเข้มข้นชนิดที่ 2 และ 3 อย่างละ 100 มิลลิลิตร (สารละลายแต่ละชนิดแสดงในภาคผนวก) ผสมรวมกับน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 9 ลิตร เติมกลูโคส และกลูตามิก ตามความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลอง (ตารางแสดงความเข้มข้นน้ำเสียแสดงในภาคผนวก) ปรับปริมาตรสุดท้ายให้เป็น 10 ลิตร (น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจะมีค่าพีเอชประมาณ 7.5-7.8) ปรับพีเอชให้ได้ในช่วง 7.00 ± 0.01 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 6 M หรือสารละลาย HCl เข้มข้น 6 M วัดค่าพีเอชด้วยเครื่องวัดพีเอช ยี่ห้อ (EUTECH INSTRUMENTS) ปิดฝาด้วยจุกซิลิโคนนำไปฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Autoclave (TOMY, model ES-315) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 1.2 กิโลกรัม ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปใส่แก๊สออกซิเจนด้วย แก๊สไนโตรเจน 99.95 % เป็นเวลา 15 นาที (ภาพที่ 18)



ภาพที่ 18 น้ำเสียสังเคราะห์

2.2 น้ำกากส่า

น้ำกากส่าที่ใช้ในการวิจัยเป็นน้ำกากส่าที่ได้จาก บริษัท สุรา บางยี่ขัน โดยมีการปรับสภาพก่อนนำไปใช้ในการทดลองด้วยการผสมบัฟเฟอร์และปรับให้พีเอชให้เท่ากับ 7 จากนั้นนำไปกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกซิเจนที่อยู่ในขวดโดยการแทนที่ด้วยแก๊สไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที โดยน้ำกากส่าที่ใช้ในการทดลองมีค่าบีโอดีอยู่ในช่วง 60,000 – 64,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 180,000 – 190,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 19)



ภาพที่ 19 น้ำกากส่า

2.2 น้ำเสียโรงอาหาร

น้ำเสียโรงอาหารที่ใช้ในการวิจัยเก็บจากบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงอาหารกลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยมีการปรับสภาพก่อนนำไปใช้ในการทดลองด้วยการผสมบัฟเฟอร์และปรับให้พีเอชเท่ากับ 7 จากนั้นนำไปกำจัดแก๊สออกซิเจนที่อยู่ในขวดโดยการแทนที่ด้วยแก๊สไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที โดยน้ำเสียโรงอาหารมีค่าบีโอดีอยู่ในช่วง 2,400 – 2,600 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 6,000 – 6,500 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 20)



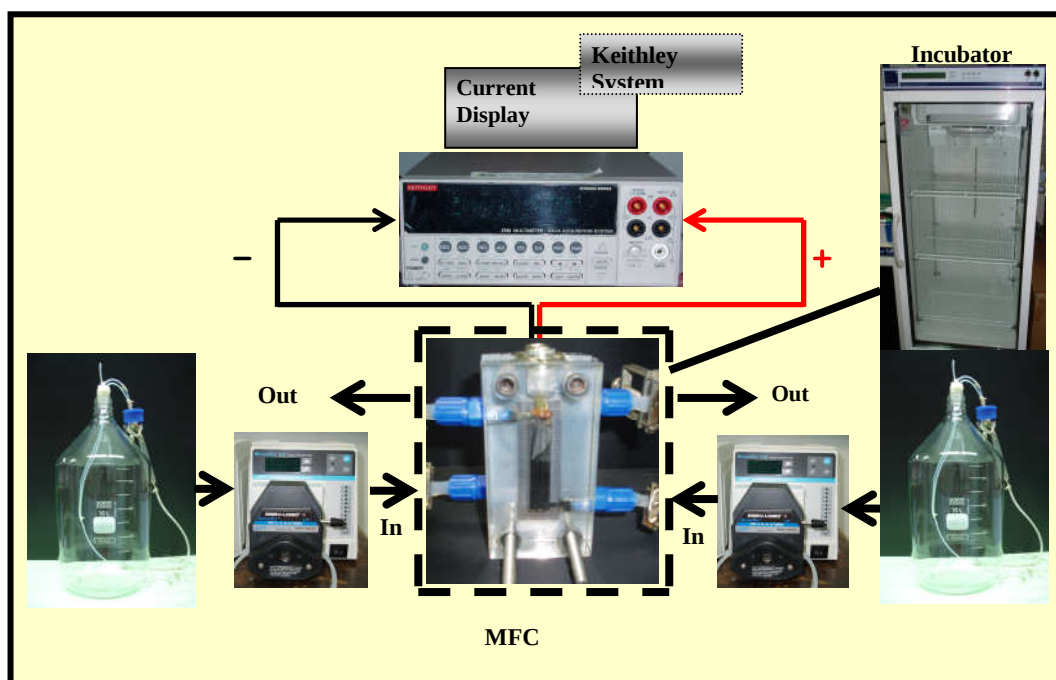
ภาพที่ 20 น้ำเสียโรงอาหาร

3. จุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากถังบำบัดน้ำเสียแบบ UASB ที่โรงงานเส้นหมี่ช่อเสง จำกัด ตำบลยายชา อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม (ภาพที่ 21)



ภาพที่ 21 ตะกอนจุลินทรีย์



ภาพที่ 22 การเดินระบบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

4. สารละลายมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าซีโอดี (APHA, n.d.)

สารละลายมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าซีโอดี ประกอบด้วย

4.1 สารละลายใช้ย่อย (Digestion solution)

ละลายโปตัสเซียมไดโครเมตซึ่งอบแห้งที่ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หนัก 10.216 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดกำมะถันเข้มข้น 167 มิลลิลิตร และปรอทซัลเฟต 33.3 กรัม คนให้ละลายปล่อยให้เย็น แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร (สารละลายใช้ย่อยไม่จำเป็นต้องมีความเข้มข้นที่แน่นอน แต่ตัวอย่างน้ำและตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้เตรียมกราฟมาตรฐานจะต้องใช้สารละลายใช้ย่อยขวดเดียวกันเสมอ)

4.2 กรดซัลฟูริกและซิลเวอร์ซัลเฟต

ซังซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) 8.8 กรัม ใส่ลงในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1-2 วัน เพื่อให้ซิลเวอร์ซัลเฟตละลายได้ทั้งหมด ก่อนนำไปใช้ต่อไป

4.3 สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (KHP)

บด KHP เพื่อลดขนาดลงและนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส จนแห้งและมีน้ำหนักคงที่ แล้วละลาย KHP ที่บดและอบแห้งแล้ว 850 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น เจือจางให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร สารละลายนี้มีซีโอดีเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถเก็บรักษาในตู้เย็นได้นานไม่เกิน 3 เดือน

5. สารละลายมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าบีโอดี (APHA, n.d.)

สารละลายมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าบีโอดี ประกอบด้วย

5.1 สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

ชั่ง Monobasic potassium phosphate (KH_2PO_4)	8.5	กรัม
Dibasic potassium phosphate (K_2HPO_4)	21.75	กรัม
Dibasic sodium phosphate ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	33.4	กรัม
Ammonium chloride (NH_4Cl)	1.7	กรัม

ละลายสารทั้งหมดในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร

สารละลายนี้ควรมีพีเอช 7.2 โดยไม่ต้องปรับ ถ้าสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดใดมีร่องรอยการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ให้ทำการเตรียมใหม่

5.2 สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ละลาย $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 22.5 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางให้ได้ 1 ลิตร

5.3 สารละลายแคลเซียมคลอไรด์

ละลาย CaCl_2 27.5 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางให้ได้ 1 ลิตร

5.4 สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์

ละลาย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.25 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางให้ได้ 1 ลิตร

5.5 สารละลายกรด-ด่าง 1 นอร์มอล สำหรับการปรับสภาพ pH ของตัวอย่าง

Acid – เติม H_2SO_4 28 มล. ลงในน้ำกลั่น (ณ ขณะที่เติมกรดทีละน้อย) แล้วเจือจางให้ได้ 1 ลิตร

Alkali – ละลาย NaOH 40 กรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร

5.6 ตัวยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification inhibitor)

2-chloro-6-(trichloro methyl) pyridine

5.7 น้ำเจือจาง

- เตรียมตัวอย่างปริมาณที่ต้องการใช้ไว้ในขวดสะอาด
- เตรียม สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ แมกนีเซียมซัลเฟต แคลเซียมคลอไรด์ และ เพอริกคลอไรด์ อย่างละ 1 มล. ต่อน้ำกลั่น 1 ลิตร
- ก่อนจะนำไปใช้เพื่อเจือจางตัวอย่าง ต้องปรับให้น้ำมีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ก่อน จากนั้นทำให้ออกซิเจนละลายจนอิ่มตัวในน้ำ อาจทำได้โดยเขย่าขวดที่มีน้ำอยู่เพียงครึ่งขวดแรงๆ หรือ ใช้เครื่องเติมอากาศที่ผ่านการกรอง หรือ เก็บน้ำไว้ในขวดที่ปิดปากขวดด้วยสำลีเป็นเวลาานพอที่น้ำจะอิ่มตัวด้วยออกซิเจน
- ควรตรวจสอบคุณภาพน้ำเจือจางด้วย โดยการหา DO_0 และ DO_5 ของน้ำเจือจาง ค่า DO uptake ในช่วง 5 วันของการบ่มไม่ควรเกิน 0.2 มก./ลิตร

ตารางที่ 4 การเลือกขนาดตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วง BOD ต่างๆ

ปริมาณตัวอย่าง(มล.)	ช่วง BOD (มก./ล)	อัตราการเจือจาง
0.02	30,000-105,00	15,000
0.05	12,000-42,000	6,000
0.10	6,000-21,000	3,000
0.20	3,000-10,500	1,500
1.0	600-2,100	300
2.0	300-1,050	150
5.0	120-420	60

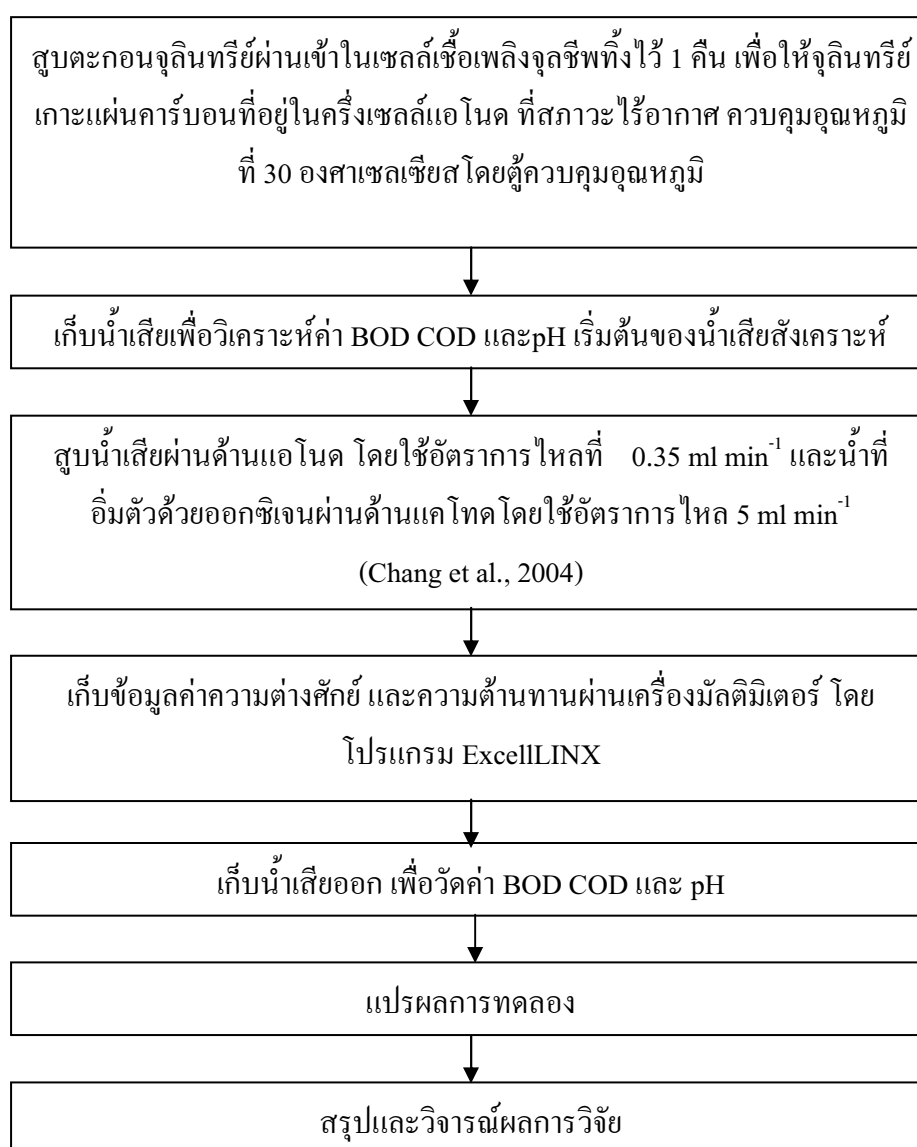
ตารางที่ 4 (ต่อ)

ปริมาณตัวอย่าง(มล.)	ช่วง BOD (มก./ล)	อัตราการเจือจาง
10.0	60-210	30
20.0	30-105	15
50.0	12-42	6
100	6-21	3
300	0-7	1

ที่มา: มั่นสิน, (2543)

วิธีการ

1. แผนผังวิธีการวิจัย



ภาพที่ 23 แผนภูมิการทดลอง

2. สภาพที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียชนิดต่างๆผ่านเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ควบคุมระบบให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศ โดยทำการไล่แก๊สออกซิเจนที่อยู่ในขวดน้ำเสียโดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที ควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียสโดยตู้ควบคุมอุณหภูมิ อัตราการไหลด้านแอโนดเท่ากับ 0.35 มิลลิลิตรต่อนาที มีระยะเวลาเก็บกักน้ำเท่ากับ 15.71 นาที และอัตราการไหลด้านแคโทดเท่ากับ 5 มิลลิลิตรต่อนาที มีระยะเวลาเก็บกักน้ำด้านแคโทดกับ 1.1 นาที

3. วิธีการทดลอง

เริ่มต้นการทดลองโดยสูบลูนิทรีเข้าสู่ระบบ ทิ้งลูนิทรีไว้ประมาณ 1 คืน เพื่อให้ลูนิทรีปรับตัวสภาพ และเกาะตัวกับแผ่นคาร์บอน จากนั้นสูบน้ำเสียที่อัตราการไหล 0.35 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้นบีโอดี 125 มิลลิกรัมต่อลิตรเพื่อให้ลูนิทรีปรับตัว โดยศึกษาจากแนวโน้มของกระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่แสดงว่าลูนิทรีปรับตัวเข้ากับน้ำเสียที่เข้าระบบแล้ว จากนั้นจึงเริ่มเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 250, 400, 600, 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แล้วจึงเปลี่ยนชนิดของน้ำเสียเป็นน้ำกากส่า และน้ำเสียโรงอาหารที่ความเข้มข้นต่างๆตามลำดับ

4. ปัจจัยที่ทำการศึกษา

4.1 กระแสไฟฟ้า

วัดปริมาณกระแสไฟฟ้าโดยใช้เครื่องวัดกระแสไฟฟ้ายี่ห้อ Keithley รุ่น 2701 โดยจะบันทึกค่าอัตโนมัติผ่านโปรแกรม ExceLINX ซึ่งค่าที่วัดได้จะอยู่ในรูปของความต่างศักย์ไฟฟ้า และความต้านทานไฟฟ้า จากนั้นแปลผลเป็นค่ากระแสไฟฟ้า

4.2 พีเอช

การวัดค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดพีเอช (EUTECH INSTRUMENTS รุ่น Cyberscan pH 11) จุ่มลงในน้ำตัวอย่างที่เก็บมาตามจุดต่างๆที่แสดงไว้ใน

ข้างต้นเพื่อทำการตรวจวัดโดยรองนกว่าค่าจะคงที่ซึ่งจะมีคำว่า read ปรากฏขึ้นบนหน้าจอ แล้ว
จึงทำการแปรผลที่ได้อ่านค่าพีเอชเพื่อทำการบันทึกผล

4.3 ค่าซีโอดี

การวัดค่าซีโอดีในการวิจัยนี้วิเคราะห์ด้วยวิธีรีฟรักส์แบบเทียบสี โดยรายละเอียดการ
วิเคราะห์แสดงในภาคผนวก

4.4 ค่าบีโอดี

การวัดค่าบีโอดีในการวิจัยนี้วิเคราะห์ด้วยวิธี Dilution method โดยรายละเอียดการ
วิเคราะห์แสดงในภาคผนวก

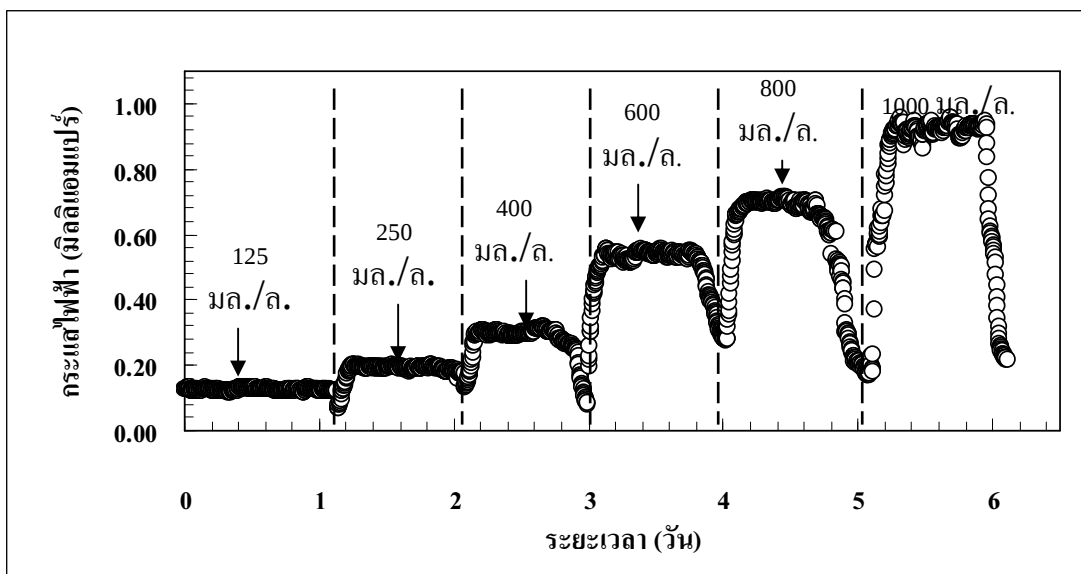
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยใช้ น้ำเสียต่างกัน 3 ชนิดเป็นสารตั้งต้น และทำการทดลองที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กัน บันทึกปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น หน่วยเป็น มิลลิแอมแปร์ จากการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องบันทึกกระแสไฟฟ้าอัตโนมัติ โดยทำการ บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าทุก 5 นาที จากนั้นเฉลี่ยผลการวิจัยข้างต้น ทำการบันทึกค่าเฉลี่ยของ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละความเข้มข้นและแต่ละชนิดน้ำเสีย เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ กระแสไฟฟ้ากับระดับความเข้มข้นและชนิดของน้ำเสีย ผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

1. การผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำกากส่าและน้ำเสียโรงอาหาร

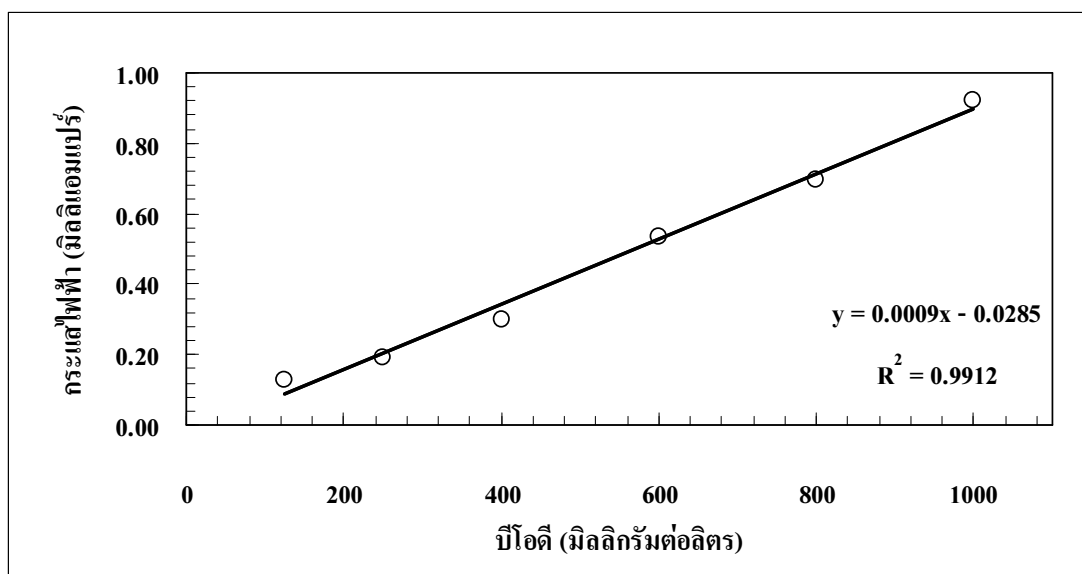
ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นสารตั้งต้น พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้า ที่ผลิตได้แปรผันตรงกับค่าบีโอดีของน้ำเสีย (ภาพที่ 24) ซึ่งแสดงว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่เพิ่มมากขึ้นมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จากปฏิกิริยาการย่อยสลายของจุลินทรีย์จะเกิดอิเล็กตรอน และโปรตอนขึ้นที่ขั้วแอโนด ความเข้มของอิเล็กตรอนและโปรตอนนั้นจะสัมพันธ์กับปริมาณความ เข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ถูกใช้ในปฏิกิริยาการย่อยสลาย โดยอิเล็กตรอนจะถูกถ่ายทอดไปสู่ขั้วนำ ไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ซึ่งหมายความว่าปริมาณของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านขั้วไฟฟ้าไป รวมตัวกับออกซิเจนในฝั่งแคโทดทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นนั่นเอง และปริมาณความเข้มของ อิเล็กตรอนที่สูงขึ้นมีผลให้กระแสไฟฟ้าสูงขึ้นเช่นกัน

ในการเดินระบบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ในแต่ละช่วงที่เพิ่มความเข้มข้นค่าบีโอดีของน้ำ เสียพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงแรกนั้น อธิบายได้ว่าเป็นช่วงที่ จุลินทรีย์ทำความคุ้นเคยต่อสารอินทรีย์ในน้ำเสีย หรือช่วงปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อม (Lag Phase) ถัดมาจะพบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นช่วงที่จุลินทรีย์มีอัตรา เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีอัตราเมตาบอลิซึมเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งเป็นช่วง Exponential Phase ถัดมา จะพบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากช่วงนี้เป็นช่วงที่เชื้อจุลินทรีย์มี อัตราการเจริญเติบโตสมดุลกับอัตราการตาย หรือช่วง Stationary Phase และช่วงสุดท้ายเป็นช่วงที่ สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายจนเกือบหมดดังนั้นจึงเกิดสภาพคลาดแคลนอาหาร แต่เนื่องจากในการ ทดลองเป็นการเดินระบบแบบต่อเนื่องจึงไม่เกิดปัญหาเรื่องการคลาดแคลนอาหาร



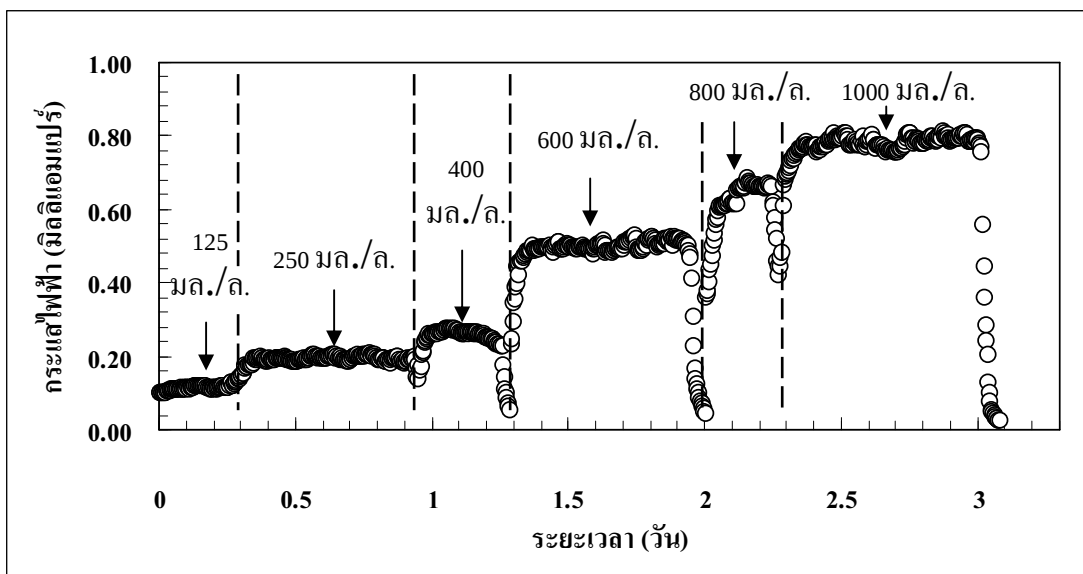
ภาพที่ 24 แนวโน้มกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยกับความเข้มข้นบีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของบีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์อย่างเป็นเส้นตรง ดังภาพที่ 25 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chang et al. (2004) ที่ทำการทดลองที่สภาวะการทดลองที่คล้ายกัน คือที่อัตราการไหล 0.35 มิลลิเมตรต่อนาที่ และใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นสารตั้งต้นที่ค่าบีโอดีของน้ำเสียตั้งแต่ 20 ถึง 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีวะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพล็อตกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นบีโอดีพบว่ามีความสัมพันธ์เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง เนื่องจากปริมาณชีวมวลที่สูงขึ้นในระบบมีผลต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากค่าบีโอดีที่สูงขึ้น

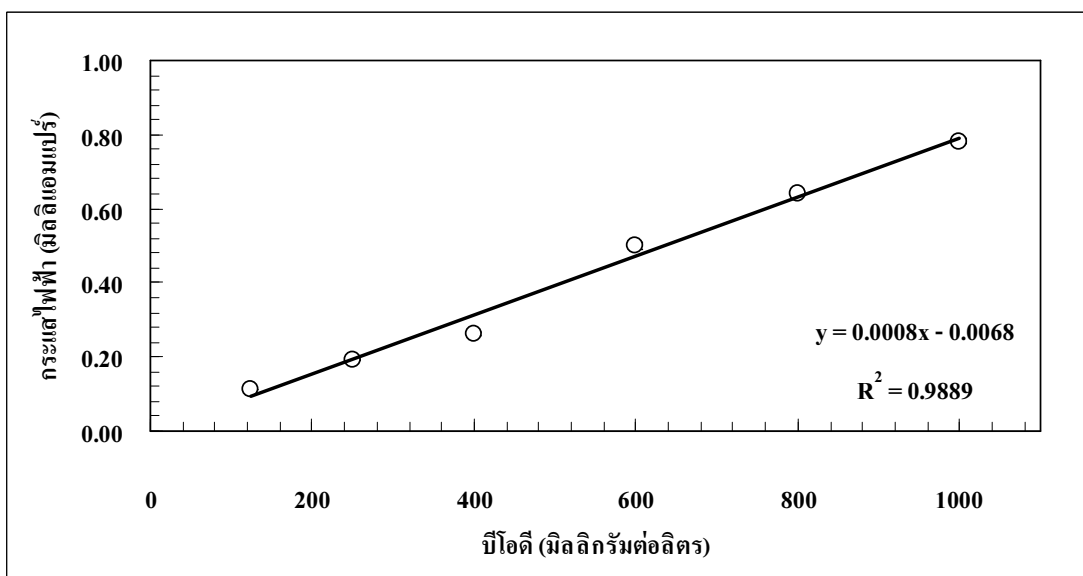


ภาพที่ 25 ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากการวิจัยโดยใช้น้ำกากส่าเป็นสารตั้งต้น พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นค่าบีโอดีของน้ำกากส่า ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าจะลดต่ำลงในช่วงการเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำเสียเนื่องจากจุลินทรีย์มีการปรับตัวให้เข้ากับความเข้มข้นที่สูงขึ้นของน้ำกากส่า จากนั้นจึงจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) โดยเมื่อจุลินทรีย์ปรับตัวเข้ากับน้ำเสียแล้วสามารถสังเกตได้จากค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีอัตราคงที่ (ภาพที่ 26) และเมื่อพล็อตกราฟระหว่างค่าบีโอดีของน้ำกากส่ากับค่ากระแสไฟฟ้าพบว่ามีความสัมพันธ์เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงตามปริมาณบีโอดีที่สูงขึ้น (ภาพที่ 27)

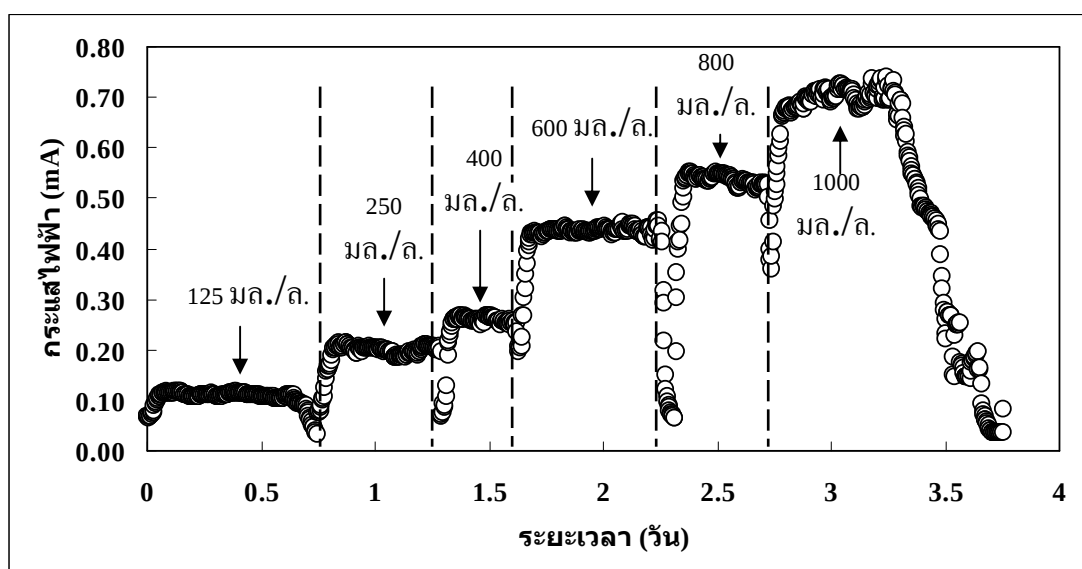


ภาพที่ 26 แนวโน้มกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากน้ำกากส่าที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

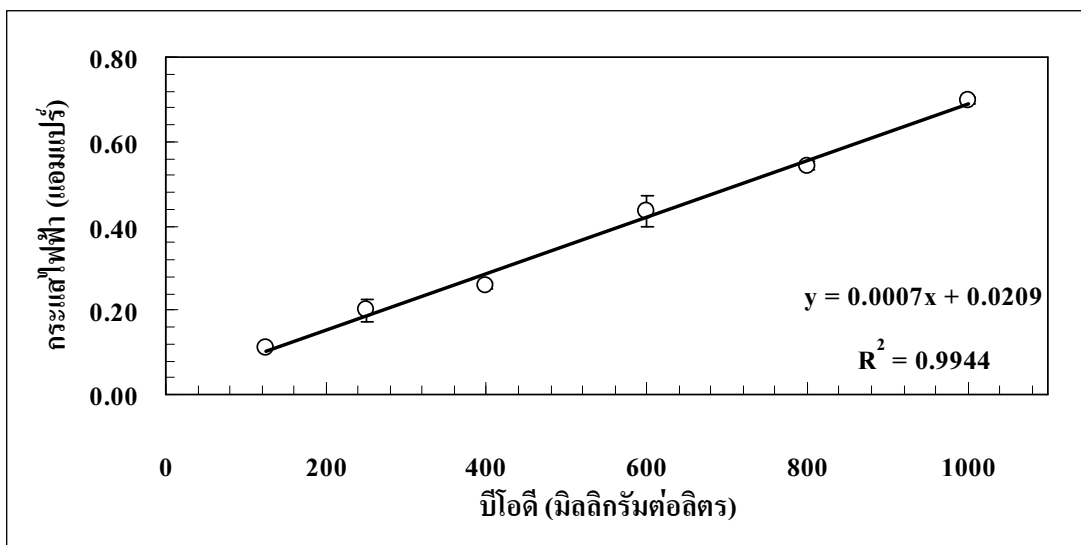


ภาพที่ 27 ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากน้ำกากส่าที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้น้ำเสียโรงอาหารเป็นสารตั้งต้น พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้แปรผันตรงกับค่าบีโอดีของน้ำเสีย (ภาพที่ 28) ซึ่งเมื่อศึกษาจากการทดลองของ Gill *et al.* (2003) ที่ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งที่พีเอช 7 อัตราการไหลที่ 10 มิลลิลิตรต่อนาที่ และความต้านทานของระบบที่ 1,000 โอห์ม พบว่าที่ซีโอดี 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 0.21 มิลลิแอมแปร์ โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพในการวิจัยโดยใช้น้ำเสียโรงอาหารซึ่งมีความใกล้เคียงกันในด้านส่วนประกอบพบว่าสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 0.26 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งสูงกว่ากระแสที่ได้จากน้ำเสียแป้งเล็กน้อย เนื่องมาจากสถานะที่ใช้ในการทดลองมีความแตกต่างกันเล็กน้อยคือ ใช้ อัตราการไหล และความต้านทานที่แตกต่าง ซึ่งปัจจัยทั้ง 2 มีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เช่นการที่อัตราการไหลสูงจะส่งผลกระทบเวลาเก็บน้ำค่าทำให้เวลาในการที่จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์น้อย เมื่อทำการเปรียบเทียบจุลินทรีย์บริสุทธิ์ (Pure Culture) เช่น *Shewanella putrefaciens* ในสถานะที่พีเอชเท่ากับ 7 ได้ค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.04 มิลลิแอมแปร์ (Kim *et al.*, 2002) ซึ่งแตกต่างจากค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากน้ำเสียทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวมาข้างต้นพอสมควร ทั้งนี้เพราะในระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพใช้จุลินทรีย์ผสม (Mixed Culture) ซึ่งมีการปรับสภาพในสถานะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้ดีกว่าซึ่งอาจส่งผลถึงปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้ให้มีความแตกต่างกัน



ภาพที่ 28 แนวโน้มกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียโรงอาหารที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

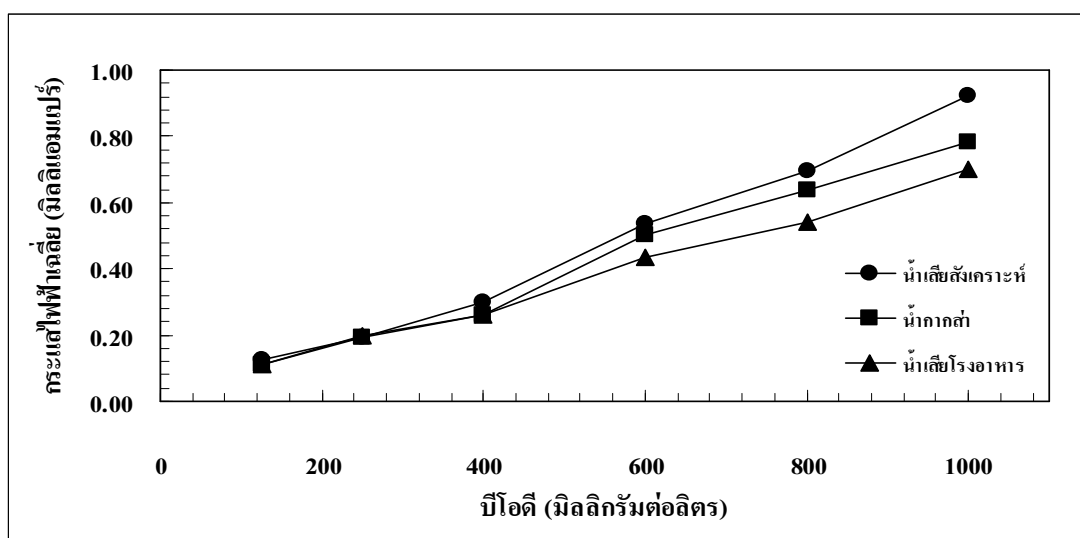


ภาพที่ 29 ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียโรงอาหารที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

จากการศึกษาการทดลองของ Chang *et al.* (2004) พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าจะเริ่มเข้าสู่ภาวะคงตัวใหม่หลังจากเวลาผ่าน 1 ชั่วโมงไปแล้ว ซึ่งจากการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ น้ำกากส่า และน้ำเสียโรงอาหาร สอดคล้องกับการศึกษาข้างต้นกล่าวคือระบบจะปรับตัวเข้าสู่ภาวะคงตัวใหม่เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นหลังผ่าน 1 ชั่วโมงไปแล้วดังภาพที่ 24, 26 และ 28

จากภาพที่ 24, 26 และ 28 พบว่าเมื่อสูบน้ำเสียเข้าระบบไปสักระยะหนึ่ง กระแสไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดต่ำลง จากนั้นจึงจะเริ่มเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระยะคงตัว เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะในการทดลองสายยางที่ใช้ในการสูบน้ำเสียมีขนาด 13 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดของสายยางจะมีความจำเพาะเจาะจงกับอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำ คือที่ 0.35 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งสายยางมีขนาดเล็กมากเมื่อสูบน้ำเสียผ่านไปสักระยะสายยางที่จะเกิดเมือกและอุดตันในสายยาง ทำให้อัตราการไหลที่เข้าสู่ระบบไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ใช้เป็นแหล่งอาหารลดลง จึงมีผลทำให้แนวโน้มของกราฟกระแสไฟฟ้าตกลง จำเป็นต้องหยุดระบบเพื่อทำการรีดตะกอนของน้ำเสียที่ไปอุดตันในเส้นท่อซึ่งจากเหตุดังกล่าวนี้เองทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้ามีในแต่ละช่วงความเข้มข้นลดต่ำลงในช่วงท้ายๆ

จากการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อปล่อยน้ำเสียเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำเสียชนิดต่างๆ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 30 โดยน้ำเสียสังเคราะห์สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงที่สุด คือ 0.92 มิลลิแอมแปร์ ที่ความเข้มข้นค่าซีโอดีของน้ำเสีย 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมาคือน้ำกากส่า และน้ำเสียโรงอาหาร โดยได้ค่ากระแสไฟฟ้า 0.78 และ 0.69 มิลลิแอมแปร์ ที่ความเข้มข้นค่าซีโอดีของน้ำเสีย 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ (ตารางที่ 4) เมื่อใช้น้ำเสียจริงซึ่งได้แก่น้ำกากส่า และน้ำเสียโรงอาหารเป็นสารตั้งต้น พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้แปรผันตรงกับค่าบีโอดีของน้ำเสียเช่นเดียวกับน้ำเสียสังเคราะห์ (ภาพที่ 27 และ 29) หากแต่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าต่ำกว่าที่ผลิตได้จากน้ำเสียสังเคราะห์ (ภาพที่ 30) เนื่องจากแหล่งคาร์บอนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายคือ กลูโคสและกลูตามิก ซึ่งเป็นสารที่ย่อยสลายง่าย จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้โดยตรง ต่างจากน้ำกากส่าที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบซึ่งมีองค์ประกอบย่อยสลายได้ยากกว่าเช่น ส่วนที่เป็นสีน้ำตาลของน้ำกากส่าซึ่งเป็นสารพวกเมลานอยดิน (Melanoidins)(Veronica, 1997) เป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยโพลีเมอร์ของน้ำตาลและกรดอะมิโน ซึ่งยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ เช่นเดียวกับน้ำเสียโรงอาหารที่สารอินทรีย์ประกอบไปด้วยพวก คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน โดยพวกเซลลูโลสและไขมันเป็นส่วนที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากมาก ทำให้อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจริงมีค่าต่ำกว่าที่จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียสังเคราะห์ อีกทั้งสารบางชนิดในน้ำเสียจริงยังมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ทำให้กระแสไฟฟ้าของน้ำกากส่าและน้ำเสียโรงอาหารที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากน้ำเสียสังเคราะห์ (ภาพที่ 30)



ภาพที่ 30 การเปรียบเทียบระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำกากส่า และน้ำเสียโรงอาหาร

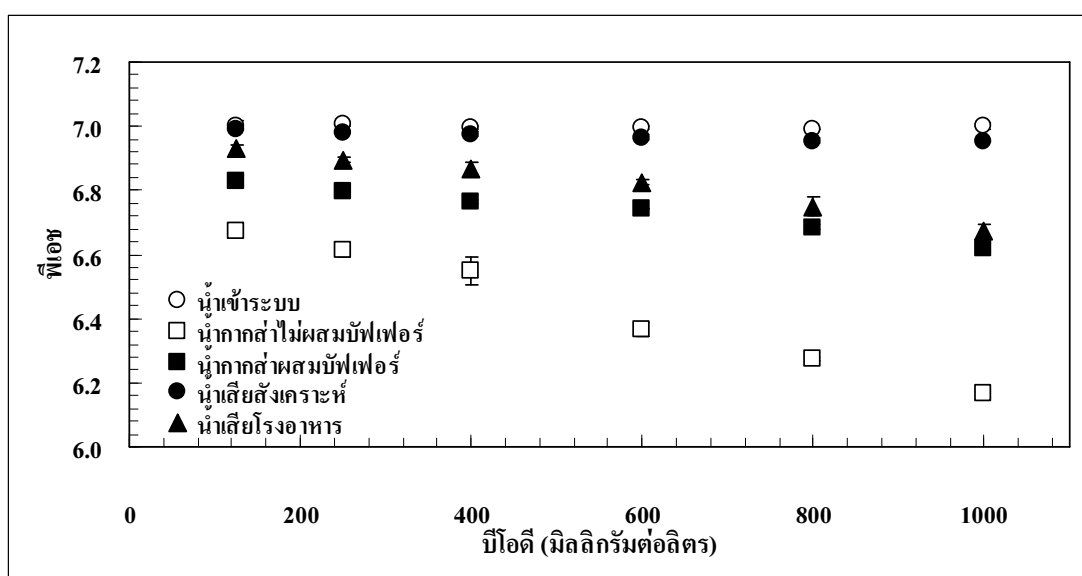
ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดยใช้น้ำเสียชนิดต่างๆ

BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (มิลลิแอมแปร์) ¹		
	น้ำเสียสังเคราะห์	น้ำกากส่า	น้ำเสียโรงอาหาร
125	0.13	0.11	0.11
250	0.19	0.19	0.20
400	0.30	0.26	0.26
600	0.54	0.50	0.44
800	0.69	0.64	0.54
1000	0.92	0.78	0.70

หมายเหตุ ¹ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเฉลี่ยจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจำนวน 2 เซลล์

2. อิทธิพลของความแปรปรวนของพีเอชต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า

ในการศึกษากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ น้ำกากส่า และน้ำโรงอาหารเป็นสารตั้งต้น ซึ่งในการทดลองมีการปรับพีเอชให้เป็นกลางและผสมบัฟเฟอร์ควบคุมพีเอชที่ 7.0 จากการวิจัยพบว่าน้ำเสียสังเคราะห์มีการเปลี่ยนแปลงของพีเอชของน้ำเสียน้อยที่สุดคืออยู่ในช่วง 6.99 – 6.95 ในขณะที่เดียวกันน้ำกากส่าที่ไม่ผสมบัฟเฟอร์มีการเปลี่ยนแปลงของพีเอชของน้ำเสียมากที่สุด คืออยู่ในช่วง 6.68 – 6.17 การที่พีเอชของน้ำเสียที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีค่าลดลงเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ของตัวจุลินทรีย์เอง ซึ่งเป็นการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เกิดขึ้นคือกรดอินทรีย์และ H^+ โดยผลิตภัณฑ์ทั้งคู่นี้มีความเป็นกรดอาจทำให้ค่าพีเอชภายในระบบลดลง ถึงแม้จะมีบัฟเฟอร์ควบคุมอยู่ก็ตาม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบน้ำเสียในแต่ละชนิด ค่าพีเอชน้ำเสียที่ผสมบัฟเฟอร์จะมีค่าลดลงต่ำกว่าน้ำเสียที่ไม่ผสมบัฟเฟอร์ (ภาพที่ 31)

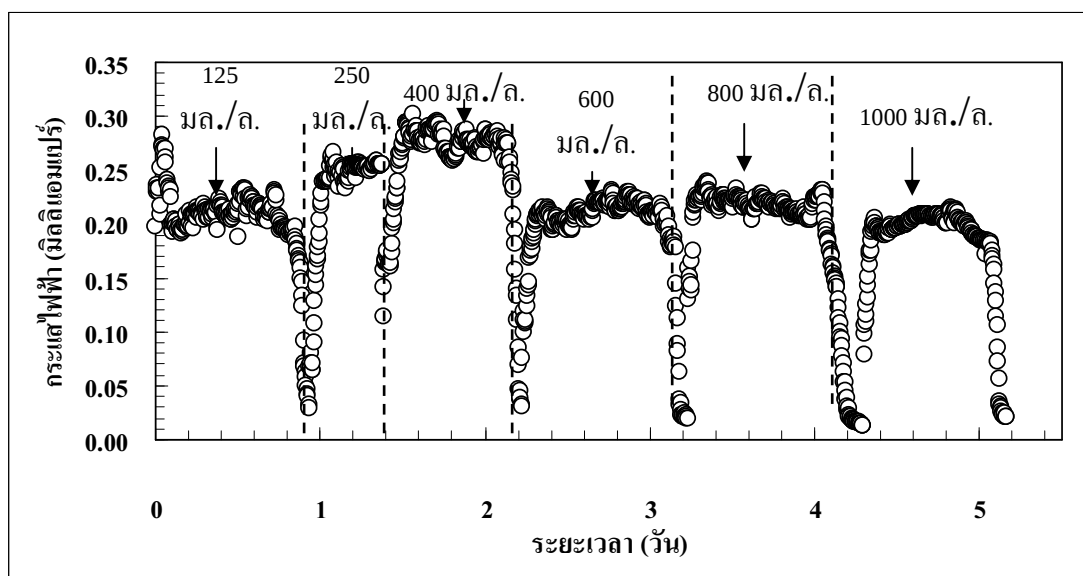


ภาพที่ 31 ค่าพีเอชที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1000 ตามลำดับ

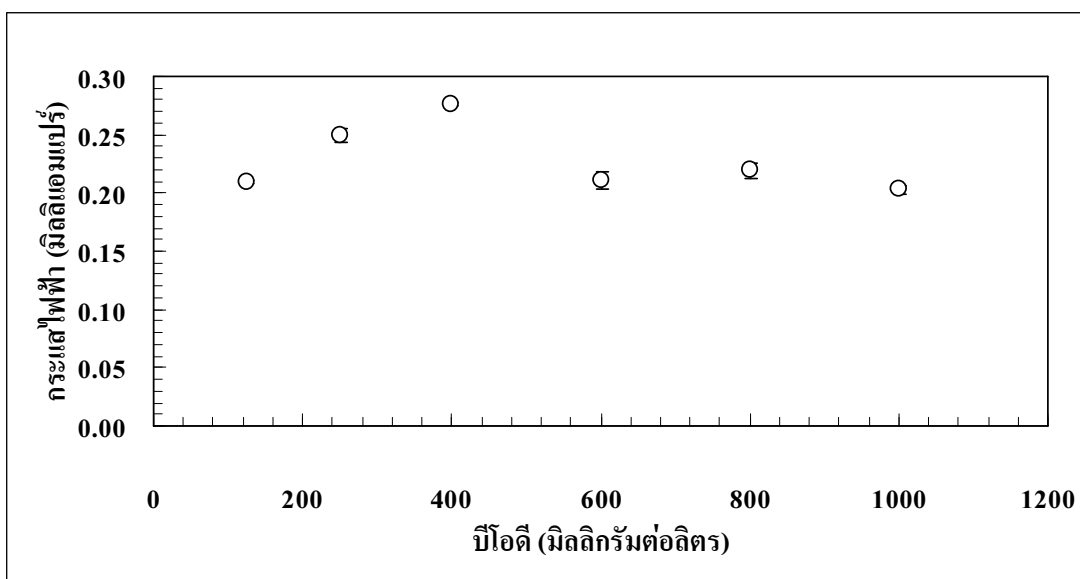
ในสภาวะการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนค่าพีเอชที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการย่อยสลายได้ดีที่สุดมีค่าประมาณ 6.5 – 7.5 ซึ่งเช่นเดียวกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ในการวิจัยซึ่งเป็นระบบแบบไร้อากาศค่าพีเอชโดยการศึกษาของ Gill *et al.* (2003) ระบุว่าค่าพีเอชที่ทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงที่สุดคือที่พีเอชเท่ากับ 7.0 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง พบว่าน้ำเสีย

สังเคราะห์มีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชน้อยที่สุด และมีแนวโน้มของกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดในทุกความเข้มข้นของบีโอดีของน้ำเสีย

ผลของความแปรปรวนพีเอชที่มีต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยจากทดลองน้ำกากส่าที่ไม่มีการผสมบัฟเฟอร์ พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้ามีความแปรปรวนสูง และแนวโน้มไม่แปรผันตรงกับค่าบีโอดีที่เพิ่มสูงขึ้น (ภาพที่ 32 และภาพที่ 33) ต่างจากน้ำกากส่าที่ผสมบัฟเฟอร์ (ภาพที่ 26) เนื่องจากเมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็น H^+ ส่งผลให้ค่าพีเอชในระบบลดต่ำลง และจากการที่ปริมาตรในระบบมีขนาดเล็กคือ 5.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำให้ค่าพีเอชในระบบเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์เป็นสาเหตุให้กระแสไฟฟ้าของน้ำกากส่าที่ปราศจากบัฟเฟอร์มีแนวโน้มไม่เพิ่มตามความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่สูงขึ้น



ภาพที่ 32 แนวโน้มกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากน้ำกากส่าที่ไม่ได้ผสมบัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ



ภาพที่ 33 ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากน้ำกากส่าที่ไม่ได้ผสมบัพเฟอร์ที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

3. ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีและซีโอดีของน้ำเสียโดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

ในการตรวจวัดปริมาณสารประกอบอินทรีย์ในแหล่งน้ำ พารามิเตอร์ที่จำเป็นในการชี้วัดความสกปรกในแหล่งน้ำคือ ค่าบีโอดีและซีโอดี จากตารางที่ 6 แสดงให้เห็นอัตราส่วนของบีโอดีต่อซีโอดีของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบ ซึ่งอัตราส่วนระหว่างบีโอดีต่อซีโอดีจะแสดงถึงความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำเสียนั้น โดยถ้าอัตราส่วนมีค่าสูงหมายถึงน้ำเสียชนิดนั้นสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์มีอัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดีสูงที่สุด แสดงว่าน้ำเสียสังเคราะห์สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีที่สุด และพบว่าอัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบและออกระบบมีแนวโน้มลดลงซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ และส่วนที่เหลืออยู่จากปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ก็คือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก และสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ ซึ่งเป็นส่วนที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวมาในส่วนข้างต้น

ตารางที่ 6 อัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดีของน้ำเสียเข้าและออกจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ช่วงความเข้มข้นบีโอดีต่างๆ

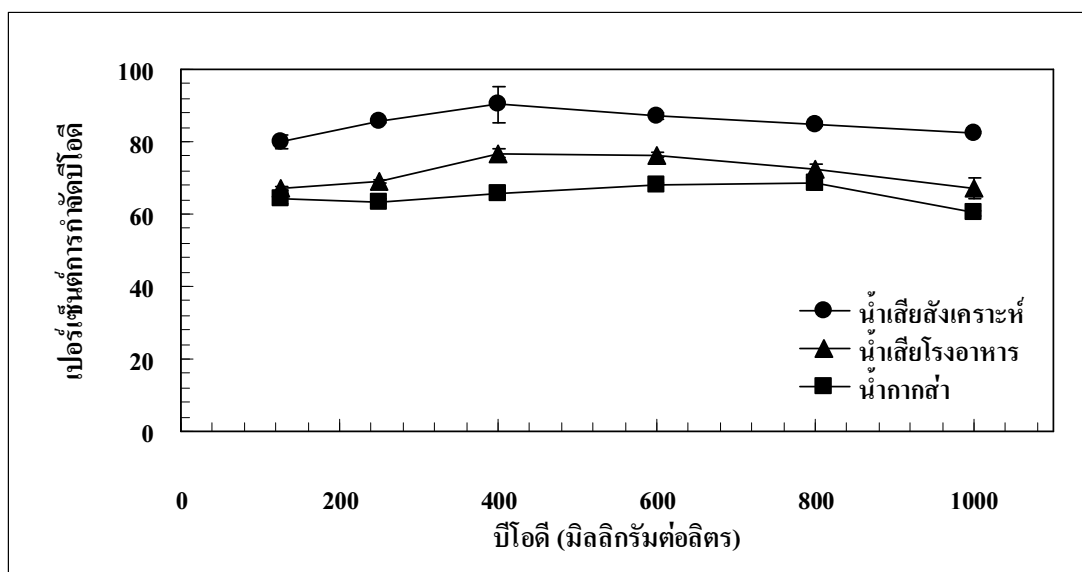
ช่วงบีโอดี น้ำเสียที่เข้า ระบบ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	อัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดี					
	น้ำเสียสังเคราะห์		น้ำเสียโรงอาหาร		น้ำกากส่า	
	เข้าระบบ	ออกระบบ	เข้าระบบ	ออกระบบ	เข้าระบบ	ออกระบบ
100 - 200	0.75	0.63	0.38	0.25	0.35	0.19
200 - 300	0.83	0.67	0.39	0.26	0.34	0.19
350 - 450	0.84	0.51	0.41	0.24	0.35	0.18
550 - 650	0.83	0.58	0.40	0.23	0.39	0.18
750 - 850	0.84	0.68	0.41	0.30	0.34	0.16
950 -1050	0.79	0.65	0.38	0.30	0.33	0.19

จากการวิจัยการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดยใช้น้ำเสียต่างๆเป็นสารตั้งต้นพบว่า การใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นสารตั้งต้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีและซีโอดีสูงที่สุดคือ 80 – 90 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นค่าบีโอดีของน้ำเสียเริ่มต้นคือ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร จนถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมาคือ น้ำเสียโรงอาหาร และน้ำกากส่าตามลำดับ (ตารางที่ 7) โดยปกติความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกำจัดบีโอดีและซีโอดีจะบอกถึงส่วนที่ถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในน้ำเสียนั้นๆ และค่าบีโอดีจะสูญเสียไปในเซลล์ที่ทดลองประมาณ 20% และสารอินทรีย์ในน้ำเสียนั้นจะถูกย่อยสลายทางชีวภาพเพียงบางส่วน ดังนั้นค่าการกำจัดซีโอดีจะมีค่าต่ำกว่าค่าการกำจัดบีโอดี (Liu *et al.*, 2004)

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การกำจัดบีโอดีและซีโอดีของน้ำเสีย

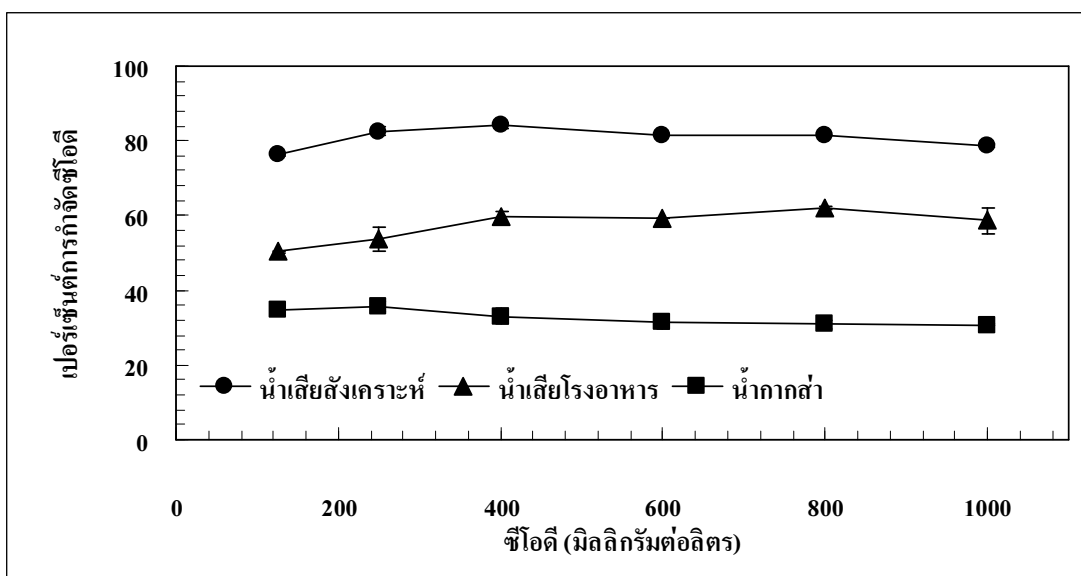
ช่วงบีโอดีน้ำ เสียที่เข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การกำจัด					
	บีโอดี			ซีโอดี		
	น้ำเสีย สังเคราะห์	น้ำเสียโรง อาหาร	น้ำกากส่า	น้ำเสีย สังเคราะห์	น้ำเสียโรง อาหาร	น้ำกากส่า
100 - 200	80.00	67.14	64.26	76.20	50.36	34.64
200 - 300	85.88	69.17	63.51	82.61	53.55	35.61
350 - 450	90.24	76.83	65.58	84.05	59.55	33.02
550 - 650	87.10	76.41	68.27	81.55	58.90	31.46
750 - 850	84.97	72.22	68.59	81.54	62.20	30.83
950 -1050	82.60	67.19	60.31	78.69	58.60	30.72

จากการวิจัยประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีของน้ำเสียทั้ง 3 ชนิด พบว่าการใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นสารตั้งต้น มีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีสูงที่สุด เนื่องจากแหล่งคาร์บอนของน้ำเสียสังเคราะห์ประกอบด้วย กลูโคสและกลูตามิก ซึ่งจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่าย รองลงมาคือน้ำเสียโรงอาหารที่มีส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีนเป็นส่วนประกอบ โดยสารอินทรีย์เหล่านี้เมื่อแตกตัวจะพบว่ามีบางส่วนที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพ เช่น ไขมัน และเซลลูโลสทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีลดลง และสุดท้ายคือน้ำกากส่า ที่เป็นส่วนประกอบของกากน้ำตาล เมื่อย่อยสลายทางชีวภาพพบว่า โพลีเมอร์ของน้ำตาลและกรดอะมิโนไม่ถูกย่อยสลายทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีลดลง (ภาพที่ 34) แต่ทั้งนี้ถ้าคิดในแง่ของระบบบำบัดน้ำเสียพบว่า ระบบมีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งเป็นตัวการของความสกปรกในน้ำเสียได้ประมาณ 60 – 80 เปอร์เซ็นต์



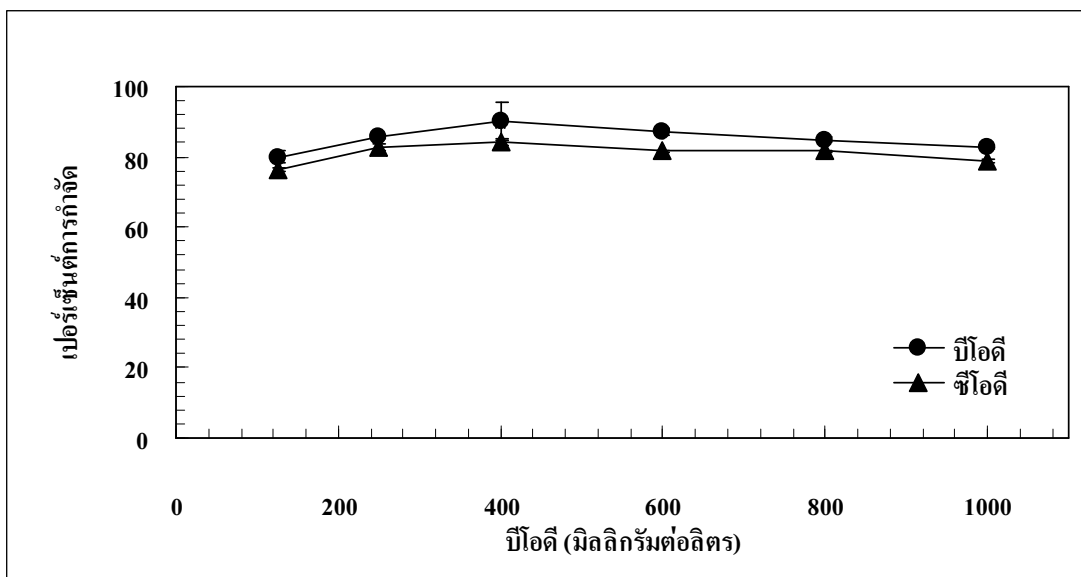
ภาพที่ 34 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดบีโอดีของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเมื่อนำน้ำเสียสังเคราะห์, น้ำกากส่า และน้ำเสียโรงอาหารที่ความเข้มข้นบีโอดี 125, 250, 400, 600, 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

ในการศึกษาการกำจัดชีโอดีของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพในน้ำเสียชนิดต่างๆ โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดค่าชีโอดีซึ่งเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ทั้งที่ย่อยสลายได้และย่อยสลายไม่ได้ รวมถึงสารอินทรีย์บางชนิด จากการวิจัยพบว่า น้ำเสียสังเคราะห์มีเปอร์เซ็นต์กำจัดชีโอดีสูงที่สุดคือประมาณ 75 - 85 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ น้ำเสียโรงอาหารประมาณ 50 - 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำกากส่าซึ่งมีเปอร์เซ็นต์กำจัดชีโอดีประมาณ 30 - 35 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 35)



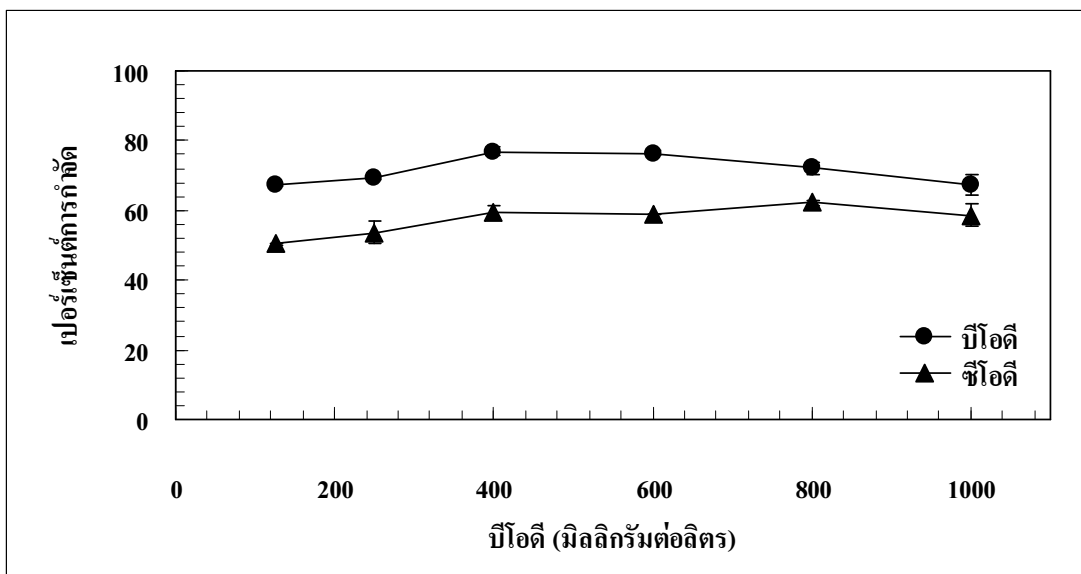
ภาพที่ 35 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเมื่อนำน้ำเสียดังเคราะห์, น้ำกาเกล้า และน้ำเสียโรงอาหารที่ความเข้มข้น 125, 250, 400, 600, 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

จากการวิจัยน้ำเสียดังเคราะห์มีอัตราส่วนระหว่างบีโอดีต่อซีโอดีใกล้เคียงกันมากที่สุดคือประมาณ 1 : 1.2 แสดงให้เห็นว่าในส่วนประกอบของน้ำเสียดังเคราะห์ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย ทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดบีโอดีและซีโอดีมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งส่วนประกอบของน้ำเสียดังเคราะห์ในส่วนของแหล่งคาร์บอนประกอบไปด้วยสารกลูโคสและกลูตามิก ซึ่งเป็นสารที่ย่อยสลายได้ง่ายเป็นส่วนใหญ่ แต่ในน้ำเสียดังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นก็ยังมีสารที่ย่อยสลายได้ยากประกอบอยู่ด้วยเช่น บัฟเฟอร์ และเกลือแร่ มีผลทำให้ค่าบีโอดีและซีโอดีมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งทำให้น้ำเสียดังเคราะห์มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดบีโอดีและซีโอดีที่ค่อนข้างสูงกว่าน้ำเสียชนิดอื่นๆ



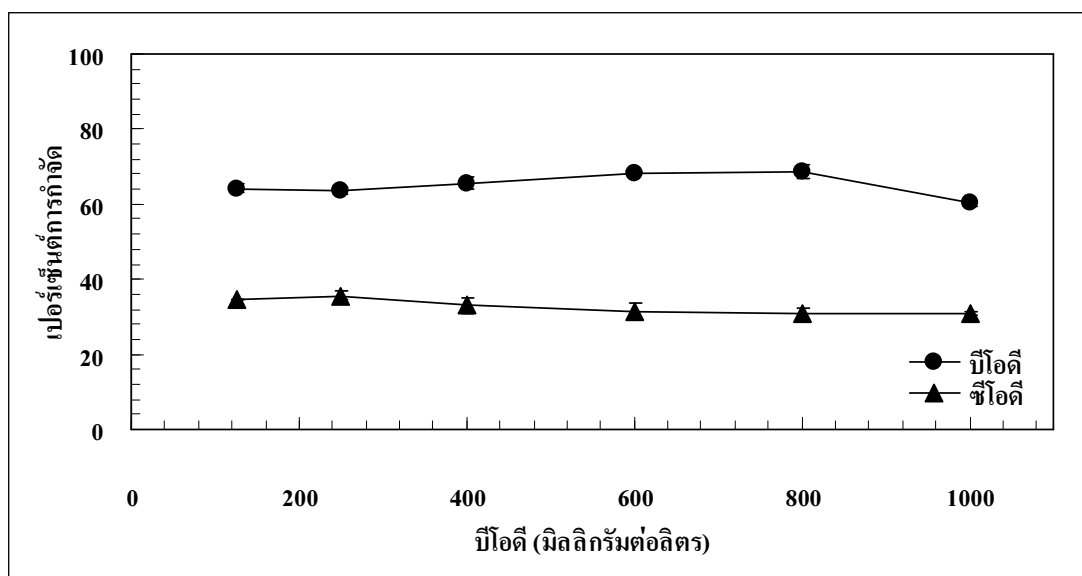
ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกำจัดบีโอดีและชีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาระหว่างค่าบีโอดีและชีโอดีของน้ำเสียโรงอาหารพบว่ามียัตราส่วนบีโอดีต่อชีโอดี โดยประมาณเป็น 1: 2.5 ซึ่งหมายถึงในน้ำเสียโรงอาหารจะมีสารอินทรีย์ส่วนที่ย่อยสลายได้ยาก และสารอินทรีย์ประกอบอยู่ด้วย ซึ่งในส่วนนี้จะแสดงออกมาให้เห็นในรูปของเปอร์เซ็นต์การกำจัดชีโอดีของระบบ โดยน้ำเสียโรงอาหารจะมีแนวโน้มการกำจัดชีโอดีไปในทิศทางเดียวกับบีโอดีแต่ต่างกันตรงที่เปอร์เซ็นต์การกำจัดชีโอดีของระบบต่ำกว่าการกำจัดบีโอดี(ภาพที่ 37) ทั้งนี้เนื่องจากค่าชีโอดีคือปริมาณออกซิเจนที่สมมูลกับปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียที่สามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยสารเคมี โดยจะรวมทั้งสารอินทรีย์ทั้งที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้และไม่ได้ (สุเทพ, 2549) ซึ่งก็หมายถึงเปอร์เซ็นต์การกำจัดชีโอดีที่เกิดขึ้นอยู่ในส่วนของสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ ทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดค่อนข้างต่ำ เมื่อคิดรวมถึงสารที่มีอยู่ในน้ำเสียทั้งหมด



ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกำจัดบีโอดีและซีโอดีของน้ำเสียโรงอาหาร

ในขณะเดียวกันน้ำกากส่าซึ่งมีอัตราส่วนของบีโอดีต่อซีโอดีประมาณ 1:3 โดยมีแนวโน้มการกำจัดซีโอดีค่อนข้างคงที่ (ภาพที่ 38) ส่วนประกอบในน้ำกากส่าจะประกอบด้วยสารอินทรีย์ส่วนที่ย่อยสลายได้และส่วนที่ย่อยสลายไม่ได้ ในส่วนที่ย่อยสลายไม่ได้คือสารพวกเมลานอยดิน (Melanoidins) ซึ่งเป็นสารที่มีสีน้ำตาล เป็นพวกสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของน้ำตาลและกรดอะมิโน สารพวกนี้ไม่สามารถถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้จะออกมาในรูปของซีโอดีที่มีค่าค่อนข้างสูง เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดแล้วทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเปอร์เซ็นต์การกำจัดบีโอดี



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกำจัดบีโอดี และซีโอดีของน้ำกากส่า

4. ศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

ในการประเมินศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ จะเห็นได้ว่าเมื่อพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากผ่านน้ำเสียชนิดต่างๆ เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ได้ผลิตกระแสไฟฟ้า เมื่อนำมาคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าปรากฏว่า น้ำเสียสังเคราะห์ให้ค่าพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดคือ 0.111 กิโลวัตต์.ชั่วโมง เมื่อคิดเทียบกับปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดไป 1 กิโลกรัม รองลงมาคือน้ำกากส่าและน้ำเสียโรงอาหาร ได้พลังงานไฟฟ้า 0.084 และ 0.042 กิโลวัตต์.ชั่วโมง ตามลำดับ (ตารางที่ 8) ซึ่งเมื่อเทียบกับพลังงานทดแทนที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จริง นั่นก็คือ แก๊สชีวภาพที่เกิดจากระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนทั่วไป พบว่า 1 กิโลกรัม ของซีโอดีที่ถูกกำจัดสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ถึง 0.3 ลูกบาศก์เมตร โดยแก๊สชีวภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนคือ แก๊สมีเทน ซึ่งให้ค่าพลังงานความร้อน 39.4 เมกะจูลต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถใช้ทดแทนน้ำมันเตาได้ 0.67 ลิตร และเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้า 9.7 กิโลวัตต์.ชั่วโมง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน, 2552) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพกับแก๊สชีวภาพ พบว่าปริมาณไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีปริมาณน้อยกว่าแก๊สชีวภาพ โดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุด 3.82 เปอร์เซ็นต์ของกระแสไฟฟ้าที่แก๊สชีวภาพสามารถผลิตได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่ำมาก เนื่องจากในการวิจัยเป็นการ

ทดลองในระดับห้องทดลอง ยังไม่มีการศึกษาภาคสนามจริงต่างจากแก๊สชีวภาพที่มีการศึกษาและพัฒนาจนสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือก จึงมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเพื่อใช้เป็นตัวตรวจวัดความสกปรกน้ำเสียดังจะกล่าวในส่วนต่อไป (BOD Sensor)

ตารางที่ 8 พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากน้ำเสียนิตต่างๆผ่านเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

บีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พลังงานไฟฟ้า ¹ (กิโลวัตต์.ชั่วโมง)			ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า ²		
	น้ำเสีย สังเคราะห์	น้ำกากส่า	น้ำเสียโรง อาหาร	น้ำเสีย สังเคราะห์	น้ำกากส่า	น้ำเสียโรง อาหาร
125	0.017	0.012	0.010	0.59	0.43	0.34
250	0.019	0.020	0.016	0.67	0.67	0.54
400	0.029	0.024	0.014	1.00	0.84	0.48
600	0.060	0.058	0.025	2.05	1.98	0.86
800	0.079	0.075	0.029	2.72	2.58	1.01
1000	0.111	0.084	0.042	3.82	2.89	1.43

หมายเหตุ ¹ พลังงานไฟฟ้าได้จากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ณ สภาวะคงที่ โดยเทียบกับกิโลกรัม.ซีโอดีที่ถูกกำจัด

² คิดประสิทธิภาพจากแก๊สชีวภาพ โดยแก๊สชีวภาพ 1 กิโลกรัม.ซีโอดีที่ถูกกำจัดให้พลังงานไฟฟ้า 2.9 กิโลวัตต์.ชั่วโมง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน)

5. การประยุกต์เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเพื่อเป็นตัวตรวจวัดความสกปรกในน้ำเสีย (BOD Sensor)

ในการตรวจวัดความสกปรกของน้ำเสียพารามิเตอร์หนึ่งที่ต้องวิเคราะห์คือค่าบีโอดี โดยการวิเคราะห์บีโอดีตามมาตรฐาน ต้องใช้ระยะเวลาในการบ่มบีโอดีกินระยะเวลาประมาณ 5 วัน ซึ่งเป็นระยะเวลานาน จึงมีแนวคิดที่ลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ให้สั้นลงโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ (Kim *et al.*, 2003) จากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจะได้กระแสไฟฟ้าเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าบีโอดีของน้ำเสีย (ภาพที่ 25) จากการวิจัยพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและค่าเข้มข้นของน้ำเสียทั้ง 3 ชนิด มี

ความสัมพันธ์เป็นไปในแนวเส้นตรง คือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของค่าบีโอดี ปริมาณกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ โดยน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำกากส่า และน้ำเสียโรงอาหารมีค่าความนำเชือถือโดยประมาณ 99.12, 98.84 และ 99.44 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยหลักการในการใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นตัวตรวจวัดค่าบีโอดีหรือ BOD Sensor นั้นเราสามารถใส่เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียที่ไม่ทราบความเข้มข้นของบีโอดี จากนั้นนำปริมาณกระแสไฟฟ้ามาแปลงเป็นค่าบีโอดีโดยใช้สมการจากกราฟมาตรฐานก็จะสามารถทราบค่าบีโอดีในระยะเวลาอันสั้นโดยไม่จำเป็นต้องใช้เวลาบ่มถึง 5 วัน เหมือนวิธีมาตรฐาน ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการวิจัยพบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นสารตั้งต้นมีค่าสูงที่สุดคือ 0.92 มิลลิแอมแปร์ ที่ความเข้มข้นของบีโอดี 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมาคือ น้ำกากส่าและน้ำเสียโรงอาหาร ได้ค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.78 และ 0.69 mA ตามลำดับ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในน้ำเสียแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันเนื่องจากส่วนประกอบในน้ำเสียแต่ละชนิด มีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากง่ายต่างกัน เช่น น้ำเสียสังเคราะห์มีแหล่งคาร์บอนคือ กลูโคส และกลูตามิก ซึ่งเป็นสารที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายเกิดเป็นอิเล็กตรอนเคลื่อนผ่านขั้วแอโนดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าแปรผันตรงกับ ความเข้มข้นของบีโอดีในน้ำเสียกล่าวคือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของบีโอดีในน้ำเสีย ค่ากระแสไฟฟ้าจะมีปริมาณสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีและกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เป็นไปในเชิงเส้นตรง

อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นคือ ความแปรปรวนของพีเอชจะมีผลต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการที่ปราศจากบัฟเฟอร์ซึ่งเป็นตัวควบคุมพีเอชในระบบทำให้ระบบมีพีเอชที่ลดต่ำลงมากซึ่งส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ ซึ่งในระบบที่ปราศจากบัฟเฟอร์พีเอชจะลดต่ำลงถึง 6.17 ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไม่เป็นไปตามแนวโน้มคือ ค่ากระแสไฟฟ้าไม่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นบีโอดีของน้ำเสียดังได้กล่าวมาข้างต้น

ในงานบำบัดน้ำเสียมีพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการตรวจสอบคือ ค่าบีโอดีและซีโอดี ซึ่งจากการวิจัยพบว่า เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีโดยรวมประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป โดยน้ำเสียสังเคราะห์มีเปอร์เซ็นต์การบำบัดสูงที่สุดเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากองค์ประกอบในน้ำเสียสังเคราะห์เป็นพวกที่ง่ายต่อการย่อยสลายต่างจากน้ำกากส่า และน้ำโรงอาหารที่มีส่วนประกอบที่ย่อยสลายยากผสมอยู่ในปริมาณที่มากกว่า

จากค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้เมื่อเทียบเป็นพลังงานไฟฟ้าพบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ให้ค่าพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุด แต่เมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพโดยเทียบจากพลังงานไฟฟ้าที่แก่ชีวภาพผลิตได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม้ออกซิเจนพบว่ามีประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้าต่ำมากคือ 3.82

เปอร์เซ็นต์ของที่แก๊สชีวภาพผลิตได้ ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนที่มีประสิทธิภาพได้ จึงมีแนวความคิดในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเพื่อเป็นตัวชี้วัดความสกปรก เช่น ค่าบีโอดีของแหล่งน้ำต่อไป ซึ่งสามารถจะทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ได้

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาทดลองเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสีย เพื่อศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ควบคู่กับความสามารถในการรองรับสารอินทรีย์ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ
2. ควรมีการศึกษาปัจจัยในด้านการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาเก็บน้ำเสียที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ
3. ควรมีการศึกษาปัจจัยที่ทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงในแต่ละความเข้มข้นทั้งทางกายภาพ และปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในระบบเอง รวมถึงควรนำเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษามหาชนิจุลินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิต
4. ในการศึกษาเพื่อพัฒนา เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นเครื่องมือตรวจวัดความสกปรกในแหล่งน้ำ ควรมีการเพิ่มชนิดของน้ำเสียในการศึกษา และทดลองนำไปใช้ในภาคสนามเพื่อทดสอบความถูกต้อง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กิตติ ชีรสรเดช. 2538. การศึกษาระดับห้องปฏิบัติการของการบำบัดน้ำเสีย จากโรงงานผลิต
น้ำอัดลมโดยกระบวนการยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2552. **พลังงานแก๊สชีวภาพ**. พลังงานทดแทน.
แหล่งที่มา: [http:// www.dede.go.th](http://www.dede.go.th), 10 เมษายน 2552.

บุษบา ธรรมประเสริฐ. 2537. การกำจัดของเสียจากสุกรโดยใช้ระบบหมักแบบ **upflow anaerobic
sludge blanket**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มันสิน ตันทุลเวศม์. 2543. **คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ**. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ

สุเทพ สิริวิทยากรณ์. 2549. **เทคโนโลยีน้ำเสีย**. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์
, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

Akiba, T., H.P. Bennetto, J.L. Stirling, and K. Tanaka. 1985. Electricity generation from
alkolotrophic organisms. **Biotechnol. Lett.** 9: 611-616.

Allen, R.M. and H.P. Bennetto. 1993. Microbial fuel cell. **Appl. Biochem Biotechnol.** 39 (40):
24-40.

Bettin, C. 2006. **Applicability and Feasibility of Incorporation Microbial Fuel Cell
Technology in to Implantable Biomedical Devices**. B.C. Thesis, Ohio State University.

Bond, D.R., D.E. Holmes and D.R. Lovley. 2002. Electrode-reducing microorganisms that
harvest energy from marine sediments. **Science**. Jan.2002: 483-485.

- Bond, D.R. and D.R. Lovley, 2003. Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. **Appl. Environ. Microbiol.** 69 (3): 1548-1555.
- Chaudhuri, S.K. and D.R. Lovley. 2003. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediator less Microbial Fuel Cells. **Nature Biotechnology**: 1229-1232.
- Chang, I. F., J.K. Jang, G.C. Gil, M. Kim, H.J. Kim, B.H. Kim and B.W. Cho. 2004. Continuous determination of biochemical oxygen demand using microbial fuel cell type biocensor. **Biosensor and Bioelectronics** 19: 607-613.
- Chang S., S. Moon. O. Bretschger, J.K. Jang, H.I. Park, K.H. Nealson and B.H. Kim. 2006. Electrochemically active bacteria (EAB) and mediator-less microbial fuel cells. **J. Microbiol. Biotechnol.** 16 (2): 163-177.
- Cooney, M.J., E. Roschi, I.W. Marison, C. Comniellis and U.V. Stockar. 1996. Physiologic studies with the sulfate-reducing bacterium *Desulfovibrio desulfuricans*: evaluation for use in a biofuel cell. **Enzyme Microbiol. Technol.** 18: 358–365.
- Cuong, P. A., S.J. Jung, N.Y. Phung, J. Lee, I.S. Chang, B.H. Kim, H. Yi and J. Chun. 2003. A novel electrochemically active and Fe(III)-reducing bacterium phylogenetically related to *Aeromonas hydrophilla*, isolated from a microbial fuel cell. **FEMS Microbiol. Lett.** 233: 129-134.
- Dichristina, T. J. and E.F. DeLong. 1994. Isolation of anaerobic respiratory mutants of *Shewanella putrefaciens* and genetic analysis of mutants deficient in anaerobic growth on Fe^{3+} . **J. Bacteriol.** 176: 1468–1474.
- Gil, G. C., I.S. Chang, B.H. Kim, M. Kim, J.K. Jang, H.S. Park and H.J. Kim. 2003. Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell. **Biosensor and Bioelectronics.** 18 (4): 327-334

- Gottschalk, G., 1979. **In Bacterial Metabolism**, 2nd edn. Springer Verlag., NewYork.
- Habermann, W. and E.H. Pommer, 1991. Biological fuel cells with sulphide storage capacity. **Appl. Microbiol. Biotechnol.** 35: 128–133
- Henslee, B.E., P.D. Gehres, C.C. Bettin, A.V. Weber, C. Sanford, M. Nazareth, J. Henry, K. Kennedy and C. Eichel. 2005. Design and implementation of electrode material in a microbial fuel cell using dairy waste. **Final Report for ASAE's G.B. Gunlogson Student Environmental Design Competition.** OhioState University, Columbus, Ohio.
- Heyndrickx, M., P. Devos. and J.U. De Ley. 1990. Hydrogen production from chemostat fermentation of glucose by *Clostridium butyricum* and *Clostridium pasteurianum* in ammonium and phosphate limitation. **Biotechnol. Lett.** 12: 731–736.
- Holmes, D.E., D.R. Bond, and D.R. Lovley. 2004. Electron transfer by *Desulfobulbus propionicus* to Fe(III) and graphite electrodes. **Appl. Environ. Microbiol.** 70: 1234-1237.
- Karube, I., T. Matsunaga, T. Tsuru and S. Suzuki. 1977. Biochemical fuel cell utilizing immobilized cells of *Clostridium butyricum*. **Biotechnol. Bioeng.** 19: 1727–1733.
- _____, S. Suzuki, T. Matsunaga and S. Kuriyama. 1981. Biochemical energy conversion by immobilized whole cells. **Ann. N.Y. Acad. Sci.** 369: 91–98.
- Kim, B.H., I.S. Chang, G.C. Gil, H.S. Park and H.J. Kim. 2003. Novel BOD (biological oxygen demand) sensor using mediator-less microbial fuel cell. **Biotechnol. Lett.** 25: 541-545.
- _____, H.S. Park, H.J. Kim, G.T. Kim, I.S. Chang, J. Lee and N.T. Phung. 2004. Enrichment of microbial community generating electricity using a fuel-cell-type electrochemical cell. **Appl. Microbiol. Biotechnol.** 63(6): 672-681.

- Kim, B.H., H.S. Park, M.S. Hyun and D.H. Park. 1999. Direct electrode reaction of Fe(III) reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. **J. Microbiol. Biotechnol.** 9: 127-131.
- Kim, H. J., H.S. Park, M.S. Hyun, I.S. Chang, M.A. Kim and B.H. Kim. 2002. A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. **Enzyme Microbiol. Technol.** 30: 145–152.
- _____, M.S. Hyun, I.S. Chang and B.H. Kim. 1999. A microbial fuel cell type lactate biosensor using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. **J. Microbiol. Technol.** 9: 265-267.
- Kim, G.T., M.S. Hyun, I.S. Chang, H.J. Kim, H. S. Park, B.H. Kim, S.D. Kim, J.W.T. Wimpenny and A.J. Weightman. 2005. Dissimilatory Fe(III) reduction by electrochemically active lactic acid bacterium phylogenetically related to *Enterococcus gallinarum* isolated from submerged soil. **J. Appl. Microbiol.** 99: 978-987.
- Lee, J., N.T. Phung, I.S. Chang, B.H. Kim and H.C. Sung. 2003. Use of acetate for enrichment of electrochemically active microorganisms and their 16S rDNA analyses. **FEMS Microbiol. Lett.** 223(2): 185-191.
- Clesceri, L.S., A.E. Greenberg and A.D. Eaton. n.d. **Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater**. 20th ed. n.p.
- Liu, H. and B.E. Logan. 2004. Electricity Generation Using an Air-Cathode Single Chamber Microbial Fuel Cell in the Presence of a Proton Exchange Membrane. **Environmental Science and Technology**. 14: 4040-4046.
- Logan, B., S. Oh and B. Min. 2004. Cathode Performance as a Factor in Electricity Generation in Microbial Fuel Cells. **Environmental Science and Technology**. 38(18): 4900-4904.

- Lovley, D. R., S.J. Giovannoni, D.C. White, J.E. Champine, E.J.P. Phillips, Y.A. Gorby and S. Goodwin. 1993. *Geobacter metallireducens* gen nov sp. nov, a microorganism capable of coupling the complete oxidation of organic compounds to the reduction of iron and other metals. **Arch. Microbiol.** 159: 336–344.
- Myers, C. R. and J.M. Myers. 1992. Localization cytochromes to the outer membrane of anaerobic ally grown *Shewanella putrefaciens* MR-11992. **J. Bacteriol.** 174: 3429–3438.
- Park, H. S., B.S. Kim, H.S. Kim, H.J. Kim, G.T. Kim, M. Kim, I.S. Chang, Y.K. Park and H.I. Chang. 2001. A novel electrochemically active and Fe(III)-reducing bacterium phylogenetically related to *Clostridium butyricum* isolated from microbial fuel cell. **Anaerobic** 7: 297-306.
- Rabaey, K., G. Lissens and W. Verstraete. n.d. Performances and perspectives. **Microbial fuel cell**. n.p.
- , W. Ossieur, M. Verhaege and W. Verstraete. 2005. Continuous Microbial Fuel Cell Convert Carbohydrates to Electricity. **Water science and technology**. 52(1-2): 515-523
- Scholz, F. and Schroder, U. 2003. Bacterial batteries. **Nature Biotechnology**. 21 (10).
- Schroder, U., J. Nieber and F. Scholz. 2003. A generation of microbial fuel cells with current output boosted by more than one order of magnitude. **Angew. Chem.** 115: 2986–2989.
- Shukla, A.K., P. Suresh, S. Berchmans and A. Rajendran. 2004. Biological fuel cells and their applications. **Current Science**, 87(4)
- Suzuki, S. and I. Karube. 1983. Energy production with immobilized cells. **Appl. Biochem. Bioeng.** 4: 281–310

Suzuki, S., I. Karube, H. Matsuoka, S. Ueyama, H. Kawakubo, S. Isoda and T. Murahashi.

1983 Biochemical energy conversion by immobilized whole cells. **Ann. N.Y. Acad.**

Sci. 413: 133–143.

_____, _____, T. Matsunaga, S. Kuriyama, N. Suzuki, T. Shirogomi and T. Takamura. 1980.

Biochemical energy conversion using immobilized whole cells of *Clostridium butyricum*.

Biochimie, 62: 353–358.

Tartakovsky, B., and S.R. Guiot. 2006. A Comparison of Air and Hydrogen Peroxide

Oxygenated Microbial Fuel Cell Reactor. **Biotechnology Progress**. 22:241-246

Tender, L. M., C.E. Reimers, H.A. Stecher, D.E. Holmes, D.R. Bond, D.A. Lowy, K. Pilobello, S.

J. Fertig and D.R. Lovley. 2002. Harnessing microbially generated power on the seafloor.

Nat. Biotechnol. 20(8): 821-825.

Veronica P. M. 1997. Flocculation of Melanoidins Induced by Inorganic Ions. **Jounal of**

Fermentation and Bioengineering. 83(3): 287-291.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเลี้ยงสังเคราะห์

น้ำเลี้ยงที่ใช้ในการทำวิจัยนี้เป็นน้ำเลี้ยงสังเคราะห์ที่เตรียมจากสารละลายเข้มข้น 3 ชนิด (stock solution) โดย

เตรียมสารละลายเข้มข้นชนิดที่ 1 ต่อปริมาตรน้ำ 1 ลิตร ประกอบด้วย

KH_2PO_4	0.06375	กรัม
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.1405	กรัม
CaCl_2	3.75	กรัม
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.05	กรัม
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.25	กรัม
$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	5.0	กรัม
NaHCO_3	0.105	กรัม

เตรียมสารละลายเข้มข้นชนิดที่ 2 ต่อปริมาตรน้ำ 1 ลิตร ประกอบด้วย

NTA	1.5	กรัม
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.1	กรัม
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.1	กรัม
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.17	กรัม
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.1	กรัม
ZnCl_2	0.1	กรัม
$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.02	กรัม
H_3BO_3	0.01	กรัม
Na_2MoO_4	0.01	กรัม
Na_2SeO_3	0.017	กรัม
$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.026	กรัม
NaCl	1.0	กรัม

เตรียมสารละลายเข้มข้นชนิดที่ 3 ต่อปริมาตรน้ำ 1 ลิตร ประกอบด้วย

KH_2PO_4	134.74	กรัม
K_2HPO_4	1.73	กรัม

ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์ซีไอดี

วิธีวิเคราะห์ค่าซีโอดี

วิธีรีฟลักซ์แบบเทียบสี

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1.1 ขวดรูปชมพู่ ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 1.2 เตาอบ (oven) สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ 150 ± 2 องศาเซลเซียส
- 1.3 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

2. สารเคมี

2.1 สารละลายใช้ย่อย (Digestion solution)

ละลายโปตัสเซียมไดโครเมตซึ่งอบแห้งที่ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงหนัก 10.216 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดกำมะถันเข้มข้น 167 มิลลิลิตร และปรอทซัลเฟต 33.3 กรัม คนให้ละลายปล่อยทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร (สารละลาย ใช้ย่อยไม่จำเป็นต้องมีความเข้มข้นที่แน่นอน แต่ตัวอย่างน้ำและตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้เตรียมกราฟ มาตรฐานจะต้องใช้สารละลายใช้ย่อยขวดเดียวกันเสมอ)

2.2 กรดซัลฟูริกและซิลเวอร์ซัลเฟต

ซังซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) 8.8 กรัม ใส่ลงในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1-2 วัน เพื่อให้ซิลเวอร์ซัลเฟตละลายได้ทั้งหมด ก่อนนำไปใช้ต่อไป

2.3 สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไฮโดรเจนพาทาเลต (KHP)

บด KHP เพื่อลดขนาดลงและนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส จนแห้งและมีน้ำหนักคงที่ แล้วละลาย KHP ที่บดและอบแห้งแล้ว 850 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น เจือจางให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร สารละลายนี้มีซีโอดีเท่ากับ 1000 มก. /ล. สามารถเก็บรักษาในตู้เย็นได้นานไม่เกิน 3 เดือน

3. วิธีวิเคราะห์

ล้างขวดรูปชมพู่ด้วยสารละลายกรดกำมะถัน 20% เสมอทุกครั้งก่อนใช้งาน

3.1 การเลือกปริมาตรตัวอย่างน้ำ ในการทดลองนี้รู้ค่าซีไอดีที่แน่นอนจึงเลือกใช้ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร และเจือจาง 10 เท่า

3.2 การย่อยตัวอย่าง

3.2.1 ใส่ตัวอย่างลงในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 5 มิลลิลิตร (เจือจาง 10 เท่า) เติมสารละลายโซ่ย่อยหรือโปรแตสเซียมไดโครเมต ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ตามด้วยกรดกำมะถันอย่างช้าๆ ปริมาตร 7 มิลลิลิตร ปิดฝาด้วยกระดาษฟอยล์เข้าผสมกันให้ดี สำหรับแบบลงค้ใช้น้ำกลั่นแล้วทำเหมือน ตัวอย่างทุกอย่าง

3.2.2 นำไปอบในตู้อบธรรมดาตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 150 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เสร็จแล้วทิ้งไว้ให้เย็น

3.3 การวัดสี

ค่อยๆ เทตัวอย่างน้ำ (อย่าให้ตะกอนฟุ้ง) ลงในหลอดวัดของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ยี่ห้อ Pharmacia LKB. รุ่น Novaspec II) และวัดค่า Absorbance ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร นำเอา Absorbance ที่ได้ไปอ่านค่าปริมาณซีไอดี (มิลลิกรัม) จากกราฟมาตรฐานและคำนวณค่าความเข้มข้นซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร) จากสูตรในข้อ 4



ภาพผนวกที่ ข1 การวิเคราะห์ซีไอดีแบบเทียบสี

3.4 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานซีโอดีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้น 20, 80, 160, 250, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สารละลายมาตรฐาน KHP ที่มีซีโอดีเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เจือจางกับน้ำกลั่นในอัตราส่วนดังแสดงในตารางข้างล่างนี้ (ปริมาตรของสารละลายที่ได้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร)

ตารางผนวกที่ ข1 อัตราส่วนสารละลายต่อน้ำกลั่นตามความเข้มข้นของซีโอดี

ซีโอดี, มก./ล.	20	80	160	250	400	600	800	1000
สารละลาย KHP, มล.	2	8	16	25	40	60	80	100
น้ำกลั่น, มล.	98	92	84	75	60	40	20	0

ย่อยตัวอย่างและวัดสีตามข้อ 2 และ 3 พล็อตกราฟระหว่าง Absorbance และปริมาณซีโอดี (มก.) จะได้กราฟเส้นตรง

4. การคำนวณ

$$\text{ซีโอดี, มิลลิกรัม O}_2\text{/ลิตร} = \frac{\text{ปริมาณซีโอดี (มก.)} \times 1000}{\text{มล. ของตัวอย่างน้ำ (มล.)}}$$

ภาคผนวก ค
การวิเคราะห์ปฏิกิริยา

วิธีวิเคราะห์ค่าบีโอดี

วิธีวิเคราะห์บีโอดี โดย Dilution method

1. เครื่องมือ

1.1 Incubation bottles (BOD Bottle) ปริมาตร 300 มล. มีจุกปิดเป็น ground-glass

1.2 air incubator หรือ water bath สามารถควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 20 ± 1 องศาเซลเซียส ที่บแสง เพื่อป้องกันการสังเคราะห์แสง

2. สารเคมี

สารละลายมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าบีโอดี ประกอบด้วย

2.1 สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

ชั่ง Monobasic potassium phosphate (KH_2PO_4)	8.5	กรัม
Dibasic potassium phosphate (K_2HPO_4)	21.75	กรัม
Dibasic sodium phosphate ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	33.4	กรัม
Ammonium chloride (NH_4Cl)	1.7	กรัม

ละลายสารทั้งหมดในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร สารละลายนี้ควรมีพีเอช 7.2 โดยไม่ต้องปรับ ถ้าสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวไหนมีร่องรอยการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ให้ทิ้งเสีย

2.2 สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ละลาย $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 22.5 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางให้ได้ 1 ลิตร

2.3 สารละลายแคลเซียมคลอไรด์

ละลาย CaCl_2 27.5 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางให้ได้ 1 ลิตร

2.4 สารละลายเฟอริกคลอไรด์

ละลาย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.25 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางให้ได้ 1 ลิตร

2.5 สารละลายกรด-ด่าง 1 นอร์มอล สำหรับการปรับสภาพ pH ของตัวอย่าง

Acid – เติม H_2SO_4 28 มล. ลงในน้ำกลั่น (คนขณะที่เติมกรดทีละน้อย) แล้วเจือจางให้ได้ 1 ลิตร

Alkali – ละลาย NaOH 40 กรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร

2.6 ตัวยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification inhibitor)

2-chloro-6-(trichloro methyl) pyridine

2.7 น้ำเจือจาง

1) เตรียมน้ำตัวอย่างปริมาณที่ต้องการใช้ไว้ในขวดสะอาด

2) เตรียม สารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ แมกนีเซียมซัลเฟต แคลเซียมคลอไรด์ และ เฟอริกคลอไรด์ อย่างละ 1 มล. ต่อน้ำกลั่น 1 ลิตร

3) ก่อนจะนำไปใช้เพื่อเจือจางตัวอย่าง ต้องปรับให้มีความเข้มข้น 20 องศาเซลเซียสก่อน จากนั้นทำให้ออกซิเจนละลายจนอิ่มตัวในน้ำ อาจทำได้โดยเขย่าขวดที่มีน้ำอยู่เพียงครึ่งขวดแรงๆ หรือ ใช้เครื่องเติมอากาศที่ผ่านการกรอง หรือ เก็บน้ำไว้ในขวดที่ปิดปากขวดด้วยสำลี เป็นเวลานานพอที่น้ำจะอิ่มตัวด้วยออกซิเจน

4) ควรตรวจสอบคุณภาพน้ำเจือจางด้วย โดยค้นหา DO_0 และ DO_5 ของน้ำเจือจาง ค่า DO uptake ในช่วง 5 วันของการบ่มไม่ควรเกิน 0.2 มก./ลิตร

3. การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์

3.1 ตัวอย่างที่มีความเป็นกรด - ด่างสูง

ให้ปรับพีเอชของตัวอย่างให้อยู่ระหว่าง 6.5 ถึง 7.5 ด้วย H_2SO_4 หรือ NaOH 1 N หรือ เลือกใช้ความเข้มข้นที่เหมาะสม ที่ไม่ทำให้ปริมาณที่เติมลงไปมีผลไปเจือจางน้ำตัวอย่างมากกว่า 0.5% การเจือจางตัวอย่างจะต้องไม่มีผลให้พีเอชที่ปรับแล้วเปลี่ยนแปลง

3.2 ตัวอย่างที่มีคลอรีนตกค้าง

ให้หลีกเลี่ยงตัวอย่างพวกนี้ โดยเก็บตัวอย่างก่อนเติมคลอรีน ถ้าตัวอย่างผ่านการเติมคลอรีนแต่ตรวจไม่พบคลอรีนตกค้าง ให้เติม seed ในน้ำเจือจางได้เลย แต่ถ้าพบคลอรีนตกค้างให้กำจัดคลอรีนก่อนเติม seed อย่าวิเคราะห์ตัวอย่างที่ผ่านการเติมคลอรีนโดยไม่ได้เติม seed บางตัวอย่างคลอรีนจะสลายไปเองภายใน 1-2 ชั่วโมง ถ้าตั้งทิ้งไว้ในที่ที่มีแสงสว่าง ถ้าไม่สลายไปเองอาจกำจัดได้ด้วยสารละลาย Na_2SO_3 ในปริมาณที่เหมาะสมซึ่งจะหาได้จากการวิเคราะห์ปริมาณคลอรีนที่มีอยู่

3.3 ตัวอย่างที่มีสารที่เป็นพิษชนิดอื่นๆ

ของเสียจากอุตสาหกรรมบางอย่างอาจมี Toxic metals ปนอยู่ ให้ศึกษาและหาวิธีกำจัดที่เหมาะสม

3.4 ตัวอย่างที่มีปริมาณออกซิเจนละลายอย่างอิ่มตัวด้วย

ตัวอย่างพวกนี้จะมีค่า DO สูงกว่า 9 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 20 องศาเซลเซียส เช่น น้ำที่มีอุณหภูมิต่ำ หรือน้ำที่มีการสังเคราะห์แสงมากๆ เพื่อป้องกันการสูญเสียออกซิเจน ระหว่างการบ่มเชื้อ ให้ลดปริมาณการละลายของออกซิเจนลง โดยการเขย่าขวดอย่างแรงๆ หรือเทปาลมลงในตัวอย่าง

3.5 การปรับอุณหภูมิตัวอย่าง

ก่อนวิเคราะห์ตัวอย่าง หรือก่อนเจือจางตัวอย่างต้องปรับอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ 20 ± 1 องศาเซลเซียส

3.6 การยับยั้งปฏิกิริยา Nitrification

เติม 2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine 3 มก. ลงในขวดบีโอดี หรือ เติมน้ำเจือจางในปริมาณพอเพียงที่จะทำให้ความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 10 มก. /ล. ตัวอย่างที่อาจต้องการยับยั้ง nitrification คือ น้ำทิ้งจากโรงบำบัดน้ำทางชีววิทยา (รวมทั้งน้ำตัวอย่างที่เติม seed จากระบบบำบัดทางชีววิทยาคด้วย) และ น้ำจากแม่น้ำ ทั้งนี้ให้บันทึกการยับยั้ง nitrogen ในรายงานการวิเคราะห์ด้วย

4. วิธีวิเคราะห์

4.1 ถ้าน้ำตัวอย่างมีปริมาณสารอินทรีย์มาก ต้องเจือจางน้ำตัวอย่าง โดยเลือกระดับการเจือจาง (ทำ 2-3 ระดับ) และวิธีเจือจางที่เหมาะสม

ใช้น้ำตัวอย่าง 3 ขวด ต่อระดับความเจือจางหนึ่งๆ สำหรับค่า DO โดย Azide Modification Method

4.1.1 ใช้น้ำขวดที่ 1 หา DO ที่เวลาตั้งต้น (DO_0)

4.1.2 นำนํ้าอีก 2 ขวด ไปทำ water seal ที่ปากขวด แล่น้ำไปบ่มที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียส และระวังแสงสว่างด้วยเพื่อป้องกันการสังเคราะห์แสง เมื่อบ่มครบ 5 วัน (± 3 ชั่วโมง) นำมาหาค่า DO_5

4.2 ทำ Dilution water blank

เพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพของ Dilution water และความสะอาดของขวดบีโอดี ควรทำการทดสอบนี้ทุกๆครั้งที่ทำการวิเคราะห์บีโอดี โดยวิเคราะห์บีโอดีของน้ำเจือจางด้วยวิธีที่ใช้กับตัวอย่าง ค่า DO up take ของน้ำเจือจางไม่ควรเกิน 0.2 มก. /ลิตร

5. การคำนวณค่า บีโอดี

$$BOD_{5, \text{mg/L}} = (D_1 - D_2) P$$

โดยที่ D_1 = DO ของตัวอย่างก่อนเข้า Incubator (มิลลิกรัมต่อลิตร)

D_2 = DO ของน้ำตัวอย่างหลังจากบ่มเป็นระยะเวลา 5 วัน ที่ 20 องศาเซลเซียส (มิลลิกรัมต่อลิตร)

P = ปริมาตรขวดบีโอดี / ปริมาตรตัวอย่าง

ภาคผนวก ง
ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ 1 ค่า D0 และ D5 น้ำเข้าระบบของน้ำเสียสังเคราะห์

ช่วงปีโอดีน้ำเสียที่เข้า				เปอร์เซ็นต์
ระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	D0	D5	D5	การเจือจาง
100 - 200	7	4.5	4.7	2
200 - 300	7.1	2.3	2.2	2
350 - 450	7.2	3	3.2	1
550 - 650	7.1	4	4	0.5
750 - 850	7	3.1	3	0.5
950 -1050	7	2.3	2	0.5

ตารางผนวกที่ 2 ค่า D0 และ D5 น้ำออกกระบบของน้ำเสียสังเคราะห์

ช่วงปีโอดี น้ำเสียที่เข้า	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเซลล์ที่ 1			เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเซลล์ที่ 2			เปอร์เซ็นต์ การเจือจาง
	ระบบ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	D0	D5	D5	D0	D5	
100 - 200	7.2	4.6	4.7	7.1	4.8	4.9	10
200 - 300	7	3.4	3.6	7	3.7	3.6	10
350 - 450	7.2	4.4	4.5	7.1	4.6	4.6	5
550 - 650	7.2	3	3	7.1	3.2	3.4	5
750 - 850	7	4.5	4.6	7.1	4.7	4.9	2
950 -1050	7.1	3.6	3.8	7.1	3.8	3.7	2

ตารางผนวกที่ 3 ค่า D0 และ D5 น้ำเข้าระบบของน้ำกากส่า

ช่วงปีโอดีน้ำเสียที่เข้า				เปอร์เซ็นต์ การเจือจาง
ระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	D0	D5	D5	
100 - 200	7	4.4	4.2	2
200 - 300	7.1	2.3	2.2	2
350 - 450	7.2	3.5	3.2	1
550 - 650	7.1	4	3.7	0.5
750 - 850	7	3.2	3.3	0.5
950 -1050	7	2.3	2	0.5

ตารางผนวกที่ 4 ค่า D0 และ D5 น้ำออกกระบวนของน้ำกากส่า

ช่วงปีโอดี น้ำเสียที่เข้า	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเซลล์ที่ 1			เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเซลล์ที่ 2			เปอร์เซ็นต์ การเจือจาง
	D0	D5	D5	D0	D5	D5	
ระบบ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)							
100 - 200	7.2	2.1	2.2	7	2.3	2.3	10
200 - 300	7	2.4	2.6	7	2.7	2.8	10
350 - 450	7.2	3.2	3	7.1	3.1	3.4	5
550 - 650	7	3	2.8	7.1	2.9	3	5
750 - 850	7	4.5	4.4	7	4.6	4.7	2
950 -1050	7.1	3.2	3	7.2	3.3	3.5	2

ตารางผนวกที่ ๕ ค่า D0 และ D5 น้ำเข้าระบบของน้ำเสียโรงอาหาร

ช่วงปีโอดีน้ำเสียที่เข้า				เปอร์เซ็นต์
ระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	D0	D5	D5	การเจือจาง
100 - 200	7	4.5	4.6	2
200 - 300	7	2	2.4	2
350 - 450	7.1	2.8	3.2	1
550 - 650	7.2	4	4.2	0.5
750 - 850	7	3	2.9	0.5
950 -1050	7	2.4	2	0.5

ตารางผนวกที่ ๖ ค่า D0 และ D5 น้ำออกระบบของน้ำเสียโรงอาหาร

ช่วงปีโอดี น้ำเสียที่เข้า	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเซลล์ที่ 1			เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเซลล์ที่ 2			เปอร์เซ็นต์
	D0	D5	D5	D0	D5	D5	
ระบบ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)							การเจือจาง
100 - 200	7.2	3.1	2.9	7.1	3	3.1	10
200 - 300	7.2	3.3	3.6	7.1	3.5	3.4	10
350 - 450	7	4.1	4.4	7	3.9	4.2	5
550 - 650	7.1	4	4.5	7	3.9	4.1	5
750 - 850	7	4.7	4.6	7	4.9	4.8	2
950 -1050	7	4	4.1	7.1	3.7	3.8	2

ตารางผนวกที่ ๗ ค่าบีโอดีของน้ำเสียเข้าและออกระบบของน้ำเสียสังเคราะห์

ช่วงบีโอดีน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าบีโอดีน้ำเสียที่ เข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าบีโอดีน้ำเสียที่ออกระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
		เซลล์เชื้อเพลิงจุล ชีพเซลล์ที่ 1	เซลล์เชื้อเพลิงจุล ชีพเซลล์ที่ 2	ค่าเฉลี่ยบีโอดีน้ำ เสียที่ออกระบบ
100 - 200	120.0	25.5	22.5	24.0
200 - 300	242.5	35.0	33.5	34.3
350 - 450	410.0	55.0	25.0	40.0
550 - 650	620.0	84.0	76.0	80.0
750 - 850	790.0	122.5	115.0	118.8
950 -1050	970.0	170.0	167.5	168.8

ตารางผนวกที่ ๘ ค่าบีโอดีของน้ำเสียเข้าและออกระบบของน้ำกากส่า

ช่วงบีโอดีน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าบีโอดีน้ำเสียที่ เข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าบีโอดีน้ำเสียที่ออกระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
		เซลล์เชื้อเพลิงจุล ชีพเซลล์ที่ 1	เซลล์เชื้อเพลิงจุล ชีพเซลล์ที่ 2	ค่าเฉลี่ยบีโอดีน้ำ เสียที่ออกระบบ
100 - 200	135.0	49.5	47.0	48.3
200 - 300	242.5	90.0	87.0	88.5
350 - 450	385.0	136.7	128.3	132.5
550 - 650	650.0	205.0	207.5	206.3
750 - 850	780.0	255.0	235.0	245.0
950 -1050	970.0	390.0	380.0	385.0

ตารางผนวกที่ 9 ค่าบีโอดีของน้ำเสียเข้าและออกระบบของน้ำเสียโรงอาหาร

ช่วงบีโอดีน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าบีโอดีน้ำเสียที่ เข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าบีโอดีน้ำเสียที่ออกระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
		เซลล์เชื้อเพลิงจุล ชีพเซลล์ที่ 1	เซลล์เชื้อเพลิงจุล ชีพเซลล์ที่ 2	ค่าเฉลี่ยบีโอดีน้ำ เสียที่ออกระบบ
100 - 200	122.5	40.0	40.5	40.3
200 - 300	240.0	75.0	73.0	74.0
350 - 450	410.0	91.7	98.3	95.0
550 - 650	620.0	142.5	150.0	146.3
750 - 850	810.0	235.0	215.0	225.0
950 -1050	9760.0	295.0	335.0	315.0

ตารางผนวกที่ 10 ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) น้ำเข้าระบบของน้ำเสียสังเคราะห์

ช่วงบีโอดีน้ำเสีย ที่เข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)			เปอร์เซ็นต์การ เจือจาง
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	
100 - 200	0.069	0.07	0.07	-
200 - 300	0.127	0.128	0.128	-
350 - 450	0.22	0.21	0.2	-
550 - 650	0.321	0.33	0.314	-
750 - 850	0.405	0.409	0.405	-
950 -1050	0.265	0.264	0.264	50

ตารางผนวกที่ 11 ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) น้ำออกจากระบบของน้ำเสียสังเคราะห์

ช่วงปีโอดี น้ำเสียที่เข้า ระบบ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)						เปอร์เซ็นต์ การเจือ จาง
	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเซลล์ที่ 1			เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเซลล์ที่ 2			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	
100 - 200	0.015	0.018	0.016	0.015	0.019	0.016	-
200 - 300	0.021	0.023	0.02	0.021	0.023	0.024	-
350 - 450	0.031	0.033	0.034	0.033	0.035	0.035	-
550 - 650	0.061	0.057	0.059	0.06	0.057	0.062	-
750 - 850	0.076	0.074	0.076	0.075	0.075	0.074	-
950 -1050	0.055	0.057	0.055	0.056	0.058	0.057	50

ตารางผนวกที่ 12 ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) น้ำเข้าระบบของน้ำกากส่า

ช่วงปีโอดีน้ำเสีย ที่เข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)			เปอร์เซ็นต์การ เจือจาง
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	
100 - 200	0.167	0.165	0.167	-
200 - 300	0.299	0.302	0.3	-
350 - 450	0.238	0.236	0.238	50
550 - 650	0.359	0.353	0.357	50
750 - 850	0.094	0.096	0.097	10
950 -1050	0.125	0.124	0.125	10

ตารางผนวกที่ 13 ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) น้ำออกกระบบของน้ำกากส่า

ช่วงปีโอดี น้ำเสียที่เข้า ระบบ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)						เปอร์เซ็นต์ การเจือ จาง
	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเซลล์ที่ 1			เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเซลล์ที่ 2			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	
100 - 200	0.108	0.11	0.109	0.109	0.109	0.108	-
200 - 300	0.197	0.195	0.196	0.193	0.189	0.19	-
350 - 450	0.164	0.163	0.16	0.156	0.155	0.156	50
550 - 650	0.244	0.253	0.25	0.237	0.24	0.24	50
750 - 850	0.067	0.063	0.066	0.068	0.067	0.066	10
950 -1050	0.088	0.085	0.085	0.086	0.088	0.086	10

ตารางผนวกที่ 14 ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) น้ำเข้าระบบของน้ำเสียโรงอาหาร

ช่วงปีโอดีน้ำเสีย ที่เข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)			เปอร์เซ็นต์การ เจือจาง
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	
100 - 200	0.134	0.134	0.136	-
200 - 300	0.259	0.263	0.26	-
350 - 450	0.208	0.216	0.21	50
550 - 650	0.33	0.333	0.35	50
750 - 850	0.085	0.082	0.084	10
950 -1050	0.107	0.108	0.105	10

ตารางผนวกที่ 15 ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) น้ำออกกระบบของน้ำเสียโรงอาหาร

ช่วงปีโอดี น้ำเสียที่เข้า ระบบ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)						เปอร์เซ็นต์ การเจือ จาง
	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเซลล์ที่ 1			เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเซลล์ที่ 2			
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	
100 - 200	0.07	0.067	0.067	0.069	0.067	0.067	-
200 - 300	0.127	0.125	0.128	0.113	0.117	0.115	-
350 - 450	0.086	0.089	0.088	0.084	0.082	0.083	50
550 - 650	0.141	0.136	0.138	0.138	0.14	0.137	50
750 - 850	0.034	0.029	0.033	0.032	0.031	0.031	10
950 -1050	0.048	0.045	0.047	0.043	0.043	0.039	10

ตารางผนวกที่ 16 ค่าซีโอดีของน้ำเสียเข้าและออกกระบบของน้ำเสียสังเคราะห์

ช่วงซีโอดีน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสียที่ เข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสียที่ออกกระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
		เซลล์เชื้อเพลิงจุล ชีพเซลล์ที่ 1	เซลล์เชื้อเพลิงจุล ชีพเซลล์ที่ 2	ค่าเฉลี่ยซีโอดีน้ำ เสียที่ออกกระบบ
100 - 200	161.6	37.9	38.7	38.3
200 - 300	296.2	49.5	52.6	51.0
350 - 450	487.2	75.8	79.7	77.7
550 - 650	746.3	136.9	138.4	137.7
750 - 850	942.8	174.8	173.2	174.0
950 -1050	1226.6	258.3	264.5	216.4

ตารางผนวกที่ 17 ค่าซีโอดีของน้ำเสียเข้าและออกระบบของน้ำกากส่า

ช่วงซีโอดีน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสียที่ เข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสียที่ออกระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
		เซลล์เชื้อเพลิงจุล ชีพเซลล์ที่ 1	เซลล์เชื้อเพลิงจุล ชีพเซลล์ที่ 2	ค่าเฉลี่ยซีโอดีน้ำ เสียที่ออกระบบ
100 - 200	390.9	256.2	255.4	255.8
200 - 300	705.8	460.6	448.1	454.4
350 - 450	1115.6	763.0	731.7	747.4
550 - 650	1674.9	1170.4	1123.4	1146.9
750 - 850	2248.3	1535.4	1574.6	1555.0
950 -1050	2929.9	2021.2	2036.8	2029.0

ตารางผนวกที่ 18 ค่าซีโอดีของน้ำเสียเข้าและออกระบบของน้ำเสียโรงอาหาร

ช่วงซีโอดีน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสียที่ เข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสียที่ออกระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
		เซลล์เชื้อเพลิงจุล ชีพเซลล์ที่ 1	เซลล์เชื้อเพลิงจุล ชีพเซลล์ที่ 2	ค่าเฉลี่ยซีโอดีน้ำ เสียที่ออกระบบ
100 - 200	321.2	159.8	159.0	159.4
200 - 300	611.8	297.7	270.3	284.0
350 - 450	993.3	412.1	390.1	401.1
550 - 650	1587.2	650.2	650.2	650.2
750 - 850	1966.3	752.1	736.4	744.2
950 -1050	2506.9	1096.7	979.2	1038.0

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	ณัฐสิริ แสงธรรมธร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	21 มิถุนายน 2527
สถานที่เกิด	นนทบุรี
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงาน นโยบายและแผนพลังงาน ประจำปีงบประมาณ 2550