



การผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี

นางสาวพิมพ์พิชญ์ นิโกบ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2556

การผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี

นางสาวพิมพ์พิชญ์ นิโกบ วศ.บ. (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... (ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ)	ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
..... (ผศ. ดร.วิลาสินี อยู่ชัชวาล)	กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
..... (ดร.ภาติญา เขมาชีวะกุล)	กรรมการ
..... (ผศ. ดร.ตะวัน ลิ้มปิยากร)	กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นางสาวพิมพ์พิชญ์ นิโกบ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร. วิลาสินี อยู่ชัชวาล
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำกลับสารอาหาร(ฟอสฟอรัส)จากน้ำเสียฟาร์มสุกรเพื่อนำมาใช้เป็นสารปรับปรุงดินโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีแผ่นเหล็กเป็น Electrode กำหนดตัวแปรต้นคือ ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและความเข้มข้นกระแส การทดลองใช้น้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์จากฟาร์มสุกร พบว่า กระบวนการไฟฟ้าเคมีมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสมากกว่า 80% ในทุกการทดลอง ทำการทดสอบศักยภาพของสารปรับปรุงคุณภาพดินที่มีเหล็กเจือปนจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีต่อการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียผลิตก๊าซมีเทน พบว่า ความเข้มข้นกระแส 9.57 มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตร มีค่าศักยภาพในการผลิตมีเทน เท่ากับ 0.1 มิลลิกรัมมีเทน-ซีโอดีต่อกรัมวีเอสเอสต่อวัน โดยมีปริมาณเหล็ก 3,687.60 มิลลิกรัมเหล็กต่อลิตร และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองควบคุม (ไม่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก) มีค่าเท่ากับ 3.05 มิลลิกรัมมีเทน-ซีโอดีต่อกรัมวีเอสเอสต่อวัน ดังนั้นสารปรับปรุงคุณภาพดินที่ผลิตได้สามารถยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนของแบคทีเรียผลิตก๊าซมีเทน เมื่อนำสารปรับปรุงคุณภาพดินไปทดสอบในแปลงเกษตร พบว่า ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนจากดินในแปลงเกษตรมีแนวโน้มลดลง กล่าวโดยสรุปแล้วกระบวนการไฟฟ้าเคมีสามารถนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียให้อยู่ในรูปของสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก ซึ่งมีศักยภาพในการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทน

คำสำคัญ: สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก/ กระบวนการไฟฟ้าเคมี/ การยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทน/
น้ำเสียฟาร์มสุกร

Thesis Title	The Soil Conditioner Production by Electrochemical Process
Thesis Credit	12
Candidate	Miss Pimpich Nigob
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Wilasinee Yoochatchawal
Program	Master of Engineering
Field of Study	Environmental Engineering
Department	Environmental Engineering
Faculty	Engineering
Academic Year	2013

Abstract

The nutrient (Phosphorus) recovery from swine wastewater by electrochemical process was investigated in this study. The iron steel has been used as an electrode. Electrochemical reactor was conducted with different conditions such as operating time and current density. The real swine wastewater and the synthetic swine wastewater were used for the experiment. The result showed that the PO_4^{3-} could be removed more than 80% as chemical sediment with iron. The potential of methane inhibition of this sediment was observed by Anaerobic Toxicity Assay measurement. Sediment from EC process at current density of 9.57 mA cm^{-2} causes iron content at 3,687.60 mg/L per serum vial. The ATA value of this sediment was 0.1 $\text{mgCH}_4\text{-COD/gVSS.day}$ (3.05 $\text{mgCH}_4\text{-COD/gVSS.day}$ for control). So, this sediment or soil conditioner from EC process can mitigate methane emissions of the methanogen bacteria. Also, in application, we applied this soil conditioner to the crop and confirmed the CH_4 emission. The trend of CH_4 concentration was mitigated by addition of the soil conditioner from EC process, compared with control. So, not only to recover P from wastewater this soil conditioner was also possible to inhibit the CH_4 production of methanogen bacteria.

Keywords: Soil conditioner mixing iron/ Electrochemical process/ Methane mitigation/
Swine wastewater

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ. ดร.วิลาสินี อยู่ชัชวาล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ และปลูกฝังแนวคิดของการเป็นนักวิจัยที่ดีให้แก่ผู้วิจัย ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งในการดำเนินงานและการดำเนินชีวิต รวมทั้งตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ ในฐานะประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์สำหรับคำแนะนำและแนวคิดของภาคธุรกิจการลงทุนให้แก่ผู้วิจัย ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งขอขอบพระคุณ ดร.ภาติญา เขมาชีวะกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำและแนวคิดในการทำวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ รศ. ดร.ตะวัน ลิ้มปียากร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเอื้อเฟื้อเวลาและให้คำแนะนำต่างๆ นอกจากนี้ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่เป็นผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณคุณพิระดา ว่องเกษฐา คุณจงกลณี ประดิษฐ์พงษ์ และ คุณนิโลบล ชุมภู เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำทดลองในห้องปฏิบัติการขอขอบพระคุณ คุณนริรัตน์ สอนใจ ที่ให้ความร่วมมือและช่วยเหลือทางด้านการเก็บตัวอย่างก๊าซจากแปลงเกษตร ขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ที่ได้สนับสนุนเงินทุนวิจัย ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณ คุณนิมารดี บุญอาพัทธเจริญ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิจัย Fungal Biotechnology สำหรับคำแนะนำและให้ความช่วยเหลือด้าน Molecular Technique และ ศูนย์ความเป็นเลิศเฉพาะทางด้านการจัดการ และใช้ประโยชน์จากของเสียอุตสาหกรรมเกษตร (Excellent Center of Waste utilization and management) ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์สำหรับการทดลองด้าน Molecular Technique

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณครอบครัวและบุพการีทั้งสองท่าน สำหรับกำลังใจและให้โอกาสในการศึกษา รวมทั้งให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมา ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ประโยชน์อันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ญ
รายการรูปประกอบ	ฉ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฐ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิจัย	3
2. ทฤษฎี/งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 สภาวะโลกร้อน	4
2.1.1 ผลของสภาวะ โลกร้อนที่มีต่อประเทศไทย	4
2.1.2 การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคเกษตรกรรมของประเทศไทย	4
2.1.3 พิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol)	6
2.1.4 การประชุม เจริญสมัชชา รัฐบาลคือนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สมัยที่ 17 (COP-17)	7
2.2 การเกิดก๊าซมีเทน	8
2.2.1 กระบวนการเกิดก๊าซมีเทนในนาข้าว	9
2.2.2 การปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าว	10
2.2.3 ลักษณะของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนจากดินนาและรากข้าว	11
2.3 น้ำเสียจากฟาร์มสุกร	13
2.3.1 ส่วนประกอบของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร	13

	หน้า
2.3.2 เกณฑ์มาตรฐานน้ำเสียจากฟาร์มสุกร	14
2.4 การนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกรไปผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดิน	16
2.4.1 การตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดิน	16
2.4.2 กลไกการตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดิน	16
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดิน	17
2.5.1 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)	17
2.5.2 การกวนผสม (mixing)	17
2.5.3 อุณหภูมิ (Temperature)	18
2.5.4 ความอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated)	18
2.5.5 อัตราส่วนของ $\text{PO}_4^{3-}:\text{Mg}^{2+}:\text{NH}_4^+$	18
2.6 การผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี	18
2.7 การนำสารประกอบของเหล็กไปใช้เป็นปุ๋ยเพื่อลดการเกิดก๊าซมีเทน	19
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
3. วิธีการวิจัย	32
3.1 แผนการดำเนินงาน	32
3.2 ตัวแปรที่ศึกษา	34
3.2.1 ตัวแปรอิสระ	34
3.2.2 ตัวแปรตาม	34
3.2.3 ตัวแปรควบคุม	34
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	34
3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดิน โดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีสำหรับน้ำเสียฟาร์มสุกรจริง	34
3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดิน โดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ฟาร์มสุกร	35
3.3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทำ Anaerobic Toxicity Assay	35
3.3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการบ่มดินเพื่อหา community ของ Methanogen	35

	หน้า
3.3.5 เครื่องมือที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ	35
3.4 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	36
3.5 น้ำเสียฟาร์มสุกร	36
3.5.1 น้ำเสียจากฟาร์มสุกรจริง	36
3.5.2 น้ำเสียสังเคราะห์ฟาร์มสุกร	37
3.6 การดำเนินการทดลอง	38
3.6.1 การผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินโดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียจริง	38
3.6.2 การผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินโดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์	40
3.6.3 การทำ Anaerobic Toxicity Assay เพื่อทดสอบความสามารถการทำงานของ Methanogen bacteria	42
3.6.4 การหา Community ของ Methanogen ในดินและหาการปลดปล่อยมีเทนจากนาข้าว	43
3.6.5 การหา community ของ Methanogen ในดิน	43
3.6.6 การสกัด DNA (DNA extraction)	43
3.6.7 การทำ Polymerase Chain Reaction (PCR)	44
3.7 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา	46
4. ผลจากการวิจัย	47
4.1 ผลจากการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรจริง	47
4.1.1 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ระยะเวลาต่างๆ โดยมี current density ที่แตกต่างกัน	47
4.1.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเหล็ก	48
4.1.3 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (COD)	50
4.1.4 ปริมาณเหล็กในสารปรับปรุงคุณภาพดิน	51
4.1.5 Anaerobic Toxicity Assay (ATA)	53
4.1.6 ผลวิเคราะห์ XRF	55
4.2 ผลจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยการใช้น้ำเสียฟาร์มสุกรสังเคราะห์	56
4.2.1 ผลการทดลองจากการปรับ pH ก่อนดำเนินงาน	56
4.2.1.1 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่สามารถ recovery ได้	56
4.2.1.2 ความเป็นกรดต่าง (pH)	58
4.2.1.3 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (COD)	59

หน้า

4.2.1.4 Anaerobic Toxicity Assay (ATA)	60
4.2.1.5 ความเข้มข้นของเหล็กหลังจาก Anaerobic Toxicity Assay	61
4.2.1.6 X-ray Fluorescence (XRF)	63
4.2.1.7 X-ray diffraction (XRD)	64
4.2.1.8 พลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายจากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมี	67
4.2.2. ผลการทดลองโดยไม่ปรับ pH ก่อนดำเนินงาน	70
4.2.2.1 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่สามารถ recovery ได้	70
4.2.2.2 ความเป็นกรดต่าง (pH)	72
4.2.2.3 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (COD)	73
4.2.2.4 ความเข้มข้นของเหล็ก	74
4.2.2.5 Anaerobic Toxicity Assay (ATA)	75
4.2.2.6 ความเข้มข้นของเหล็กหลังจาก Anaerobic Toxicity Assay	76
4.2.2.7 X-ray Fluorescence (XRF)	78
4.2.2.8 X-ray diffraction (XRD)	79
4.2.2.9 พลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายจากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมี	80
4.3 ผลการทดลองจากแปลงเกษตร	82
4.3.1 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากแปลงทดลอง	82
4.3.2 การหา community ของ Methanogen bacteria	84
5. สรุปผลการวิจัย	86
5.1 การดำเนินงานโดยใช้น้ำเสียจริง	86
5.2 การดำเนินงานโดยการใช้ น้ำเสียฟาร์มสุกรสังเคราะห์	86
5.2.1. ผลการทดลองจากการปรับ pH ก่อนดำเนินงาน	86
5.2.2. ผลการทดลองจากการไม่ปรับ pH ก่อนดำเนินงาน	87
5.3 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากแปลงเกษตรและ community ของ Methanogen	87

เอกสารอ้างอิง

88

ภาคผนวก

- ก. ตารางผลการทดลองพารามิเตอร์ต่างๆ จากกระบวนการไฟฟ้าเคมี
โดยการใช้ น้ำเสียจริง 95
- ข. ตารางผลการทดลองพารามิเตอร์ต่างๆ จากกระบวนการตกตะกอนทางเคมี
โดยการใช้ น้ำเสี้ยงเคราะห์ที่มีการปรับ pH ก่อนดำเนินงาน 109
- ค. ตารางผลการทดลองพารามิเตอร์ต่างๆ จากกระบวนการไฟฟ้าเคมี
โดยการใช้ น้ำเสี้ยงเคราะห์ที่ไม่มีการปรับ pH ก่อนดำเนินงาน 152
- ง. ตารางผลการทดลองพารามิเตอร์ต่างๆ จากการทดลองในแปลงเกษตร 172
- จ. รูปต่างๆ จากการดำเนินงานตกตะกอนไฟฟ้าเคมี 175

ประวัติผู้วิจัย

178

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงปฏิกิริยาและรีดอกซ์โพเทนเชียล (Eh) ในดินน้ำท่วม	10
2.2 แสดงปริมาณสิ่งขับถ่ายของสุกรในแต่ละวัน	13
2.3 แสดงส่วนประกอบของน้ำเสียฟาร์มสุกร	14
2.4 แสดงมาตรฐานน้ำเสียจากฟาร์มสุกร	15
3.1 แสดงแผนการปฏิบัติงาน	33
3.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุอาหารในน้ำเสียสังเคราะห์	37
3.3 แสดงสารอินทรีย์คาร์บอน สารอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ในน้ำเสียสังเคราะห์	37
3.4 แสดงค่าพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์	46
4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักจากการวิเคราะห์ XRF	55
4.2 แสดงศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของ Methanogenic bacteria โดยการทำ ATA	60
4.3 แสดงความเข้มข้นของเหล็กในส่วนที่เหลือจากการทำ ATA	62
4.4 แสดงศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria โดยการทำ ATA	75
4.5 แสดงความเข้มข้นของเหล็กในส่วนที่เหลือจากการทำ ATA	77

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	แสดงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2543	5
2.2	แสดงปริมาณและสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ในปี พ.ศ.2543	5
2.3	แสดงการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรตในดินน้ำขัง	9
2.4	Methanogen จากตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าว	12
2.5	Methanogen จากตัวอย่างดินบริเวณรากข้าว	12
2.6	Methanogen จากรากข้าว	12
2.7	แสดงรูปร่างของผลึกสารปรับปรุงคุณภาพดิน	17
2.8	แสดงรูปร่างของผลึกสตรูไวท์	20
2.9	แสดงรูปร่างของสตรูไวท์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)	24
2.10	แสดงรูปร่างของสตรูไวท์ ซึ่งเป็นมีรูปร่างเป็นเข็ม (needle shape)	26
3.1	แสดงการติดตั้งระบบการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียจริง	38
3.2	แสดงการดำเนินงานหลังจากติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์	39
3.3	แสดงการติดตั้งระบบการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์	40
3.4	แสดงการดำเนินงานหลังจากติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์	41
4.1	แสดงความเข้มข้นของฟอสฟอรัสจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่เวลาต่างๆ	47
4.2	แสดงความเข้มข้นของเหล็กจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี	49
4.3	แสดงความเข้มข้นของซีโอดีจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี	51
4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current density กับความเข้มข้นของเหล็ก	52
4.5	แสดงปริมาณเหล็กแต่ละความเข้มข้นกระแส สำหรับการทำให้ ATA	53
4.6	แสดงค่า ATA แต่ละความเข้มข้นกระแส	54
4.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสฟอรัสกับ Current density	56
4.8	แสดงค่าความเป็นกรดต่างจากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมี โดยมี ความเข้มข้นกระแสและระยะเวลาในการดำเนินงานต่างกัน	58
4.9	แสดงประสิทธิภาพในการกำจัด COD แต่ละความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าที่ใช้	59
4.10	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของธาตุในสารปรับปรุงคุณภาพดิน โดยการวิเคราะห์ XRF	63
4.11	แสดงกราฟจากการวิเคราะห์ XRD ของสารปรับปรุงคุณภาพดินแต่ละชนิด	65

รูป	หน้า
4.12 แสดงพลังงานไฟฟ้าจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยมีความเข้มข้น กระแสและระยะเวลาในการดำเนินงานต่างกัน	67
4.13 แสดงค่าใช้จ่ายจากการดำเนินงานโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยมี ความเข้มข้นกระแสและระยะเวลาในการดำเนินงานต่างกัน	69
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสฟอรัสกับประสิทธิภาพ ในการ recovery ฟอสฟอรัสแต่ละความเข้มข้นกระแส	70
4.15 แสดงค่าความเป็นกรดด่าง (pH) จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมี	72
4.16 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัด COD แต่ละความเข้มข้นกระแส	73
4.17 แสดงความเข้มข้นของเหล็กจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี	74
4.18 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของธาตุในสารปรับปรุงคุณภาพดินแต่ละชนิด โดยการวิเคราะห์ XRF	78
4.19 แสดงผลจากการวิเคราะห์ XRD ของสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก	79
4.20 แสดงพลังงานไฟฟ้าจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี	80
4.21 แสดงค่าใช้จ่ายจากการดำเนินงานโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี	81
4.22 แสดงความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่ปลดปล่อยจากแปลงเกษตรในแต่ละเดือน ระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ.2556 – เมษายน พ.ศ.2557	82
4.23 แสดง PCR pattern จากการใช้ <i>mcrA</i> gene specific primer	84

ประมวลศัพท์และคำย่อ

กก.	=	กิโลกรัม
นน.	=	น้ำหนัก
สปด.	=	สารปรับปรุงคุณภาพดิน
ATA	=	Anaerobic Toxicity Assay
COD	=	Chemical Oxygen Demand
DC	=	Direct current
EC	=	Electrochemical
Eh	=	Redox Potential
Fe-struvite	=	Iron mixing with Struvite
g.	=	gram
g/l	=	gram per Liters
gSS/l	=	gram Suspended Solids per liters
gVSS/l	=	gram Volatile Suspended Solids per liters
kWh	=	kilo Watt hour
MAP	=	struvite
mA cm^{-2}	=	milliamp per centimeter square
Mg	=	Magnesium
mg/l	=	milligram per liters
$\text{mgCH}_4/\text{mgVSS.day}$	=	mg Methane per mg Volatile Suspended Solids per day
P	=	Phosphorus
PCR	=	Polymerase Chain Reaction
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P} : \text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+$	=	Ratio of Phosphorus, Magnesium and Ammonia
ppm	=	part per millions
TS	=	Total Solids
TVSS	=	Total Volatile Suspended Solids
UASB	=	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
XRD	=	X-ray diffraction
XRF	=	X-ray Fluorescence

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ฟอสฟอรัสและแอมโมเนียจัดเป็นสารประกอบกลุ่มสารอาหาร (Nutrient) สำหรับพืช มักพบปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียชุมชน ปัสสาวะของมนุษย์ และน้ำเสียจากภาคเกษตรกรรม (ฟาร์มเลี้ยงสัตว์) เมื่อมีการปล่อยน้ำเสียดังกล่าวลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ อาจจะทำให้เกิดปัญหาสาหร่ายเบ่งบาน (algal bloom) ดังนั้นน้ำเสียในกลุ่มที่มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและแอมโมเนียสูงจึงสมควรผ่านการบำบัดนำกลับสารอาหารมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อม

การตกตะกอนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีเป็นเทคนิคหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับการนำกลับสารอาหาร เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพสูง เมื่อเริ่มกระบวนการจ่ายกระแสไฟฟ้าภายนอกเข้าไป ทำให้สารละลายที่ใกล้ขั้วแคโทดมีค่า pH เพิ่มขึ้น เพราะเกิดจากการแพร่ของออกซิเจนไปสู่ขั้วแคโทด แล้วให้ OH^- ออกมา (Wang *et al.*, 2010) ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการเติมสารเคมีเพื่อปรับ pH เนื่องจากการตกตะกอนจะเกิดขึ้นเมื่อมีสถานะความเป็นด่าง และการตกตะกอนสารอาหารพวกฟอสฟอรัส ซึ่งต่อไปนี้จะขอเรียกว่า “สารปรับปรุงคุณภาพดิน” มี pH ที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 8 – 11 ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงมีแนวคิดในการผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินจากน้ำเสียฟาร์มสุกรโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี

นอกจากนี้ปัญหาสภาวะโลกร้อนในปัจจุบันเพิ่มทวีสูงขึ้น เนื่องจากการทำกิจกรรมของมนุษย์เป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเผาไหม้ น้ำมันเชื้อเพลิงและการทำเกษตรกรรม ส่งผลให้มีการสะสมของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศมากขึ้นไป จึงทำให้ส่งผลกระทบต่อดำรงชีวิตของมนุษย์ทั่วโลก ดังนั้นก๊าซเรือนกระจกจึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น เนื่องจากก๊าซเรือนกระจกมีคุณสมบัติในการดูดซับและแผ่รังสีความร้อน จึงมีความสำคัญต่อการรักษาอุณหภูมิของโลก

ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีมากเป็นลำดับสองรองมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แต่ก๊าซมีเทนมีความสำคัญต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของโลกมากกว่า เนื่องจากก๊าซมีเทนมีความสามารถในการเพิ่มอุณหภูมิของโลกได้มากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 26.5 เท่า (คมกฤษณ์ ศิริรมย์, 2554) โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1 ส่วนในล้านส่วนโดยปริมาตร จะทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น 0.0049 องศาเซลเซียส ในขณะที่ก๊าซมีเทน 1 ส่วนในล้านส่วนโดยปริมาตร จะทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นถึง 0.13 องศาเซลเซียส (คมกฤษณ์ ศิริรมย์, 2554) ดังนั้นก๊าซมีเทนมีความสำคัญมาก

ก๊าซมีเทนเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรีย Methanogen และส่วนใหญ่มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากภาคเกษตรกรรม วิทยานิพนธ์นี้จึงหาแนวคิดเพื่อยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนของแบคทีเรีย Methanogen จากการศึกษาวิจัยของ Schnell *et al.*, 2000; Huang *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2009 พบว่า เฟอร์ริกไอออนสามารถยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย Methanogen ไม่ให้เกิดก๊าซมีเทนได้ถึง 52-80% วิทยานิพนธ์นี้จึงมีแนวคิดในการนำเฟอร์ริกไอออนไปผสมกับสารปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งเป็นปุ๋ยชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในภาคเกษตรกรรม โดยสารปรับปรุงคุณภาพดินที่ใช้จะทำการผลิตจากน้ำเสียฟาร์มสุกร ซึ่งมีธาตุอาหารที่เหมาะสมในการทำเกษตรกรรมปริมาณมาก และมีแนวคิดในการนำเฟอร์ริกไอออนมาจากแผ่นเหล็กซึ่งเป็นขั้ว Electrode จากการกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่มีแผ่นเหล็กเป็นขั้ว Electrode คือ สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินจากน้ำเสียฟาร์มสุกรโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีแผ่นเหล็กเป็นวัสดุขั้วที่สภาวะต่างๆ อาทิ ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กต่อการยับยั้งการทำงานของ Methanogenic Bacteria จากการทดสอบ Anaerobic Toxicity Assay รวมทั้งวัดความเข้มข้นของก๊าซมีเทน และ community ของ Methanogenic Bacteria ในแปลงเกษตร

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกรที่ อ.หนองแค จ.สระบุรี และ น้ำเสียสังเคราะห์จากฟาร์มสุกร
2. การผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยมีระยะห่างของแผ่นเหล็กเท่ากับ 2 และ 10 เซนติเมตร สำหรับถึงปฏิกิริยาที่ใช้กับน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์ ตามลำดับ
3. เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดสอบ Anaerobic Toxicity Assay มาจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศในถังปฏิกรณ์ UASB ที่ได้ดำเนินงานมาแล้ว 3 ปีของบริษัทเบียร์ไทย (1991) จำกัด (มหาชน)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิจัย

1. สามารถผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินจากน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์จากฟาร์มสุกร โดยใช้กระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี
2. สารปรับปรุงคุณภาพดินสามารถยับยั้งการทำงานของ Methanogenic Bacteria ได้

บทที่ 2 ทฤษฎี/งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน

สภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาหลักที่ส่งผลกระทบต่อประชาชนทั่วโลก ซึ่งสาเหตุเกิดจากก๊าซเรือนกระจก ที่ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2), ก๊าซมีเทน(CH_4), ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O), ก๊าซในกลุ่มไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน(HFCs), ก๊าซเปอร์ฟลูออโรคาร์บอน(CFCs) และก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์(SF_6) โดยก๊าซเรือนกระจกส่วนใหญ่มาจากการทำกิจกรรมของมนุษย์ ทำให้มีการจัดตั้งพิธีสารเกียวโตขึ้น

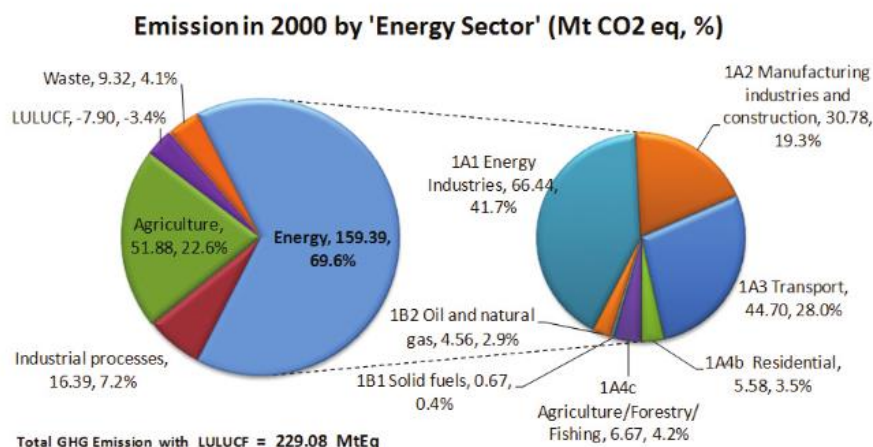
ปัจจุบันทั่วโลกให้ความสำคัญกับปัญหาโลกร้อนที่มีสาเหตุมาจากภาคเกษตรกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การทำนาที่มีน้ำขัง เพราะจะทำให้เกิดสภาวะขาดออกซิเจน ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยไม่ใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์กลุ่ม Methanogenic Bacteria ทำให้มีการผลิตก๊าซมีเทนและปลดปล่อยสู่บรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน โดยค่า Global Warming Potential (GWP) ของก๊าซมีเทนมีค่าเท่ากับ 21 เท่าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (UNFCCC, 2012) ดังนั้นการเพาะปลูกข้าวจึงมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้

2.1.1 ผลของสภาวะโลกร้อนที่มีต่อประเทศไทย

อุณหภูมิในโลกช่วง 50 ปีที่ผ่านมา มีแนวโน้มสูงขึ้นตลอด เฉลี่ยประมาณ 2.5- 4 °C ประเทศไทยได้รับผลกระทบในเรื่องอุณหภูมิและปริมาณฝน โดยอุณหภูมิในภาคตะวันออกเฉียงเหนืออาจสูงขึ้น 4°C และอุณหภูมิภาคใต้อาจสูงขึ้น 2.5 °C นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยของฝนรายปีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นมากกว่าปกติเล็กน้อย โดยภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 20 %ของปริมาณปกติ ส่วนภาคใต้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 40 % แต่เมื่อนำผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นมาวิเคราะห์รวมกันแล้ว ดังนั้นภาคตะวันออกเฉียงเหนืออาจจะแห้งแล้งขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมาก แต่ปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้นน้อย ส่วนภาคใต้อาจชุ่มชื้นเนื่องจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นน้อยแต่ปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้นมาก

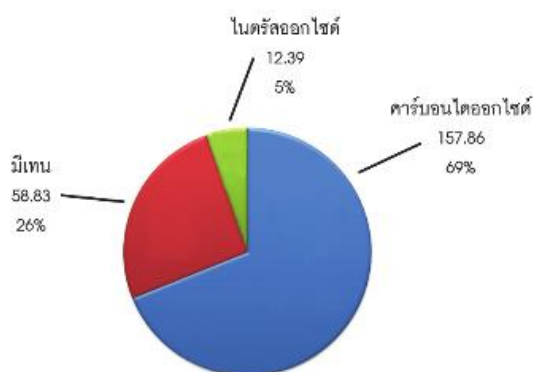
2.1.2 การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคเกษตรกรรมของประเทศไทย

ปัญหาสภาวะโลกร้อนในปัจจุบันมาจากภาคเกษตรกรรมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคเกษตรกรรมของประเทศไทยอยู่ที่ 51.88 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ซึ่งเป็นอันดับสองรองจากภาคพลังงานอยู่ที่ 159.4 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า แสดงดังรูปที่2.1 (สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย, 2553)



รูปที่ 2.1 แสดงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2543
(สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย, 2553)

ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO₂) ของประเทศทั้งหมดเท่ากับ 157.86 ล้านตัน คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ก๊าซมีเทน(CH₄) เท่ากับ 58.83 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และก๊าซไนตรัสออกไซด์(N₂O) เท่ากับ 12.39 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ซึ่งคิดเป็นร้อยละ ได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงปริมาณและสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยในปี พ.ศ.2543
(สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย, 2553)

นอกจากนี้การผลิตข้าวและการย่อยอาหารของสัตว์เคี้ยวเอื้องเป็นแหล่งที่มาหลักของการปลดปล่อย ก๊าซมีเทนจากภาคเกษตรกรรม รวมทั้งมีการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการปล่อยโดยตรง และทางอ้อมจากดินที่ทำเกษตรกรรม และเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีพื้นที่ทำ

นาเป็นจำนวนมาก รวมทั้งมีการส่งออกข้าวเป็นอันดับต้นๆของโลก ดังนั้นปัญหาเรื่องการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าว อาจส่งผลกระทบต่อ การส่งออกข้าวของไทย และการประกอบอาชีพของชาวนา ลักษณะการทำนาแบบนาสวน เป็นแบบที่เกษตรกรนิยมใช้ ซึ่งมักจะส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทน มากกว่าการทำนาแบบนาเมืองและนาไร่ รวมทั้งการทำนาในรูปแบบนาดำเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทน นอกจากนี้ ลักษณะทางกายภาพของดินที่มีลักษณะหยาบ อินทรีย์วัตถุสูง และค่า pH เป็นกลาง ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงเช่นกัน รวมทั้งพันธุ์ข้าวก็สามารถส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับสรีรวิทยาของช่องอากาศภายในลำต้น (พันธุ์ศัมพันธ์พานิช และ นิตยา รื่นสุข, 2556)

2.1.3 พิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol)

เนื่องด้วยก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gases: GHG) เป็นก๊าซที่มีการสะสมตัวในชั้นบรรยากาศเป็นระยะเวลานาน และการสะสมของก๊าซเรือนกระจกเป็นจำนวนมากจะส่งผลให้สภาพภูมิอากาศโดยรวมของโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น จนกลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมระดับโลก ด้วยเหตุนี้ อนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือ UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) เพื่อรักษาระดับความเข้มข้นของปริมาณก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย เพื่อให้ธรรมชาติสามารถปรับตัวได้และเพื่อเป็นการประกันว่าจะไม่มีผลกระทบต่อความมั่นคงทางอาหารและไม่ส่งผลกระทบต่อพัฒนาเศรษฐกิจอย่างยั่งยืน (ภิรนา พุทธิรัตน์, 2550)

ก๊าซเรือนกระจกที่อยู่ภายใต้พิธีสารเกียวโตที่มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและมีผลกระทบโดยตรงต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ก๊าซมีเทน (CH_4), ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) โดยมีแหล่งกำเนิดดังนี้

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สามารถเกิดขึ้นจากกระบวนการตามธรรมชาติ โดยมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสงและการหายใจของสิ่งมีชีวิต และสามารถเกิดขึ้นจากมนุษย์เป็นผู้สร้าง โดยมาจากการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ รวมทั้งตัดไม้ทำลายป่าด้วย

ก๊าซมีเทน (CH_4) สามารถเกิดขึ้นจากกระบวนการตามธรรมชาติและจากการประกอบกิจกรรมของมนุษย์ โดยมาจากการย่อยสลายของมูลสัตว์ การย่อยสลายสารอินทรีย์ การทำนาในน้ำขังและการเผาป่า เป็นต้น ก๊าซมีเทนมีความสามารถในการดูดซับรังสีความร้อนดีกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 21 เท่า จึงทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นถึง 1 ใน 3 เท่าของปริมาณที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ก๊าซไนตรัสออกไซด์(N₂O) สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยมาจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดิน นอกจากนี้การใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในการเกษตรก็มีผลต่อการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ออกมาด้วย พหุสารเกียวโต คือ การจัดสรรสิทธิการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้กับประเทศภาคี โดยสิทธิการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่จัดสรรนี้มีจำนวนต่ำกว่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ประเทศภาคีปล่อยอยู่ในปัจจุบัน เพื่อจำกัดและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทั้งนี้อนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ แบ่งประเทศสมาชิกออกเป็น 2 กลุ่ม

1. ประเทศภาคีในภาคผนวกที่ 1 (Annex I)

ประเทศภาคีในภาคผนวกที่ 1 (Annex I) คือ กลุ่มของประเทศที่พัฒนาแล้ว ประกอบด้วย 42 ประเทศ มีพันธกรณีถูกบังคับให้ลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 5.2% จากระดับที่เคยปล่อยเมื่อปี พ.ศ. 2533 ภายในปี พ.ศ.2551-2555 และในอนาคตอาจต้องลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 13-17 % (COP-16) แล้วต้องส่งรายงานแห่งชาติเพื่อการตรวจสอบ และสนับสนุนทางการเงินและเทคโนโลยี

2. ประเทศภาคีที่อยู่นอกภาคผนวกที่ 1 (Annex II)

ประเทศภาคีที่อยู่นอกภาคผนวกที่ 1 (Annex II) คือ กลุ่มของประเทศกำลังพัฒนา ประกอบด้วย 153 ประเทศ ซึ่งประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศที่อยู่ในกลุ่มนี้ ซึ่งประเทศกลุ่ม Annex II สามารถปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ตามอิสระ แต่ต้องมีแนวทางในการร่วมช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกด้วย และมีเพียงพันธกรณีในการส่งรายงานแห่งชาติและสนับสนุนการดำเนินงานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศตามอนุสัญญาฯ

ในปัจจุบันได้มีการประชุม เจริญสมัชชา รัฐภาคีอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สมัยที่ 17 (COP-17) ในการประชุมนี้มีประเด็นที่สำคัญเกี่ยวกับ การกำหนดเป้าหมายในระดับนานาชาติในเรื่องการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ภายหลังจากที่พหุสารเกียวโตจะสิ้นสุดลงในปี พ.ศ. 2555

2.1.4 การประชุม เจริญสมัชชา รัฐภาคีอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สมัยที่ 17 (COP-17)

การประชุมเจริญสมัชชา รัฐภาคีอนุสัญญาสหประชาชาติ ว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สมัยที่ 17 และการประชุม รัฐภาคีพหุสารเกียวโต สมัยที่ 7 (COP-17/ CMP-7) จัดขึ้นระหว่างวันที่ 28 พฤศจิกายน – 12 ธันวาคม 2554 ณ เมืองเดอร์บัน ประเทศแอฟริกาใต้ ในการประชุมครั้งนี้ องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) ได้มีส่วนร่วมเป็นองค์ประกอบคณะผู้แทนไทยเข้าร่วมการประชุมเจริญโดยเฉพาะอย่างยิ่งติดตามใกล้ชิดในประเด็นเจรจาด้านการลดก๊าซเรือนกระจก

จากการประชุมของ COP-17 และองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.) ได้ติดตามประเด็นหลัก 2 เรื่อง คือ

1. พันธกรณีลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศพัฒนาแล้ว (Annex I)

ประเทศพัฒนาแล้ว (Annex I) ควรลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกลง 25% - 40% ภายในปี พ.ศ.2563 เทียบกับปริมาณการปลดปล่อยที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ.2533 และประเทศกลุ่ม Annex I ควรลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกลง 80% - 95% ภายในปี พ.ศ.2593 เทียบกับปริมาณการปลดปล่อยที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ.2533

2. แผนงานลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศกำลังพัฒนา หรือ Nationally Appropriate Mitigation Action (NAMA)

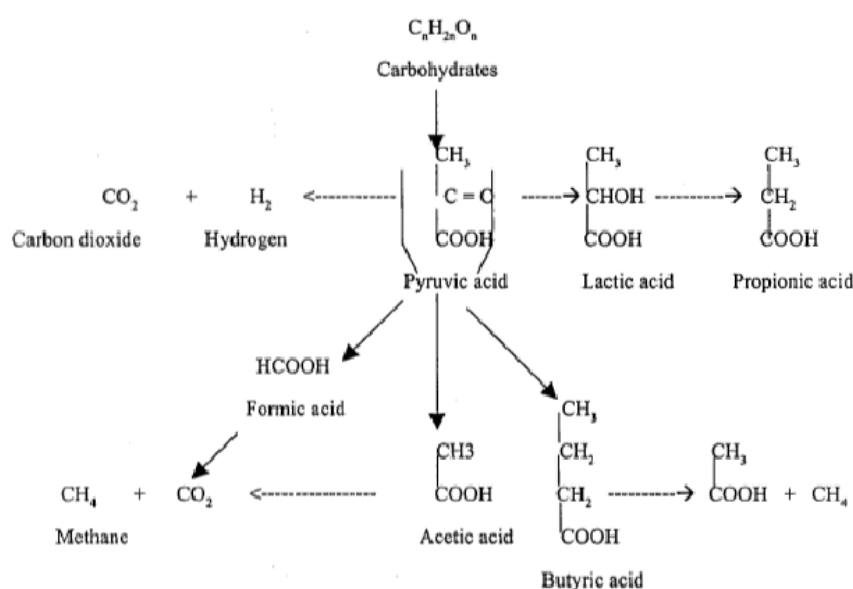
ประเทศที่กำลังพัฒนาต้องจัดทำ “แผนกิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ และคำนึงถึงการพัฒนาที่ยั่งยืน โดยได้รับการสนับสนุนทางการเงิน เทคโนโลยีและเสริมศักยภาพ โดยมีเป้าหมายลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และนำไปสู่การลดก๊าซเรือนกระจกภายในปี พ.ศ. 2563 รวมทั้งประเทศกำลังพัฒนา (Annex II) ควรลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกลง 15% - 30% เทียบกับปริมาณการปลดปล่อยที่น่าจะเกิดขึ้นในปี พ.ศ.2563 ซึ่งแผนลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศที่กำลังพัฒนา (NAMA) ที่ได้รับการสนับสนุน จะมีการตรวจสอบ รายงานและทวนสอบ (MRV) ภายในประเทศตามแนวทางกลไกระหว่างประเทศ ภายใต้อนุสัญญาฯ และ แผนลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ (NAMA) ที่ดำเนินการเอง จะมีการตรวจสอบ รายงานและทวนสอบ (MRV) ภายในประเทศตามแนวทางทั่วไปภายอนุสัญญาฯ

2.2 การเกิดก๊าซมีเทน

ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่เกิดในธรรมชาติ หรือมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ รวมทั้งก๊าซมีเทนสามารถปลดปล่อยออกมาจากสัตว์ที่กินพืช ในปัจจุบันก๊าซมีเทนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทำกิจกรรมของมนุษย์ นั่นคือ การทำนาข้าวและปศุสัตว์ การเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนจะทำให้เกิดสถานะเรือนกระจกเป็นอันดับสองรองจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการประเมินของ USEPA (United States Environmental Protection Agency) พบว่า ก๊าซมีเทนมีส่วนทำให้อุณหภูมิโลกสูงขึ้น 20 % จากการปลดปล่อยก๊าซมีเทน และสำหรับประเทศไทย OEPP ได้ รายงานว่ามีการปลดปล่อยมีเทนทั้งหมดประมาณปีละ 3.2 ล้านตัน โดยมาจากภาคเกษตรกรรม 91% ของก๊าซมีเทนที่ปล่อยทั้งหมด ซึ่งมีแหล่งปลดปล่อยที่ใหญ่ที่สุด คือ นาข้าวประมาณ 73% และมาจากปศุสัตว์ 22% (คมกฤษณ์ กิริรมย์, 2554)

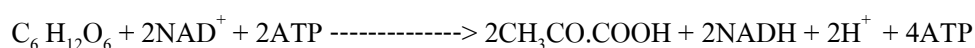
2.2.1 กระบวนการเกิดก๊าซมีเทนในนาข้าว

การปลูกข้าว มี 2 ลักษณะ คือ การปลูกข้าวแบบดินที่มีน้ำขัง และแบบดินไร่ ซึ่งนาที่มีน้ำขังจะมีการแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างอากาศในดินกับบรรยากาศ โดยที่ออกซิเจนในบรรยากาศจะเข้าไปในดินโดยการแพร่กระจายไปสู่ผิวน้ำ แต่ในนาข้าวมีน้ำขังจึงมีอัตราการแพร่กระจายช้ามาก (Khalil, 1993) ทำให้ดินอยู่ในสภาวะไร้อากาศ ส่วนปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่เดิมจะถูกจุลินทรีย์ในดินนำไปใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินและแบคทีเรีย Methanogen ก็จะย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศเช่นกัน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรตในดินน้ำขัง (คมกฤษณ์ กীরมย์, 2554)

เมื่อคาร์โบไฮเดรตสลายตัวจะได้ Pyruvic acid ดังสมการ



พลังงานที่ได้ จะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในกระบวนการ Fermentation หมายถึง กระบวนการทางชีวเคมีที่จุลินทรีย์ที่มีกิจกรรมในสภาวะไร้อากาศ ใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้น ผลที่ได้จากการสลายตัวก็จะเป็นสารประกอบอินทรีย์อยู่ในสภาพออกซิไดซ์และรีดิวซ์ และ Pyruvic acid จะเปลี่ยนแปลงต่อไปได้หลาย ๆ รูปแบบ ซึ่งสารประกอบที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรตในดินที่มีน้ำขังที่สำคัญ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), กรดอะซิติก (Acetic acid) และ ก๊าซมีเทน (CH_4)

ส่วนในกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์ในดินในสภาวะที่มีออกซิเจน ออกซิเจนจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน สารประกอบอื่นๆ จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนจุลินทรีย์ที่อยู่ได้ทั้งในสภาวะที่ไม่มีและมียออกซิเจน รวมทั้งจุลินทรีย์ที่อยู่ได้เฉพาะที่ไม่มีออกซิเจนจะใช้ NO_3^- , Mn^{+4} , Fe^{+3} , NO_4^{2-} , CO_2 และ H^+ เป็นตัวรับอิเล็กตรอนและเปลี่ยนเป็น N_2 , Mn^{+2} , Fe^{+2} , S^{2-} , CH_4 และ H_2 ตามลำดับ (คมกฤษณ์ คีรีรัมย์, 2554) แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงปฏิกิริยาและรีดอกซ์โพเทนเชียล(Eh) ในดินน้ำท่วม

Reduction	Redox Potential	
$\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	+380 to +320	
$\text{NO}_3 \rightarrow \text{N}_2$	+280 to +220	Denitrification reduction
$\text{Mn}^{4+} \rightarrow \text{Mn}^{2+}$		Manganese reduction
$\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	+180 to +150	Iron reduction
$\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{S}^{2-}$	-120 to -180	Sulfate reduction
$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4$	-200 to -280	Methane reduction

ที่มา : คมกฤษณ์ คีรีรัมย์, 2554

การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแต่ละตัวรับอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นเมื่อมีค่า Redox Potential(Eh) ที่ต่างกัน เมื่อดินมีปริมาณออกซิเจนลดลง ค่า Eh ก็จะลดลงด้วย และเมื่อค่า Eh ของดินอยู่ในช่วง -200 ถึง -280 mV ก็จะเกิดปฏิกิริยา Methane fermentation ซึ่งจะมีการผลิตก๊าซมีเทนออกมา นอกจากนี้ค่า Eh จะมีความสัมพันธ์กับ pH เช่นกัน คือ เมื่อพื้นที่นามีระยะเวลาของการขังน้ำนานขึ้น ทำให้ค่า pH จะเพิ่มขึ้น และค่า Eh จะลดลง แต่เมื่อระบายน้ำออก ค่า pH จะลดลง Eh จะเพิ่มขึ้น

2.2.2 การปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าว

สถาบันวิจัยข้าวนานาชาติ หรือ IRRI (1991) ยืนยันว่าการเกิดก๊าซมีเทนจากนาข้าวเกิดได้ 3 ทาง คือ การแพร่ผ่านชั้นน้ำ (Diffiusion), ฟองอากาศ (Bubble) และการปล่อยก๊าซส่วนใหญ่ประมาณ 80% ผ่านทางต้นข้าว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Barbara and Hogan (1991) ดังนี้

ก๊าซมีเทนที่เกิดจากนาข้าวจะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศได้ 3 ทาง คือ

1. เคลื่อนผ่านต้นข้าวจากรากออกสู่บริเวณกาบใบและใบ (มากกว่าร้อยละ 90)

2. เคลื่อนที่ผ่านน้ำสู่ผิวน้ำโดยกระบวนการแพร่ (Diffusion)
3. การเคลื่อนที่ของฟองอากาศลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ (Ebullition)

การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวเพิ่มขึ้นทุกปี เนื่องจากการขยายพื้นที่ในการทำเกษตรกรรม ซึ่งการปลดปล่อยมีเทนจากนาข้าวคิดเป็น 10-20% ของการปลดปล่อยมีเทนทั้งหมด โดยแต่ละปีจะเพิ่มขึ้นถึง 50-100 Tg และคาดว่าจะเพิ่มถึง 145 Tg ในปี พ.ศ.2568 และในประเทศไทยมีการปลดปล่อยมีเทนเพิ่มขึ้นถึง 1.8 Tg ต่อปี ซึ่งคิดเป็น 65% ของการปลดปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมด ซึ่งการปลดปล่อยมีเทนจากนาข้าวเกิดจากการผลิตมีเทนของ Methanogen Bacteria และการย่อยสลายของ Methanotrophs โดยกระบวนการ Oxidation เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด และจากการศึกษาพบว่า ในดินนาข้าวอยู่ในสภาวะไร้อากาศ และมีอะซิเตตเป็นสารอาหารของ Methanogenesis (Schutz *et al.*, 1989)

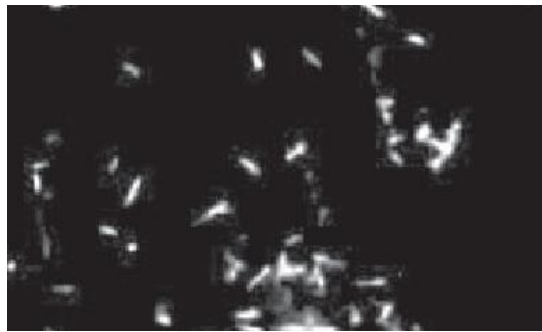
2.2.3 ลักษณะของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนจากดินนาและรากข้าว

จากการศึกษา Methanogen ในดินและรากข้าว ที่รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา และความหลากหลายของ Methanogen (Chidthaisong *et al.*, 1999) พบว่า Methanogen ในรากข้าวมากกว่า 80% เป็น *Methanospirillum sp.* และ Methanogen ในดินข้าวมากกว่า 60% เป็น *Methanobacterium sp.* อย่างไรก็ตาม Methanogen ที่พบในนาข้าวทั่วโลก ส่วนใหญ่จะเป็น *Methanobacterium sp.* และ มักจะพบ *Methanospirillum sp.* ในรากข้าวบางครั้ง เมื่อรู้สาเหตุและปัจจัยของการผลิตและการปลดปล่อยมีเทน ดังนั้นเราควรหาวิธีควบคุมการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าว

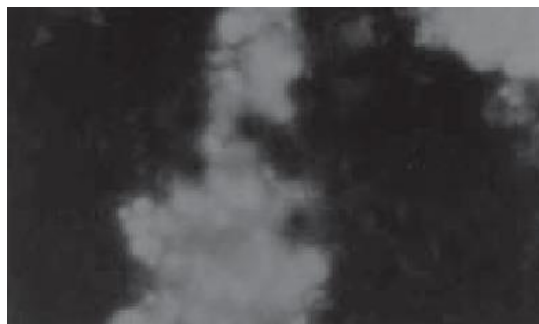
นอกจากนี้จากการศึกษาคุณลักษณะของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนจากดินนาและรากข้าว (จิรัชศักดิ์ คงเกียรติจิร และคณะ, 2006) พบว่า มักจะพบแบคทีเรีย 2 กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนจากกรดอะซิติก (Acetoclastic methanogens) จากดินก่อนการเพาะปลูกข้าว ดินบริเวณรากข้าว และรากข้าว นั่นคือกลุ่มแบคทีเรียที่มีรูปร่างเป็นแท่งเดี่ยว (Bacilli in single) และมีโครงสร้างเป็นโซ่ และกลุ่มแบคทีเรียที่อยู่รวมกันหลายเซลล์ และจากการศึกษาจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค Fluorescent In Situ Hybridization (FISH) พบว่า จะพบแบคทีเรียที่มีรูปร่างเป็นท่อนและโครงสร้างเป็นโซ่ยาว ซึ่งคล้ายกับ *Methanosaeta sp.* (ดังรูปที่ 2.4) ในตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าว ส่วนในตัวอย่างดินบริเวณรากข้าว จะพบแบคทีเรียที่มีรูปร่างเป็นท่อนและโครงสร้างเป็นโซ่ยาว คล้ายกับ *Methanosaeta sp.* และมีการรวมตัวของเซลล์คล้ายกับ *Methanosarcina sp.* (ดังรูปที่ 2.5) และในรากข้าว จะพบ *Methanosarcina-like cell* เป็นแบคทีเรียกลุ่มหลัก (ดังรูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.4 Methanogen จากตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าว
(ที่มา : จิรศักดิ์ คงเกียรติขจร และคณะ, 2006)



รูปที่ 2.5 Methanogen จากตัวอย่างดินบริเวณรากข้าว
(ที่มา : จิรศักดิ์ คงเกียรติขจร และคณะ, 2006)



รูปที่ 2.6 Methanogen จากรากข้าว
(ที่มา : จิรศักดิ์ คงเกียรติขจร และคณะ, 2006)

แบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนจากกรดอะซิติก(Acetoclastic methanogens) จากดินนาและรากข้าว สามารถแบ่งเป็น 2 สายพันธุ์

1. *Methanosaeta* sp. เซลล์มีรูปร่างเป็นท่อนเดี่ยว และมีการรวมกลุ่มกันเป็นโซ่
2. *Methanosarcina* sp. เซลล์มีรูปร่างเป็นทรงกลมเดี่ยว ทรงกลมคู่และรวมตัวกันเป็นกลุ่ม

2.3 น้ำเสียจากฟาร์มสุกร

น้ำเสียจากฟาร์มสุกรเป็นน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและไนโตรเจนสูง จึงเป็นแหล่งที่มาของมลพิษทางน้ำ ถ้ามีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและไนโตรเจนเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน เนื่องจากมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช จึงต้องมีเทคโนโลยีในการบำบัดเพื่อควบคุมมลพิษทางน้ำเหล่านั้น ดังนั้นการนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมาผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงในการนำฟอสฟอรัสและไนโตรเจนกลับมาใช้ประโยชน์ ซึ่งเป็นการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพ รวมทั้งได้ผลผลิตไปใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ยทางการเกษตร

2.3.1 ส่วนประกอบของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ส่วนประกอบของน้ำเสียฟาร์มสุกรมีธาตุอาหารต่างๆ ที่เหมาะต่อการเจริญเติบโตของพืช ขึ้นอยู่กับลักษณะการเลี้ยงและการให้อาหาร เพราะสุกรเป็นสัตว์กระเพาะเดี่ยว ไม่สามารถย่อยอาหารที่มีเส้นใยได้ และระบบการย่อยอาหารทำให้น้ำที่ย่อยอาหารให้มีขนาดเล็กลง เพื่อให้สุกรสามารถดูดซึมไปใช้เสริมสร้างส่วนต่างๆ ของร่างกาย และของเสียจากสุกรในแต่ละวันจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับน้ำหนักตัวของสุกรนั้น แสดงดังตารางที่ 2.2 และได้นำน้ำเสียหลังจากเข้าบ่อปรับเสถียรจากฟาร์มสุกรที่ อ.หนองแค จ.สระบุรี มาวิเคราะห์ส่วนประกอบต่างๆ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 แสดงปริมาณสิ่งขับถ่ายของสุกรในแต่ละวัน

น้ำหนักตัว (กก.)	อุจจาระ (กก.)	ปัสสาวะ (กก.)	อุจจาระ+ปัสสาวะ (กก.)	เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัว		
				อุจจาระ	ปัสสาวะ	อุจจาระ+ปัสสาวะ
40	1.02	2.60	3.12	2.4	6.2	8.6
60	1.51	2.57	4.08	2.5	4.3	6.8
90	1.90	2.55	4.45	2.1	2.8	4.9
130	2.15	2.74	4.89	1.7	2.1	3.8
เฉลี่ย (87)	1.73	2.62	4.35	2.0	3.0	5.0

ที่มา : อโณชา, 2531

ตารางที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของน้ำเสียฟาร์มสุกร โดยมีอัตราส่วนเชิงโมลของ Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-} -P เท่ากับ 1.2 : 8 : 1

พารามิเตอร์	ความเข้มข้นโดยเฉลี่ย
ความเป็นกรดต่าง (pH)	7.33
ฟอสฟอรัส (TP)	65
แอมโมเนีย (NH_4)	292
แมกนีเซียม (Mg^{2+})	4.1
ความเข้มข้นสารอินทรีย์(COD)	404.8

หมายเหตุ วิเคราะห์จากน้ำเสียหลังจากเข้าบ่อปรับเสถียรจากฟาร์มสุกรที่ อ.หนองแค จ.สระบุรี

2.3.2 เกณฑ์มาตรฐานน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

น้ำเสียจากฟาร์มสุกรเป็นน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์จำนวนมาก จึงมีความจำเป็นต้องนำน้ำเสียเข้ากระบวนการบำบัดก่อนที่จะทิ้งลงแหล่งน้ำสาธารณะ เพื่อไม่ให้เกิดปรากฏการณ์สาหร่ายเบ่งบาน(Eutrofication) ที่มีสาเหตุมาจากสารอาหารในแหล่งน้ำมากเกินไป จึงต้องมีค่ามาตรฐานน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วตาม มาตรา 69 ของพระราชบัญญัติส่งเสริม และรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงมาตรฐานน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่ามาตรฐานฟาร์มสุกร	
		ประเภท ก.	ประเภท ข.
ความเป็นกรดและด่าง (pH)	mg/L	5.5 - 9.0	5.5 - 9.0
บีโอดี (BOD)	mg/L	60	100
ซีโอดี (COD)	mg/L	300	400
ทีเคเอ็น (TKN)	mg/L	150	200
สารแขวนลอย (SS)	mg/L	120	200
ทองแดง (Cu)	mg/L	ไม่มากกว่า 2	ไม่มากกว่า 2
สังกะสี (Zn)	mg/L	ไม่มากกว่า 5	ไม่มากกว่า 5
ความขุ่น (Turbidity)	FAU	ไม่เกิน 25	ไม่เกิน 25
สี (Color)	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	-	-

ที่มา : ศูนย์วิจัยและการพัฒนาสัตวแพทยภาคใต้

หมายเหตุ : การแบ่งประเภทของฟาร์มสุกรจะใช้น้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ (นปส.) หรือ Livestock Unit เป็นเกณฑ์ เนื่องจากฟาร์มแต่ละแห่งจะประกอบด้วยสุกรที่มีความแตกต่างกันทั้งประเภท ขนาด และช่วงอายุ ซึ่งจะทำให้เกิดของเสียและน้ำเสียในปริมาณที่แตกต่าง โดยมีข้อกำหนดดังนี้

1. ประเภทของฟาร์มสุกร แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

ประเภท ก มีน้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ มากกว่า 600 นปส. (เทียบเท่าจำนวนสุกร มากกว่า 5,000 ตัว)

ประเภท ข มีน้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ ตั้งแต่ 60-600 นปส.(เทียบเท่าจำนวนสุกร ตั้งแต่ 500-5,000 ตัว)

ประเภท ค มีน้ำหนักปศุสัตว์ ตั้งแต่ 6-น้อยกว่า 60 นปส. (เทียบเท่าจำนวนสุกร ตั้งแต่ 50-น้อยกว่า 500 ตัว)

2. หลักเกณฑ์การใช้น้ำหนักหน่วยปศุสัตว์

เมื่อ น้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ 1 หน่วย เท่ากับน้ำหนักสุกรรวม 500 กิโลกรัม

โดย น้ำหนักเฉลี่ยสุกรพ่อ-แม่พันธุ์ เท่ากับ 170 กิโลกรัม

น้ำหนักเฉลี่ยสุกรขุน เท่ากับ 60 กิโลกรัม

น้ำหนักเฉลี่ยลูกสุกร

เท่ากับ 12 กิโลกรัม

การบังคับใช้มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรจะเริ่มใช้บังคับกับ ฟาร์มสุกรประเภท ก (ขนาดใหญ่) และประเภท ข (ขนาดกลาง) ก่อน โดยกำหนดให้เป็น แหล่งกำเนิดมลพิษตาม มาตรา 69 ของพระราชบัญญัติส่งเสริม และรักษาคุณภาพ สิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ที่จะต้องถูกควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำ สาธารณะ หรือออกสู่สิ่งแวดล้อมนอกเขตที่ตั้งแหล่งกำเนิดมลพิษ ทั้งนี้ให้บังคับใช้เมื่อ พ้นกำหนดหนึ่งปีนับแต่วันถัดจากวันประกาศในราชกิจจานุเบกษา เป็นต้นไป

2.4 การนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกรไปผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดิน

สารปรับปรุงคุณภาพดินเป็นปุ๋ยชนิดหนึ่งที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี โดยผลิตจาก กระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งพืชสามารถดูดกินธาตุอาหารได้ทันทีเมื่อละลายน้ำหรือใส่ลงดิน และสาร ปรับปรุงคุณภาพดินเป็นการรวมกันของธาตุอาหารที่พืชสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้

2.4.1 การตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดิน

การผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีเกิดจากการตกตะกอนของสารอาหารที่อยู่ในน้ำเสีย โดยทั่วไปมักใช้วิธีนี้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอาหารสูง เช่น น้ำปัสสาวะของมนุษย์ น้ำเสีย ชุมชน และน้ำเสียจากภาคเกษตรกรรม เป็นต้น เนื่องจากมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและแอมโมเนีย สูง การตกตะกอนโดยการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจึงเป็นอีกหนึ่งเทคนิคในการนำธาตุอาหารกลับมาใช้ ประโยชน์และเป็นการกำจัดธาตุอาหารที่มีมากเกินไปออกจากน้ำเสีย ซึ่งการกำจัดฟอสฟอรัสหรือ แอมโมเนีย โดยการผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินจากน้ำเสียที่มาจากฟาร์มสุกรหรือน้ำเสียชุมชน เป็น กระบวนการที่เอาฟอสเฟตและแอมโมเนียออกจากน้ำเสียในรูปของแข็ง เมื่อมีสถานะที่เหมาะสม สำหรับกระบวนการตกตะกอน ความเข้มข้นของสารอาหารที่อยู่ในน้ำเสียก็จะรวมกันเป็นสาร ปรับปรุงคุณภาพดิน ในปัจจุบันมีการเติมแมกนีเซียมเพื่อช่วยให้เกิดการตกตะกอนดีขึ้น โดยเทคนิคนี้ มีข้อดีคือ สามารถตกตะกอนได้ดี เป็นผลึกที่อัดแน่น สามารถจัดการได้ง่าย และสะดวกในการขนส่ง รวมทั้งสารปรับปรุงคุณภาพดินที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพในการนำมาทำเป็นปุ๋ย

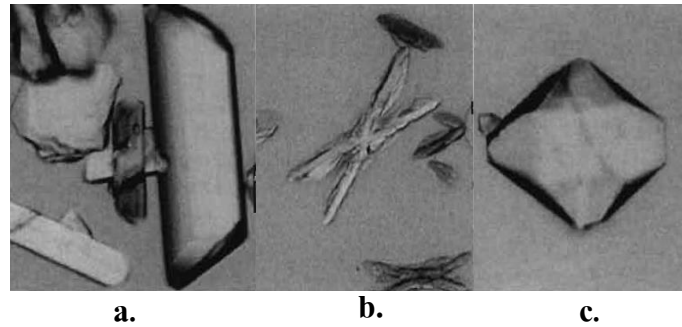
2.4.2 กลไกการตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดิน

กลไกการตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดินมี 2 ขั้นตอน คือ

1. Nucleation เป็นขั้นตอนแรกที่ไม่มีการรวมตัวของอนุภาคนิวเคลียส

2. Crystal Growth เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นหลังจาก Nucleation ซึ่งนิวเคลียสจะเติบโตใหญ่ขึ้น โดยการรวมกันหลายอนุภาค เมื่ออนุภาคใหญ่มากพอก็แตกออกเป็นอนุภาคเล็กๆ แล้วอนุภาคเล็กๆ

เกิดการรวมตัวกับอนุภาคอื่นๆจนกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่หรือผลึกนั่นเอง



รูปที่ 2.7 แสดงรูปร่างของผลึกสารปรับปรุงคุณภาพดิน โดยที่ a. rod-like crystals, b. dendritic, c. rhombohedral crystals ที่มา : ธัญวรรษ์ บรรณาธรรม (2553)

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดิน

2.5.1 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

pH เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการตกตะกอนของสารปรับปรุงคุณภาพดิน และจะส่งผลกระทบต่อขนาดของสารปรับปรุงคุณภาพดิน และจากการศึกษางานวิจัยพบว่า pH ที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสารปรับปรุงคุณภาพดิน คือ pH = 9-10 เพราะถ้ามี pH ต่ำ ไฮโดรเจนไอออนจะไปยับยั้งการเกิดผลึกสารปรับปรุงคุณภาพดิน แต่หลายงานวิจัยก็ได้บอกว่า ช่วง pH ที่เหมาะสมคือ 8-11 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะน้ำเสียด้วย

นอกจากนี้ ความต่างกันของ pH ทำให้ปฏิกิริยาในน้ำเสียที่ประกอบด้วย PO_4^{3-} , NH_4^+ , และ Mg^{2+} มีปฏิกิริยาต่างกันด้วย เช่น ถ้ามี pH ต่ำและมี PO_4^{3-} สูง ผลิตภัณฑ์หลักคือ $\text{Mg}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ และถ้ามี pH สูง ผลิตภัณฑ์หลักคือ $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Struvite)

2.5.2 การกวนผสม (mixing)

การกวนผสมเป็นการทำให้ความเข้มข้นของ PO_4^{3-} , NH_4^+ , และ Mg^{2+} มีการสัมผัสแล้วรวมตัวกันเกิดตะกอนของสารปรับปรุงคุณภาพดินขึ้น ถ้าการกวนมีความปั่นป่วนมากก็เป็นการเร่งความเร็วในการตกตะกอนและเร่งการระเหยของ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ และถ้ามีการปั่นป่วนน้อย การตกตะกอนก็จะช้าลง รวมทั้งอาจจะได้ผลึกสารปรับปรุงคุณภาพดินที่มีขนาดเล็กด้วย ทั้งนี้การให้ความปั่นป่วนมากจะต้องให้พลังงานมากเช่นกัน จึงต้องคำนึงเรื่องของพลังงานควบคู่ไปด้วย

2.5.3 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลต่อขนาดของสารปรับปรุงคุณภาพดิน ถ้ามีอุณหภูมิต่ำ สารปรับปรุงคุณภาพดินก็จะมีขนาดเล็ก อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเกิดผลึกได้น้อยและอุณหภูมิยังส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วย

2.5.4 ความอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated)

ความอิ่มตัวยิ่งยวดของสารละลายจะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมีมากจนเกินขีดจำกัดในการละลาย ทำให้เกิดการตกตะกอนของน้ำเสียและรวมกันเป็นสารปรับปรุงคุณภาพดินได้

2.5.5 อัตราส่วนของ $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$

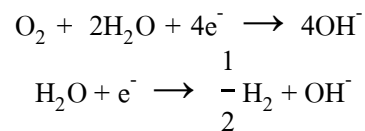
อัตราส่วนของ $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$ เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญปัจจัยหนึ่ง มีผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี และความอิ่มตัวยิ่งยวดของความเข้มข้นของสารละลาย ถ้าสารเคมีต่างกันก็จะมีปฏิกิริยาต่างกัน เช่น $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-} จะทำให้ค่า pH สูงและเป็นสาเหตุให้ PO_4^{3-} ลดลง ทำให้ตะกอนที่ได้อาจจะไม่ใช่ปุ๋ยเคมีหรืออาจเกิดการยับยั้งการตกตะกอนได้

2.6 การผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

กระบวนการไฟฟ้าเคมีเป็นเทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียที่ทันสมัย สามารถทำได้ง่าย มีประสิทธิภาพในด้านค่าใช้จ่าย จึงมีแนวคิดในการนำกระบวนการไฟฟ้าเคมีมาผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดิน หัวใจหลักของกระบวนการนี้ คือ การแลกเปลี่ยนอะตอมและไอออนโดยการใส่ electron จากกระแสไฟฟ้าภายนอกเข้าไป ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยของ Liu *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2010; Ichihashi and Hirooka (2012); Cusick and Logan (2011) พบว่า ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

1. แรงดันไฟฟ้า
2. ความเข้มข้นของไอออนต่างๆในน้ำเสีย เช่น Mg^{2+} , NH_4^+ , $H_nPO_4^{3-n}$
3. การนำไฟฟ้าของสารละลาย
4. วัสดุที่นำมาเป็น Electrode
5. เวลาในการทำปฏิกิริยา
6. pH
7. อุณหภูมิ
8. ความสามารถในการละลายน้ำ
9. การกวนผสม

และปัจจัยที่มีสำคัญในการตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดินมากที่สุดคือ pH เนื่องจากเมื่อเริ่มกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี ในสารละลายที่ใกล้ขั้วแคโทดจะมีค่า pH เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และมีการตกตะกอนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ค่า pH เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากอัตราการแพร่ของออกซิเจนไปสู่ขั้วแคโทดแล้วให้ OH^- ออกมา ซึ่งเป็นไปตามสมการนี้



แล้วหลังจากนั้นความเข้มข้นของ OH^- ที่เพิ่มขึ้นใกล้ขั้วแคโทด อาจจะทำปฏิกิริยากับ Mg^{2+} , NH_4^+ , $\text{H}_n\text{PO}_4^{3-n}$ ซึ่งเป็นการเริ่มกลไก nucleation และ growth ของการผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดิน เมื่อสารปรับปรุงคุณภาพดินตกตะกอนจะมีการรวมตัวและเกิดผลึกขึ้น

2.7 การนำสารประกอบของเหล็กไปใช้เป็นปุ๋ยเพื่อลดการเกิดก๊าซมีเทน

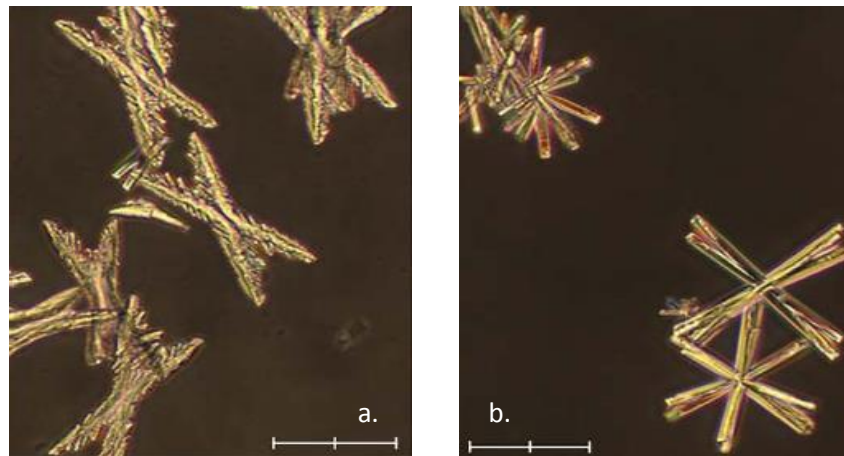
ก๊าซมีเทนเกิดจากการทำกิจกรรมของภาคเกษตรกรรมเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปลูกข้าว การควบคุมการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากการปลูกข้าว ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้ คุณสมบัติของดิน, ความอุดมสมบูรณ์, การจัดการทางดินน้ำ, สายพันธุ์ของข้าว และปฏิกิริยารีดอกซ์ เป็นต้น จากการศึกษางานวิจัยของ Huang *et al.*, 2009; Schnell *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2009; Frenzel *et al.*, 1999 พบว่า เฟอร์ริกไอออนสามารถยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนของแบคทีเรีย Methanogen ได้ เนื่องจากเกิดการแข่งขันระหว่างจุลินทรีย์ที่รีดิวซ์เฟอร์ริกไอออนกับแบคทีเรีย Methanogen ซึ่งจุลินทรีย์ที่รีดิวซ์เฟอร์ริกไอออนมีพลังในการรับอิเล็กตรอนมากกว่าแบคทีเรีย Methanogen ทำให้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์ และทำให้แบคทีเรีย Methanogen เกิดการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทน รวมทั้งศักยภาพของปฏิกิริยารีดอกซ์มีความสำคัญต่อแบคทีเรีย Methanogen เช่นกัน ถ้ามีค่า E_h สูง ทำให้มีการรีดิวซ์เฟอร์ริกไอออนได้ดี ส่งผลให้ความเข้มข้นของมีเทนน้อย เนื่องจากออกซิเจนถูกใช้เพื่อควบคุม E_h ในระบบ

นอกจากนี้เฟอร์ริกไอออนมักถูกใช้สำหรับการตกตะกอนซัลไฟด์ในน้ำเสีย เพื่อควบคุมการเกิดกลิ่น แต่เฟอร์ริกไอออนก็มีผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรีย Sulfate-reducing และแบคทีเรีย Methanogen เช่นกัน โดยการตกตะกอนเป็นสาเหตุของการแข่งขันการให้อิเล็กตรอนระหว่างแบคทีเรียที่รีดิวซ์เฟอร์ริกไอออนกับแบคทีเรีย Sulfate-reducing และแบคทีเรีย Methanogen รวมทั้งถ้า น้ำเสียมีการตกตะกอนของ FeS ในปริมาณมาก ทำให้ FeS อาจะตกตะกอนบนเซลล์ของแบคทีเรีย

Sulfate-reducing และแบคทีเรีย Methanogen จึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งในการยับยั้งกระบวนการเมทาบอลิซึมของเซลล์ ส่งผลให้มีการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทน

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mariska *et al.*, 2010 ทำการศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคในกระบวนการตกตะกอนสตรูไวท์พบว่า ผลึกที่เกิดขึ้นในการทดลองแบบ batch โดยใช้น้ำปัสสาวะจริง มีขนาดเฉลี่ยมากกว่า 90 μm ที่ pH 9.0 และ 20°C และอาจจะมีขนาดลดลงถึง 45 μm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของชนิดเครื่องกวน, อุณหภูมิ, pH, ความอึดตัวยิ่งยวด ซึ่งลักษณะน้ำเสียเข้าเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลกระทบต่อการเกิด ความอึดตัวยิ่งยวด คือ ถ้ามีความอึดตัวยิ่งยวดสูง แต่ไม่มีการกวนผสม, pH ต่ำ, อุณหภูมิต่ำ ก็จะทำให้ผลึกสตรูไวท์มีขนาดเล็กและนอกจากนี้รูปร่างของผลึกสตรูไวท์มีลักษณะเป็น X-shape (รูปที่ 2.9 a.) และที่ pH เท่ากับ 11 รูปร่างของผลึกสตรูไวท์มีลักษณะเป็น dendrite-like shape (รูปที่ 2.9 b.)

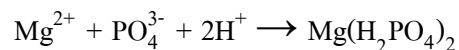


รูปที่ 2.8 แสดงรูปร่างของผลึกสตรูไวท์ (Mariska *et al.*, 2010)

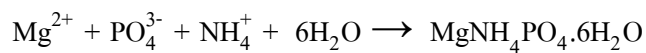
Zhang *et al.*, 2012 ทำการศึกษาค่าที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากสุกรก่อนเข้าระบบบำบัดและผลกระทบของมลพิษในการย่อยสลายแบบไร้อากาศ น้ำเสียมีความเข้มข้นของ NH_4^+ และ SS สูงจึงไม่สามารถที่จะบำบัดแบบไร้อากาศได้ จึงมีความจำเป็นที่ต้องบำบัดน้ำเสียก่อนเพื่อเป็นการลดความเข้มข้นดังกล่าว ซึ่งในการทดลองจะมีการระดับการบำบัดที่ต่างกันในการเกิดผลึกสตรูไวท์ เช่น ความเร็วในการปั่นป่วน เท่ากับ 400 และ 160 rpm, pH เท่ากับ 9, 9.5, 10, 10.5, 11 และ 11.5 และสัดส่วนของ P:Mg:N เท่ากับ 1:1:1.2, 1:1:1.7, 1:1:2.2, 1:1:2.7, 1:1:4.0 และ 1:1:5.0

มีปัจจัยหลายอย่างของน้ำเสียที่มีผลต่อการตกผลึกสตรูไวท์ โดยส่วนใหญ่คือ pH และอัตราส่วน P:Mg:N เป็นต้น ถ้าสารเคมีต่างกันก็จะมีปฏิกิริยาต่างกัน เช่น H_2PO_4^- และ H_2PO_4^- จะทำให้ค่า pH สูง และเป็นสาเหตุให้ PO_4^{3-} ลดลง ในการทดลองใช้น้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกรที่มี pH เท่ากับ 8.25 แล้วทำการปรับ pH ด้วยการเติม MgCl_2 และ Na_3PO_4 จนถึง pH เท่ากับ 9 ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการทดลอง

ความต่างกันของ pH จะส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาในน้ำเสียที่ประกอบด้วย PO_4^{3-} , NH_4^+ , และ Mg^{2+} เช่น ภายใต้อัตราที่ pH ต่ำและมี PO_4^{3-} สูง ผลิตภัณฑ์หลักคือ $\text{Mg}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ดังสมการนี้

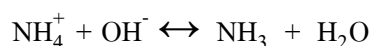


และภายใต้อัตราที่ pH สูง ผลิตภัณฑ์หลักคือ $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Struvite) ดังสมการนี้



ดังนั้น pH เป็นปัจจัยสำคัญในการตกตะกอนสตรูไวท์ มีการวิจัยมากมายบอกว่า pH ที่เหมาะสมคือ 9.0-10.0 แต่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลายในน้ำเสีย ถ้าสารละลายในน้ำเสียต่างกัน ผลต่อ pH ก็ต่างกันด้วย

ในการกำจัด $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ โดยกระบวนการตกตะกอนสตรูไวท์ มีกลไกหลัก 2 กลไก คือการระเหยและการรวมตัวของสตรูไวท์ (Uludag-Demirer and Othman, 2009) การระเหยของแอมโมเนียขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้ pH, อุณหภูมิ, ความดัน, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, HRT เป็นต้น ซึ่งความดันต่ำจะประหยัดพลังงาน และความดันสูงก็จะเป็นการเร่งความเร็วในการระเหยของ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ และการตกตะกอน นอกจากนี้ในสารละลายที่ pH เป็นกลางหรือสูง $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ จะอยู่ใน 2 รูปแบบ คือ NH_4^+ และ NH_3 (Weatherley and Miladinovic, 2004) ดังสมการนี้



จากสมการข้างต้นทำให้รู้ว่าสัดส่วนและความสมดุลของสารละลายขึ้นอยู่กับค่า pH และอุณหภูมิ (Wahab *et al.*, 2010) ถ้าในสารละลายมี pH ต่ำกว่า 7 จะอยู่ในรูปของ NH_4^+ เป็นหลัก แต่ถ้า pH เท่ากับหรือมากกว่า 11 จะอยู่ในรูปของ NH_3 เป็นหลัก

ผลจากการทดลองการตกผลึกสตรูไวท์น้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกรก่อนเข้าบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ มีสถานะที่เหมาะสมในการตกผลึกดังนี้ pH เท่ากับ 10, เวลาอย่างน้อย 10 นาที ในการทำให้มีความปั่นป่วน 400 รอบต่อนาที และ 160 รอบต่อนาทีสำหรับ 30 นาที และอัตราส่วน P:Mg:N เท่ากับ 1:1:1.2 เป็นต้น ดังนั้นการตกตะกอนสตรูไวท์มีความสำคัญในการลด $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, COD, TC, และ TOC ในน้ำเสียจากสุกร

Liu *et al.*, 2011 ทำการศึกษาการหมุนเวียนสารละลายสตรูไวท์โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีในการนำกลับฟอสเฟตและไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและ โดยถึงปฏิกรณ์ทำจากแผ่นกระจกทนความร้อนที่ทำด้วยโพลีเมอร์ มี titanium plate ที่เคลือบ iridium oxide เป็นขั้วแอโนด และมี stainless steel plate เป็นขั้วแคโทด พบว่าน้ำเสียฟาร์มสุกรมีความเข้มข้นของ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ สูง มากกว่าอโทฟอสเฟต ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$) ประมาณ 20 เท่า ทำให้การตกผลึกสตรูไวท์สามารถกำจัด $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ได้น้อยมาก ดังนั้นเพื่อกำจัด $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จึงต้องเติม P และ Mg เข้าไป อย่างไรก็ตามต้องเสียเงินค่า Mg salts และ P เพื่อประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย จึงกลายเป็นอุปสรรคในกระบวนการตกตะกอนสตรูไวท์ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการเติม P และ Mg จึงผลิตสตรูไวท์โดยใช้ความร้นภายใต้สภาวะความเป็นด่าง ซึ่งสามารถเป็นแหล่งของ P และ Mg ได้ และเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานอีกด้วย (He *et al.*, 2007; Turker *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2009)

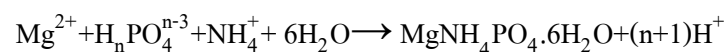
นอกจากนี้กระบวนการไฟฟ้าเคมีเป็นเทคโนโลยีในการบำบัดที่ทันสมัย สามารถทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพด้านค่าใช้จ่าย และเป็นเทคนิคที่มีแนวโน้มที่จะประสบความสำเร็จ หัวใจหลักของกระบวนการนี้คือการแลกเปลี่ยนอะตอมและไอออนโดยการใส่อิเล็กตรอนจากกระแสไฟฟ้าภายนอก ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับ แรงดันไฟฟ้า, ความเข้มข้นของไอออน, การนำไฟฟ้าของสารละลาย, วัสดุที่นำมาเป็นอิเล็กโทรดและเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยการเพิ่มประสิทธิภาพของปัจจัยดังกล่าวจะมีความสำคัญต่อความสำเร็จของกระบวนการ ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ทำการผสมระหว่างสตรูไวท์บริสุทธิ์กับ NaCl ด้วยน้ำประปាក่อนที่จะใส่ในถังปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าของสารละลายและเป็นการลดพลังงานที่ให้กับระบบ

ผลจากการทำวิจัยนี้ พบว่า NaCl ถูกใช้เป็นสารนำไฟฟ้าของสารละลาย เพราะความนำไฟฟ้าของสารละลายเพิ่มมากขึ้น และเป็นการลดพลังงานจากภายนอก และจากการทดลองมีสถานะที่เหมาะสมดังนี้ ความดันไฟฟ้า 7V, NaCl 0.06%, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1.5 ชั่วโมง, ปริมาณสตรูไวท์เริ่มต้น 1.25 g/l และสามารถกำจัดแอมโมเนียได้

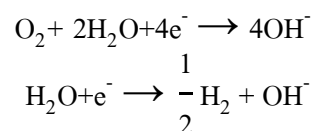
Wang *et al.*, 2010 ทำการศึกษาการตกตะกอนสตรูไวท์ที่ pH เป็นกลางโดยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี โดยมี inert Pt เป็นขั้วแอโนด และ Ni เป็นขั้วแคโทด ในการดำเนินการจะติดตั้งเครื่องวัด pH ใกล้กับแคโทด และการตกตะกอนสตรูไวท์ควบคุมโดยปัจจัยดังนี้ ความเข้มข้นของ Mg^{2+} , NH_4^+ , $H_nPO_4^{3-n}$, ionic strength, pH, อุณหภูมิ เป็นต้น ในที่นี้ pH เป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการตกตะกอนสตรูไวท์ ซึ่งมี pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 8 – 11 แต่ค่า pH สูงจะมีข้อเสีย คือ ต้องเติม alkalinity และคาร์บอนสามารถตกตะกอนได้ ดังนั้นในการศึกษานี้จะทำการศึกษาที่ pH 7.0 -7.5 ถึงแม้ว่าอัตราการตกตะกอนของสตรูไวท์จะช้ามาก

ทันทีที่เริ่มกระบวนการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับระบบ จะมีฟองก๊าซบางอย่างเกิดขึ้นออกมาจากขั้วแอโนดและแคโทด และในเวลาเดียวกัน pH ในสารละลายที่ใกล้ขั้วแคโทดเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และตกตะกอนลง และยังเกิดตะกอนเป็นชั้นๆบนขั้วอิเล็กโทรด

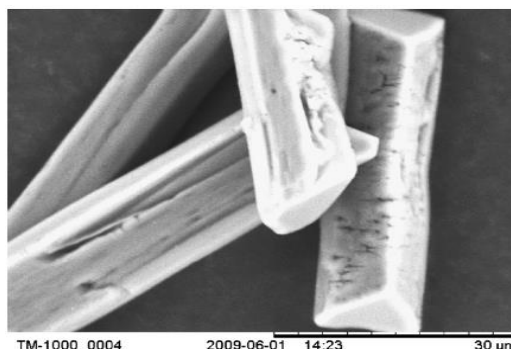
นอกจากนี้จากการทดลองพบว่า pH เป็นกุญแจสำคัญที่ใช้ในการควบคุมการตกตะกอนสตรูไวท์ดังสมการนี้



เมื่อเริ่มการทดลองจะเกิด OH^- ขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่ม pH มากกว่า 7.5 บริเวณใกล้ขั้วแคโทด โดยปฏิกิริยาต่อไปนี้



ซึ่งเกิดจากอัตราการแพร่ของออกซิเจนไปสู่ขั้วแคโทด และอัตราการให้ OH^- โดยปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้ตกตะกอน การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของ OH^- ที่ใกล้ขั้วแคโทด, Mg^{2+} , NH_4^+ , $H_nPO_4^{3-n}$ อาจจะมีการทำปฏิกิริยาระหว่างกัน ซึ่งเป็นการเริ่มกลไก nucleation และ growth ของสตรูไวท์ หลังจากนั้นเมื่อสตรูไวท์ตกตะกอนจะมีการรวมตัวและเกิดเป็นชั้นๆบนขั้วแคโทด หรือตกลงในถังปฏิกรณ์ และผลึกสตรูไวท์มีรูปร่างเป็นแท่งโปร่งแสงขนาดเล็ก (0.5-2 mm.) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงรูปร่างของสตรูไวท์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)
(ที่มา: Wang *et al.*, 2010)

นอกจากนี้ถ้าในน้ำประปามี Ca^{2+} จะส่งผลกระทบทางลบต่อการเกิดสตรูไวท์ (X.D. Hao *et al.*, 2008) เพราะแคลเซียมทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากสารละลายลดลง 50%-60% และการทำวิจัยนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตสูงและจากการตกตะกอนได้สตรูไวท์ที่มีความบริสุทธิ์สูง

Ichihashi and Hirooka (2012) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดและนำกลับฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นสตรูไวท์จากน้ำเสียฟาร์มสุกรโดยใช้ microbial fuel cell (MFC) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สามารถบำบัดน้ำเสียพร้อมกับการ recovery น้ำเสียมีฟอสฟอรัสอยู่ปริมาณมาก ซึ่งฟอสฟอรัสเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นในการเกษตรกรรม ถ้าใช้ฟอสฟอรัสเป็นปุ๋ย ก็จะเป็นการเพิ่มศักยภาพทางการเกษตร ดังนั้นในปัจจุบันนี้การนำฟอสฟอรัสกลับมาจากน้ำเสียจึงเป็นที่นิยมกันทั่วโลก การตกผลึกสตรูไวท์เป็นวิธีการที่จะนำฟอสฟอรัสกลับมาจากน้ำเสีย สตรูไวท์เป็นผลึกของแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสฟอรัส (MAP) แล้วทำปฏิกิริยารวมกันเป็น $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ นอกจากนี้ความสามารถในการละลายของสตรูไวท์จะลดลงเมื่อมีการเพิ่ม pH ซึ่งสามารถเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง อย่างไรก็ตามการตกผลึกสตรูไวท์มีราคาแพง เนื่องจากต้องเติมสารเคมีเพื่อปรับ pH

วิธี MFC ที่ใช้จะต้องปลดปล่อย orthophosphate จาก iron phosphate หลังจากนั้นก็เติมแมกนีเซียม, แอมโมเนีย และทำการปรับ pH ภายนอก MFC ก็จะได้สตรูไวท์ตามที่ต้องการ ซึ่งปริมาณการตกตะกอนสตรูไวท์จะสูง เมื่อมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสสูง โดยมีการดำเนินการของ air-cathode MFC และวิธีการนี้สามารถกำจัดฟอสฟอรัสซึ่งจะอยู่ในรูปสตรูไวท์ เพราะ pH บริเวณใกล้ขั้วแคโทดสูงกว่าบริเวณอื่นๆในถังปฏิกรณ์ เนื่องจากการสร้าง OH^- เกิดขึ้นเป็นผลพลอยได้

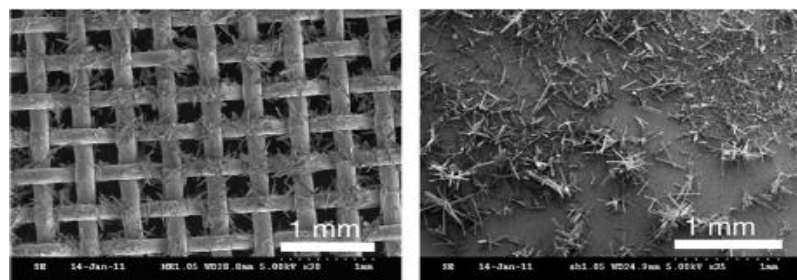
ในการดำเนินงานโดยใช้ Carbon felt เป็นขั้วแอโนดและใช้ carbon paper ที่เคลือบด้วย Pt เพื่อช่วยในการทำปฏิกิริยาเป็นแคโทด และดำเนินงานที่ 40 kV และ 30 mA รวมทั้งน้ำเสียฟาร์มสุกรมีค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับ 10 mS/cm และในการดำเนินงานจะแบ่งเป็น 2 phase เพื่อเป็นการลดการสัมผัสที่ขั้วแคโทดและป้องกันการตกตะกอนบนขั้วแคโทด จากการดำเนินงานดังกล่าวพบว่า phase I สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ 70-82% และ phase II สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ 70-75% และจากการสังเกตภายในถังปฏิกรณ์หลังการดำเนินงานแต่ละเฟส พบว่า phase I จะมีตะกอนตกอยู่บางส่วนที่ผิวหน้าขั้วแคโทดและไม่มีตะกอนที่ขั้วแอโนด ส่วน phase II ไม่มีตะกอนอยู่บนพื้นผิวของแคโทด แต่ในขณะเดียวกันมีสัจจจำนวนมากสะสมอยู่ข้างใต้ anode chamber ซึ่งใกล้พื้นผิวของ carbon felt ที่เป็นขั้วแอโนด เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทดใน phase II นอกจากนี้การตกผลึกสตรูไวท์จะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ Mg^{2+} , NH_4^+ , PO_4^{3-} เกินขีดจำกัดในความสามารถของการละลายน้ำ ซึ่งสตรูไวท์จะละลายน้ำได้ลดลงเมื่อ pH เพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันอาจเป็นผลกระทบของ ionic strength หรือ ion activity ในสารละลาย (Doyle and Parsons, 2002) และพื้นผิวบริเวณขั้วแคโทดมี pH เพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนที่ขั้วแคโทด ดังนั้นวิธีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นวิธีที่นำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย ซึ่งอยู่ในรูปสตรูไวท์ โดยที่มี pH เพิ่มขึ้นโดยการทำปฏิกิริยาของขั้วแคโทด อย่างไรก็ตามวิธีนี้ต้องการพลังงานเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กโทรด แต่มีความแตกต่างจากระบบอื่น ซึ่งวิธีนี้สามารถผลิตพลังงานได้มากกว่าพลังงานที่ต้องให้แก่ระบบคือ ก๊าซไฮโดรเจน

Cusick and Logan (2011) ทำการศึกษาการนำกลับฟอสเฟตในรูปสตรูไวท์โดยการใช้ chamber microbial electrolysis cell ซึ่งสตรูไวท์เป็นผลึกของสารอนินทรีย์ในน้ำเสียจากสัตว์ที่มากจากธาตุอาหารและน้ำเสียชุมชน การตกผลึกเกิดขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นของ Mg^{2+} , NH_4^+ , PO_4^{3-} มากเกินขีดจำกัดความสามารถละลายน้ำ การรวมตัวของผลึกสตรูไวท์ต้องมีค่า pH สูง เป็นผลให้ความสามารถในการละลายน้ำของสตรูไวท์จะน้อยเมื่อ pH ใกล้เคียง 10 และจากการสังเกตการตกผลึกสตรูไวท์จะมีประสิทธิภาพเมื่อ $pH > 8$ และการควบคุมการนำกลับสตรูไวท์จากน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพ จะต้องเติมสารเคมี เช่น NaOH, $Mg(OH)_2$ และ $Ca(OH)_2$ เป็นต้น การระเหยของคาร์บอนไดออกไซด์และการนำไฟฟ้า แต่วิธีนี้ต้องมีค่าใช้จ่ายจำนวนมาก

สตรูไวท์สามารถเกิดผลึกที่ขั้วแคโทดของเซลล์ไฟฟ้า ส่งผลให้ pH เพิ่มขึ้นบริเวณขั้วแคโทด เนื่องจากการเสียโปรตอน และทำให้มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ ต้องเสียเงินในการให้พลังงานสูงเพื่อสร้างศักยภาพในการแยกน้ำที่แอโนด และกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี ต้องการการกวนผสมที่ปั่นป่วนเพื่อให้มันสามารถตกตะกอนได้ด้วยตัวเอง

นอกจากนี้การนำก๊าซไฮโดรเจนกลับมาจะสามารถชดเชยค่าพลังงานที่เสียไปได้ ซึ่งประสิทธิภาพของพลังงานไฟฟ้าใน MECS สูงถึง 400% (สัดส่วนของพลังงานที่ได้จากการผลิตก๊าซไฮโดรเจนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการ) (Call and Logan, 2008) ดังนั้นการนำก๊าซไฮโดรเจนกลับมาและการใช้ประโยชน์จากก๊าซไฮโดรเจนมีความเป็นไปได้ในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

จากผลการทดลอง พบว่า วิธีการประหยัดพลังงานจากการผลิตก๊าซไฮโดรเจนพร้อมกับการผลิตสตรูไวท์ ขึ้นอยู่กับกระบวนการทางชีว-ไฟฟ้าเคมี(bioelectrochemically) ที่เป็นแรงผลักดันให้เกิดผลึกของสตรูไวท์ที่ขั้วแคโทดของ single chamber microbial electrolysis struvite-precipitation cell (MESC) โดยมีขั้วแคโทดเป็น stainless steel 304 ตาข่ายหรือ flat plates และประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 20% - 40% และถ้าต้องการให้ประสิทธิภาพสูงกว่นี้ ต้องใช้ขั้วแคโทดที่เป็นตาข่ายมากกว่าการใช้เป็นแผ่นเรียบ ซึ่งผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นสามารถตรวจสอบโดยใช้ SEM-EDS (ดังรูปที่ 2.11) ผลึกสตรูไวท์ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกรณ์ โดยที่อัตราการตกผลึกสตรูไวท์ ($\text{g}/\text{m}^2\text{-h}$) และอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ($\text{m}^3/\text{m}^3\text{-d}$) ขึ้นอยู่กับความดันไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ประสิทธิภาพของพลังงานทั้งหมด (สารอาหารและไฟฟ้า) จะสูงถึง $73 \pm 4\%$ และไม่ขึ้นกับความดันไฟฟ้า ส่งผลให้ MESC เป็นวิธีที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและการผลิตสตรูไวท์



รูปที่ 2.10 แสดงรูปร่างของสตรูไวท์ ซึ่งเป็นมีรูปร่างเป็นเข็ม (needle shape)
(ที่มา: Cusick and Logan (2011))

Song *et al.*, 2011 ทำการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดและการนำสารอาหารกลับคืนมาจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียฟาร์มสุกรโดยไม่มีการเติมสารเคมี เนื่องจากน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและไนโตรเจนสูง ซึ่งเป็นปัญหาหลักของปศุสัตว์และเป็นการก่อให้เกิดปรากฏการณ์สาหร่ายเบ่งบาน ดังนั้นการตกผลึกสตรูไวท์เป็นวิธีการหนึ่งที่จะกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจน ซึ่งกระบวนการตกผลึกสตรูไวท์จะดำเนินการโดยการเพิ่มขึ้นของ pH และการปรับอัตราส่วนเชิงโมลระหว่างแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟต เป็นกระบวนการที่สำคัญ

นอกจากนี้การเติมแมกนีเซียมเป็นการเพิ่มการกำจัดฟอสเฟสได้ดี และการตกตะกอนสตรูไวท์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน จะต้องการอัตราส่วนของ Mg/P มากกว่า 5 เท่า ซึ่งเหตุผลที่ต้องใส่แมกนีเซียม เพราะในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมี Mg^{2+} น้อยและใช้ NaOH ในการปรับ pH ซึ่งการเติม NaOH เป็นการทำให้ pH สูงขึ้นและเป็นสาเหตุของการเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จากการตกตะกอนแมกนีเซียม นอกจากนี้การเพิ่ม pH สามารถทำได้โดยใช้วิธี CO_2 stripping ซึ่งวิธีนี้สามารถลดการเติม NaOH แต่ต้องลดการเติมแมกนีเซียมหรือลดการเติมสารอื่นๆ และจากการทดลองพบว่า น้ำเสียนี้อาจมีค่า pH เพิ่มขึ้นโดยกระบวนการ CO_2 stripping และเกิดกระบวนการตกผลึกสตรูไวท์โดยไม่มีการเติม Mg^{2+} และทำให้เป็นต่าง ผลจากการดำเนินการสามารถกำจัดและนำฟอสฟอรัสกลับคืนมาได้มากกว่า 85% และมีการกำจัด $NH_4^+ - N$ โดย air stripping 40-90% นอกจากนี้ยังได้สตรูไวท์บริสุทธิ์มากกว่า 90%

Huang *et al.*, 2009 ทำการศึกษาผลกระทบของเฟอร์ริกไอออนและการนำเฟอร์ริกไอออนกลับมาใหม่ต่อการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์และก๊าซมีเทนในดินที่ปลูกข้าว เนื่องจากในปัจจุบันทุ่งนาเป็นแหล่งที่มาหลักของก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกลำดับที่สองรองจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากปี 1770 จนถึงปัจจุบัน ก๊าซมีเทนเพิ่มสูงขึ้นถึง 30-40% ซึ่งมากกว่าการเพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ปัจจุบันอุณหภูมิของโลกสูงขึ้น การเพิ่มนี้มีสาเหตุจากการทำกิจกรรมของมนุษย์เป็นหลัก ซึ่งมาจากการผลิตพลังงานและผลิตอาหาร ดังนั้นพื้นที่ที่ใช้ในการปลูกข้าวทั้งหมดกลายเป็นแหล่งสำคัญของการเกิดก๊าซมีเทนจากน้ำมือของมนุษย์ ซึ่งการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวเป็นผลของการผลิตการออกซิเดชันและการเคลื่อนที่ ซึ่งควบคุมโดยปัจจัยต่างๆ ที่ประกอบด้วยคุณสมบัติของดิน, ปุ๋ย, การจัดการน้ำ และสายพันธุ์ของข้าว เป็นต้น

ระดับของจุลินทรีย์ที่รีดิวซ์เฟอร์ริกไอออน(Fe^{3+}) มักจะพบเป็นส่วนใหญ่ในดิน ซึ่งเป็นการควบคุมการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากดินที่ปลูกข้าว การรีดิวซ์เฟอร์ริกไอออนในดินประกอบด้วย สารประกอบเหล็กที่มีความสามารถรีดิวซ์แตกต่างกัน สารละลายเฟอร์ริกไอออนและการแลกเปลี่ยนเฟอร์ริกไอออนเป็นการรีดิวซ์แต่โดยทั่วไปมักจะมีความเข้มข้นต่ำ เฟอร์ริกออกไซด์ไม่มีรูปร่างจะคล้ายกับเฟอร์ไรต์ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่สามารถรีดิวซ์ และน่าจะเป็นส่วนประกอบหลักของการรีดิวซ์เฟอร์ริก ผลิตภัณฑ์ของเฟอร์ริกออกไซด์คล้ายกับ magnetite และ goethite ซึ่งมีความสามารถที่จะรีดิวซ์น้อย แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากความอุดมสมบูรณ์ของเหล็กสูง ทำให้จุลินทรีย์ที่รีดิวซ์เฟอร์ริกเป็น electron acceptor หลักในดิน มากกว่านี้จุลินทรีย์ที่รีดิวซ์เฟอร์ริกสามารถฟื้นฟูกลับโดยสารเคมีและการออกซิเดชันของจุลินทรีย์ที่พื้นที่สัมผัสระหว่างดินกับน้ำและบริเวณรากของต้นข้าวและระหว่างดินที่มีน้ำท่วมขัง

จุลินทรีย์ที่รีดิวซ์เฟอร์ริกสามารถแข่งขันให้เกิดการยับยั้งการผลิตมีเทน ซึ่งเป็นการควบคุมการปลดปล่อยมีเทนจากนาข้าวที่มีน้ำท่วมขัง

การเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์ที่รีดิวซ์เฟอร์ริก ทำได้โดยการปรับปรุงวัตถุเหลือที่มีการถูกประเมินจากผลกระทบของการรีดิวซ์เฟอร์ริกต่อการลดลงของการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าวที่มีน้ำท่วมขัง จากการศึกษาเรื่องนี้พบว่า มีจุลินทรีย์ที่รีดิวซ์เฟอร์ริกเพิ่มขึ้น โดยการเติมเฟอร์ริไฮไดรต์ (40 mol Fe g^{-1}) ทำให้มีการผลิตมีเทนลดลง 30% ในวันที่ 15 ในสภาวะไร้อากาศ ส่วนการทดลองในนาข้าวจริงมีการเติมเฟอร์ริไฮไดรต์เท่ากับ $63 \mu\text{mol Fe g}^{-1}$ ส่งผลให้ในช่วงแรกมีการยับยั้งการปลดปล่อยมีเทนที่ไม่ชัดเจน แต่จะมีความสำคัญในช่วงหลังน้ำท่วม ซึ่งมีการปลดปล่อยมีเทนต่ำกว่านาข้าวที่ควบคุม 26% หลังจากที่มีการระบายน้ำออกครั้งเดียวและต่ำกว่านาข้าวที่ควบคุม 69% หลังจากมีการระบายน้ำออกสองครั้ง เนื่องจากจุลินทรีย์ที่รีดิวซ์ Fe^{3+} มีพลังในการแข่งขันกระบวนการรับอิเล็กตรอนมากกว่า Methanogenesis และส่งผลต่อการยับยั้งการปลดปล่อยมีเทนภายใต้สภาวะไร้อากาศหลังจากที่มีการฟื้นฟู Fe^{3+} จากกระบวนการออกซิเดชันของ Fe^{2+} โดยการเติมอากาศ

Schnell *et al.*, 2000 ทำการศึกษาการยับยั้งการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวโดยใช้ปุ๋ย ferric ion ซึ่งการผลิตก๊าซมีเทนเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการ โดยเริ่มเกิดก๊าซมีเทนเมื่อน้ำท่วมรากของข้าว หลังจากนั้นก็มีกระบวนการของจุลินทรีย์เกิดขึ้น โดยมีไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน การรับอิเล็กตรอนเป็นไปตามปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเป็นตัวกำหนดพลังงานของกระบวนการ และการนำสารอาหารไปใช้ประโยชน์สามารถเป็นไปได้ถ้ามีความเข้มข้นต่ำ โดยมีตัวรับอิเล็กตรอนที่มีศักยภาพในการทำปฏิกิริยารีดอกซ์สูง ดังนั้นการแข่งขันระหว่างกลุ่มแบคทีเรียที่มีลักษณะทางกายภาพต่างกันเป็นอีกหนึ่งปัจจัยในกระบวนการ ปริมาณตัวรับอิเล็กตรอนในธรรมชาติส่งผลต่อกระบวนการของจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ นอกจากนี้ ไนเตรต, เฟอร์ริไฮไดรต์และซัลเฟต สามารถยับยั้งการผลิตมีเทนได้ ซึ่งกลไกหลักในการยับยั้งไนเตรตของ methanogen จะเป็นพิษกับตัวกลางในกระบวนการ denitrification มากกว่าการแข่งขันในการย่อยสลายสารอาหารระหว่าง denitrifiers กับ methanogen โดยการทดลองนี้จะทำการทดลองในเรือนกระจกสำหรับเพาะปลูกและ chamber คลุมเพื่อวัดการปล่อยมีเทน พบว่า การปลูกข้าวจะมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนลดลงหลังจากใส่ปุ๋ย ferric ion oxide-ferrihydrite ลงไปในดิน รวมทั้งการปลดปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมดของข้าวจะลดลง 43% และ 84% เมื่อมีการเติม ferrihydrite 15, 30 กรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ตามลำดับ การเจริญเติบโตของต้นข้าวจะลดลงช่วงสัปดาห์แรกในการใส่ปุ๋ย ferrihydrite แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจาก 14 สัปดาห์ และจำนวนผลผลิตเมล็ดข้าวต่อต้นข้าวจะเหมือนกันหลังจากใส่ปุ๋ยเหล็กในปริมาณต่ำ นั่นคือ 82%

ของการควบคุมหลังจากใส่ปุ๋ยเหล็กในปริมาณ ปรากฏว่า ferric ion จะยับยั้ง methanogenesis และการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาข้าว

Zhang *et al.*, 2009 ทำการศึกษาการยับยั้ง sulfate-reducing และ methanogenic ของไบโอฟิล์มในท่อน้ำเสีย โดยการใส่เฟอร์ริกไอออน เนื่องจากเฟอร์ริกไอออนมักถูกใช้สำหรับการตกตะกอนของซัลไฟด์ในน้ำเสีย เพื่อควบคุมการก่อก้อนและกลิ่นที่เกิดขึ้น แต่เฟอร์ริกไอออนมีผลกระทบต่อกิจกรรมของ Sulfate-reducing bacteria และ Methanogen ในท่อน้ำเสียที่ไร้อากาศด้วย การเติมเฟอร์ริกไอออนลงในน้ำเสีย ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำเสียและเฟอร์ริกไอออน ในการทดลองได้ทำการทดลองแบบ batch แล้วเติม $Mg(OH)_2$ เพื่อปรับ pH และเติมเฟอร์ริกไอออนในรูป $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ผลการทดลอง พบว่า เฟอร์ริกไอออนสามารถยับยั้ง Methanogen ในการผลิตมีเทนได้ 52% - 80% และยับยั้งการทำกิจกรรมของ Sulfate-reducing bacteria ได้ 39% - 60 % การยับยั้งการบวนการรีดักชันของ Sulfate และการผลิตมีเทนโดยการตกตะกอนด้วยเฟอร์ริก เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการแข่งขันในการให้อิเล็กตรอนของ Fe^{3+} -reducing bacteria กับ Sulfate-reducing bacteria (SRB) และ Methanogen ซึ่งจะมีอะซิเตตและไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์ของกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรีย ความเข้มข้นของอะซิเตตกับไฮโดรเจนจะน้อยโดยกลไกของ Fe^{3+} -reducing bacteria ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันการปล่อยอะซิเตตกับไฮโดรเจนจากกลไกของ SRB และ Methanogen แต่กลไกนี้ไม่น่าเกิดขึ้นสำหรับการศึกษา เนื่องจากในน้ำเสียมีสารประกอบอินทรีย์มากมายและมีข้อจำกัดเกี่ยวกับสารอาหารเพื่อการเจริญเติบโตของ Fe^{3+} -reducing bacteria, SRB และ Methanogen แต่จากสมมติฐานของ Utgikar *et al.*, 2002 พบว่า การตกตะกอนของ FeS บนผิวของเซลล์ SRB หรือ Methanogen อาจจะเป็นสาเหตุในการยับยั้งกิจกรรมของเซลล์ในระหว่างการใช้เฟอร์ริกบำบัด ซึ่งน้ำเสียจะมีความเข้มข้นของตะกอน FeS สูง เพราะมีการผลิตซัลไฟด์เพิ่มขึ้นภายในท่อ ทำให้ตะกอน FeS ตกอยู่ใกล้กับเซลล์แบคทีเรีย ซึ่งเป็นการลดสารตั้งต้น(sulfate และ VFA) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่จำเป็น ดังนั้นจะทำให้กระบวนการเมทาบอลิซึมของแบคทีเรียลดลง

Frenzel *et al.*, 1999 ทำการศึกษาการปลดปล่อยมีเทนและศักยภาพของเฟอร์ริกไอออนที่ทำหน้าที่เป็น electron acceptor ซึ่งนาข้าวเป็นที่มาหลักในการปล่อยก๊าซมีเทน ในการทดลองจะใช้ดินอ่อนของข้าว และทำการเปรียบเทียบระหว่างชั้นดินด้านบนและชั้นดินที่ต่ำกว่าราก พบว่า ชั้นดินด้านบนมี biomass สูง, มีค่า E_h สูง ทำให้มีการรีดิวซ์เฟอร์ริกไอออนได้ดี ส่งผลให้มีความเข้มข้นของมีเทนต่ำ และมี Methanogenesis น้อย ส่วนดินที่ต่ำกว่ารากจะแสดงพฤติกรรมที่แตกต่างกันทั้งหมดจากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เนื่องจากกระบวนการออกซิไดซ์ของชั้นดินด้านบนและการรีดิวซ์ของชั้นดินที่ต่ำกว่า สังเกตจาก acetate จะถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการ respiration ในชั้นดินด้านบน และเปลี่ยนเป็นมีเทนในชั้นดินที่ต่ำกว่า หลังจากนั้นเมื่อผ่านไป 60 วัน มีการปลดปล่อยมีเทนจากดินข้าวสูงขึ้น เมื่อความ

เข้มข้นของ porewater มีค่าสูง อาจเกิดจากอุณหภูมิ, ความเข้มข้น, และเวลา นอกจากนี้เมื่อสังเกต redox profile ทำให้ทราบถึงการกระจายของออกซิเจนไปสู่ต้นข้าว และพบว่าค่า Eh เป็นปัจจัยหลักในการควบคุม Methanogenesis ซึ่ง E_h จะมีค่าต่ำเมื่อมี Methanogen น้อย ดังนั้นศักยภาพของปฏิกิริยา Redox มีความสำคัญต่อการทดลอง จึงใช้ออกซิเจนเพื่อควบคุม E_h ซึ่งในระบบ มี Fe^{2+} หรือ Sulfur ที่อาจจะถูกออกซิไดซ์ และเกิดการยับยั้ง Methanogenesis ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการแข่งขันการรับสารอาหาร โดยศักยภาพของปฏิกิริยารีดอกซ์

ในน้ำข้าวของอิตาลีและใน Slurry จากดินมีการสร้างมีเทนจาก acetate 70-90% (Rothfuss and Conrad (1993), Achtnich *et al.*, 1995b, Frenzel and Bosse (1996)) แต่ไม่มีการสะสมของ acetate ใน Slurry ที่ใช้ทดลองเพื่อศึกษาเกี่ยวกับ Methanogenesis ถูกยับยั้ง เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของ electron flow จาก Methanogenesis เป็นกระบวนการรีดักชัน Fe^{3+} ซึ่งสอดคล้องกับผลใน freshwater sediments ซึ่งบอกว่า electron เคลื่อนที่จาก organic matter ไปสู่ acceptor ตัวสุดท้าย ซึ่งจะถูกจำกัดโดยการย่อยสลายของแบคทีเรีย ซึ่งความเข้มข้นของ Sulfate ในตอนเริ่มต้นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในชั้นดินด้านบน เนื่องจากมีกระบวนการออกซิเดชันของ Sulfide ควบคู่กับกระบวนการรีดักชันของ Fe^{3+} อย่างไรก็ตาม การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นวิธีการหนึ่งที่เป็นวัฏจักรของกระบวนการออกซิเดชันและรีดักชันของซัลเฟอร์ แต่ Fe^{3+} เป็น electron acceptor ตัวสุดท้าย และเมื่อ Fe^{3+} ถูกใช้หมดไปทำให้ Methanogenesis เพิ่มขึ้นถึง 10 เท่า และเหมือนกันกับในชั้นดินที่ต่ำกว่า ส่วน Slurry จากรากที่ sediment freshwater จะมีพฤติกรรมที่คล้ายกัน

อย่างไรก็ตาม สาเหตุที่มีการผลิตมีเทนอาจเนื่องมาจากไม่มีการแข่งขันในการใช้ substrate และ ferric iron-reducing bacteria อาจใช้ acetate โดยตรง แต่ไม่ได้แข่งขันกับ Methanogen ในดิน slurry และมี Methanogenesis อยู่เล็กน้อยระหว่างกระบวนการรีดักชัน เพราะอาจจะมีการแข่งขันอยู่บางส่วน นอกจากนี้จำนวนของ Methanogen และ จำนวนของ ferric-iron bacteria ในดินทั้ง 2 ชั้นไม่มีความแตกต่างกัน แต่ Fe^{3+} เป็น alternative electron acceptor ที่แบคทีเรียมีการแข่งขันเพื่อใช้สารอาหารในการเจริญเติบโต นอกจากนี้ ferric iron-reducing bacteria ใช้ความเข้มข้นของ H_2 และ CH_3COOH น้อยกว่า Methanogen ซึ่งสอดคล้องกับจุลินทรีย์ของระบบไร้อากาศที่มีความเข้มข้นของสารอาหารต่ำ ถ้าใช้ electron acceptor ในการทำปฏิกิริยา Redox เพื่อให้มีศักยภาพสูง หมายความว่า ferric iron-reducing bacteria สามารถใช้ประโยชน์จากสารอาหารได้น้อยกว่า Methanogen และความเข้มข้นของ H_2 ที่เกิดจาก ferric iron-reducing bacteria สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยกว่า Methanogen ดังนั้นการเติม Fe^{3+} ทำให้ลดการเกิด H_2 และการเติม Fe^{3+} ไม่มีผลต่อความเข้มข้น acetate

ดังนั้น จากการทดลองมีอัตราการผลิตมีเทนต่ำ เพราะกระบวนการแข่งขัน หรือ ถูกออกซิเจนยับยั้งโดยตรง และมี Fe^{3+} เพิ่มขึ้นเนื่องจากกระบวนการออกซิเดชันของ Fe^{2+} ในชั้นดิน และเนื่องจากการเคลื่อนที่ของ electron ไปสู่กระบวนการรีดักชันของเฟอร์ริก และมีการให้ออกซิเจนเพิ่มเพื่อให้เกิดกระบวนการออกซิเดชันอีกครั้งอย่างรวดเร็วของการรีดิวซ์สารประกอบซัลเฟอร์และไนโตรเจน ซึ่งอาจจะเป็น alternative electron acceptor และทำให้มีการเคลื่อนที่ electron ของ Methanogenesis น้อยลง อย่างไรก็ตาม ในญี่ปุ่นมีการปลดปล่อยมีเทน 22-29% ที่เกิดจากการสังเคราะห์แสง และมีการแข่งขันระหว่าง iron reducer และ Methanogen น้อย ซึ่งโดยทั่วไปความสมดุลระหว่าง electron donor, ออกซิเจนหายไปในรากข้าว และการรีดักชันของเหล็ก สามารถควบคุมไม่ให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของมีเทนในนาข้าวได้

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงาน

การปฏิบัติงานในช่วงเดือน มกราคม-มีนาคม พ.ศ. 2556 ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีและทางเคมี และศึกษาผลของการนำเพอริคไออออนไปลดการเกิดก๊าซมีเทนในนาข้าว รวมทั้งศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ในการวิจัยจะดำเนินการทดลองแบบ Lab-scale เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี เพื่อลดการเกิดก๊าซมีเทน

การปฏิบัติงานในช่วงเดือน มีนาคม-เมษายน พ.ศ. 2556 ได้ทำการเก็บน้ำเสียฟาร์มสุกร ที่ อ.หนองแค จ.สระบุรี ซึ่งมีลักษณะเป็นฟาร์มเปิด และทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆเบื้องต้นของน้ำเสียจากฟาร์มนี้ โดยทำการวัดพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2.3

การปฏิบัติงานในช่วงเดือน เมษายน-พฤษภาคม พ.ศ. 2556 ทำการเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีต่างๆที่ใช้ในการดำเนินงานกระบวนการไฟฟ้าเคมี

การปฏิบัติงานในช่วงเดือน พฤษภาคม-ธันวาคม พ.ศ. 2556 เริ่มทำการทดลองทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีแผ่นเหล็กเป็นวัสดุขั้วที่สภาวะต่างๆ อาทิ ระยะเวลาเก็บกัก 30, 60 นาที กระแสไฟที่ใช้ 1, 2, และ 3 A และมีระยะห่าง 2 cm. สำหรับถึงปฏิกรณ์ของน้ำเสียจริงและระยะห่าง 10 cm. สำหรับถึงปฏิกรณ์ของน้ำเสียสังเคราะห์ และนำสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กมาทำ Anaerobic Toxicity Assay เพื่อทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยก๊าซมีเทนของตะกอนจุลินทรีย์

การปฏิบัติงานในช่วงเดือน มกราคม-มีนาคม พ.ศ. 2557 ทำการทดลองทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีแผ่นเหล็กเป็นวัสดุขั้ว โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 60 นาที ความเข้มข้นกระแส 2.39, 4.77 และ 7.16 mA cm⁻² และมีระยะห่าง 10 cm. สำหรับถึงปฏิกรณ์ของน้ำเสียสังเคราะห์ และนำสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กมาทำ Anaerobic Toxicity Assay เพื่อทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยก๊าซมีเทนของตะกอนจุลินทรีย์

การปฏิบัติงานในช่วงเดือน มีนาคม- เมษายน พ.ศ. 2557 ทำการวิเคราะห์ผลจากการทดลองและสรุปผลจากการทดลอง เพื่อเขียนรายงานผลการทดลองดังกล่าว

ตารางที่ 3.1 แสดงแผนการปฏิบัติงาน

กิจกรรม	พ.ศ. 2556								พ.ศ. 2557							
	เดือน								เดือน							
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1.ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง																
2.ทำการเก็บน้ำเสียและหาพารามิเตอร์ต่างๆ																
3.เตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง																
4.ทำการทดลอง																
5.วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง																

3.2 ตัวแปรที่ศึกษา

3.2.1 ตัวแปรอิสระ

- ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี
- ความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า

3.2.2 ตัวแปรตาม

- สารปรับปรุงคุณภาพดินที่ผลิตจากน้ำเสียโดยมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ มีตัวชี้วัด คือ สารอินทรีย์ในน้ำเสีย (COD) ก่อนและหลังกระบวนการ
- การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย มีตัวชี้วัด คือ ฟอสฟอรัสที่เหลืออยู่ในน้ำเสียและฟอสฟอรัสในสารปรับปรุงคุณภาพดิน
- ศักยภาพในการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทน มีตัวชี้วัด คือ ปริมาณก๊าซมีเทนในนาข้าว และ ค่า Anaerobic Toxicity Assay

3.2.3 ตัวแปรควบคุม

1. ระยะห่างของแผ่นเหล็ก
2. ความเป็นกรดด่าง (pH)

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินโดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีสำหรับน้ำเสียฟาร์มสุกรจริง

- | | |
|---|-----------|
| 1. บีกเกอร์ขนาด | 2 ลิตร |
| 2. แผ่นเหล็กขนาด กว้าง 98 มม. × ยาว 190 มม. × หนา 3 มม. | 2 แผ่น |
| 3. เครื่องผสมสารละลายระบบแม่เหล็กไฟฟ้า | 1 เครื่อง |
| 4. แท่งแม่เหล็กที่ใช้ในการผสมสารละลาย | 1 แท่ง |
| 5. เครื่องวัดพีเอช-ความนำไฟฟ้า WTW multi 3420 | 1 เครื่อง |
| 6. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Fluke 287 | 2 เครื่อง |
| 7. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง Tektronix PWS4323 | 1 เครื่อง |
| 8. สายไฟขั้วบวกและลบ | 2 เส้น |

3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินโดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

- | | |
|---|-----------|
| 1. ถังปฏิกรณ์อิเล็กโทรไลต์ที่ทำมาจากกระจกทนความร้อนขนาด | 10 ลิตร |
| 2. แผ่นเหล็กขนาด กว้าง 194.5 มม. × ยาว 300 มม. × หนา 30 มม. | 2 แผ่น |
| 3. ไบพัตเพื่อใช้ในการกวนผสม | 1 อัน |
| 4. เครื่องวัดพีเอช-ความนำไฟฟ้า WTW multi 3420 | 1 เครื่อง |
| 5. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Fluke 287 | 2 เครื่อง |
| 6. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง Tektronix PWS4323 | 1 เครื่อง |
| 7. สายไฟขั้วบวกและลบ | 2 เส้น |

3.3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทำ Anaerobic Toxicity Assay

1. ขวด vial ขนาด 120 มิลลิลิตร
2. จุกยางและฝาอลูมิเนียม
3. อุปกรณ์การวัดก๊าซมีเทน
4. เครื่อง GC-8A SHIMAZU (column: N₂, CH₄, CO₂; Carrier gas: He; Inject Temp: 160°C; pack column: unibeads C)

3.3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการบ่มดินเพื่อหา Community ของ Methanogen

1. ภาชนะสำหรับใส่ดิน
2. ดิน
3. Oligonucleotide probes ของ Integrated DNA Technologies, Inc. (IDT)

3.3.5 เครื่องมือที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

1. เครื่องมือวัดพีเอช (pH meter)
2. เครื่องชั่งแบบละเอียด (Analytical balance)
3. ตู้อบอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส (Oven)
4. ตู้ดูดควัน (Fume hood)
5. เตาไฟฟ้า (Hot plate)
6. เครื่องดูดสุญญากาศ (Vacuum pump)
7. เครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
8. เครื่องวัดองค์ประกอบของก๊าซ (Gas Chromatograph)

9. เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrophotometer)

3.4 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 6M หรือ 1M
2. สารละลาย KH_2PO_4 ความเข้มข้น 1.7 g/l
3. สารละลาย K_2HPO_4 ความเข้มข้น 2.18 g/l
4. สารละลาย NH_4Cl ความเข้มข้น 1.25 g/l
5. สารละลาย $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 0.375 g/l
6. สารละลาย $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 1 g/l
7. สารละลายที่เป็นอาหารเสริม (Trace element) ซึ่งประกอบด้วย
 - $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 200 g/l
 - $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 17 g/l
 - ZnCl_2 ความเข้มข้น 7 g/l
 - H_3BO_3 ความเข้มข้น 6 g/l
 - $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 50 g/l
 - $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 4 g/l
 - $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 2.7 g/l
 - $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 2.5 g/l
 - EDTA disodium salt ความเข้มข้น 500 g/l
8. สารละลาย HCl 36%
9. Stock Solution ของอะซิเตด ที่เตรียมจาก CH_3COONa มีความเข้มข้น 2000 mgCOD/l
10. สารละลาย Phosphate buffer (1.7 g KH_2PO_4 + 2.18 g K_2HPO_4 ในน้ำกลั่น 1 ลิตร)

3.5 น้ำเสียฟาร์มสุกร

3.5.1 น้ำเสียจากฟาร์มสุกรจริง

น้ำเสียฟาร์มสุกรที่นำมาใช้ในการทดลองได้รับอนุญาตจากเกษตรปศุสัตว์ของฟาร์มสุกรในอำเภอหนองแวง จังหวัดสระบุรี โดยนำน้ำที่ผ่านการบำบัดมากรอง แล้วเก็บไว้ในภาชนะที่มีขนาด 25 ลิตร และติดฉลากแสดงชื่อน้ำเสีย, สถานที่ที่เก็บน้ำเสีย, ส่วนประกอบของน้ำเสีย และวัน/เดือน/ปี ที่ทำการเก็บ แล้วจึงนำไปเก็บไว้ในตู้แช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C นอกจากนี้ให้นำน้ำเสียจริงไปวิเคราะห์หาอัตราส่วนเชิงโมลของ $\text{Mg}^{2+}:\text{NH}_4^+:\text{PO}_4^{3-}:\text{P}$ ได้เท่ากับ 1.2 : 8 : 1

3.5.2 น้ำเสียสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เป็นการเลียนแบบน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศแล้ว ดังนั้นในน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการนี้ยังคงเหลือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งจะเป็นสารในกลุ่มกรดอินทรีย์ระเหยง่าย โดยเฉพาะกรดอะซิติก ผู้วิจัยจึงใช้ CH_3COOH ที่มีความเข้มข้น 1,000 mgCOD/l เป็นแหล่งคาร์บอน นอกจากนี้ในน้ำเสียสังเคราะห์นี้ยังมีสารอนินทรีย์ประกอบอยู่ด้วย จึงมีแหล่งไนโตรเจนและแหล่งฟอสฟอรัส โดยมีอัตราส่วนเชิงโมลของ $\text{Mg}^{2+}:\text{NH}_4^+:\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ เท่ากับ 1.5 : 8.6 : 1 และทำการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3^-) เพื่อคืนสภาพความเป็นด่างให้กับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเติม 1.2 g NaHCO_3^- /l ต่อแอมโมเนียไนโตรเจน 200 mg N/l เพื่อกำหนดอัตราส่วน COD: NH_4^+ เท่ากับ 4:1 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์อยู่ในช่วง 7.77 – 8.04 และทำการเตรียมน้ำเสียก่อนทำการทดลองทุกครั้ง เพื่อให้ได้น้ำเสียที่มีความสดใหม่อยู่เสมอ แสดงองค์ประกอบธาตุอาหารในน้ำเสียสังเคราะห์ดังตารางที่ 3.2 และ ตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุอาหารในน้ำเสียสังเคราะห์

Basic medium		*Trace mineral	
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.60 g/l	FeCl_3	0.90 g/l
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.07 g/l	H_3BO_3	0.15 g/l
EDTA	0.01 g/l	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.03 g/l
Trace mineral*	2.0 ml/l	KI	0.03 g/l
		$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.12 g/l
		$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.06 g/l
		$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.15 g/l

ตารางที่ 3.3 แสดงสารอินทรีย์คาร์บอน สารอนินทรีย์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์

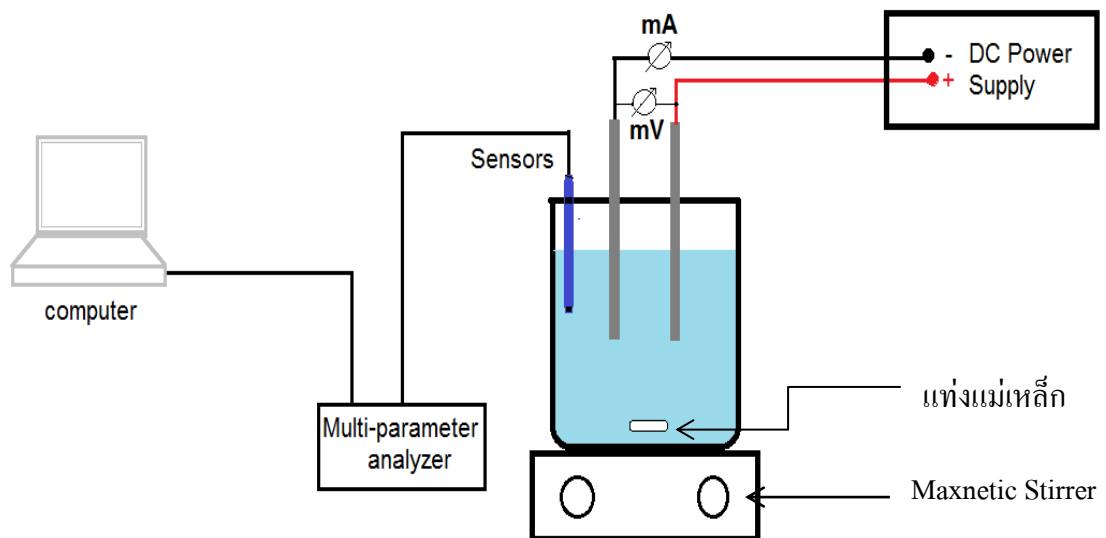
ธาตุอาหาร	ความเข้มข้น 1,000 mgCOD/l
แหล่งคาร์บอน(g/l) : CH_3COOH	1.28
แหล่งไนโตรเจน(g/l) : NH_4Cl	0.725
แหล่งฟอสฟอรัส(g/l) : K_2HPO_4	0.163
: KH_2PO_4	0.093

หมายเหตุ ตารางที่ 3.2 และ 3.3 คัดแปลงมาจาก อุกฤษ กมลาลิงห์ (2549)

3.6 การดำเนินการทดลอง

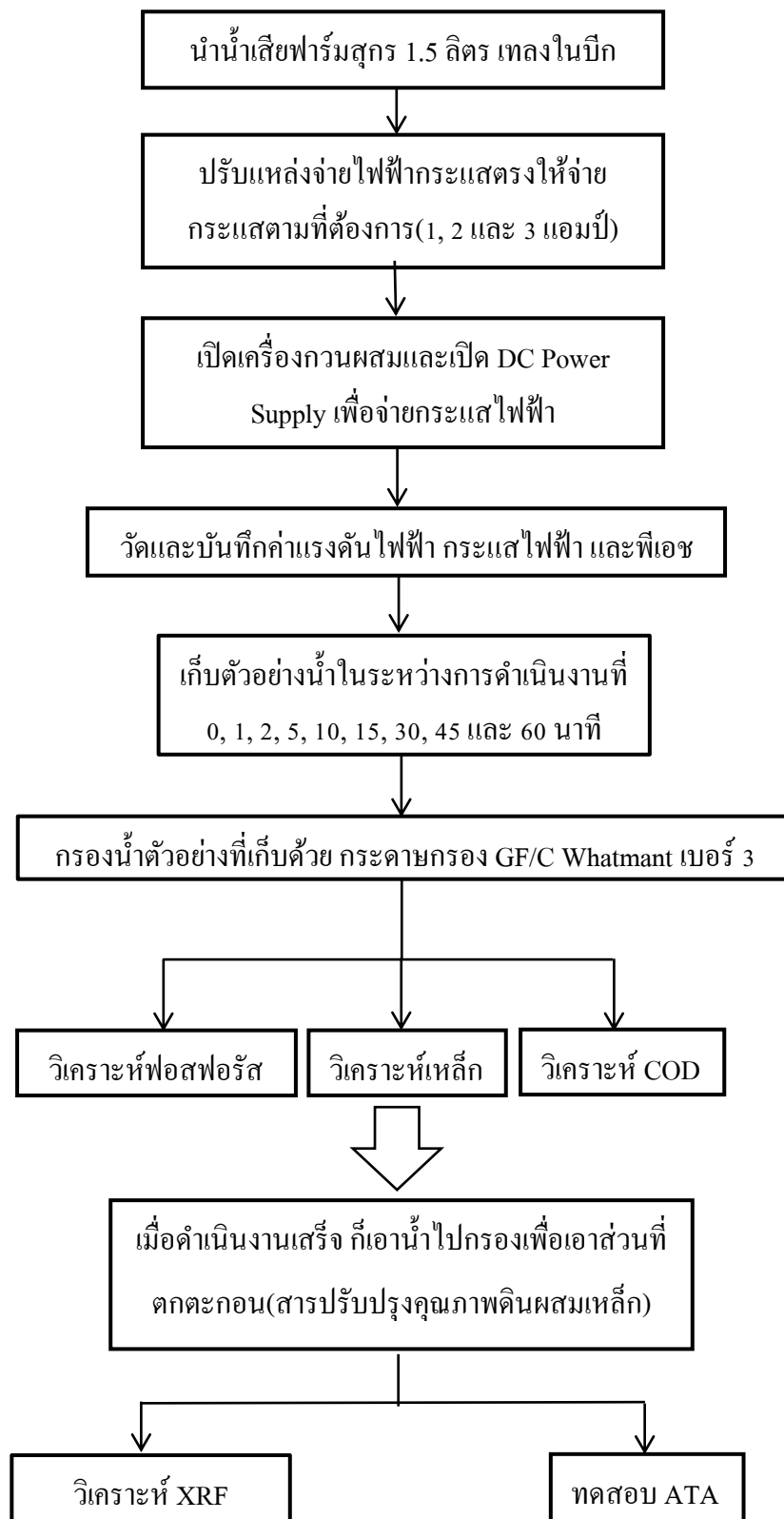
3.6.1 การผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียจริง

การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ สร้างปฏิกรณ์แก้วขนาด 2 ลิตรวางลงบนเครื่องกวนผสม (Magnetic Stirrer) แล้วใส่แท่งแม่เหล็กเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดการกวนผสม หลังจากนั้นทำการติดตั้ง Electrode ซึ่งในการทดลองจะใช้แผ่นเหล็ก 2 แผ่น แผ่นหนึ่งจะเป็นขั้วบวก และอีกแผ่นจะเป็นขั้วลบ จัดวางแผ่นเหล็กที่มีระยะห่าง 2 cm. แล้วทำการต่อกับ DC Power Supply ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง หลังจากนั้นก็ทำการต่อ Sensors ลงไปในปฏิกรณ์เพื่อเก็บข้อมูลต่อเนื่องทุกๆ 2 วินาที ข้อมูลทั้งหมดบันทึกโดยคอมพิวเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.1



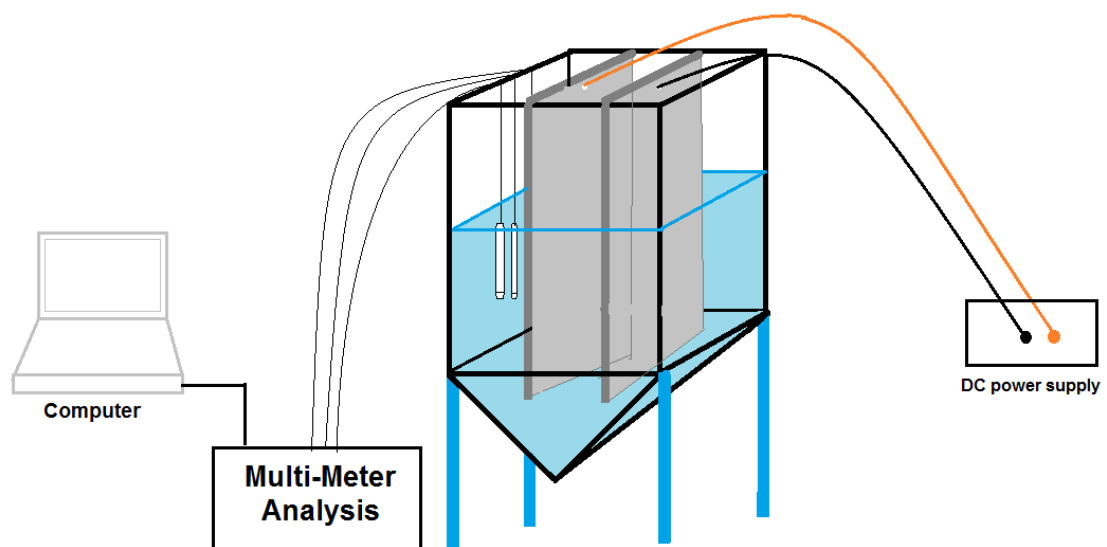
รูปที่ 3.1 แสดงการติดตั้งระบบการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียจริง

หลังจากนั้น เมื่อติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์เสร็จแล้วก็ดำเนินการดังรูปที่ 3.2



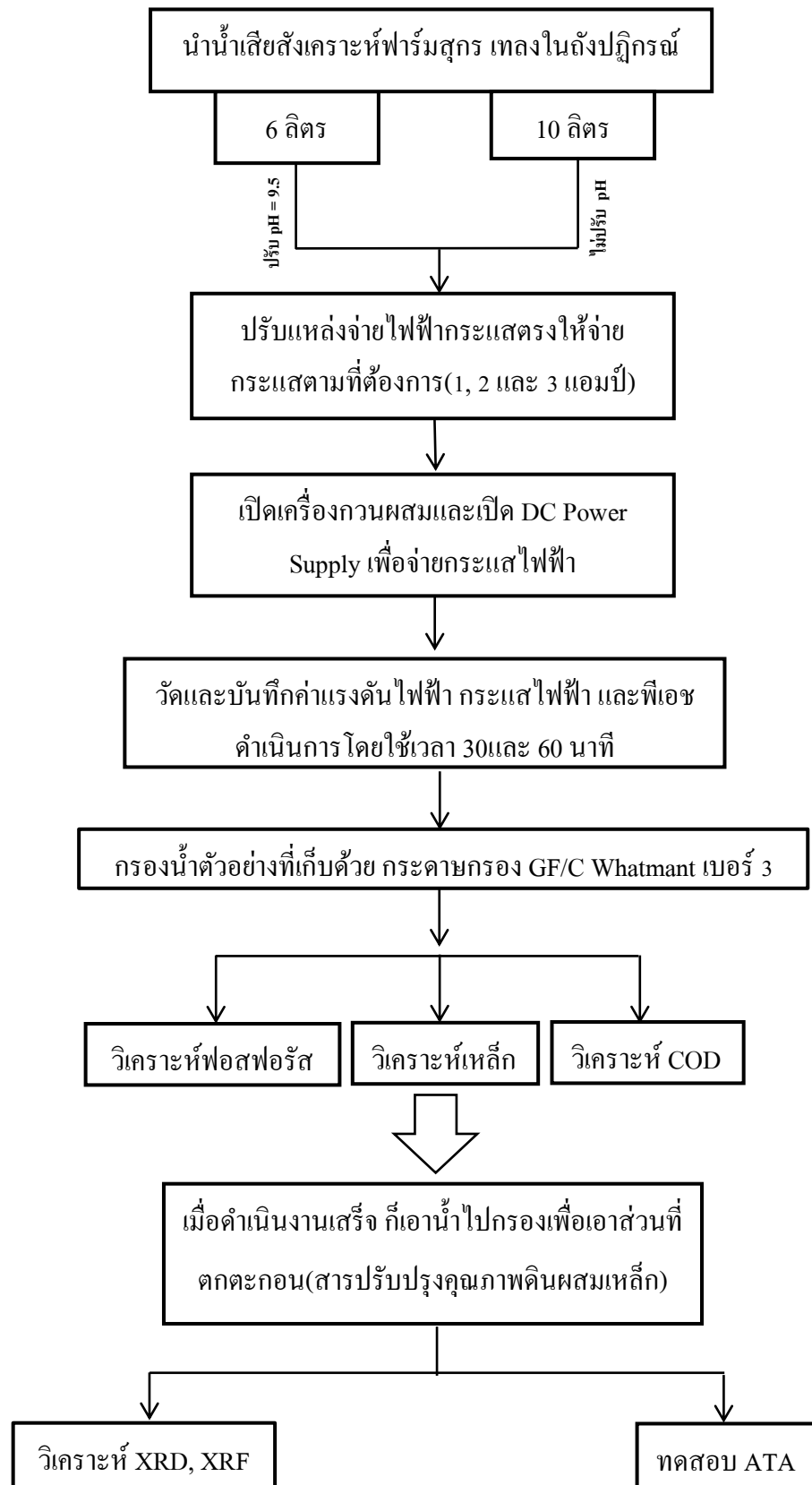
รูปที่ 3.2 แสดงการดำเนินงานหลังจากติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์

3.6.2 การผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์
 การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ ดำเนินการโดยใช้ถังปฏิกรณ์ Electrolite ที่ทำมาจากกระจกทนความร้อนขนาด 10 ลิตร ซึ่งมีใบพัดเพื่อใช้ในการกวนผสมสารละลาย หลังจากนั้นทำการติดตั้ง Electrode ซึ่งในการทดลองจะใช้แผ่นเหล็ก 2 แผ่น แผ่นหนึ่งจะเป็นขั้วบวก และอีกแผ่นจะเป็นขั้วลบ จัดวางแผ่นเหล็กที่มีระยะห่าง 10 cm. แล้วทำการต่อกับ DC Power Supply ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง หลังจากนั้นก็ทำการต่อ Sensors ลงไปในถังปฏิกรณ์เพื่อเก็บข้อมูลต่อเนื่องทุกๆ 2 วินาที จากการดำเนินงานเข้าสู่คอมพิวเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงการติดตั้งระบบการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์

เมื่อติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์เสร็จแล้วก็ดำเนินการดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการดำเนินงานหลังจากติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์

3.6.3 การทำ Anaerobic Toxicity Assay เพื่อทดสอบความสามารถทำงานของ Methanogen Bacteria

ในการทดลองทำ Anaerobic Toxicity Assay ได้นำเชื้อตะกอนจุลินทรีย์มาจากระบบ UASB ของบริษัทเปียร์ไทย (1991) จำกัด (มหาชน) โดยลักษณะของตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองมีค่าของแข็งทั้งหมด (TS) 75.9 gSS/l และของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (TVSS) 37.4 gVSS/l โดยมีขั้นตอนการเตรียมเชื้อและการทดลอง ATA ดังนี้

การเตรียมเชื้อตะกอนจุลินทรีย์

1. ทำการล้างเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ด้วยสารละลาย Phosphate buffer โดยใช้เครื่อง Centrifuge
2. นำเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่ล้างด้วย Phosphate buffer แล้วไปปั่นให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปทำการวิเคราะห์ SS, VSS และนำมาทดสอบ Anaerobic Toxicity Assay ต่อไป

การทดลองทำ Anaerobic Toxicity Assay

ในการทดลองจะให้ปริมาณสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กในขวด vial ที่แตกต่างกันดังนี้ 0.05, 0.1, 0.5 กรัม โดยความเข้มข้นเหล็กเท่ากับ 369, 352 และ 475 mgFe/g Soil conditioner ที่ 9.57, 19.14 และ 28.71 mA cm⁻² ตามลำดับ สำหรับสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ได้จากกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีของน้ำเสียจริง และสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก 1 และ 5 กรัม โดยความเข้มข้นเหล็กสามารถเทียบได้จาก %Fe₂O₃ ดังรูปที่ 4.10 และ 4.18 สำหรับสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ได้จากกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีของน้ำเสียสังเคราะห์ และมีขวดที่ไม่มีสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กซึ่งเป็นขวดควบคุม เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการผลิตก๊าซมีเทน โดยแต่ละตัวอย่างจะทำการทดลองแบบสองซ้ำ (Duplicate) ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เขียนฉลากติดที่ขวด vial ที่มีขนาด 120 ml.
2. เตรียมสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กตามน้ำหนักที่ได้กล่าวไว้แล้ว ลงในขวด vial
3. เตรียมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO₃) 0.05 กรัมลงในขวด vial
4. เตรียมเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ความเข้มข้น 10gVSS/l ปริมาณ 25ml. ใส่ลงในขวด vial
5. ใส่สารอาหารหลัก และสารอาหารเสริม ลงในขวด vial
6. นำขวด vial ไปไล่อากาศโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสัดส่วน 80:20 เป็นเวลา 2 นาที แล้วทำการปิดฝาขวด vial ทันที แล้วทำการเขย่าเพื่อให้เกิดการกวนผสมระหว่างจุลินทรีย์กับสารปรับปรุงคุณภาพดินแล้วนำขวดเขย่าไปไว้ในตู้หมัก 37°C
7. วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยใช้การแทนที่ของก๊าซ จดบันทึกค่าและเวลาที่ทำการวัด
8. นำก๊าซชีวภาพในขวด vial ไปวิเคราะห์หาปริมาณสัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ (Gas Chromatography)

9. นำปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นไปหาค่า Anaerobic Toxicity Assay

10. ในขวดควบคุม จะไม่มีการเติมสารปรับปรุงคุณภาพดินลงไปแต่จะเติม Phosphate buffer และเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ให้มีปริมาตรรวมเท่ากับ 50 ml. จากนั้นจึงทำเหมือนข้อ 3 – 9

3.6.4 การหา Community ของ Methanogen ในดินและการปลดปล่อยมีเทนจากนาข้าว

การหา Community ของ Methanogen ในดิน โดยใช้สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักจากการตกตะกอนทางเคมีใส่ลงในแปลงนาข้าว มีขั้นตอนการทำได้ดังนี้

1. วิเคราะห์คุณสมบัติของสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลัก

2. ทำการปลูกข้าวในแปลงเกษตรโดยใส่ปุ๋ยผสมกับดินที่ใช้ปลูก โดยการทดลองจะมีลักษณะการใส่ปุ๋ยที่แตกต่างกัน ดังนี้ ชุดแรกจะเป็นชุดควบคุมซึ่งไม่มีการใส่ปุ๋ย, ชุดที่สองจะเป็นการใส่ปุ๋ยจากการวิเคราะห์ดินที่ใช้ในการปลูก, ชุดที่สามจะใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลัก และชุดสุดท้ายจะใส่ปุ๋ยตามวิธีของเกษตรกร เป็นต้น

3. ทำการปลูกข้าวและเก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเป็นระยะๆ

4. เก็บตัวอย่างดินแต่ละชุดการทดลองเพื่อมาหา Community ของ Methanogen ในดิน

3.6.5 การหา community ของ Methanogen ในดิน

การหา community ของ Methanogen ในดินจากกระถางทดลอง โดยใช้ Molecular technique มี 2 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. DNA extraction เป็นขั้นตอนการสกัด Nucleotide ออกมาจากตัวอย่าง โดยใช้วิธีของ Zhou *et al.*, 1996) โดยใช้ชุด kit ของ Integrated DNA Technologies, Inc. (IDT)

2. Polymerase Chain Reaction (PCR) เป็นการเพิ่มจำนวน DNA ให้มีปริมาณมาก จาก DNA ต้นแบบ สำหรับการหา community ของ Methanogen ในดิน จะใช้ *mcrA* gene specific primer สำหรับ Methanogen ซึ่งมีขนาด 500 bp และ Primer sequences สำหรับ *mcrA* gene คือ *mcrA* f = 5'-GGTGGTGT^A_CGGAT-TCACACA^A_GTA^C_TGC^A_TACAGC-3', *mcrA* r = 5'-TTCATTGC^A_GTAGTT^A_TGG^A_GTAGTT-3' (Sheppard *et al.*, 2005) โดยใช้ PCR protocol (Innis *et al.*, 1990)

3.6.6 การสกัด DNA (DNA extraction)

1. นำตัวอย่างมา homogenize เพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้ homogenizer แล้วนำตัวอย่างมา 1 ml ใส่ลงใน microcentrifuge tube ขนาด 1.5 ml หลังจากนั้นทำการ centrifugation ที่ 8000 rpm เป็นเวลา 10 นาที และเทน้ำส่วนใสทิ้ง

2. นำส่วนที่เป็นตะกอน (pellet) มาใส่ extraction buffer pH 8.0 (100 mM Tris-HCl pH 8.0, 100 mM EDTA pH 8.0, 1.5 M NaCl) 600 μ l, Lysozyme (10mg/ml) 60 μ l, silicabase แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 60 นาที
3. ใส่ 20% SDS 100 μ l แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 30 นาที (กลับด้าน tube เบบๆ ทุกๆ 5-10 นาที)
4. นำเชื้อที่แตกตัวแล้ว (lysate) มา centrifuge ที่ 13,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที และเทน้ำส่วนใสลงใน tube ใหม่ แล้วจดปริมาตร (DNA solution)
5. เติม chloroform:isoamyl alcohol (24:1) ในปริมาตรเท่ากับ DNA solution แล้วผสมให้เข้ากัน และ centrifuge ที่ 14,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที
6. ดูคส่วนที่เป็นของเหลวออกมาใส่ใน tube ใหม่ แล้วจดปริมาตร (ระวัง! อย่าให้แต่ละชั้นผสมกัน ถ้ามีการผสมกัน สามารถทำข้อ 5-6 ใหม่ได้)
7. ใส่ isopropanol 0.6V เพื่อให้ DNA ตกตะกอน และบ่มไว้ในตู้เย็น 3 ชั่วโมง หรือหนึ่งคืน
8. นำ DNA มา centrifuge ที่ 14,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที แล้วเทน้ำส่วนใสทิ้ง และทำการล้างโดยการเติม absolute ethanol 1 ml แล้วนำไป centrifuge ที่ 14,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที และเทน้ำส่วนใสทิ้ง แล้วเปิดฝาดังทิ้งไว้จนกว่า pellet แห้งสนิท
9. เติมสารละลาย TE pH 8.0 (1 M Tris-HCl, 0.5 M EDTA) 25-50 μ l

3.6.7 การทำ Polymerase Chain Reaction (PCR)

เนื่องจากสารละลาย DNA ที่สกัดเสร็จแล้วมีสีน้ำตาลอ่อน จึงต้องทำความสะอาดก่อนทำ PCR มี โดยใช้ PCR clean up protocol (Vogelstein and Gillespie, 1979) และใช้ชุด kit ของ Integrated DNA Technologies, Inc. (IDT) ขั้นตอนดังนี้

1. ใส่ DF buffer ในปริมาตร 5 เท่าของปริมาตรตัวอย่าง ลงในสารละลาย DNA แล้วผสมกัน โดยใช้ vortex

2. วาง DF column ใน Collection tube ขนาด 2 ml แล้วนำตัวอย่างที่ผสมแล้วจากข้อ 1 มาใส่ลงใน DF column แล้วนำไป centrifuge ที่ $14-16000 \times g$ เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นเทน้ำใน tube ออก และวาง DF column กลับที่เดิม

3. ใส่ wash buffer ที่มีการเติม ethanol 600 μ l (ใส่ลงตรงกลาง DF column) และรอ 1 นาที หลังจากนั้นก็นำมา centrifuge ที่ $14-16000 \times g$ เป็นเวลา 30 วินาที แล้วเทน้ำใน tube ออก และวาง DF column กลับที่เดิม และ centrifuge ที่ $14-16000 \times g$ เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้ column แห้ง

4. นำ DF column ที่แห้งแล้วไปวางใน microcentrifuge tube ขนาด 1.5 ml ใหม่ แล้วเติม Elution buffer 20-50 μ l ลงตรงกลางของ column รอประมาณ 2 นาที เพื่อให้ Elution buffer ถูกดูดซึม และนำไป centrifuge ที่ $14-16000 \times g$ เป็นเวลา 2 นาที เพื่อเอาส่วน purified DNA

5. วัดความเข้มข้นของ DNA ที่ purified แล้ว

สำหรับการทำ PCR มีขั้นตอนดังนี้

1. เติมนสารต่างๆ (ด้านล่าง) ลงใน microcentrifuge tube ขนาด 0.5 ml

Components	Volume	Final Concentration
10X PCR Buffer	2 μ l	1X
25 mM dNTP mixture	0.16 μ l	0.2 mM
25 mM MgCl ₂	2.4 μ l	3 mM
Primer mix 20 μ M	2.5 μ l	0.5 μ M each
Template DNA	1-20 μ l	as required
Taq DNA polymerase	0.2-0.5 μ l	1.0-2.5 units
Q solution 5X	2 μ l	0.5X
Autoclaved, Distilled water	20 μ l	not applicable

2. ผสมสารทุกอย่างลงใน tube แล้วนำ tube ไปเข้าเครื่อง Thermocycler เพื่อทำปฏิกิริยา โดยตั้งค่าบ่ม tube ใน thermal cycler ที่ 95°C เป็นเวลา 5 นาที และตั้งค่า PCR amplification 30 cycles ดังนี้ Denature ที่ 95 °C เป็นเวลา 45 วินาที, Anneal ที่ 54 °C เป็นเวลา 45 วินาที และ Extend ที่ 72°C เป็นเวลา 2 นาที

3. บ่ม tube ไว้ที่อุณหภูมิ 72°C เป็นเวลา 10 นาที และให้ทำปฏิกิริยาหลังจาก cycling ที่ 4°C

4. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้วิธี agarose gel electrophoresis

3.7 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา

ทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำเสียก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี และในสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักดังตารางที่ 3.4 นอกจากนี้ เมื่อได้สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักแล้ว ก็นำไปวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของธาตุและสารประกอบเชิงซ้อนของธาตุ โดยการวิเคราะห์ X-ray Fluorescence (XRF) และ X-ray diffraction (XRD) ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์

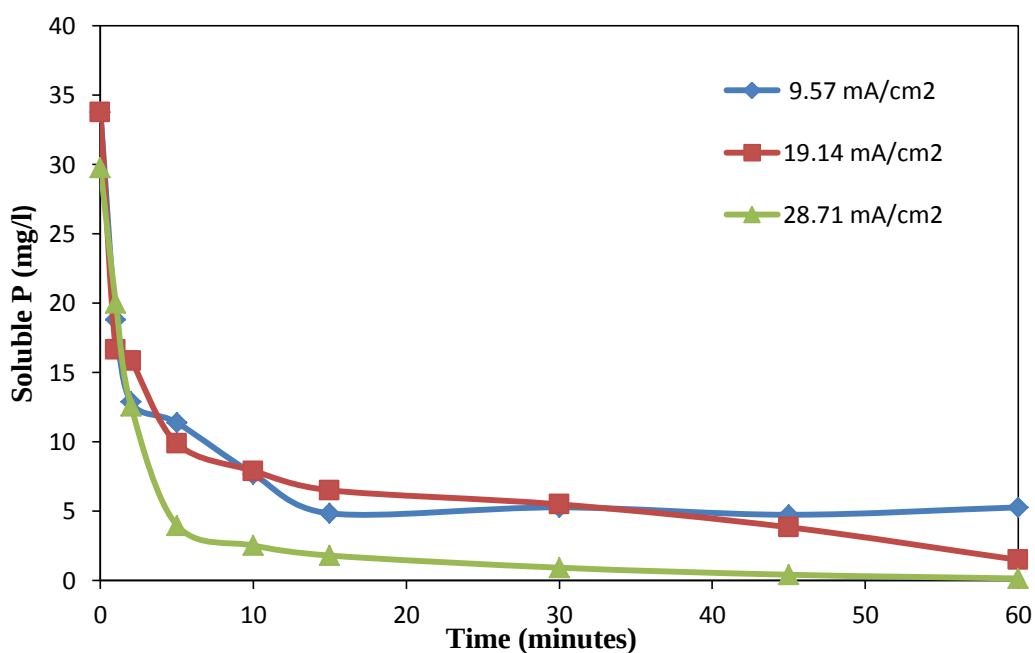
พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
COD	Dichromate Closed Reflux Method
SS	Gravimetric method
VSS	Gravimetric method
Phosphorus	Stannous Chloride Method
pH	pH Meter
Iron	Titration Method

บทที่ 4 ผลจากการวิจัย

4.1 ผลจากการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรจริง

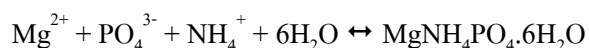
4.1.1 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ระยะเวลาต่างๆโดยมี current density ที่แตกต่างกัน

จาก รูปที่ 4. 1 แสดงความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ระยะเวลาต่างๆโดยมี current density ที่แตกต่างกัน พบว่า แนวโน้มของความเข้มข้นของฟอสฟอรัสมีปริมาณลดลงในแต่ละระยะเวลาจนกระทั่ง ระยะเวลาที่ 60 นาที มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสน้อยที่สุด



รูปที่ 4.1 แสดงความเข้มข้นของฟอสฟอรัสจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่เวลาต่างๆ

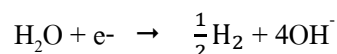
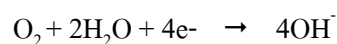
เนื่องจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างการดำเนินกระบวนการไฟฟ้าเคมี ทำให้เกิดการรวมตัวเป็นสารปรับปรุงคุณภาพดินเพราะในการดำเนินงานมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งเป็นไปตามสมการของ Zhang *et al.*, 2012



ทำให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำเหลือน้อยลง และจากผลการทดลองโดยการปรับเปลี่ยน current density พบว่าการทดลองที่มี current density มากที่สุด สามารถ recovery ฟอสฟอรัสได้มาก

ที่สุด โดยมีประสิทธิภาพ recovery ของความเข้มข้นกระแสที่ 9.57, 19.14 และ 28.71 mA cm⁻² เท่ากับ 84.40, 95.61 และ 99.52% ตามลำดับ

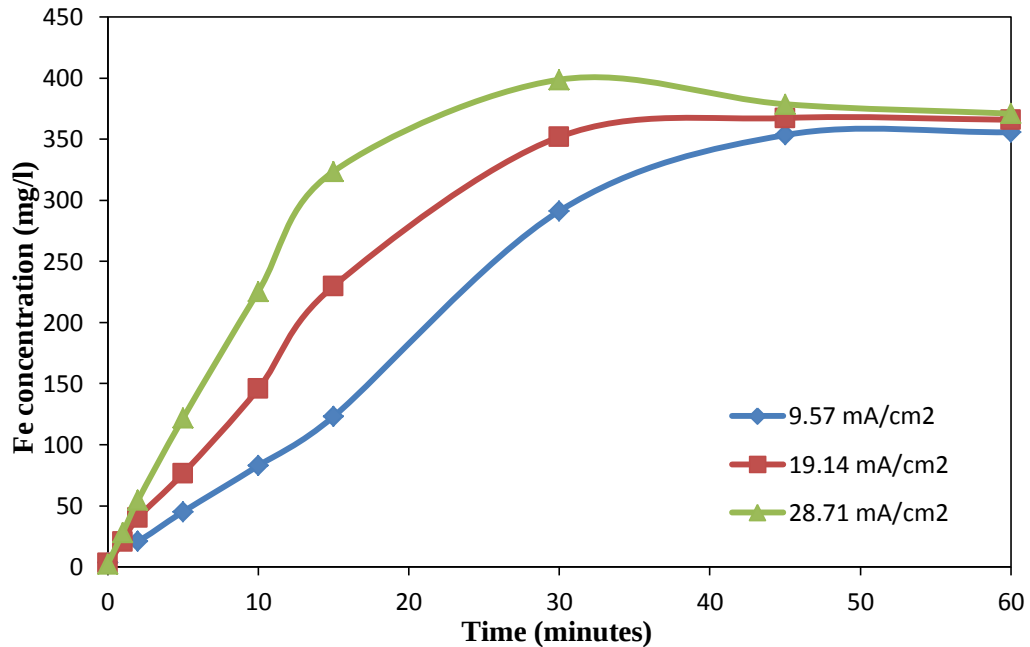
การตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดินขึ้นอยู่กับควบคุม pH ที่เหมาะสม เนื่องจาก pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอนเท่ากับ 8-10 (Song *et al.*, 2011) และการตกตะกอนจะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ Mg²⁺, PO₄³⁻ และ NH₄⁺ เกินความสามารถในการละลายน้ำ และความสามารถในการละลายน้ำจะลดลงเมื่อ pH เพิ่มขึ้น ในกรณีน้ำเสียจากฟาร์มสุกร จะเกิดการตกตะกอนเมื่อ pH ระหว่าง 8-9 (O.Ichihashi and K.Hirooka, 2012) นอกจากนี้อุณหภูมิก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการตกตะกอน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการตกตะกอนจะลดลงเมื่อมีอุณหภูมิต่ำ และประสิทธิภาพของการกำจัดฟอสฟอรัสจะเพิ่มขึ้นจาก 63% ไปจนถึง 78% เมื่ออุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 5°C ไปจนถึง 50 °C (Song *et al.*, 2011) จากการดำเนินงานการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียจริงเป็นเวลา 60 นาที และทำการปรับเปลี่ยน current density พบว่า การทดลองที่มี current density มากที่สุดสามารถ recovery ฟอสฟอรัสได้มากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพ recovery เท่ากับ 99.52% (รูปที่ 4.1) เนื่องจากการดำเนินงานมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอน คือ ค่าความเป็นกรดและด่าง(pH) อยู่ในช่วง 9.5 – 10 และมีความเข้มข้นของแมกนีเซียม แอมโมเนีย และฟอสฟอรัสเพียงพอต่อการรวมตัวของสารปรับปรุงคุณภาพดิน โดยมีอัตราส่วนเชิงโมลของ Mg²⁺:NH₄⁺:PO₄³⁻-P เท่ากับ 1.2 : 8 : 1 เมื่อเริ่มการทดลองกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี ทำให้เกิดการสร้าง OH⁻ ใกล้เคียงแคโทด ส่งผลให้ pH ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดจากอัตราการถ่ายเทออกซิเจนไปสู่ขั้วแคโทด และอัตราการผลิต OH⁻ โดยการทำปฏิกิริยาเคมีในการรวมตัวตกตะกอน (Wang *et al.*, 2010) ดังสมการนี้



และเมื่อ pH เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดกระบวนการรวมตัวของตะกอนและตกลงสู่ภายในถังปฏิกรณ์เป็นสารปรับปรุงคุณภาพดิน

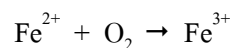
4.1.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเหล็ก

จาก รูปที่ 4.2 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเหล็กเทียบกับเวลา ผู้วิจัยทำการศึกษาที่ความเข้มข้นของกระแส 9.57, 19.14 และ 28.71 mA cm⁻² พบว่าความเข้มข้นของเหล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะเวลาทดลองมากขึ้น จนกระทั่งระยะเวลาที่ 60 นาที มีความเข้มข้นของเหล็กมากที่สุด เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

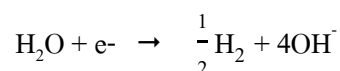


รูปที่ 4.2 แสดงความเข้มข้นของเหล็กจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี

เมื่อทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่กระบวนการไฟฟ้าเคมีซึ่งมีแผ่นเหล็กเป็นขั้ว Electrode ทำให้เฟอร์รัสออกมาจากขั้ว Electrode เนื่องจากเกิดการกัดกร่อน หลังจากนั้นเมื่อสารละลายสัมผัสกับออกซิเจนทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ดังสมการนี้



ในการดำเนินงานจะใช้เวลา 60 นาทีสำหรับการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี และทำการปรับเปลี่ยน current density เพื่อหาปริมาณเหล็กที่เหมาะสมในการยับยั้งการเกิดก๊าซมีเทน ซึ่งมี current density ดังนี้ 9.57, 19.14 และ 28.71 mA cm⁻² เป็นต้น จากการทดลองพบว่า ขณะการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีมีความเข้มข้นเหล็กเพิ่มสูงขึ้น และถ้ามี current density สูงก็จะส่งผลให้ความเข้มข้นของเหล็กสูงเช่นกัน แต่จากรูปที่ 4.2 ระยะเวลา 60 นาที ความเข้มข้นของเหล็กแต่ละ current density มีค่าใกล้เคียงกัน อาจเนื่องจากการเกิดฟองสกัมของเหล็ก ซึ่งตะกอนของเหล็กลอยตัวขึ้นขณะการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในช่วงเวลาระหว่าง 40-60 นาที เพราะเกิดก๊าซ H₂ ขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีซึ่งเป็นไปตามสมการนี้

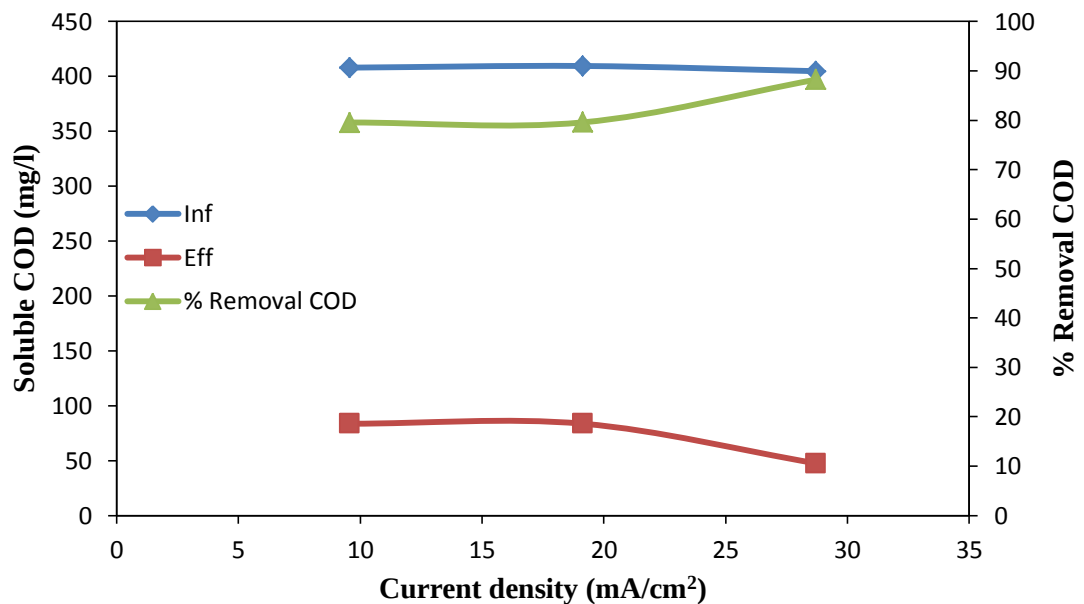


ทำให้เหล็กที่อยู่ในน้ำเสียมีการลอยตัวอยู่บนผิวน้ำ และเหล็กบางส่วนที่ถูกกัดกร่อนจากขั้ว Electrode เริ่มกระบวนการตกตะกอน ซึ่งความเข้มข้นของเหล็กที่อยู่ในน้ำที่ระยะเวลา 60 นาที มีค่าดังนี้ 355.69, 365.88 และ 370.94 mg/l โดยมี current density เท่ากับ 9.57, 19.14 และ 28.71 mA cm⁻² ตามลำดับ

นอกจากนี้ หลังจากการดำเนินการผ่านไป 30 นาทีแรก ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำเสียเริ่มเข้าสู่ Steady state เนื่องจากผ่านไป 30 นาที ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในระบบเหลือน้อย (รูปที่ 4.1) เนื่องจากเกิดกระบวนการตกตะกอน และรวมตัวกับเฟอริกในน้ำเสีย ซึ่งมาจากการกัดกร่อนหรือกระบวนการ oxidation ของแผ่นเหล็ก แล้วเกิดการลอยตัวเป็นสกัมบนผิวน้ำ ทำให้ความเข้มข้นเหล็กที่อยู่ในน้ำเสียเริ่มคงที่ รวมทั้งการเติมไอออนของเหล็กสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ (Chen, 2004) และกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยมีแผ่นเหล็กเป็นขั้ว Electrode เป็นการให้ประจุบวกสำหรับการตกตะกอนของอนุภาคของสาร (Alexandra and Kai, 2013) ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาทีความเข้มข้นของเหล็กเกิดการรวมตัวกับฟอสฟอรัสในน้ำเสีย ทำให้ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำเสียเริ่มคงที่

4.1.3 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (COD)

จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียจริง พบว่า ในน้ำเสียจริงมีปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 407 mg/l แล้วหลังการดำเนินงาน น้ำเสียมีความเข้มข้นสารอินทรีย์เหลือ เท่ากับ 83.60, 83.60 และ 47.52 mg/l ที่ความเข้มข้นกระแสเท่ากับ 9.57, 19.14 และ 28.71 mA cm⁻² ตามลำดับ ดังนั้นกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่มีการปรับเปลี่ยน current density สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้สูง ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ดังนี้ 79.56, 79.59 และ 88.24% ของ 9.57, 19.14 และ 28.71 mA cm⁻² ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3

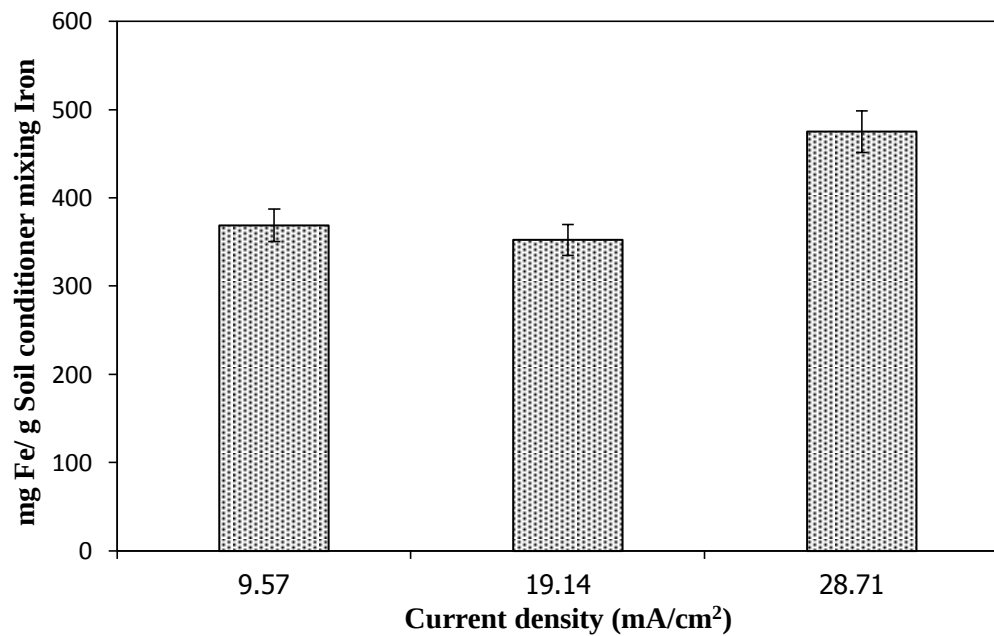


รูปที่ 4.3 แสดงความเข้มข้นของซีโอดีจากระบวนการไฟฟ้าเคมี

จากรูปที่ 4.3 กระบวนการไฟฟ้าเคมีมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียฟาร์มสุกรจริง เนื่องจากในน้ำเสียฟาร์มสุกรจริงมีปริมาณสารอินทรีย์เท่ากับ 407 mg/l และหลังการดำเนินงานในน้ำเสียมีสารอินทรีย์เหลืออยู่ในปริมาณน้อย เนื่องจากการทำปฏิกิริยารวมตัวกันของอนุภาคสารอินทรีย์ และจากการศึกษาวิจัยของ Zhang *et al.*, 2012 ปรากฏว่า ประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงเมื่อมีปริมาณ organic matter รวมทั้ง ฟอสฟอรัสและแมกนีเซียมสูง ซึ่งเป็นอนุภาคสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และนอกจากนี้ในการดำเนินงานมีอัตราส่วนเชิงโมลของ $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}-P$ เท่ากับ 1.2 : 8 : 1 ซึ่งทำให้สอดคล้องกับงานวิจัย ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD มากขึ้น เมื่อมีปริมาณฟอสฟอรัส แมกนีเซียมและแอมโมเนียสูง เพราะสารเคมีดังกล่าวสามารถรวมตัวกันตกตะกอนกับสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ (Zhang *et al.*, 2012)

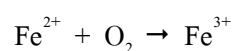
4.1.4 ปริมาณเหล็กในสารปรับปรุงคุณภาพดิน

ในการทดลองเพื่อหาปริมาณเหล็กในสารปรับปรุงคุณภาพดิน โดยใช้วิธีการวัดด้วยเครื่อง Spectrometer ที่ความยาวคลื่น 510 nm. พบว่าเมื่อดำเนินการโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี ซึ่งการทดลองที่มี current density มากที่สุด ส่งผลให้มีปริมาณเหล็กในสารปรับปรุงคุณภาพดินมากที่สุด เนื่องจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าไปยังแผ่นเหล็กที่ใช้เป็นขั้ว Electrode ทำให้แผ่นเหล็กเกิดการกัดกร่อน หลังจากนั้นเหล็กที่ถูกกัดกร่อนกับสารละลายในน้ำเสียที่มีฟอสฟอรัส, แมกนีเซียม, แอมโมเนีย ทำปฏิกิริยารวมตัวกันแล้วตกตะกอนในที่สุด (รูปที่ 4.4)



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current density กับความเข้มข้นของเหล็ก

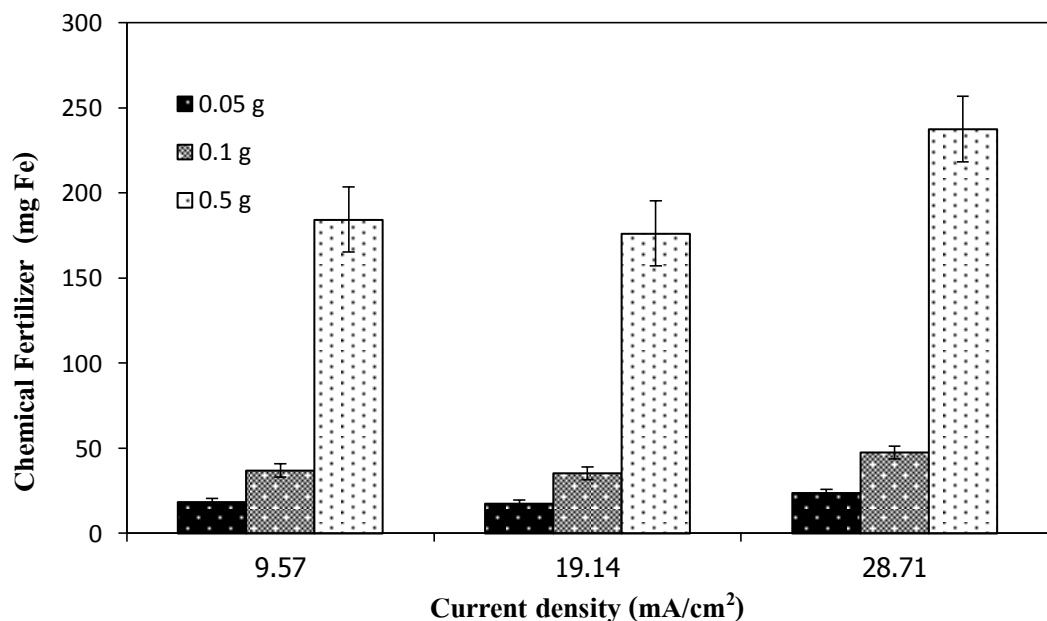
ในการดำเนินการจะทำการปรับเปลี่ยน current density เท่ากับ 9.57, 19.14 และ 28.71 mA cm⁻² เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปสู่แผ่นเหล็กที่เป็นขั้ว Electrode ทำให้แผ่นเหล็กเกิดการกัดกร่อน ส่งผลให้ตะกอนเหล็กรวมตัวกับสารละลายที่อยู่ในน้ำ ซึ่งประกอบด้วยฟอสฟอรัส, แมกนีเซียม และแอมโมเนีย แล้วหลังจากนั้นก็เกิดการตกตะกอนลงในถังปฏิกรณ์ จากการทดลองพบว่า current density เท่ากับ 9.57, 19.14 และ 28.71 mA cm⁻² มีความเข้มข้นของเหล็กในสารปรับปรุงคุณภาพดิน เท่ากับ 368.75, 352.38 และ 475 mgFe /g Soil conditioner mixing Iron ตามลำดับ จากผลการทดลองสามารถสังเกตได้ว่า ที่ความเข้มข้นกระแสเท่ากับ 9.57 และ 19.14 mA cm⁻² มีความเข้มข้นของเหล็กไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ที่ความเข้มข้นกระแสมากที่สุดมีความเข้มข้นของเหล็กมากที่สุด เนื่องจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าไปสู่ขั้ว Electrode ในปริมาณมาก ทำให้เกิดการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กเป็นจำนวนมาก และจากการสังเกตการดำเนินงาน พบว่า ช่วงแรกของกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี แผ่นเหล็กจะปลดปล่อย เฟอร์ริกออกมาเนื่องจากสารละลายเริ่มเปลี่ยนเป็นสีส้ม แต่เมื่อดำเนินการไปสักระยะหนึ่งสารละลายเป็นสีเขียว เนื่องจากในกระบวนการไม่มีออกซิเจนที่เพียงพอที่จะให้เฟอร์รัสออกไซด์เปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ริก ดังสมการนี้



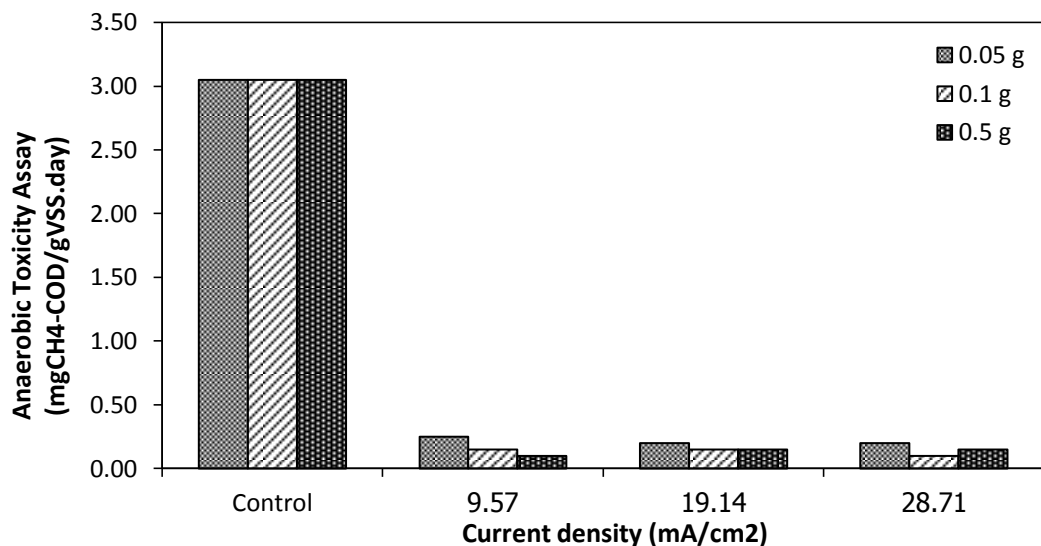
แต่อย่างไรก็ตาม หลังจากการดำเนินการดำเนินการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีเสร็จสิ้น เฟอร์สก็จะเปลี่ยนเป็น เฟอร์ริก เนื่องจากได้รับออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น

4.1.5 Anaerobic Toxicity Assay (ATA)

จากการศึกษาเพื่อหาศักยภาพในการยับยั้งการเกิดก๊าซมีเทน โดยการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสม เหล็กที่มีความเข้มข้นของเหล็กต่างกัน พบว่า ATA ของชุดการทดลองที่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กมีค่าน้อยกว่าชุดควบคุม (ไม่ใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก) เนื่องจาก Methanogenic bacteria ยังสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ แต่อย่างไรก็ตาม การใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กก็สามารถทำให้มีการผลิตก๊าซมีเทนลดลงได้ และในการทดลองทำการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กเท่ากับ 0.05, 0.1 และ 0.5 g โดยมีปริมาณของเหล็กดังรูปที่ 4.5 (โดยเปรียบเทียบกับปริมาณเหล็กในสารปรับปรุงคุณภาพดินจากรูปที่ 4.4) นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ XRF จากตัวอย่าง 28.71 mA cm^{-2} มี Fe_2O_3 เท่ากับ 84.4% (ตารางที่ 4.1) เพราะฉะนั้นในชุดการทดลอง ATA มีความเข้มข้นของเหล็ก เท่ากับ 0.59, 1.18 และ 5.9 g/l (เทียบเท่ากับ $\%\text{Fe}_2\text{O}_3$) ดังนั้นการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กในการทดสอบ ATA ส่งผลให้ Methanogenic bacteria มีการผลิตก๊าซมีเทนลดลง



รูปที่ 4.5 แสดงปริมาณเหล็กแต่ละความเข้มข้นกระแสดำเนินการสำหรับทำ ATA



รูปที่ 4.6 แสดงค่า ATA แต่ละความเข้มข้นกระแส

ก๊าซมีเทนเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดย Methanogen bacteria ในสภาวะไร้อากาศ จากการศึกษางานวิจัยของ Huang *et al.*, 2009 พบว่า จุลินทรีย์ที่รีดิวซ์เฟอร์ริกมีความสามารถแข่งขันในการยับยั้งการผลิตมีเทน ซึ่งเป็นการควบคุมการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าว และเฟอร์ริกสามารถช่วยบรรเทาการปลดปล่อยก๊าซมีเทน ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมการทำปฏิกิริยาการผลิตมีเทนและในการทดลองจะใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์และควบคุมการผลิตมีเทนภายใต้สภาวะที่มีน้ำจมน้ำ และจากการทดลองจะใช้สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กจากกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี โดยมีความเข้มข้นของเหล็กในสารปรับปรุงคุณภาพดินดังรูปที่ 4.4 ซึ่งในการทำ ATA ได้สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กเท่ากับ 0.05, 0.1 และ 0.5 g ที่ได้จากกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่มี current density เท่ากับ 9.57, 19.14 และ 28.71 mA cm⁻² พบว่า การใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กแต่ละความเข้มข้นกระแส สามารถบรรเทาการผลิตก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria ได้ ทำให้ค่า ATA จากการทดลองที่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม เนื่องจากชุดควบคุมไม่มีองค์ประกอบของเหล็กเพื่อให้ Ferric-reducing bacteria ใช้ในการเจริญเติบโต ซึ่ง Ferric-reducing bacteria จะทำหน้าที่ในการแข่งขันสำหรับกระบวนการรับ electron กับ Methanogen bacteria และมีพลังงานในการแข่งขันมากกว่า ดังนั้นทำให้ชุดควบคุมซึ่งไม่มีองค์ประกอบของเหล็กมีค่า ATA สูง ดังรูปที่ 4.6 และการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กมีค่า ATA น้อยเนื่องจากมีความเข้มข้นของเหล็กผสมอยู่ในปริมาณมาก ทำให้ Ferric-reducing bacteria สามารถเจริญเติบโตและมีพลังงานในการแข่งขันการรับ electron มากกว่า Methanogen bacteria จึงส่งผลให้มีการผลิตก๊าซ

มีเทนลดลง ดังนั้นการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักจึงเป็นการบรรเทาการปลดปล่อยก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria ได้

4.1.6 ผลวิเคราะห์ XRF

การวิเคราะห์ X-ray fluorescence spectrometry (XRF) เป็นการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของธาตุในตัวอย่าง โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิด สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ธาตุ Be ถึง U ซึ่งมีหลักการทำงานโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของ Electron ในรูปแบบลำแสง ซึ่งกำเนิดจาก X-Ray Tube ทำให้ Electron เคลื่อนที่จากแรงดันต่ำไปหาแรงดันสูง (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานอุตสาหกรรม, 2013) จาก ตารางที่ 4.1 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารปรับปรุงคุณภาพดินโดยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี ทำให้ทราบปริมาณออกไซด์แต่ละชนิดที่อยู่ในสารปรับปรุงคุณภาพดิน

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักจากการวิเคราะห์ XRF

Chemical composition	Unit (%)	Chemical composition	Unit (%)
Fe ₂ O ₃	84.4	SO ₃	0.37
P ₂ O ₅	1.97	MnO	0.24
MgO	0.90	CuO	0.19
CaO	2.03	ZnO	0.12
SiO ₂	1.46	Cl	0.1085
K ₂ O	0.58		

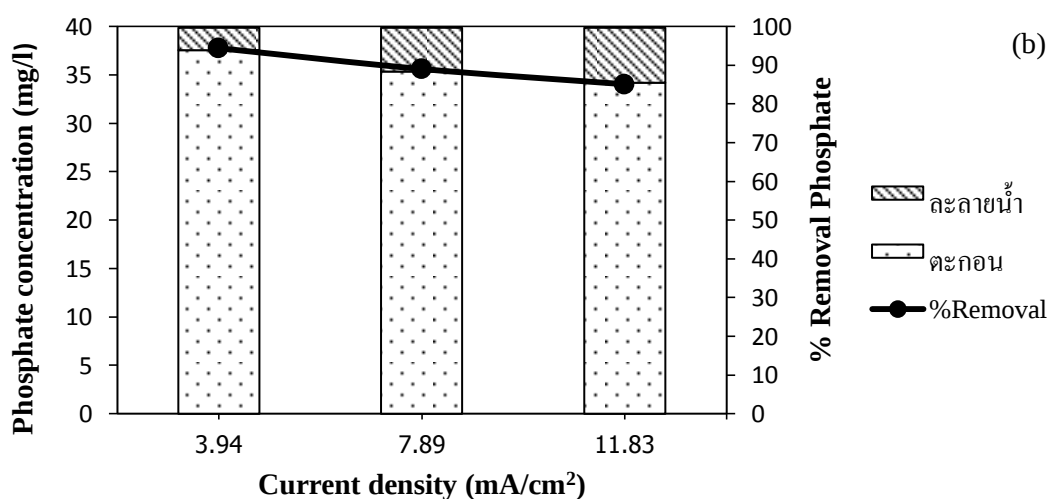
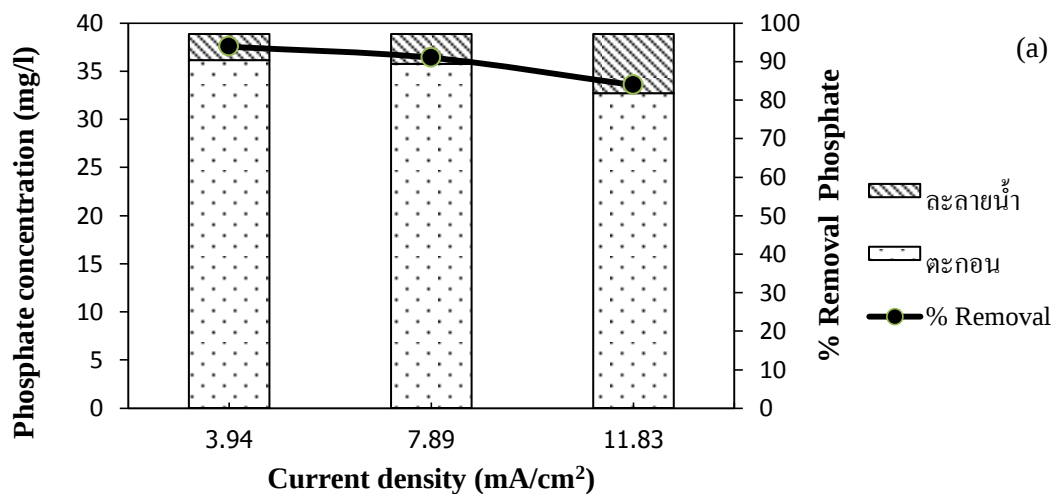
จากผลการวิเคราะห์ XRF เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของสารปรับปรุงคุณภาพดินซึ่งในการดำเนินการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี ที่ current density เท่ากับ 28.71 mA cm⁻² มี Fe₂O₃, P₂O₅, MgO, CaO, SiO₂, K₂O, SO₃, MnO, CuO, ZnO และ Cl มี 84.4%, 1.97%, 0.90%, 2.03%, 1.46%, 0.58%, 0.37%, 0.24%, 0.19%, 0.12% และ 0.11% ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว มีปริมาณ Fe₂O₃ มากที่สุด เนื่องจากกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี มีแผ่นเหล็กเป็นขั้ว Electrode เมื่อทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบในปริมาณมาก ทำให้แผ่นเหล็กถูกกัดกร่อน ส่งผลให้มีเฟอร์ริกในปริมาณมาก ซึ่งสามารถดูได้จากเปอร์เซ็นต์ของเฟอร์ริกออกไซด์ดังตารางที่ 4.1

4.2 ผลจากระบบการไฟฟ้าเคมีโดยการใช้ไฟฟ้ารีเจนเนอเรชัน

4.2.1. ผลการทดลองจากการปรับ pH ก่อนดำเนินงาน

4.2.1.1 ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่สามารถ recovery ได้

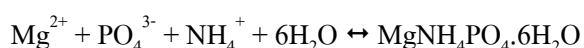
ในการดำเนินงานโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนเชิงโมลของ $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-} -P$ เท่ากับ 1.5 : 8.6 : 1 และทำการปรับเปลี่ยน current density เท่ากับ 3.94, 7.89 และ 11.83 $mA\ cm^{-2}$ เป็นต้น รวมทั้งระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของระบบการไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 30 และ 60 นาที พบว่า ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่สามารถ recovery ได้แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งมีประสิทธิภาพการ recovery มากกว่า 80% ทุกการดำเนินงาน



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสเฟตกับ Current density

โดยที่ (a.) เวลาดำเนินงาน 30 นาที และ (b.) เวลาดำเนินงาน 60 นาที

ในการดำเนินงานโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนเชิงโมลของ $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}-P$ เท่ากับ 1.5 : 8.6 : 1 และทำการปรับเปลี่ยน current density เท่ากับ 3.94, 7.89 และ 11.83 mA cm⁻² เป็นต้น รวมทั้งระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของกระบวนการไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 30 และ 60 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสและการ recovery มากกว่า 80% ทุกการทดลอง เนื่องจากการตกตะกอนของสารปรับปรุงคุณภาพดินขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น pH, อัตราส่วนเชิงโมลของ $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}-P$, การกวนผสม และอุณหภูมิ จากงานวิจัยของ Zhang *et al.*, 2012 การรวมตัวของสารปรับปรุงคุณภาพดินจะเกิดขึ้นเมื่อมี pH สูง ดังสมการนี้



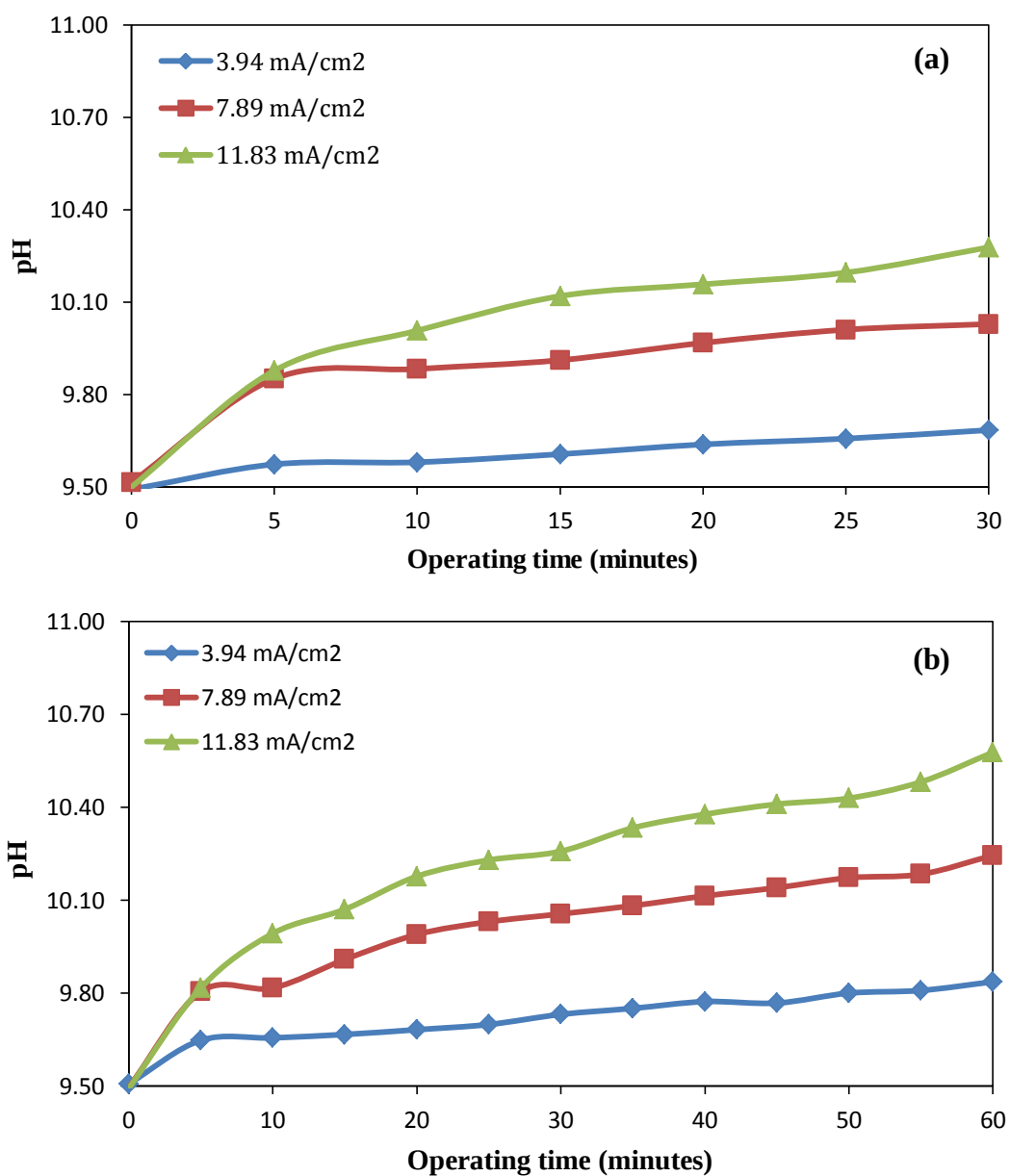
ดังนั้น pH จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดินซึ่งในการดำเนินงานจะทำการปรับ pH เท่ากับ 9.5 ก่อนจ่ายกระแสไฟฟ้า และระหว่างการดำเนินงาน pH จะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอัตราการแพร่กระจายของออกซิเจนไปสู่ขั้วแคโทด ส่งผลให้ความเข้มข้นของ OH^- เพิ่มมากขึ้น (Wang *et al.*, 2010) และหลังจากนั้นก็เกิดกระบวนการการตกตะกอนแล้วรวมตัวกันเป็นสารปรับปรุงคุณภาพดินจึงส่งผลให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำเหลืออยู่ในปริมาณน้อย และส่งผลให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียให้อยู่ในรูปของสารปรับปรุงคุณภาพดิน (รูปที่ 4.7) นอกจากนี้อุณหภูมิก็นำมาซึ่งการตกตะกอนเช่นกัน เพราะ pH กับ อุณหภูมิจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยตรงของความอิ่มตัวยิ่งยวดระหว่างกระบวนการตกตะกอน (Mariska *et al.*, 2010) และนอกจากนี้ ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม (จาก 5°C เป็น 50°C) เนื่องจากปฏิกิริยาของการตกผลึกจะลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำ (Song *et al.*, 2011) และในการดำเนินงานน้ำเสียสังเคราะห์มีอุณหภูมิ 25-27°C, pH เริ่มต้น 9.5, มีการกวนผสม และอัตราส่วนเชิงโมลของ $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}-P$ เท่ากับ 1.5 : 8.6 : 1 ด้วยเหตุนี้จึงเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ส่งผลให้กระบวนการไฟฟ้าเคมีมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดฟอสฟอรัส

น้ำเสียฟาร์มสุกรสังเคราะห์โดยมีอัตราส่วนระหว่าง $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}-P$ เท่ากับ 1 : 8 : 1 มี pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 9.5-10.5 ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตเท่ากับ 93% แต่ในทางกลับกันเมื่อ pH มากกว่า 11 จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตลดลง เนื่องจากผลึกสารปรับปรุงคุณภาพดินจะมีขนาดเล็กเมื่อมี pH เท่ากับ 11 เพราะเกิด flocculent ในน้ำเสีย จึงส่งผลให้คุณสมบัติในการตกตะกอนลดลงและการรวมตัวของสารปรับปรุงคุณภาพดินจะถูกยับยั้งมากขึ้น (Song *et al.*, 2007) ซึ่งเหตุผลดังกล่าวสอดคล้องกับการทดลองนี้ เมื่อมีความเข้มข้นกระแสสูงมากขึ้น จะทำให้

ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตลดลง (รูปที่ 4.7) เพราะ pH จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมีมีค่าใกล้เคียง 11 (รูปที่ 4.8)

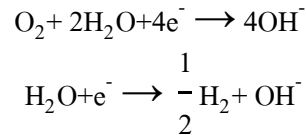
4.2.1.2 ความเป็นกรดต่าง (pH)

จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมีโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปสู่ขั้ว Electrode และในการดำเนินงานจะทำการปรับ pH เท่ากับ 9.5 ก่อนจ่ายกระแสไฟฟ้า พบว่า เมื่อเริ่มกระบวนการไฟฟ้าเคมี ทำให้ pH เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (รูปที่ 4.8)



รูปที่ 4.8 แสดงค่าความเป็นกรดต่าง(pH)จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมีโดยมีความเข้มข้นกระแสต่างกันและมีระยะเวลาในการดำเนินงาน ดังนี้ (a) 30 นาที และ (b) 60 นาที

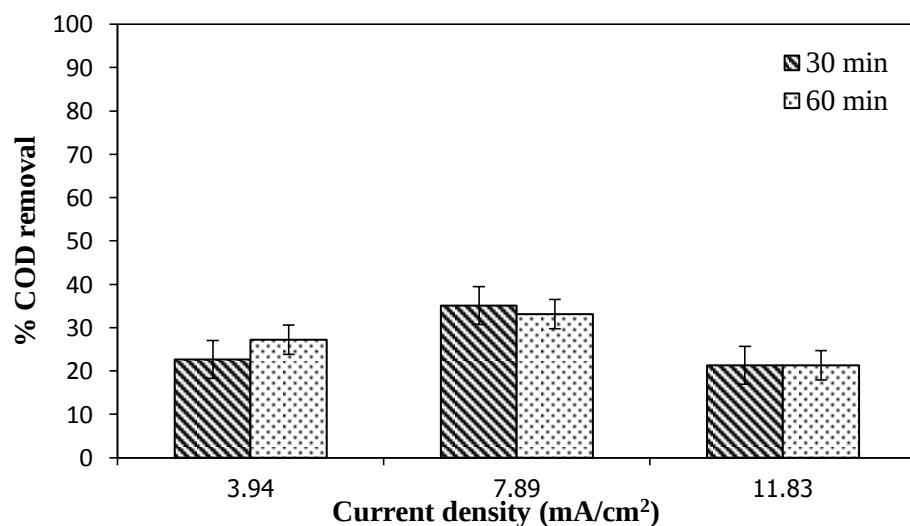
จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมีโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปสู่อิเล็กโทรด พบว่า เมื่อเริ่มกระบวนการไฟฟ้าเคมี ทำให้ pH เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพราะมีการเกิด OH^- ขึ้นที่ขั้วแคโทด เนื่องจากอัตราการแพร่กระจายของออกซิเจนไปสู่อิเล็กโทรด ส่งผลให้ความเข้มข้นของ OH^- เพิ่มขึ้นดังสมการของ Wang *et al.*, 2010



ทำให้ในการทดลองมีความเหมาะสมต่อการตกตะกอนของสารปรับปรุงคุณภาพดินเนื่องจากเมื่อ pH เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, NH_4^+ และ Mg^{2+} ที่อยู่ในน้ำเสียเริ่มกระบวนการตกตะกอนเป็นสารปรับปรุงคุณภาพดิน และจากการศึกษาหลายงานวิจัย พบว่า pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดินอยู่ในช่วง 9.0-10.0 และจากการศึกษางานวิจัยของ Zhang *et al.*, 2012, Wang *et al.*, 2010, Cusick and Logan (2011) พบว่า ค่า pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดินเท่ากับ 8.0-11.0 ดังนั้นในการทดลองนี้มีสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดินจึงส่งผลให้กระบวนการไฟฟ้าเคมีมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดฟอสเฟสที่อยู่ในน้ำเสีย

4.2.1.3 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (COD)

จาก รูปที่ 4.9 แสดงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี ซึ่งในการทดลองจะเตรียมความเข้มข้นของซีโอดีเท่ากับ 1000 mg/l จาก CH_3COOH พบว่ากระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์กำจัดสารอินทรีย์ได้น้อย



รูปที่ 4.9 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัด COD แต่ละความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าที่ใช้

ในการดำเนินงานตกตะกอนด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นกระแสเท่ากับ 3.94, 7.89 และ 11.83 mA cm⁻² โดยมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 30 และ 60 นาที พบว่า การกำจัดสารอินทรีย์แต่ละความเข้มข้นกระแสและระยะเวลาที่ใช้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ต่ำ (รูปที่ 4.9) เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของกระบวนการไฟฟ้าเคมีขึ้นอยู่กับการรวมตัวกันของอนุภาค organic matters, Mg และ P เป็นต้น (Zhang *et al.*, 2012) และกระบวนการไฟฟ้าเคมีสามารถนำมาใช้กำจัดสารอินทรีย์(COD) ได้โดยมีประสิทธิภาพสูง ก็ต่อเมื่อมีปริมาณ organic matters ในน้ำเสียน้อยเกินไป ทำให้ในการทดลองนี้มีประสิทธิภาพการกำจัด COD ต่ำ เนื่องจากในน้ำเสียสังเคราะห์มีอนุภาค organic matters น้อย

4.2.1.4 Anaerobic Toxicity Assay (ATA)

สำหรับการทำ Anaerobic Toxicity Assay จะทำการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ผลิตได้จากกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีซึ่งมีแผ่นเหล็กเป็นขั้ว Electrode โดยทำการปรับเปลี่ยน current density เท่ากับ 3.94, 7.89 และ 11.83 mA cm⁻² เป็นต้น โดยทำการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กแต่ละชนิด 1 และ 5 กรัม เพื่อทดสอบศักยภาพของการผลิตก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria นอกจากนี้ในการทำ ATA ก็ได้ใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินที่ผลิตได้จากการตกตะกอนเคมีโดยไม่มีองค์ประกอบของเหล็ก เพื่อเปรียบเทียบศักยภาพการปลดปล่อยก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria (ตารางที่ 4.2)

ตารางที่ 4.2 แสดงศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของ Methanogenic bacteria โดยการทำ ATA

concentration	Anaerobic Toxicity Assay (mgCH ₄ -COD/gVSS.day)							
	Control	Soil conditioner (no iron)	Soil conditioner mixing iron from EC process					
			3.94 mA cm ⁻²		7.89 mA cm ⁻²		11.83 mA cm ⁻²	
			30 min	60 min	30 min	60 min	30 min	60 min
20 g/l	0.50	1.00	0.40	0.65	0.60	0.65	0.50	0.50
100 g/l		3.00	0.25	0.14	0.20	0.40	0.35	0.06

จากการดำเนินงานเพื่อหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria จากการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี และเปรียบเทียบกับการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินที่ผลิตได้จากการตกตะกอนทางเคมีซึ่งไม่มีองค์ประกอบของเหล็ก พบว่า การใส่สาร

ปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กแต่ละชนิดโดยมีความเข้มข้น 20 g/l มีค่า ATA ใกล้เคียงกับชุดควบคุม เนื่องจากความเข้มข้นของสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ใช้สำหรับการทำ ATA มีปริมาณน้อย ทำให้ยังไม่เพียงพอต่อการบรรเทาการปลดปล่อยก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria ส่งผลให้ Methanogen bacteria ยังสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ ทำให้การใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่มีความเข้มข้น 20 g/l มีค่า ATA ใกล้เคียงกับชุดควบคุม และเมื่อเปรียบเทียบกับการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินจากการตกตะกอนทางเคมี(ไม่มีองค์ประกอบของเหล็ก) พบว่าการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กมีค่า ATA น้อยกว่าการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินจากการตกตะกอนทางเคมี เนื่องจากมีองค์ประกอบของเหล็กให้ Ferric reducing bacteria สามารถรีดิวซ์และนำไปใช้ในการเจริญเติบโต ทำให้มีพลังงานในกระบวนการรับ Electron ได้มากกว่า Methanogen bacteria และทำให้ Methanogen bacteria ผลิตก๊าซมีเทนได้น้อย และการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กแต่ละชนิดที่มีความเข้มข้น 100 g/l มีค่า ATA น้อยกว่าชุดควบคุมและชุดที่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินจากการตกตะกอนทางเคมีซึ่งไม่มีองค์ประกอบของเหล็ก เนื่องจากมีองค์ประกอบของเหล็กค่อนข้างสูง (รูปที่ 4.10) ส่งผลให้ Ferric reducing bacteria สามารถรีดิวซ์และมีการเจริญเติบโตได้มากกว่า Methanogen bacteria และจากการศึกษาวิจัยของ Zhang *et al.*, 2009 พบว่า การยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนโดย ferric reducing bacteria ซึ่งเกิดจากการแข่งขันการเป็น electron donor ของ Ferric reducing bacteria กับ methanogen bacteria นอกจากนี้จากกลไกการทำงานของ Ferric reducing bacteria มีความเข้มข้นของอะซิเตตค่อนข้างต่ำ จึงป้องกันการทำงานกลไกของ Methanogen bacteria ได้ และ Ferric reducing bacteria มีพลังในการแข่งขันการรับ Electron ได้มากกว่า Methanogen bacteria ทำให้เกิดการรีดิวซ์เฟอร์ริกและสามารถยับยั้งการปลดปล่อยมีเทนได้ (Huang *et al.*, 2009) ดังนั้นการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กแต่ละชนิดจึงมีศักยภาพในการบรรเทาการปลดปล่อยก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria ได้

4.2.1.5 ความเข้มข้นของเหล็กหลังจาก Anaerobic Toxicity Assay

ในการทดสอบ Anaerobic Toxicity Assay โดยการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่มีความเข้มข้นกระแสแตกต่างกัน ซึ่งมีการเปรียบเทียบกับสารปรับปรุงคุณภาพดินที่ได้จากกระบวนการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งหลังจากการทำ Anaerobic Toxicity Assay ได้นำส่วนที่เป็นของเหลวมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเหล็ก สามารถแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงความเข้มข้นของเหล็กในส่วนที่เหลือจากการทำ ATA

Concentration	Fe concentration (mg/l)							
	Control	Soil conditioner (no iron)	Soil conditioner mixing iron from EC process					
			3.94 mA cm ⁻²		7.89 mA cm ⁻²		11.83 mA cm ⁻²	
			30 min	60 min	30 min	60 min	30 min	60 min
20 g/l	115.38	152.63	118.75	137.38	176.50	169.25	129.00	85.75
100 g/l		134.63	129.63	161.25	136.88	143.50	135.75	101.38

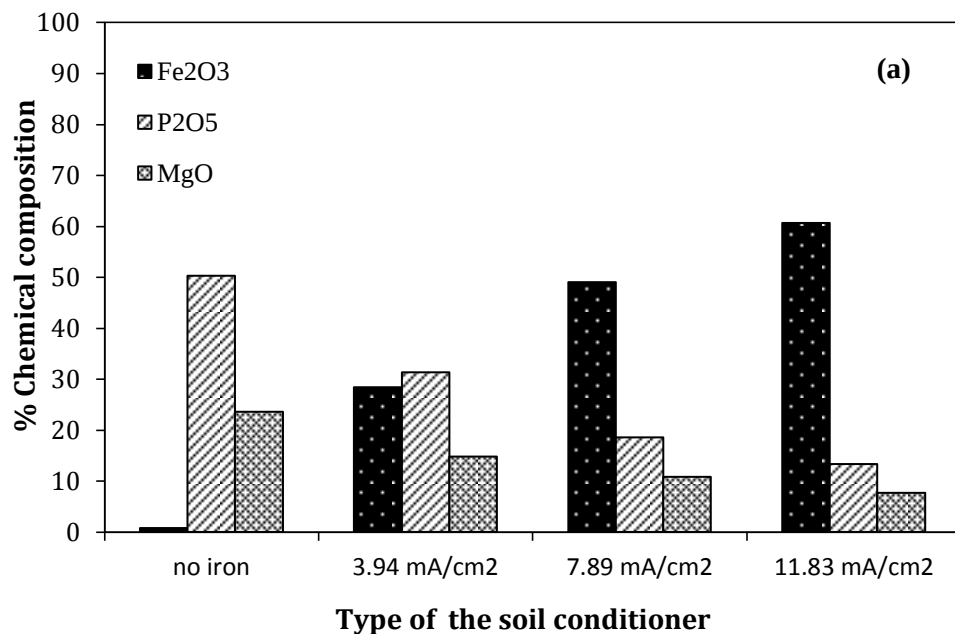
จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็กในส่วนที่เหลือจากการทำ ATA พบว่า ชุดควบคุมมีความเข้มข้นของเหล็กน้อยที่สุด เนื่องจากการไม่มีการใส่สารประกอบของเหล็ก แต่ชุดการทดลองที่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กมีความเข้มข้นของเหล็กมากกว่าชุดควบคุม เนื่องจากสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กเป็นผลผลิตที่ได้จากกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยมีแผ่นเหล็กเป็นขั้ว Electrode ทำให้มีองค์ประกอบของเหล็กในปริมาณมาก ส่งผลให้การใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กในการทำ ATA มีความเข้มข้นของเหล็กในปริมาณมากเช่นกัน นอกจากนี้ชุดการทดลองที่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก 20 g/l มีความเข้มข้นของเหล็กในส่วนที่เหลือมากกว่าชุดควบคุม เนื่องจากการทำ ATA โดยใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก 20 g/l มีความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 3.97, 6.86 และ 8.48 mg/l สำหรับการดำเนินงาน 30 นาที และ 4.69, 8.55 และ 10.01 mg/l สำหรับการดำเนินงาน 60 นาที (คิดเทียบกับ %XRF ที่วัดได้) โดยมีความเข้มข้นกระแส 3.94, 7.89 และ 11.83 mA cm⁻² ตามลำดับ เมื่อมีความเข้มข้นของเหล็กในปริมาณมาก ทำให้ Ferric reducing bacteria สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโต จึงส่งผลให้ความเข้มข้นของเหล็กที่เหลือจากการนำไปใช้มีปริมาณน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นจากชุดการทดลองที่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินจากการผลิตโดยมีความเข้มข้นกระแสเท่ากับ 11.83 mA cm⁻² และมีระยะเวลา 60 นาที มีความเข้มข้นของเหล็กน้อยกว่าชุดควบคุม อาจเนื่องมาจากสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กสามารถละลายน้ำได้น้อยในสภาวะความเป็นกลาง รวมทั้ง Ferric reducing bacteria อาจจะถูกนำไปใช้ในการเจริญเติบโตแล้ว จึงทำให้ความเข้มข้นของเหล็กเหลือน้อย แสดงดังตารางที่ 4.3

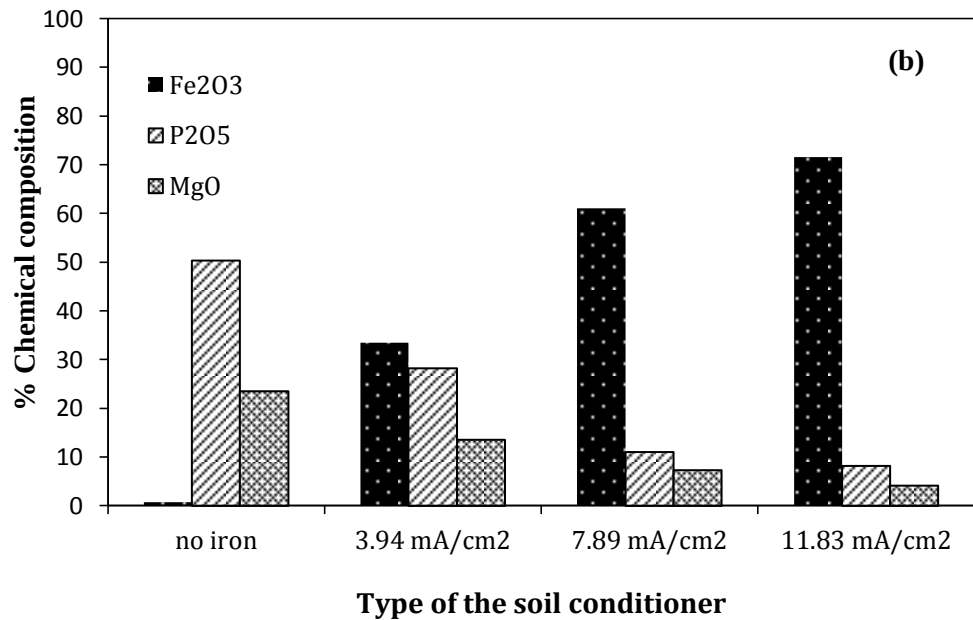
นอกจากนี้การทำ ATA โดยใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่มีความเข้มข้น 100 g/l มีความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 19.82, 34.30 และ 42.41 mg/l สำหรับการดำเนินงาน 30 นาที และ 23.43, 42.72 และ 50.03 mg/l สำหรับการดำเนินงาน 60 นาที (คิดเทียบกับ %XRF ที่วัดได้) โดยมีความเข้มข้นกระแส 3.94, 7.89 และ 11.83 mA cm⁻² ตามลำดับ เนื่องจากสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ใส่มีความเข้มข้นของเหล็กในปริมาณมาก ทำให้ Ferric reducing bacteria สามารถนำไปใช้

ประโยชน์ในการเจริญเติบโต และทำให้ความเข้มข้นของเหล็กที่เหลือจากการนำไปใช้มีปริมาณลดลง จากเดิม ดังตารางที่ 4.3 นอกจากนี้เมื่อนำค่า ATA มาเปรียบเทียบ พบว่า การใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก 100 g/l มีค่า ATA น้อยกว่าชุดควบคุมและการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก 20 g/l เพราะสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กมีความเข้มข้นของเหล็กมากกว่า ทำให้ Ferric reducing bacteria สามารถรีดิวซ์เฟอร์ริก แล้วมีพลังงานในการแข่งขันสำหรับกระบวนการรับ Electron มากกว่า Methanogen bacteria ส่งผลให้ Methanogen bacteria สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ลดลง

4.2.1.6 X-ray Fluorescence (XRF)

จากการดำเนินการผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินโดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีซึ่งมีแผ่นเหล็กเป็นขั้ว Electrode และการผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินโดยการตกตะกอนทางเคมี ได้นำผลผลิตดังกล่าวไปวิเคราะห์ XRF เพื่อหาองค์ประกอบธาตุต่างๆ ของสารปรับปรุงคุณภาพดินแต่ละชนิด โดยมีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.10





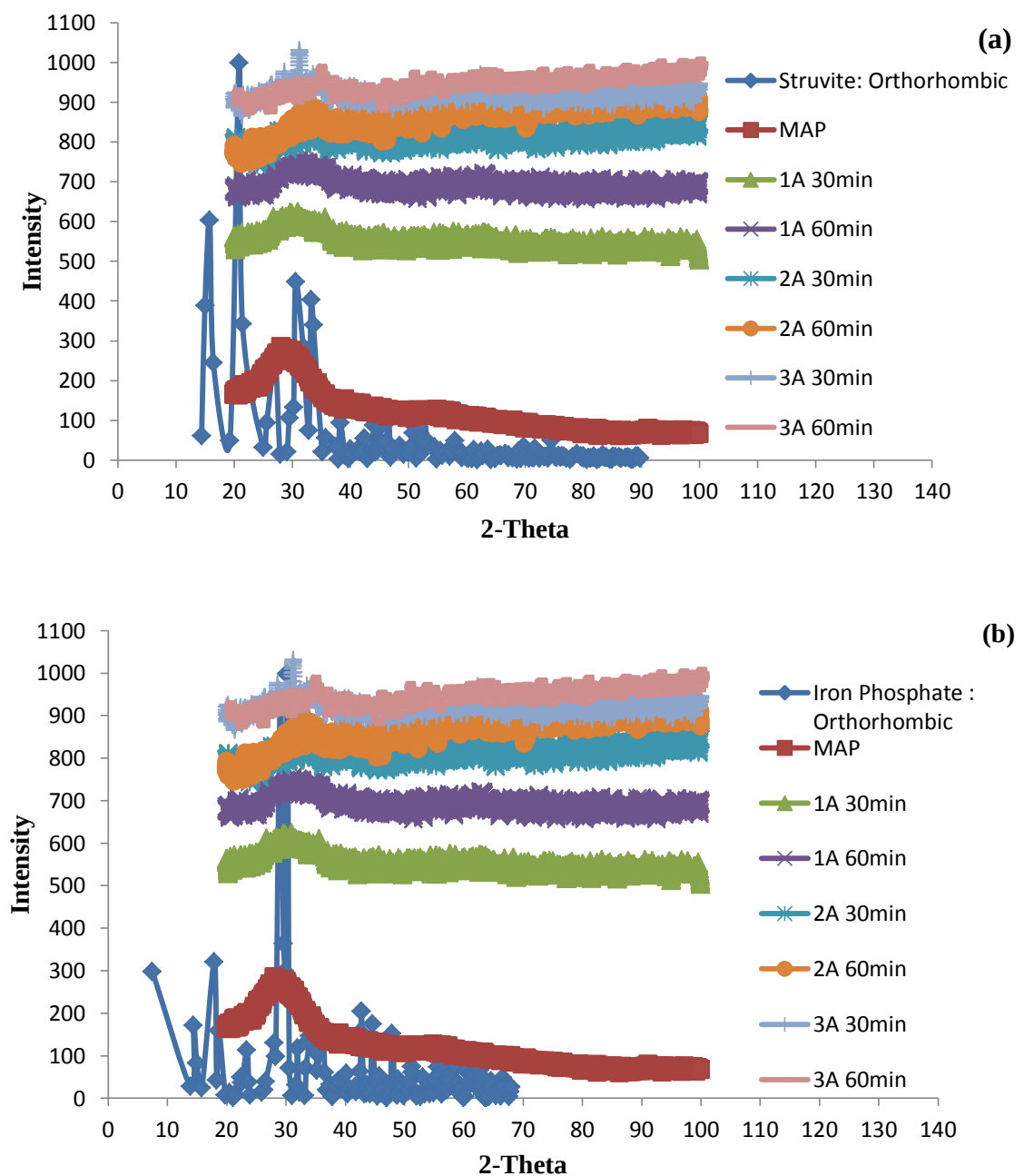
รูปที่ 4.10 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของธาตุในสารปรับปรุงคุณภาพดินโดยการวิเคราะห์ XRF โดยที่มีเวลาในการดำเนินงาน (a) 30 นาที และ (b) 60 นาที

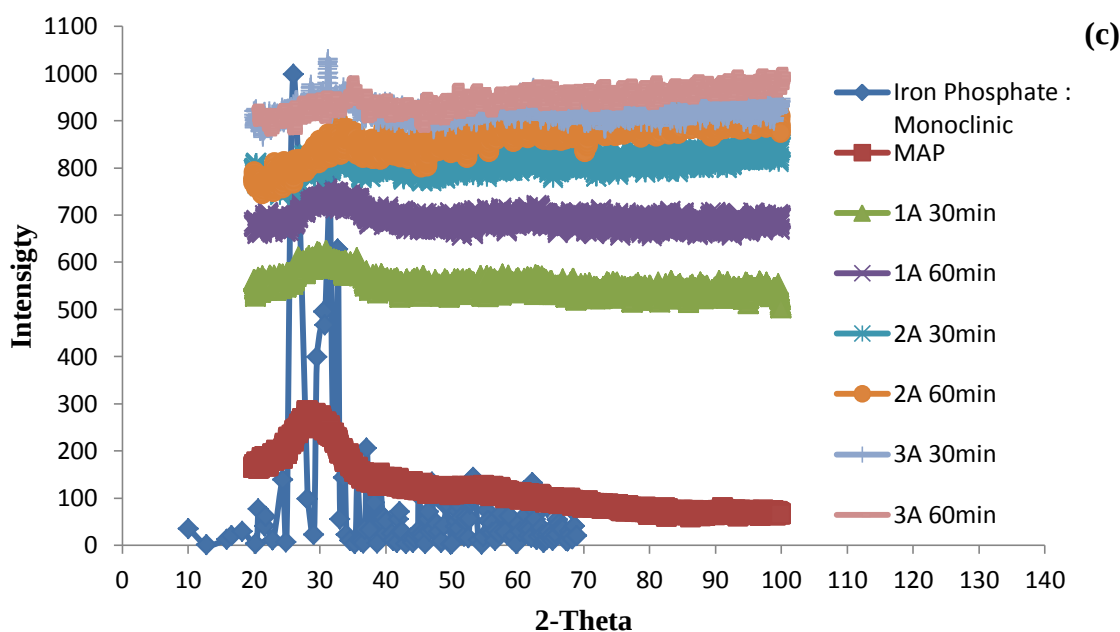
จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆในสารปรับปรุงคุณภาพดินแต่ละชนิด พบว่าสารปรับปรุงคุณภาพดินที่ได้จากการตกตะกอนทางเคมี มีปริมาณของ Fe_2O_3 , P_2O_5 , และ MgO เท่ากับ 0.72, 50.30, และ 23.55 % ตามลำดับ และสารปรับปรุงคุณภาพดินที่ผลิตได้จากกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยมีความเข้มข้นกระแสเท่ากับ 11.83 mA cm^{-2} และมีระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 60 นาที มีองค์ประกอบของเหล็กค่อนข้างสูง เนื่องจากเกิดจากการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กซึ่งเป็นขั้ว Electrode โดยมีองค์ประกอบดังนี้ Fe_2O_3 , P_2O_5 , และ MgO เท่ากับ 71.55, 8.24, และ 4.14 % ตามลำดับ นอกจากนี้ องค์ประกอบธาตุต่างๆ ของสารปรับปรุงคุณภาพดินแต่ละชนิดยังมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นกระแสและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาอีกด้วย จากการสังเกต เมื่อมีความเข้มข้นกระแสและระยะเวลาการทำปฏิกิริยามากขึ้น ก็ยังมี Fe_2O_3 มากขึ้น แต่จะมี P_2O_5 , และ MgO ลดลง อาจเนื่องมาจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบในปริมาณมาก ทำให้แผ่นเหล็กถูกกัดกร่อนในปริมาณมาก จึงอาจส่งผลกระทบต่อ P_2O_5 และ MgO ของสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก ดังรูปที่ 4.10

4.2.1.7 X-ray diffraction (XRD)

การวิเคราะห์ XRD เป็นเทคนิคที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์วัสดุต่างๆ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์(X-ray diffraction:

XRD) เมื่อลำรังสีตกกระทบบัวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ ในการวิเคราะห์ XRD สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดหรือแยกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นธาตุชนิดใดโดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัด (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม, 2013) จากการดำเนินการผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ได้นำผลผลิตดังกล่าวไปวิเคราะห์ XRD เพื่อหาลักษณะประกอบเชิงซ้อนของผลผลิต (รูปที่ 4.11) โดยมีผลการวิเคราะห์ดังนี้





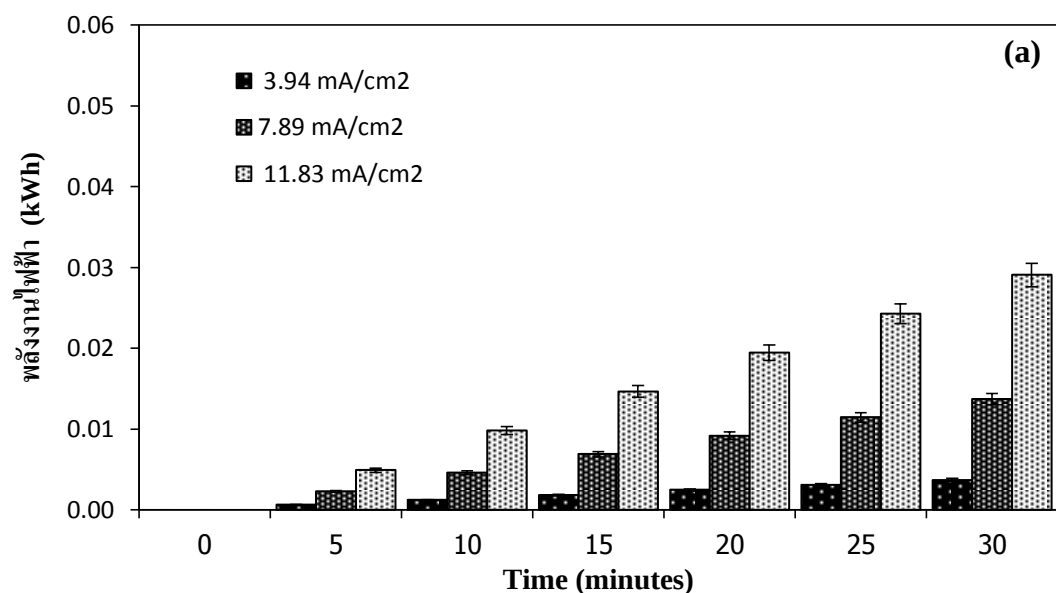
รูปที่ 4.11 แสดงกราฟจากการวิเคราะห์ XRD ของสารปรับปรุงคุณภาพดินแต่ละชนิดโดยเปรียบเทียบกับสารประกอบเชิงซ้อนต่างๆ ดังนี้ (a) Struvite : Orthorhombic, (b) Iron Phosphate : Orthorhombic และ (c) Iron Phosphate : Monoclinic

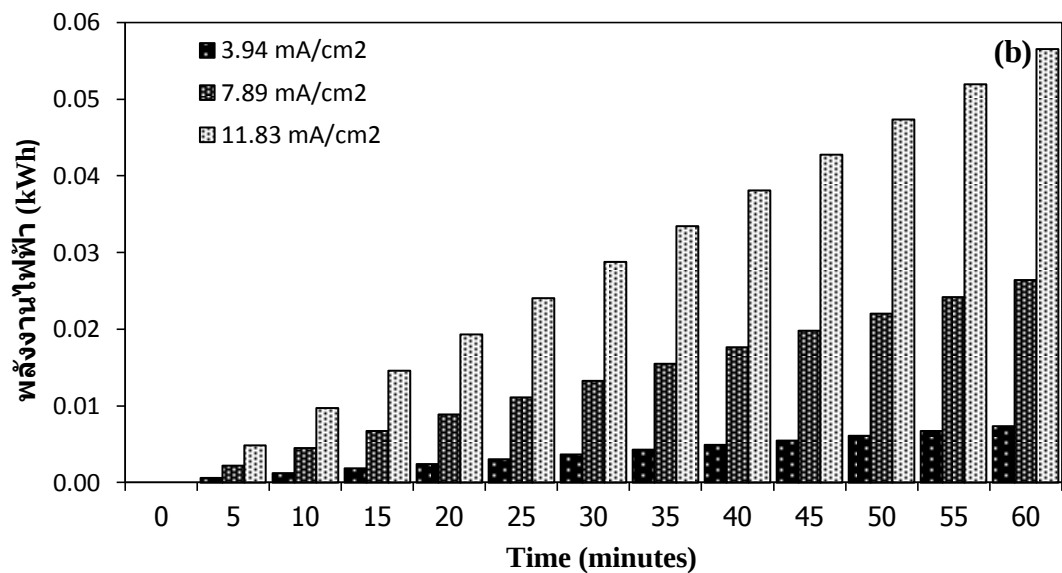
จากการดำเนินการผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดิน โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี และผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินโดยการตกตะกอนเคมี นำผลผลิตดังกล่าวไปวิเคราะห์ XRD เพื่อหาองค์ประกอบเชิงซ้อนของผลผลิต พบว่ากราฟของสารปรับปรุงคุณภาพดิน (MAP) มีจุดสูงสุดที่มุม Theta ใกล้เคียงกับจุดสูงสุดของกราฟมาตรฐานของสารปรับปรุงคุณภาพดินมากกว่ากราฟอื่นๆ (รูปที่ 4.11(a)) เนื่องจากมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัส, แมกนีเซียม และแอมโมเนีย มากพอที่ทำให้เกิดการตกตะกอนของสารปรับปรุงคุณภาพดินและมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกสารปรับปรุงคุณภาพดินซึ่งกราฟของสารปรับปรุงคุณภาพดินจากการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยมีความเข้มข้นกระแสและเวลาต่างกัน มีจุดสูงสุดของกราฟที่มุมใกล้เคียงกับกราฟมาตรฐานของสารปรับปรุงคุณภาพดินเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากในสารปรับปรุงคุณภาพดินมีความเข้มข้นของเกลือในปริมาณมาก จึงทำให้เกลืออาจไปรบกวนกระบวนการรวมตัวกันของสารปรับปรุงคุณภาพดินเพราะไอออนของเกลือสามารถทำปฏิกิริยารวมกับฟอสเฟต หรือส่วนประกอบต่างๆของสารปรับปรุงคุณภาพดินสามารถรวมตัวกับไอออนอื่นๆในน้ำเสียได้ นอกจากนี้ในน้ำเสียสังเคราะห์มีสารเคมีหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าในน้ำเสียมี Ca^{2+} ก็จะทำให้ส่งผลกระทบต่อการตกผลึกสารปรับปรุงคุณภาพดินซึ่งจะรบกวนกระบวนการ nucleation และ

growth (Kristell *et al.*, 2005) และ ส่งผลให้เกิดการรวมตัวของสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวได้รวดเร็วกว่าการรวมตัวของสารปรับปรุงคุณภาพดินและจากการวิเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนโดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Iron Phosphate พบว่า สารปรับปรุงคุณภาพดินจากกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีแต่ละชนิดมีจุดสูงสุดที่มุม Theta เดียวกันกับกราฟมาตรฐานของ Iron Phosphate สามารถแสดงดังรูปที่ 4.11 (b)(c) ซึ่งอาจเนื่องมาจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขั้ว Electrode ทำให้เกิดการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กเป็นจำนวนมาก และทำให้ผลผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมกับเหล็กในปริมาณมากเช่นกัน รวมทั้งเมื่อใช้เวลานานก็ยิ่งทำให้มีความเข้มข้นของเหล็กสูง ดังนั้นทำให้สารปรับปรุงคุณภาพดินที่ผลิตจากการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีมีองค์ประกอบเชิงซ้อนของ Iron Phosphate เป็นหลัก (รูปที่ 4.10)

4.2.1.8 พลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายจากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมี

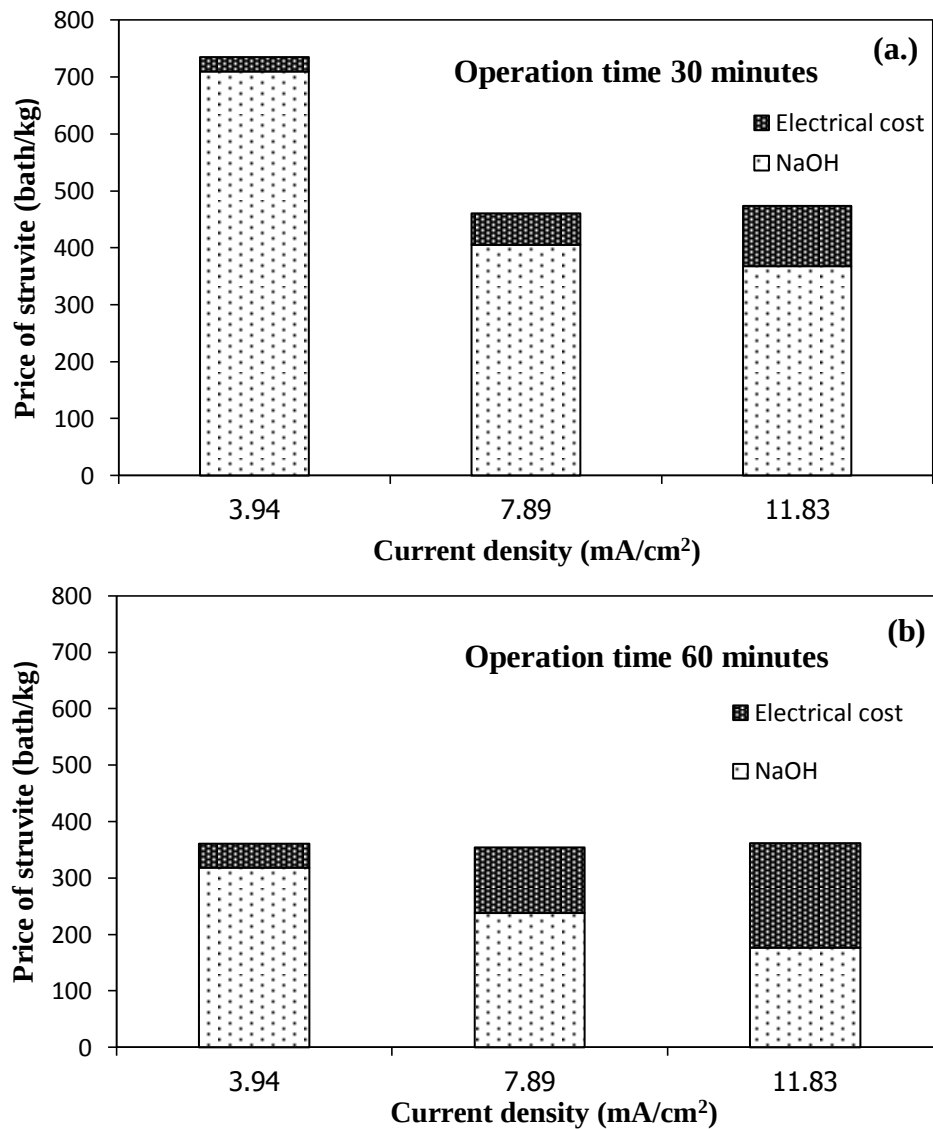
จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมีโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขั้ว Electrode พบว่า พลังงานไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยตามระยะเวลาในการดำเนินงาน และในการดำเนินงานจะใช้เวลา 30 และ 60 นาที พบว่า พลังงานไฟฟ้าจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีระยะเวลาในการดำเนินงานมากขึ้นและถ้ามีความเข้มข้นกระแส (Current density) ในปริมาณมากก็จะส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขั้ว Electrode เป็นระยะเวลานาน จะทำให้มีแรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น และอาจเนื่องมาจากแผ่นเหล็กซึ่งเป็นขั้ว Electrode ถูกกัดกร่อนจากการปล่อยกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้มีความต้านทานทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้การดำเนินงานไฟฟ้าเคมีโดยมีความเข้มข้นกระแสและระยะเวลาต่างกันมีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้น เมื่อมีระยะเวลาในการดำเนินงานและความเข้มข้นกระแสสูงขึ้น(รูปที่ 4.12)





รูปที่ 4.12 แสดงพลังงานไฟฟ้าจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยมีความเข้มข้นกระแสและระยะเวลาในการดำเนินงานต่างกัน ดังนี้ (a) 30 นาที และ (b) 60 นาที

นอกจากนี้การดำเนินงานไฟฟ้าเคมีที่มีความเข้มข้นกระแสและระยะเวลามากขึ้น มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าในการดำเนินงานสูง จึงส่งผลต่อค่าไฟจากการดำเนินงานเช่นกัน รวมทั้งค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมี(NaOH) เพื่อทำการปรับ pH ก่อนการดำเนินงาน จากการดำเนินงานโดยมีความเข้มข้นกระแสเท่ากับ 3.94 mA cm^{-2} และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี 30 นาที มีค่าใช้จ่ายสำหรับการใช้กระแสไฟฟ้าน้อยที่สุด เพราะมีการปล่อยกระแสไฟฟ้าน้อยที่สุด จึงส่งผลให้มีแรงดันไฟฟ้าในการดำเนินงานน้อยกว่าความเข้มข้นกระแสอื่นๆ และมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีมากที่สุด เพราะในการดำเนินงานเมื่อมีความเข้มข้นกระแสน้อย ก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กน้อยเช่นกัน จึงทำให้ผลผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักมีปริมาณน้อยกว่าการใช้ความเข้มข้นกระแสอื่นๆ ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีสูง โดยมีหน่วยเป็น บาท/กิโลกรัม สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 (a)



รูปที่ 4.13 แสดงค่าใช้จ่ายจากการดำเนินงานโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยมีความเข้มข้น กระแสและเวลาในการดำเนินงานต่างกัน ดังนี้ (a) 30 นาที และ (b) 60 นาที

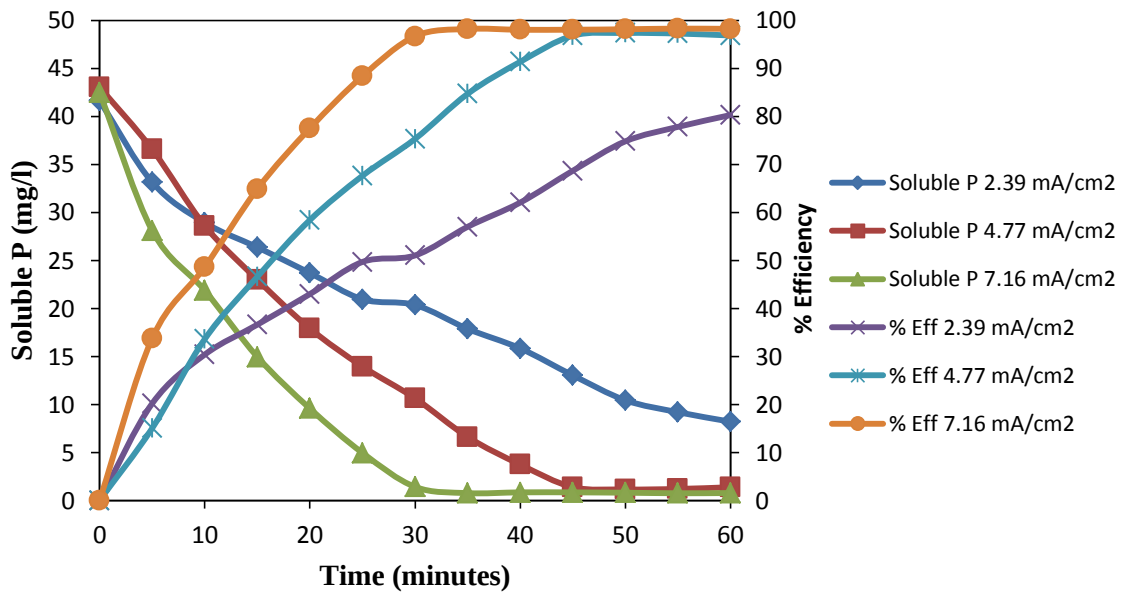
รวมทั้งจากการดำเนินงาน 60 นาที สำหรับค่าใช้จ่ายจากการดำเนินงานซึ่งรวมทั้งค่าไฟและค่าสารเคมี มีแนวโน้มเดียวกันกับการดำเนินงาน 30 นาที นั่นคือ การดำเนินงานที่มีความเข้มข้นกระแสน้อย จะมีค่าใช้จ่ายมากที่สุด แต่การดำเนินงานที่ 60 นาทีจะมีค่าไฟและค่าสารเคมีน้อยกว่าการดำเนินงาน 30 นาที เพราะผลผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักที่เกิดจากการกัดกร่อนของขั้ว Electrode มีมากกว่าการดำเนินงาน 30 นาที และสำหรับค่าไฟในการดำเนินงาน 60 นาทีจะสูง เพราะเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขั้ว Electrode จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ สำหรับค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน 60 นาที สามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 4.13 (b.) ดังนั้นเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่าย ควรแก้ไขให้มีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าการทดลองดังกล่าว โดยการใช้ความเข้มข้นกระแสน้อยลง รวมทั้งไม่ใช้สารเคมี

ในการปรับ pH ก่อนการดำเนินงาน เพราะในการดำเนินงานกระบวนการไฟฟ้าเคมีสามารถผลิต OH^- ให้เพิ่มขึ้นได้

4.2.2. ผลการทดลองโดยไม่ปรับ pH ก่อนดำเนินงาน

4.2.2.1 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่สามารถ recovery ได้

ในการดำเนินงานไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนเชิงโมลของ $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ : \text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ เท่ากับ 1.5 : 8.6 : 1 โดยไม่มีการปรับ pH ก่อนการทดลอง และในการทดลองใช้ความเข้มข้นกระแสเท่ากับ 2.39, 4.77 และ 7.16 mA cm^{-2} เป็นต้น และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 60 นาที สามารถแสดงความเข้มข้นของฟอสฟอรัสกับประสิทธิภาพในการ recovery ฟอสฟอรัสแต่ละความเข้มข้นกระแสได้ดังรูปที่ 4.14

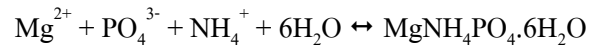


รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสฟอรัสกับประสิทธิภาพ

ในการ recovery ฟอสฟอรัสแต่ละความเข้มข้นกระแส

ในการดำเนินงานไฟฟ้าเคมีโดยไม่มีการปรับ pH ก่อนการทดลอง พบว่า ความเข้มข้นฟอสฟอรัสแต่ละความเข้มข้นกระแสจะลดน้อยลงตามระยะเวลาในการดำเนินงาน ซึ่งการดำเนินงานจะมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี 60 นาที และความเข้มข้นกระแสที่มากที่สุดมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเหลือน้อยที่สุด เนื่องจากในการดำเนินงานมีความเหมาะสมต่อการตกตะกอนของสารปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งการตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดินขึ้นอยู่กับ pH, อัตราส่วนเชิงโมลของ $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ : \text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, การกวนผสม และอุณหภูมิ และจากการศึกษาวิจัยของ Zhang *et al.*, 2012

พบว่า การรวมตัวของสารปรับปรุงคุณภาพดินจะเกิดขึ้นเมื่อมีสภาวะความเป็นด่าง(pH สูง) และจะเกิดการรวมตัวดังนี้

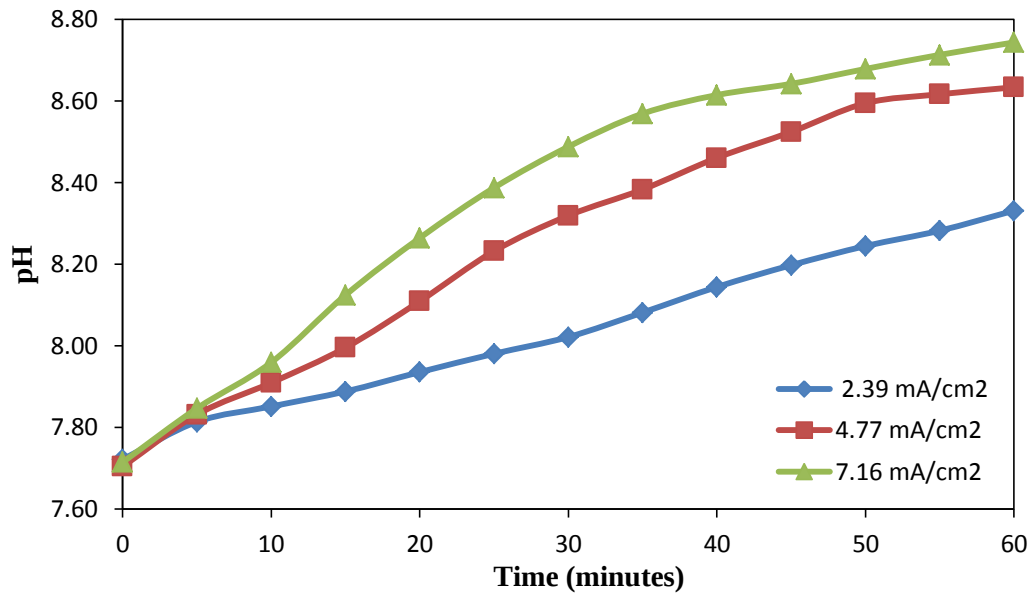


ดังนั้น pH จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการตกผลึกสารปรับปรุงคุณภาพดินเพราะในการดำเนินงานไฟฟ้าเคมี เมื่อเริ่มกระบวนการ ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (รูปที่ 4.15) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Zhang *et al.*, 2012, Wang *et al.*, 2010, Cusick and Logan (2011) พบว่า ค่า pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดินเท่ากับ 8.0-11.0 ดังนั้นในการทดลองมีสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดินเนื่องจากที่ระยะเวลา 60 นาที มี pH เท่ากับ 8.33, 8.63 และ 8.74 โดยมีความเข้มข้นกระแสเท่ากับ 2.39, 4.77 และ 7.16 mA cm⁻² ตามลำดับ จึงส่งผลให้ในการดำเนินงานนี้มีการ recovery ฟอสฟอรัสซึ่งมีประสิทธิภาพสูงแปรตามกับความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งถ้ามีความเข้มข้นกระแสสูงก็จะมีประสิทธิภาพในการ recovery ฟอสฟอรัสสูงเช่นกัน (รูปที่ 4.14) และจากการทดลองมีประสิทธิภาพในการ recovery ฟอสฟอรัสเท่ากับ 80.26, 96.84 และ 98.22% โดยมีความเข้มข้นกระแสเท่ากับ 2.39, 4.77 และ 7.16 mA cm⁻² ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบกับ การตกตะกอนไฟฟ้าเคมีที่มีการปรับ pH ก่อนการดำเนินงาน พบว่า ประสิทธิภาพในการ recovery ของฟอสฟอรัสของกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีที่ไม่มีการปรับ pH ก่อนการดำเนินงานมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับประสิทธิภาพในการ recovery ของฟอสฟอรัสของกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีที่มีการปรับ pH ก่อนการดำเนินงาน เพราะการปรับ pH ก่อนการดำเนินงานและมีความเข้มข้นกระแสที่สูง จะส่งผลให้ค่า pH ในการดำเนินงานเพิ่มสูงขึ้นมาก จึงทำให้กระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีที่มีการปรับ pH ก่อนการทดลองมีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งจากการศึกษา พบว่า ถ้ามี pH ใกล้เคียง 11 จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตลดลง เนื่องจากผลึกสารปรับปรุงคุณภาพดินจะมีขนาดเล็กและเกิด flocculent ในน้ำเสีย ส่งผลให้คุณสมบัติในการตกตะกอนลดลงและการรวมตัวของสารปรับปรุงคุณภาพดินจะถูกยับยั้ง (Song *et al.*, 2007) ดังนั้นจากการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับการทดลองที่มีการปรับ pH ก่อนการดำเนินงาน เพราะการทดลองที่มีการปรับ pH ก่อนการดำเนินงานจะมี pH สูงขึ้นใกล้เคียงกับ 11 และการปรับ pH ก่อนการทดลองทำให้เสียค่าใช้จ่ายมากกว่าที่ไม่ปรับ pH ก่อนการดำเนินงาน อย่างไรก็ตามการทดลองที่ไม่ปรับ pH ก็ยังสามารถ recovery ฟอสฟอรัสได้ประสิทธิภาพสูงเช่นกัน รวมทั้งไม่มีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีที่ใช้ปรับ pH อีกด้วย

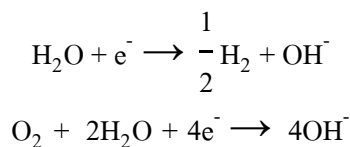
4.2.2.2 ความเป็นกรดต่าง (pH)

จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมี โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปสู่ขั้ว Electrode พบว่า เมื่อเริ่มกระบวนการไฟฟ้าเคมี ทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สามารถแสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงค่าความเป็นกรดต่าง (pH) จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมี

จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมีโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขั้ว Electrode จะมีการทำปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดตามสมการของ Wang *et al.*, 2010 และ Lacasa *et al.*, 2011 ดังนี้

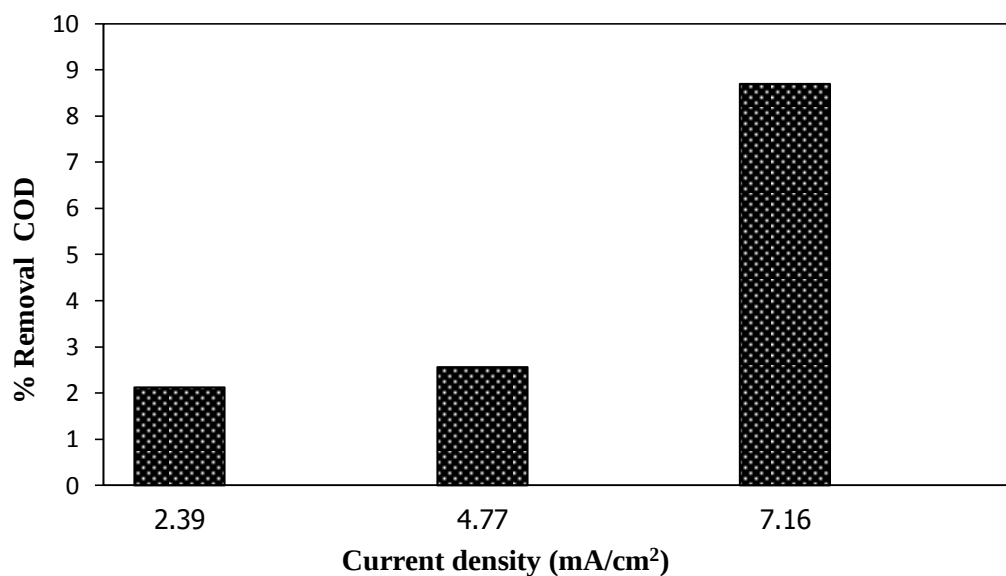


ทำให้ในกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี มี pH เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพราะมีการเกิด OH^- ขึ้นที่ขั้วแคโทด เนื่องจากอัตราการแพร่กระจายของออกซิเจนไปสู่ขั้วแคโทด ส่งผลให้ความเข้มข้นของ OH^- เพิ่มขึ้น สามารถแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่า เมื่อมีความเข้มข้นกระแสสูง ส่งผลให้ค่า pH ในกระบวนการยิ่งสูง เพราะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขั้ว Electrode ในปริมาณมาก นอกจากนี้ค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นกระแสที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี ดังนั้นที่ความเข้มข้นกระแสสูง จะทำให้มีค่า pH สูง และการเปลี่ยนแปลง pH ระหว่างกระบวนการไฟฟ้าเคมีมีความสัมพันธ์กับการนำไฟฟ้าของน้ำและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอน (Lacasa *et al.*,

2011) ดังนั้นกระบวนการไฟฟ้าเคมีจึงเหมาะแก่การตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดินเพราะมีค่า pH ที่เหมาะสม โดยไม่ต้องมีการเติมสารเคมีเพื่อปรับ pH ก่อนการทดลอง ทำให้ PO_4^{3-} , NH_4^+ และ Mg^{2+} ที่อยู่ในน้ำเสียรวมตัวกันแล้วตกตะกอนเป็นสารปรับปรุงคุณภาพดิน ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

4.2.2.3 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (COD)

ในการทดลองจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ โดยเตรียมความเข้มข้นของซีโอดีเท่ากับ 1000 mg/l จาก CH_3COOH และผลจากการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัด COD แต่ละความเข้มข้นกระแสจากกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.16

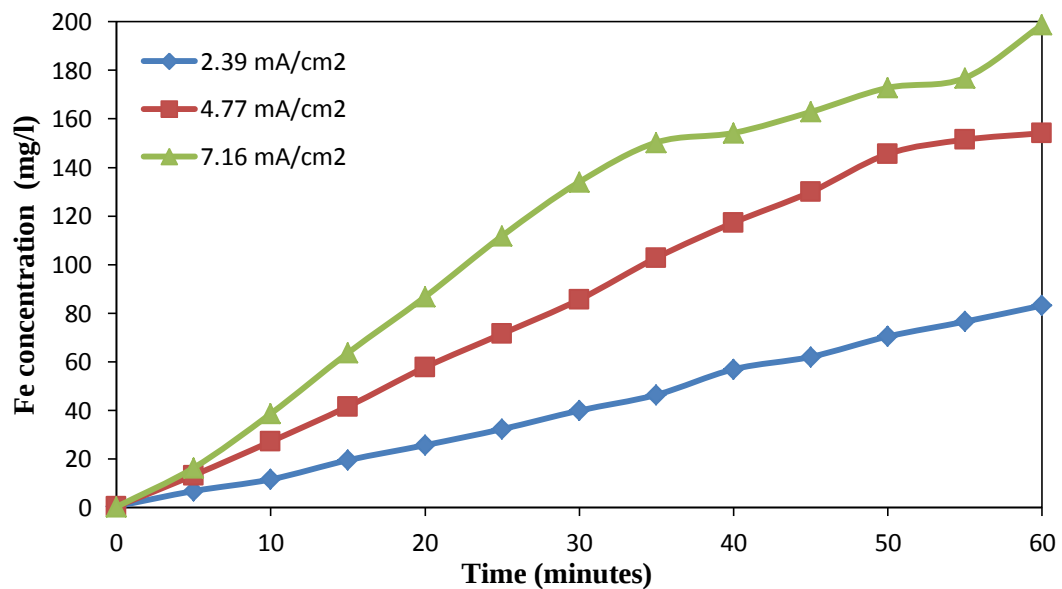


รูปที่ 4.16 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัด COD แต่ละความเข้มข้นกระแส

จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่า กระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ฟาร์มสุกร มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ต่ำ เนื่องจากในน้ำเสียสังเคราะห์มี organic matters น้อย เพราะการกำจัด COD จะมีประสิทธิภาพสูง ขึ้นอยู่กับการรวมตัวกันของอนุภาค organic matters, Mg และ P เป็นต้น (Zhang *et al.*, 2012) โดยเฉพาะถ้ามี organic matters ในน้ำเสียสูง ก็จะมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูง ดังนั้นในการทดลองนี้จึงมีผลการกำจัด COD ต่ำ

4.2.2.4 ความเข้มข้นของเหล็ก

ในการทดลองการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้ว Electrode โดยมีความเข้มข้นกระแสเท่ากับ 2.39, 4.77 และ 7.16 mA cm⁻² พบว่า ความเข้มข้นของเหล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่มากขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 โดยที่ระยะเวลา 60 นาที มีความเข้มข้นของเหล็กมากที่สุด และความเข้มข้นกระแสมากที่สุดก็มีความเข้มข้นของเหล็กสูงกว่าความเข้มข้นกระแสอื่นๆ

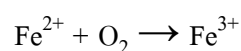


รูปที่ 4.17 แสดงความเข้มข้นของเหล็กจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ในการดำเนินงานกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีซึ่งมีแผ่นเหล็กเป็นขั้ว Electrode โดยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ คือ จะเกิดปฏิกิริยา oxidation ที่ขั้ว Electrode (Lacasa *et al.*, 2011) ซึ่งมีสมการดังนี้



และกรณีที่แผ่นเหล็กเป็นขั้ว Electrode ทำให้ Fe²⁺ จากกระบวนการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว แล้วกลายเป็น Fe³⁺ ดังนั้นผลผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินจึงมี Fe³⁺ ผสมอยู่เป็น species หลักดังสมการนี้



จากสมการดังกล่าว ทำให้ความเข้มข้นของเหล็กที่อยู่ในน้ำมีปริมาณสูงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่ความเข้มข้นกระแสสูง ก็จะมีค่าความเข้มข้นของเหล็กในปริมาณสูง เนื่องจากแผ่นเหล็กเกิดการกัดกร่อนเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปสู่ขั้ว Electrode และเนื่องจากการดำเนินงานมีความเข้มข้นกระแสเท่ากับ 2.39, 4.77 และ 7.16 mA cm⁻² เป็นต้น ทำให้ที่ระยะเวลา 60 นาที มีความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 83.19, 154.13 และ 198.75 mg/l ตามลำดับ นอกจากนี้ในทดลองมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสเหลือน้อย เนื่องจากเกิดการตกตะกอนและรวมตัวกับเฟอริกที่เกิดจากการกัดกร่อนของแผ่นเหล็ก ดังนั้นวิธีนี้จึงสามารถกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียได้โดยการเติมไอออนของเหล็ก (Chen, 2004)

4.2.2.5 Anaerobic Toxicity Assay (ATA)

ในการทดสอบ Anaerobic Toxicity Assay เพื่อหาศักยภาพในการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria โดยการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ผลิตจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ฟาร์มสุกร สำหรับการทำให้ ATA จะใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กจากการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีที่มีความเข้มข้นกระแสเท่ากับ 2.39, 4.77 และ 7.16 mA cm⁻² เป็นต้น และใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินจากการตกตะกอนทางเคมีโดยไม่มียอดประกอบของเหล็กในปริมาณ 1 และ 5 กรัม เพื่อนำไปเปรียบเทียบหาศักยภาพการปลดปล่อยก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria โดยการทำให้ ATA

concentration	Anaerobic Toxicity Assay (mgCH ₄ -COD/gVSS.day)				
	Control	Soil conditioner (no iron)	Soil conditioner mixing iron from EC process		
			3.94 mA cm ⁻²	7.89 mA cm ⁻²	11.83 mA cm ⁻²
20 g/l	0.30	0.60	0.29	0.25	0.14
100 g/l		-	0.05	0.06	0.04

จากการทำให้ ATA เพื่อหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria โดยใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กจากกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีที่มีความเข้มข้นกระแสต่างกัน และได้ทำการเปรียบเทียบกับการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินที่ได้จากกระบวนการตกตะกอนทางเคมีซึ่งไม่มีองค์ประกอบของเหล็ก พบว่า ค่า ATA จากการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินที่ได้จากกระบวนการตกตะกอนทางเคมีซึ่งไม่มีองค์ประกอบของเหล็ก มีค่า ATA สูงกว่าชุดควบคุมและสูงกว่าการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กจากกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี เนื่องจากผู้วิจัยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินโดยการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งมีองค์ประกอบของ

สารเคมีที่ Methanogen bacteria สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต จึงส่งผลให้ Methanogen bacteria สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากกว่าชุดควบคุมและชุดที่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก เนื่องจาก Ferric reducing bacteria ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ เพราะไม่มีเฟอร์ริกให้ Ferric reducing bacteria นำไปใช้ประโยชน์ในการรีดิวซ์ และ Ferric reducing bacteria เป็นแบคทีเรียชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับการควบคุมความเข้มข้นของ H_2 และ Acetate ให้อยู่ในระดับที่ต่ำ เพื่อไม่ให้ Methanogen bacteria คู่มืเข้าไปใช้ในการเจริญเติบโต (Zhang *et al.*, 2009) นอกจากนี้เมื่อนำค่า ATA จากการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กจากกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกับค่า ATA ของชุดควบคุม พบว่า การใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่มีความเข้มข้น 20 g/l มีค่า ATA น้อยกว่าชุดควบคุม และถ้าใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กจากการผลิตที่มีความเข้มข้นกระแสมากก็ยังมีค่า ATA น้อยกว่าชุดควบคุมมาก เนื่องจากมีความเข้มข้นของเหล็กในปริมาณมาก ทำให้ Ferric reducing bacteria สามารถรีดิวซ์เพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโต ทำให้ Ferric reducing bacteria มีพลังในการแข่งขันสำหรับ electron accepting process มากกว่า Methanogen bacteria ซึ่ง Fe-ion เป็น electron acceptor และคาร์บอนที่ย่อยสลายง่ายเป็น electron donor (Huang *et al.*, 2009 และ Cheng *et al.*, 2007) และการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่มีความเข้มข้น 100 g/l มีค่า ATA น้อยกว่าการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่มีความเข้มข้น 20 g/l และน้อยกว่าชุดควบคุมมาก อาจเนื่องมาจากมีความเข้มข้นของเหล็กในปริมาณมาก ทำให้ Ferric reducing bacteria สามารถรีดิวซ์เพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโต จึงทำให้มีพลังในการแข่งขันสำหรับกระบวนการรับ electron มากกว่า Methanogen bacteria ส่งผลให้ Methanogen bacteria สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้น้อยจากการทดสอบ ATA และเมื่อใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กจากกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีทำให้ Ferric reducing bacteria เพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ Methanogen bacteria มีการผลิตก๊าซมีเทนลดลง ดังนั้นสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ผลิตจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีจึงมีศักยภาพในการลดการผลิตก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria ได้ (ตารางที่ 4.4)

4.2.2.6 ความเข้มข้นของเหล็กหลังจาก Anaerobic Toxicity Assay

ในการทดสอบ Anaerobic Toxicity Assay โดยการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่มีความเข้มข้นกระแส 2.39, 4.77 และ 7.16 mA cm^{-2} โดยมีการเปรียบเทียบกับสารปรับปรุงคุณภาพดินที่ได้จากกระบวนการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งหลังจากการทำ Anaerobic Toxicity Assay ได้นำส่วนที่เป็นของเหลวมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเหล็ก

จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็กในของเหลวหลังจากการทำ ATA พบว่า ชุดควบคุมมีความเข้มข้นของเหล็กน้อยที่สุด เนื่องจากไม่มีการปล่อยประกอบของเหล็กเข้าไปในชุดควบคุม นอกจาก

การใส่ Trace element ที่มีส่วนประกอบของเหล็กอยู่ด้วย เพื่อให้ Methanogen bacteria ใช้ในการเจริญเติบโต นอกจากนี้ชุดการทดลองที่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินจากกระบวนการตกตะกอนทางเคมีมีความเข้มข้นของเหล็กมากกว่าชุดควบคุม เนื่องจากสารปรับปรุงคุณภาพดินเป็นผลผลิตที่ได้จากการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมีองค์ประกอบของสารเคมีหลายชนิด รวมทั้งองค์ประกอบของเหล็ก ทำให้มีความเข้มข้นของเหล็กมากกว่าชุดควบคุม แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตความเข้มข้นของเหล็กจากชุดการทดลองที่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กจากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี 20 g/l มีความเข้มข้นของเหล็กในของเหลวมากกว่าชุดควบคุม เนื่องจากการทำ ATA โดยใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ความเข้มข้น 20 g/l มีความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 7.22, 8.93 และ 9.96 g/l (คิดเทียบกับ %XRF ที่วัดได้) โดยมีความเข้มข้นกระแส 2.39, 4.77 และ 7.16 mA cm⁻² ตามลำดับ เมื่อมีความเข้มข้นของเหล็กในปริมาณมาก ทำให้ Ferric reducing bacteria สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโต จึงส่งผลให้ความเข้มข้นของเหล็กที่เหลือจากการนำไปใช้มีปริมาณน้อย แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงความเข้มข้นของเหล็กในส่วน of เหลวจากการทำ ATA

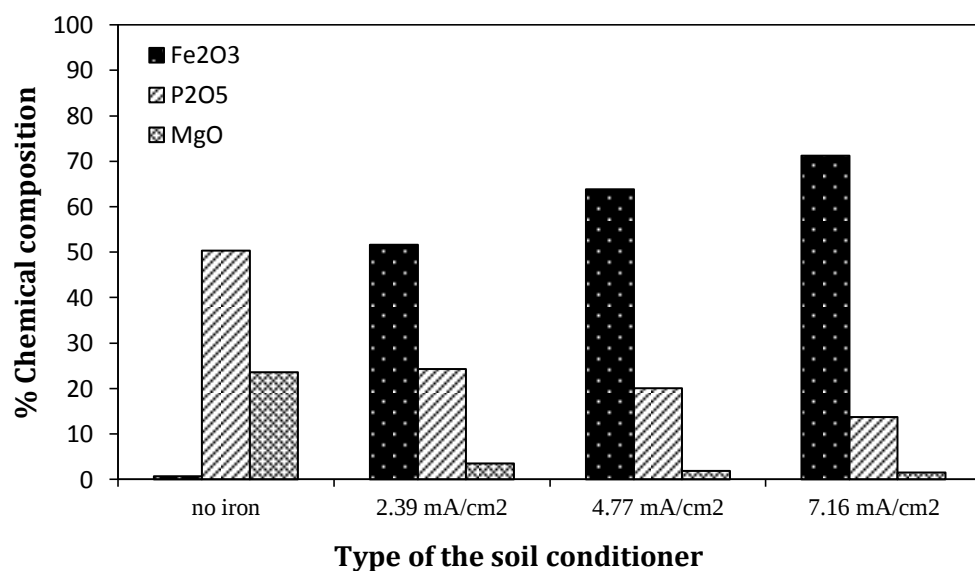
concentration	Fe concentration (mg/l)				
	Control	Soil Conditioner (no iron)	Soil conditioner mixing iron from EC process		
			2.39 mA cm ⁻²	4.77 mA cm ⁻²	7.16 mA cm ⁻²
20 g/l	123.13	152.63	155.63	148.88	131.13
100 g/l		-	161.25	158.25	168.75

นอกจากนี้การใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ผลิตจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี 100 g/l มีความเข้มข้นของเหล็กมากกว่าชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากการทำ ATA โดยใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ความเข้มข้น 100 g/l มีความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 36.08, 44.65 และ 49.82 g/l (คิดเทียบกับ %XRF ที่วัดได้) โดยมีความเข้มข้นกระแส 2.39, 4.77 และ 7.16 mA cm⁻² ตามลำดับ ทำให้ Ferric reducing bacteria สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโต เนื่องจากสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ได้มีความเข้มข้นของเหล็กในปริมาณมาก จึงส่งผลให้ความเข้มข้นของเหล็กที่เหลือจากการนำไปใช้มีปริมาณลดลงจากเดิม ดังตารางที่ 4.5 นอกจากนี้การใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กในปริมาณมาก ทำให้เหล็กสามารถละลายน้ำได้มาก จึงส่งผลให้หลังการทำ ATA โดยใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก 100 g/l มีความเข้มข้นของเหล็กมากกว่า ใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก 20 g/l และจากความเข้มข้นของเหล็กดังกล่าวมีความสอดคล้องกับค่า ATA เนื่องจากการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ 100 g/l มีค่า ATA น้อยกว่าการใส่

สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ 20 g/l อาจเนื่องมาจาก Ferric reducing bacteria นำองค์ประกอบของเหล็กไปใช้ในการเจริญเติบโต เพราะมีความเข้มข้นของเหล็กในปริมาณมาก ทำให้มีพลังในการแข่งขันสำหรับกระบวนการรับ Electron มากกว่า Methanogen bacteria จึงส่งผลกระทบต่อการผลิตก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria ทำให้การใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก 100 g/l มีค่า ATA น้อยกว่าการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก 20 g/l ดังนั้นสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ผลิตโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีจึงมีศักยภาพในการลดการผลิตก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria ได้

4.2.2.7 X-ray Fluorescence (XRF)

จากการดำเนินการผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กโดยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี และได้นำผลผลิตดังกล่าวไปวิเคราะห์ XRF เพื่อหาองค์ประกอบธาตุต่างๆ ของสารปรับปรุงคุณภาพดินแต่ละความเข้มข้นกระแส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18



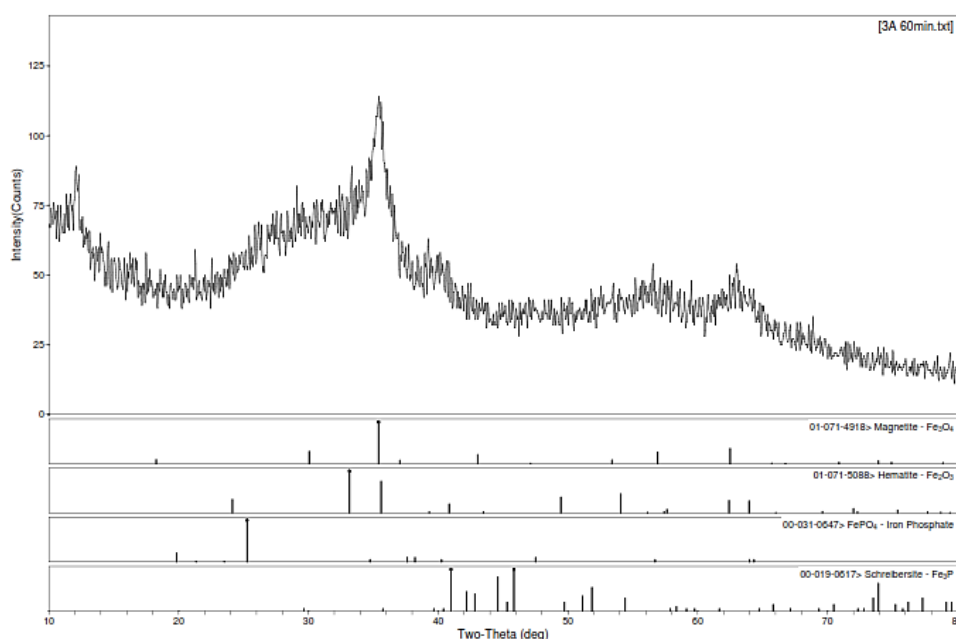
รูปที่ 4.18 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของธาตุในสารปรับปรุงคุณภาพดินแต่ละชนิดจากการวิเคราะห์ XRF

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ในสารปรับปรุงคุณภาพดินดังรูปที่ 4.18 พบว่า องค์ประกอบของธาตุต่างๆ มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นกระแส โดยที่ความเข้มข้นกระแสสูงจะมีองค์ประกอบของ Fe₂O₃ ค่อนข้างสูง เนื่องจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเป็นจำนวนมาก จึงทำให้เหล็กที่ถูกกัดกร่อนออกมาจากแผ่นเหล็กที่ใช้เป็นขั้ว Electrode มีปริมาณมากเช่นกัน ทำให้อาจส่งผลกระทบ

ต่อ $\%P_2O_5$ และ $\%MgO$ ของสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักแต่ละชนิด และจากการทดลองเมื่อมีความเข้มข้นกระแสสูงขึ้น ก็จะทำให้มี $\%P_2O_5$ และ $\%MgO$ ลดลง

4.2.2.8 X-ray diffraction (XRD)

การวิเคราะห์ XRD เป็นเทคนิคที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์วัสดุต่างๆ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์(X-ray diffraction: XRD) ในการวิเคราะห์ XRD สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดหรือแยกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นธาตุชนิดใดโดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัด (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม, 2013) จากการดำเนินการผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ได้นำผลผลิตที่ความเข้มข้นกระแสเท่ากับ 7.16 mA cm^{-2} ไปวิเคราะห์ XRD ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ เพื่อหาองค์ประกอบเชิงซ้อน โดยมีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.19



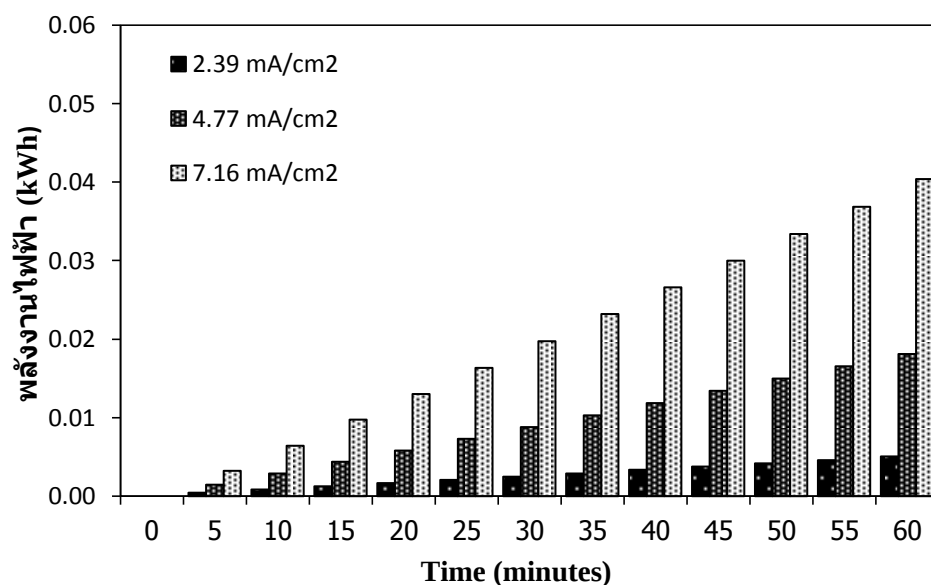
รูปที่ 4.19 แสดงผลจากการวิเคราะห์ XRD ของสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลัก

จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่า สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักที่ความเข้มข้นกระแส 7.16 mA cm^{-2} มีองค์ประกอบเชิงซ้อนของ Fe_2O_3 และ Fe_3O_4 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็น Hematite และ Magnetite ตามลำดับ เนื่องจากกราฟของสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักและกราฟมาตรฐานของ Fe_2O_3 และ

Fe_3O_4 มีจุดสูงสุด (peak) ที่มุมเดียวกันมากกว่า 2 มุม รวมทั้งสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ผลิตได้มีองค์ประกอบของเหล็กในปริมาณมาก เนื่องจากกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี มีแผ่นเหล็กเป็นขั้ว Electrode ทำให้แผ่นเหล็กถูกกัดกร่อนเมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ส่งผลให้สารปรับปรุงคุณภาพดินตกตะกอนรวมตัวกับองค์ประกอบของเหล็กในปริมาณมาก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ผลิตโดยใช้ความเข้มข้นกระแส 7.16 mA cm^{-2} มีองค์ประกอบเชิงซ้อนของ Fe_2O_3 และ Fe_3O_4 เป็นหลัก

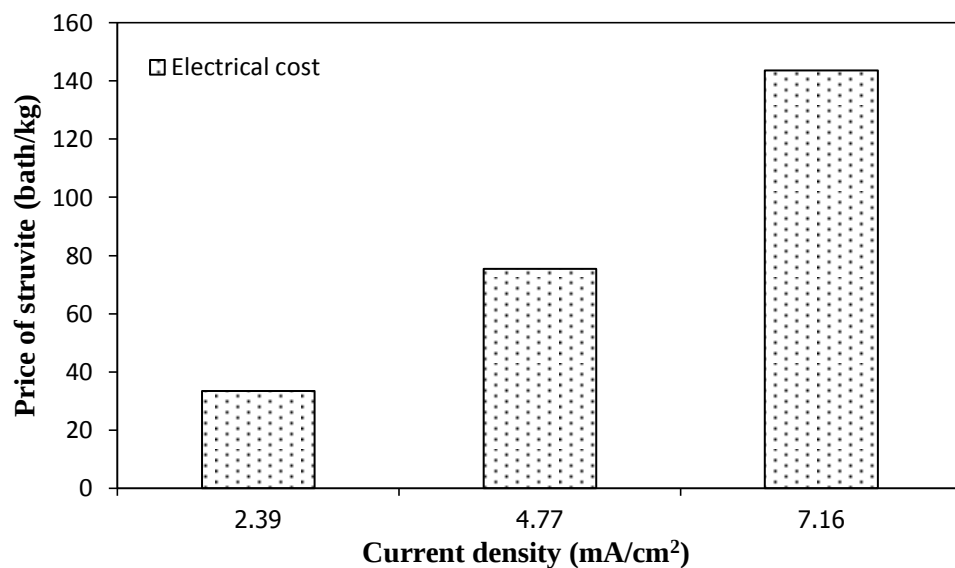
4.2.2.9 พลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายจากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมี

จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมีโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขั้ว Electrode พบว่า พลังงานไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาในการดำเนินงาน ซึ่งมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี 60 นาที พบว่า พลังงานไฟฟ้าจากการทดลองจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีระยะเวลาในการดำเนินงานมากขึ้น และถ้ามีความเข้มข้นกระแส (Current density) ในปริมาณมากก็จะส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขั้ว Electrode เป็นระยะเวลานาน ทำให้มีแรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น และอาจเนื่องมาจากแผ่นเหล็กซึ่งเป็นขั้ว Electrode ถูกกัดกร่อนจากการปล่อยกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้มีความต้านทานทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ทำให้การดำเนินงานไฟฟ้าเคมีโดยมีความเข้มข้นกระแสต่างกัน มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่างกันด้วย (รูปที่ 4.20)



รูปที่ 4.20 แสดงพลังงานไฟฟ้าจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี

นอกจากนี้เมื่อมีการดำเนินงานไฟฟ้าเคมีที่มีความเข้มข้นกระแสสูง จึงทำให้มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าในการดำเนินงานสูงเช่นกัน ทำให้ส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายจากการดำเนินงาน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่มีการปรับ pH ก่อน พบว่า จากการดำเนินงานที่ไม่มีการปรับ pH ก่อน มีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่ากระบวนการไฟฟ้าเคมีที่มีการปรับ pH ก่อน เนื่องจากไม่มีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมี และจากการดำเนินงานที่ความเข้มข้นกระแส 2.39 mA cm^{-2} มีค่าใช้จ่ายสำหรับการใช้กระแสไฟฟ้าน้อยกว่าการใช้ความเข้มข้นกระแส 4.77 และ 7.16 mA cm^{-2} เพราะมีแรงดันไฟฟ้าน้อย ซึ่งค่าใช้จ่ายสำหรับกระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็น บาท/กิโลกรัม ดังรูปที่ 4.21 นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายสำหรับกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ดังนั้นกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยไม่ปรับ pH ก่อนการทดลอง ซึ่งจะใช้ความเข้มข้นกระแสต่ำกว่ากระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยปรับ pH ก่อนการทดลองจึงมีค่าใช้จ่ายสำหรับกระแสไฟฟ้าในปริมาณน้อย

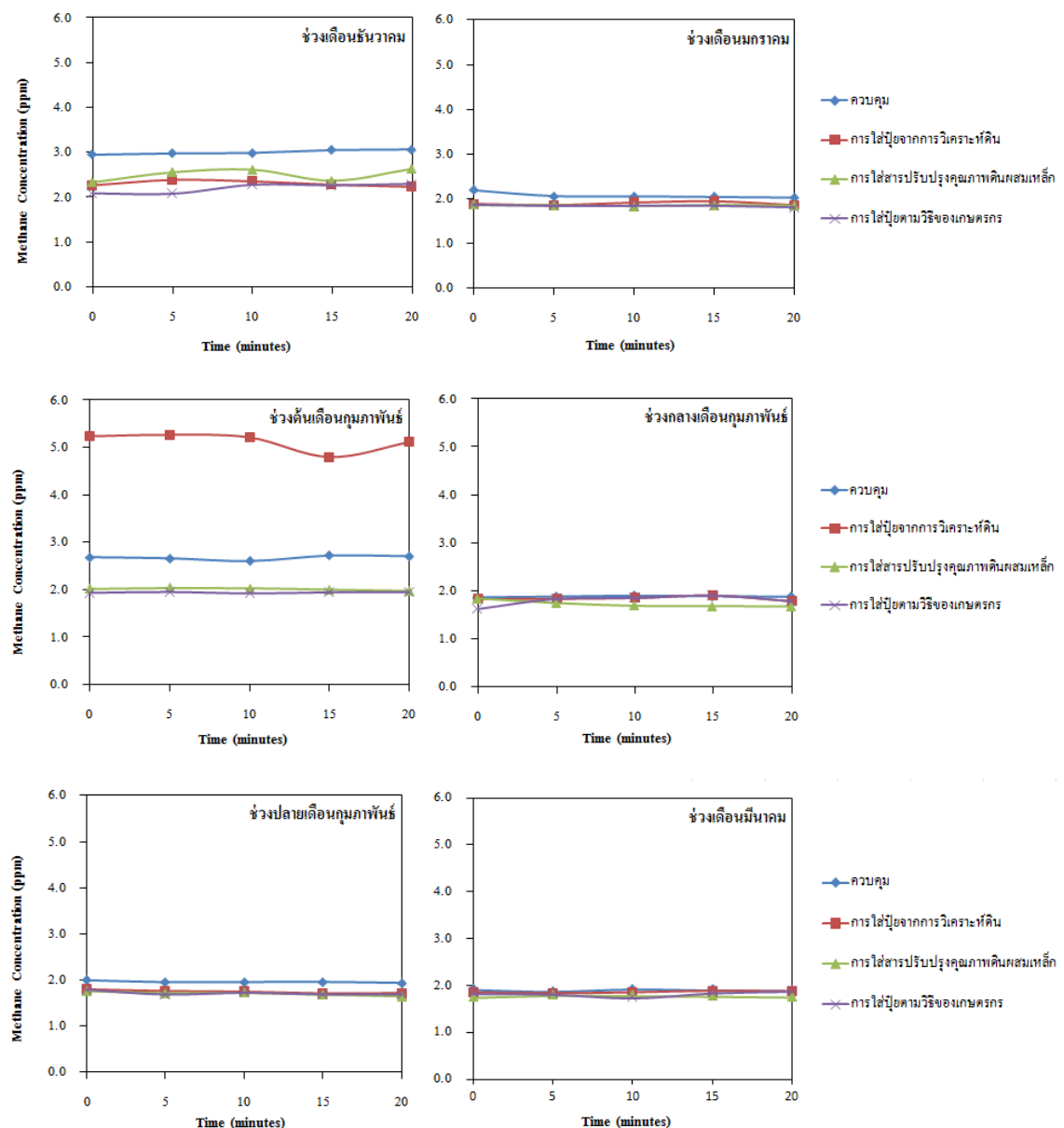


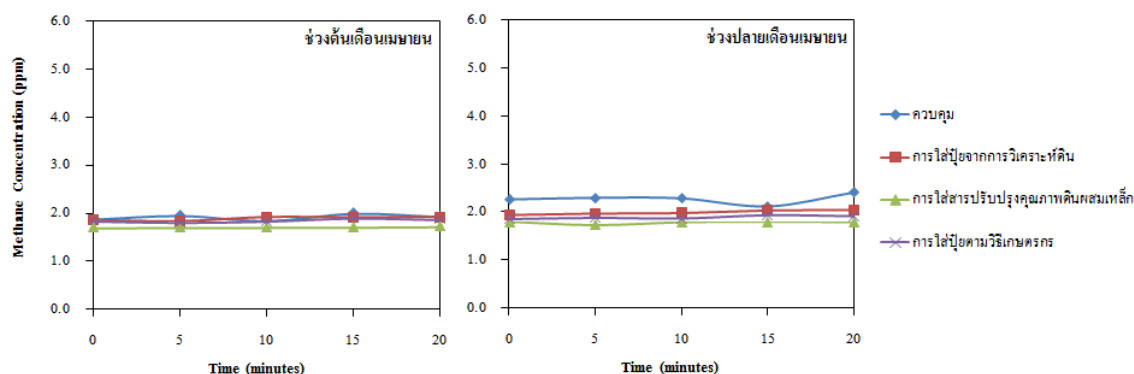
รูปที่ 4.21 แสดงค่าใช้จ่ายจากการดำเนินงานโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยมีความเข้มข้นกระแสที่ต่างกัน

4.3 ผลการทดลองจากแปลงเกษตร

4.3.1 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากแปลงทดลอง

จากการดำเนินงานเพื่อหาศักยภาพในการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าว โดยใช้สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักจากการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งในการทดลองจะดำเนินงานระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ. 2556 จนถึง เดือนเมษายน พ.ศ. 2557 และในการทดลองจะทำการเปรียบเทียบลักษณะการใส่ปุ๋ยในแปลงเกษตรเพื่อหาศักยภาพการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลัก โดยการทดลองมีลักษณะการใส่ปุ๋ยในแปลงเกษตรที่แตกต่างกัน ดังนี้ ควบคุม(ไม่มีการใส่ปุ๋ย), การใส่ปุ๋ยจากการวิเคราะห์ดิน, การใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลัก และการใส่ปุ๋ยตามวิธีของเกษตรกร เป็นต้น ซึ่งมีผลการทดลองดังรูปที่ 4.22





รูปที่ 4.22 แสดงความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่ปลดปล่อยจากแปลงเกษตรในแต่ละเดือน ระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ.2556 – เมษายน พ.ศ.2557

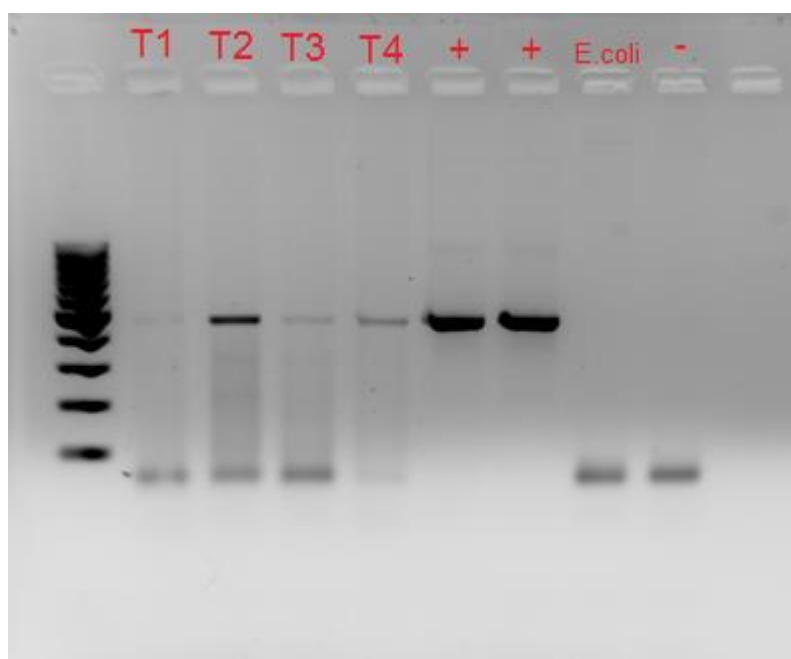
จากการทดลองเพื่อศึกษาของสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักต่อการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าว โดยทำการเก็บตัวอย่างก๊าซจากแปลงเกษตรระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ. 2556 – เมษายน พ.ศ. 2557 เพื่อนำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของก๊าซมีเทน พบว่า ในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2556 จนถึงต้นเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2557 ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนจากแปลงเกษตรที่ได้ใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักยังไม่มีแนวโน้มต่อการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนเมื่อเทียบกับการใส่ปุ๋ยจากการวิเคราะห์ดินและการใส่ปุ๋ยตามวิธีเกษตรกร เพราะการใส่ปุ๋ยจากการวิเคราะห์ดิน, การใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลัก และการใส่ปุ๋ยตามวิธีของเกษตรกร มีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่ใกล้เคียงกันมาก แต่ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนจะมีการปลดปล่อยลดลงโดยการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักเมื่อเทียบกับชุดควบคุม เนื่องจากสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักมีองค์ประกอบของเฟอร์ริคอยู่ ทำให้ Ferric reducing bacteria สามารถรีดิวซ์แล้วนำมาใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโตได้

ในช่วงกลางเดือนกุมภาพันธ์จนถึงเมษายน พ.ศ. 2557 ในแปลงเกษตรที่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักมีแนวโน้มของความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่ลดลง แต่ช่วงกลางเดือนกุมภาพันธ์จนถึงมีนาคม พ.ศ. 2557 อาจจะยังเห็นไม่ชัดเจนสำหรับความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่ลดลง อย่างไรก็ตาม ในช่วงเดือนเมษายน พ.ศ. 2557 แปลงเกษตรที่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนน้อยกว่าแปลงเกษตรที่มีการควบคุม, การใส่ปุ๋ยจากการวิเคราะห์ดินและการใส่ปุ๋ยตามวิธีเกษตรกรอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก Ferric reducing bacteria สามารถรีดิวซ์เฟอร์ริคจากการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลัก และทำให้มีพลังในการแข่งขันสำหรับกระบวนการรับ electron ได้ดีกว่า Methanogen bacteria (Huang *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 1993; Frenzel *et al.*, 1999; Yao *et al.*, 1999) ส่งผลให้ Methanogen bacteria ที่อยู่ในดินมีการผลิตก๊าซมีเทนได้ลดลง ดังนั้นการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักในแปลงเกษตรมีศักยภาพต่อการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทน

นอกจากนี้ การใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กทำให้เกิดการสร้าง organic acid (acetic acid) ในปริมาณต่ำ (Toyoaki *et al.*, 2002) เนื่องจาก Fe-ion มีความเป็นไปได้ในการช่วยบรรเทาการปลดปล่อยมีเทนในดินนาข้าว (Yagi *et al.*, 1997) และการทำปฏิกิริยา oxidize และ reduce ในดินจะเป็นตัวควบคุมการผลิตมีเทนจากดินนาข้าว นอกจากนี้ Fe-ion จะเป็นวัตถุดิบหลักในการ oxidizing และเป็นการควบคุมการผลิต organic acid และ Methane ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Asami and Takai, 1970; Watanabe and Kimura, 1999) ส่งผลให้การใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กในแปลงเกษตรเป็นการช่วยบรรเทาการปลดปล่อยก๊าซมีเทน (รูปที่ 4.22) ดังนั้นสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กได้ถูกนำมาพัฒนาและนำมาใช้เพื่อศึกษาภาพในการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าว ซึ่งจะเกิดยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนและเป็นการปรับปรุงกระบวนการ oxidation ของการผลิตก๊าซมีเทนให้ดีขึ้น

4.3.2 การหา community ของ Methanogen bacteria

การหา community ของ Methanogen bacteria โดยใช้ Molecular technique ได้นำตัวอย่างดินจากแปลงเกษตรมาสกัด DNA ซึ่งผลสุดท้ายจะได้ Nucleic acid ออกมา หลังจากนั้นก็เข้าสู่กระบวนการ Polymerase Chain Reaction (PCR) เพื่อเพิ่มจำนวน DNA จาก DNA ต้นแบบที่ได้สังเคราะห์ขึ้น โดยใช้ *mcrA* gene specific primer สำหรับ Methanogen bacteria ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.23 แสดง PCR pattern จากการใช้ *mcrA* gene specific primer

โดยที่ T1 = ควบคุม (ไม่มีการใส่ปุ๋ย), T2 = การใส่ปุ๋ยจากการวิเคราะห์ดิน, T3 = การใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก และ T4 = การใส่ปุ๋ยตามวิธีของเกษตรกร

ในการทำ PCR โดยใช้ตัวอย่างดินจากผิวดินของแปลงเกษตรมาสกัด DNA เพื่อหา community ของ Methanogen bacteria โดยใช้ *mcrA* gene specific primer เป็น DNA ต้นแบบ โดยตัวอย่างดินแต่ละชนิดที่เก็บมาจากผิวดิน จะมีลักษณะการใส่ปุ๋ยต่างกันดังนี้ ควบคุม (ไม่มีการใส่ปุ๋ย), การใส่ปุ๋ยจากการวิเคราะห์ดิน, การใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลัก และการใส่ปุ๋ยตามวิธีของเกษตรกร ซึ่งหลังจากสกัด DNA แล้ว Nucleic acid มีความเข้มข้นเท่ากับ 30, 30, 30 และ 60 ng/μl ตามลำดับ เมื่อนำมาทำ PCR พบว่า ตัวอย่างดินจากการใส่ปุ๋ยจากการวิเคราะห์ดิน และการใส่ปุ๋ยตามวิธีของเกษตรกร มี Methanogen bacteria มากกว่าควบคุมและการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลัก เนื่องจากมีแถบสี (Band) ของ DNA ที่เคลื่อนที่ไปใน agarose gel ปรากฏขึ้นเมื่อเทียบกับ positive DNA ซึ่ง positive DNA คือ ยีนส์ DNA ของ Methanothermobacter (Lot. 8985-A2 Hn) ดังรูปที่ 4.23 นอกจากนี้ DNA ของตัวอย่างดินจากแปลงที่ควบคุม (T1) จะมีแถบสีที่บางที่สุด อาจเนื่องมาจากในธรรมชาติมี Methanogen Bacteria น้อย เพราะเก็บตัวอย่างดินจากผิวดิน ทำให้มี Methanogen bacteria อาศัยอยู่น้อย ซึ่งไม่เหมือนตัวอย่างดินที่มีการใส่ปุ๋ยจากการวิเคราะห์ดิน (T2) และการใส่ปุ๋ยตามวิธีของเกษตรกร (T4) ที่มีแถบสีที่เข้มกว่าควบคุม เนื่องจากปุ๋ยที่ใส่ลงไปในดินอาจจะมีธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อ Methanogen bacteria ที่อยู่ในดิน ทำให้ Methanogen bacteria นำไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโต จึงส่งผลให้มี DNA ของ Methanogen bacteria มากกว่าตัวอย่างดินจากชุดควบคุม รวมทั้ง DNA ของตัวอย่างดินที่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลัก (T3) มีแถบสีที่บางกว่าตัวอย่างดินที่มีการใส่ปุ๋ยจากการวิเคราะห์ดิน (T2) และการใส่ปุ๋ยตามวิธีของเกษตรกร (T4) เนื่องจาก Fe^{3+} reducing bacteria สามารถรีดิวซ์เฟอร์ริกที่อยู่ในสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลัก ทำให้มีการเจริญเติบโตได้ดีกว่า Methanogen bacteria เพราะ Fe^{3+} reducing bacteria มีพลังงานในการแข่งขันสำหรับกระบวนการรับ Electron มากกว่า Methanogen bacteria ทำให้ Methanogen bacteria ที่อยู่ในดินมีจำนวนน้อย ดังนั้นสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักมีศักยภาพในการบรรเทาการปลดปล่อยก๊าซมีเทนได้ แต่ DNA ของตัวอย่างที่มีการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลัก (T3) มีแถบสีที่เข้มกว่าควบคุม (T1) อาจเนื่องมาจากสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักมีธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ Methanogen bacteria ที่อยู่ในดิน ทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโต ส่งผลให้มี Methanogen bacteria มากกว่าควบคุม แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับลักษณะการใส่ปุ๋ยอื่นๆ สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักมีศักยภาพต่อการลดการผลิตก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria ได้ ดังนั้นสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมหลักจึงเป็นปุ๋ยชนิดหนึ่งที่สามารถใช้เป็นสารปรับปรุงคุณภาพดิน เพื่อช่วยบรรเทาก๊าซมีเทนจากนาข้าว

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

5.1 การดำเนินงานโดยใช้น้ำเสียจริง

จากการดำเนินงานตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียจริง ในการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกระแสดังนี้ 9.57, 19.14 และ 28.71 mA cm⁻² ซึ่งในการทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเท่ากับ 84.40, 95.61 และ 99.52% ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์เท่ากับ 79.56, 79.59 และ 88.24% ตามลำดับ เนื่องจากการทดลองมีสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนสารปรับปรุงคุณภาพดิน และในการดำเนินงานไฟฟ้าเคมีทำให้แผ่นเหล็กถูกกัดกร่อนส่งผลให้ความเข้มข้นของเหล็กที่อยู่ในน้ำเสียเพิ่มมากขึ้นในระหว่างการทดลองและมีปริมาณเหล็กในสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กเท่ากับ 368.75, 352.38 และ 475 mgFe /g Soil conditioner mixing Iron ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ XRF พบว่า สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ความเข้มข้นกระแส 28.71 mA cm⁻² มี %Fe₂O₃ เท่ากับ 84.4 % นอกจากนี้สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กมีศักยภาพในการช่วยบรรเทาการผลิตก๊าซมีเทนได้โดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุมซึ่งมีค่า Anaerobic Toxicity Assay เท่ากับ 3.05 mgCH₄-COD/gVSS.day และ 0.10 mgCH₄-COD/gVSS.day จากการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ความเข้มข้นกระแสเท่ากับ 9.57 mA cm⁻² ในปริมาณ 0.5 กรัม ดังนั้นสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กมีศักยภาพสำหรับการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria ได้

5.2 การดำเนินงานโดยการใช้ น้ำเสียฟาร์มสุกรสังเคราะห์

5.2.1. ผลการทดลองจากการปรับ pH ก่อนดำเนินงาน

ในการดำเนินงานตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียฟาร์มสุกรสังเคราะห์ ในการทดลองมีความเข้มข้นกระแสเท่ากับ 3.94, 7.89 และ 11.83 mA cm⁻² และมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 30 และ 60 นาที จากการทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสมากกว่า 80% ทุกการดำเนินงาน แต่มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ต่ำ นอกจากนี้ค่า pH ระหว่างการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากอัตราการแพร่กระจายของออกซิเจนไปสู่ขั้วแคโทด ทำให้มีสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก รวมทั้งสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กมีผลทำให้ Methanogen bacteria ผลิตก๊าซมีเทนได้ลดลง โดยมีค่า Anaerobic Toxicity Assay เท่ากับ 0.5, 0.14 และ 3.00 mgCH₄-COD/gVSS.day ของชุดควบคุม, สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ความเข้มข้นกระแส

3.94 mA cm⁻² และสารปรับปรุงคุณภาพดินจากการตกตะกอนเคมี ตามลำดับ ดังนั้นสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กจึงมีศักยภาพในการลดการผลิตก๊าซมีเทนได้ เนื่องจาก Fe³⁺ reducing bacteria สามารถรีดิวซ์เฟอร์ริกและมีพลังงานในกระบวนการรับ Electron มากกว่า Methanogen bacteria

5.2.2. ผลการทดลองจากการไม่ปรับ pH ก่อนดำเนินงาน

จากการดำเนินงานตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียฟาร์มสุกรสังเคราะห์ ซึ่งในการทดลองมีความเข้มข้นกระแสเท่ากับ 2.39, 4.77 และ 7.16 mA cm⁻² และมีระยะเวลาการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี 60 นาที จากการทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเท่ากับ 80.26, 96.84 และ 98.22% ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ต่ำ นอกจากนี้การดำเนินงานไฟฟ้าเคมีทำให้แผ่นเหล็กถูกกัดกร่อน ส่งผลให้ความเข้มข้นของเหล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งความเข้มข้นของเหล็กที่เวลา 60 นาที เท่ากับ 83.19, 154.13 และ 198.75 mg/l ตามลำดับ นอกจากนี้สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมทำให้ Methanogen bacteria ผลิตก๊าซมีเทนลดลง โดยมีค่า Anaerobic Toxicity Assay เท่ากับ 0.14, 0.3 และ 0.6 mgCH₄-COD/gVSS.day ของการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กที่ความเข้มข้นกระแส 11.83 mA cm⁻², ชุดควบคุมและการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินจากการตกตะกอนเคมี โดยมีความเข้มข้น 20 g/l นอกจากนี้การใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็ก 100 g/l ก็ยังทำให้ค่า Anaerobic Toxicity Assay น้อยกว่าการใส่ 20 g/l ดังนั้นสารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กมีศักยภาพในการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria ได้ รวมทั้งการผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดินที่ไม่มีการปรับ pH ก่อนการทดลองมีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าการผลิตที่มีการปรับ pH ก่อน ดังนั้นการดำเนินงานโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ไม่มีการปรับ pH จึงเหมาะสมในการผลิตสารปรับปรุงคุณภาพดิน

5.3 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากแปลงเกษตรและ community ของ Methanogen

จากการทดลองในแปลงเกษตรเพื่อหาความเข้มข้นของก๊าซมีเทนโดยทำการทดลองในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2556 – เมษายน พ.ศ. 2557 และนำตัวอย่างดินจากแปลงเกษตรมาหา DNA ของ Methanogen bacteria พบว่า สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กมีศักยภาพสำหรับการลดการผลิตก๊าซมีเทนของ Methanogen bacteria เนื่องจากความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงเดือนเมษายน พ.ศ. 2557 และตัวอย่างดินจากการใส่สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กมีแถบสี(Band) ที่บางกว่าตัวอย่างดินจากการใส่ปุ๋ยในลักษณะอื่น ดังนั้นจากการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า สารปรับปรุงคุณภาพดินผสมเหล็กมีศักยภาพต่อการลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากแปลงเกษตรได้

เอกสารอ้างอิง

คมกฤษณ์ คีรีรัมย์, 2554, การศึกษาอัตราการแพร่กระจายก๊าซมีเทนในนาข้าวจากดัชนีพืชพรรณโดยประยุกต์ใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT-5 TM กรณีศึกษา อำเภอบางน้ำเปรี้ยว จังหวัดฉะเชิงเทรา, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะพัฒนาลังคมและสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, หน้า 1-23.

จิรศักดิ์ คงเกียรติจร, วินัย แก้วสวัสดิ์ และสมเกียรติ เดชกาญจนรักษ์, “การศึกษาคุณลักษณะของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนจากดินนาและรากข้าว”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 29, ฉบับที่ 3, หน้า 283-299.

ธัญวรัญ บรรณาธรรม, 2553, การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการตกตะกอนของสตรูไวท์(Struvite), วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 5-9.

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช และ นิตยา รื่นสุข, 2556, “ผลของพันธุ์ข้าวและชนิดของปุ๋ยต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าว”, วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, หน้า 105-115.

ภริณา พุทธรัตน์, 2550, การอนุรักษ์กฎหมายไทยที่มีต่อพิธีสารเกียวโต: ศึกษากรณีการดำเนินกลไกการพัฒนาที่สะอาดในภาคพลังงานและอุตสาหกรรม, วิทยานิพนธ์ปริญญานิติศาสตรมหาบัณฑิต คณะนิติศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง, หน้า 69-77.

ศิรพัชร เวสาลี, 2554, การกำจัดไนโตรเจนในน้ำปัสสาวะโดยวิธีการไฮโดรไลซิสในสภาวะต่าง พร้อมกับการตกผลึกสตรูไวท์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 4-12.

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2013, การทดสอบด้านกายภาพ : XRD และ XRF [Online], Available <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics>[2013, Decamber 8].

สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย, 2553, “ประเด็นท้าทายข้อเสนอเชิงนโยบายและการเจรจาของไทย เรื่องการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก”, ใน **สร้างสรรค์ปัญญา: ชุมนโยบายสาธารณะ ลำดับที่ 22**, รศ.ดร.ขยันต์ ตันติวิศดาการ, ครั้งที่ 1, ชุดโครงการพัฒนาความรู้และยุทธศาสตร์ความตกลงพหุภาคีด้านสิ่งแวดล้อมและยุทธศาสตร์ลดโลกร้อน, สถาบันธรรมรัฐเพื่อการพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม, หน้า 56.

อานนท์ ดวงพาลี, 2552, การกำจัดแอมโมเนียในกระบวนการไฮโดรไลซิสทางความร้อนของมูลไก่โดยวิธีตกผลึกสตรูไวท์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 12-14.

อโณชา เลาศรีรัตนชัย, 2531, “การจัดการมูลสุกรในฟาร์ม”, **สุกรสาราน**, Vol. 55, No. 14, pp. 53-61.

Achtnich, C., Schuhmann, A., Wind, T. and Conrad, R., 1995b, “Role of Interspecies H_2 Transfer to Sulfate and Ferric Iron-Reducing Bacteria in Acetate Consumption in Anoxic Paddy Soil”, **FEMS Microbiology Ecology**, Vol. 16, pp. 61-69.

Alexandra, H. and Kai M. U., 2013, “Struvite Precipitation from Urine with Electrochemical Magnesium Dosage”, **Water Research**, Vol. 47, pp. 289-299.

Asami, T. and Takai, Y., 1970, “Behaviour of Free Iron Oxide in Paddy Soils, Part 4, Relationship between Reduction of Free Iron Oxide and Formation of Gases in Paddy Soils”, **Japan, Journal of the Science of Soil and Manure**, Vol. 41, pp. 48-55.

Call, D. and Logan, B.E., 2008, “Hydrogen Production in a Single Chamber Microbial Electrolysis Cell (MEC) Lacking a Membrane”, **Environmental Science and Technology**, Vol. 42, No. 9, pp. 3401–3406.

Cheng, W., Yagi, K., Akiyama, H., Nishimura, S., Suda, S., Fumoto, T., Hasegawa, T., Hartley, A.E. and Megonigal, J.P., 2007, “An Empirical Model of Soil Chemical Properties that Regulate Methan Production in Japanese Rice Paddy Soil”, **Journal of Environmental Quality**, Vol. 36, pp. 1920-1925.

Chidthaisong, R. B.A. and Conrad, R., 1999, "Measurement of Monosaccharides and Conversion of Glucose to Acetate in Anoxic Rice Field Soil", **Applied and Environmental Microbiology**, Vol. 65, pp. 2350-2355.

Cusick, R.D. and Logan, B.E., 2011, "Phosphate Recovery as Struvite within a Single Chamber Microbial Electrolysis Cell", **Bioresource Technology**, Vol. 107, pp. 110-115.

Doyle, J.D. and Parsons, S.A. 2002, "Struvite Formation Control and Recovery", **Water Research**, Vol. 36, No. 16, pp. 3925-3940.

Engracia, L., Pablo C., Cristina, S., Francisco, J. F. and Manuel, A.R., 2011, "Electrochemical Phosphates Removal Using Iron and Aluminium Electrodes", **Chemical Engineering Journal**, Vol. 172, pp. 137-143.

Frenzel, P. and Bosses, U., 1996, "Methyl Fluoride, an Inhibitor of Methane Oxidation and Methane Production", **FEMS Microbiology Ecology**, Vol. 26, pp. 25-36.

Frenzel, P., Bosses, U. and Janssen, P.H., 1999, "Rice Roots and Methanogenesis in a Paddy Soil: Ferric Iron as an Alternative Electron Acceptor in the Rooted Soil", **Soil Biology and Biochemistry**, Vol. 31, pp. 421-430.

Hao, X.-D., Wang, C.-C., and Van Loosdrecht, M.C.M., 2008, "Struvite Formation, Analytical Methods and Effects of pH and Ca^{2+} ", **Water Science and Technology**, Vol. 58, pp. 1687-1692.

He, S.L., Zhang, Y., Yang, M., Du, W. and Harada, H., 2007, "Repeated Use of MAP Decomposition Residues for the Removal of High Ammonium Concentration from Landfill Leachate", **Chemosphere**, Vol. 66, pp. 2233-2238.

Huang, B., Yu, K., and Gambrell, R.P, 2009, "Effects of Ferric Iron Reduction and Regeneration on Nitrous Oxide and Methane Emissions in a Rice Soil", **Chemosphere**, Vol. 74, pp. 481-486.

Huang, H.M., Xu, C.L. and Zhang, W., 2011, "Removal of Nutrients from Piggery Wastewater Using Struvite Precipitation and Pyrogenation Technology", **Bioresource Technology**, Vol. 102, pp. 2523-2528.

Ichihashi, O. and Hirooka, K., 2012, "Removal and Recovery of Phosphorus as Struvite from Swine Wastewater Using Microbial Fuel Cell", **Bioresource Technology**, Vol. 114, pp. 303-307.

Khalil, M.A.K., 1993, "Atmospheric Methane : Sources, Sinks, and Role in Global Change", **NATO ASI Series, Series 1 : Global Environmental Change**, Vol. 13, pp. 561-562.

Kristell, S. L. C., Eugenia, V.J., Phil, H., and Simon, A.P., 2005, "Impact of Calcium on Struvitecrystal Size, Shapeand Purity", **Journal of Crystal Growth**, Vol. 283, pp. 514–522.

Lacasa, E., Canizares, P., Saez, C., Fernandez, F.J. and Rodrigo, M.A., 2011, "Electrochemical Phosphates Removal Using Iron and Aluminium Electrodes", **Chemical Engineering Journal**, Vol. 172, pp. 137–143.

Le Corre, K. S., Valsami-Jones, E., Hobbs, P., and Parsons, S. A., 2009, "Phosphorus Recovery from Wastewater by Struvite Crystallization", **A Review: Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, Vol. 39, pp. 433-477.

Liu, Y., Kumar, S., Kwag, J.H., Kim, J.H., Kim, J.D. and Ra, C.S., 2011, "Recycle of Electrolytically Dissolved Struvite as an Alternative to Enhance Phosphate and Nitrogen Recovery from Swine Wastewater", **Journal of Hazardous Materials**, Vol. 195, pp. 175-181.

Mariska, R., Max, M., Rainer, H. and Willi, G., 2010, "Struvite Precipitation from Urine-Influencing Factors on Particle Size", **Water Research**, Vol. 44, pp. 2038-2046.

Innis, M.A., Gelfand, D.H., Sninsky, J.J, and White, T.J., eds., 1990, "**PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications**", Academic Press, San Diego, Ca, p. 1-4.

Ratering, S. and Conrad, R., 1998, "Effects of Short-Term Drainage and Aeration on the Production of Methan in Submerged Rice Soil", **Global Change Biology**, Vol. 4, pp. 397-407.

Schnell, S. and Jackel, U., 2000, "Suppression of Methane Emission from Rice Paddies by Ferric Iron Fertilization", **Soil Biology and Biochemistry**, Vol. 32, pp. 1811-1814.

Schutz, H., Seiler, W. and Conrad, R., 1989, "Processes Involved in Formation and Emission of Methane in Rice Paddies", **Biogeochemistry**, Vol. 7, pp. 33-53.

Sheppard, S.K., McCarthy, A.J., Loughnane, J.P., Gray, N.D., Head, I.M. and Lloyd, D., 2005, "The Impact of Sludge Amendment on Methanogen Community Structure in an Upland Soil", **Applied Soil Ecology**, Vol. 28, pp. 147-162.

Song, Y., Yuan, P., Zheng, B., Peng, J., Yuan, F. and Gao, Y., 2007, "Nutrients Removal and Recovery by Crystallization of Magnesium Ammonium Phosphate from Synthetic Swine Wastewater", **Chemosphere**, Vol. 69, pp. 319-324.

Song, Y.H., Qiu, G.L., Yuan, P., Cui, X.Y., Peng, J.F., Zeng, P., Duan, L., Xiang, L.C., and Qian, F., 2011, "Nutrients Removal and Recovery from Anaerobically Digested Swine Wastewater by Struvite Crystallization without Chemical Additions", **Journal of Hazardous Materials**, Vol. 190, pp. 140-149.

Takai, Y., 1961, "Reduction and Microbial Metabolism in Paddy Soil(3)", **Nogyo Gijutsu**, Vol. 16, pp. 122-126.

Toyoaki, I., Mayumi, H. and Masahiko, S., 2002, "Effects of Iron Oxide on Methane Emission Rates and Rice Growth in Paddy Soil: a Pot Experiment", **17th World Congress of Soil Science**, 14-21 August 2002, Queen Sirikit National Convention Center, Bangkok, Vol. 1491, p. 1-6.

Turker, M. and Celen, I., 2007, "Removal of Ammonia as Struvite from Anaerobic Digester Effluents and Recycling of Magnesium and Phosphate", **Bioresource Technology**, Vol. 98, pp. 1529-1534.

Uludag-Demirer, S. and Othman, M., 2009, "Removal of Ammonium and Phosphate from the Supernatant of Anaerobically Digested Waste Activated Sludge by Chemical Precipitation", **Bioresource Technology**, Vol. 100, pp. 3236-3244.

Utgikar, V.P., Harmon, S.M., Chaudhary, N., Tabak, H.H., Govind, R. and Haines, J.R., 2002, "Inhibition of sulfate-Reducing Bacteria by Metal Sulfide Formation in Bioremediation of Acid Mine drainage", **Environmental Toxicology**, Vol. 17, No. 1, pp. 40-48.

Wahab, M.A., Jellali, S. and Jedidi, N., 2010, "Effect of Temperature and pH on the Biosorption of Ammonium onto Posidonia Oceanica Fiber: Equilibrium, and Kinetic Modeling studies", **Bioresource Technology**, Vol. 101, pp. 8606-8615.

Wang, C.-C., Hao, X.-D., Guo, G.-S. and Van Loosdrecht, M.C.M., 2010, "Formation of Pure Struvite at Neutral pH by Electrochemical Deposition", **Chemical Engineering Journal**, Vol. 159, pp. 280-283.

Wang, Z.P., Lindau, C.W., Delaune, R.D. and Patrick, W.H., 1993, "Methane Emission and Entrapment in Flooded Rice Soils as Affected by Soil Properties", **Biology and Fertility of Soils**, Vol. 16, pp. 163-168.

Watanabe, A. and Kimura, M., 1999, "Influence of Chemical Properties of Soils on Methane Emission from Rice Paddies", **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Vol. 30, pp. 2449-2463.

Weatherley, L.R. and Miladinovic, N.D., 2004, "Comparison of the Ion Exchange Uptake of Ammonium Ion onto New Zealand Clinoptilolite and Mordenite", **Water Resources**, Vol. 38, pp. 4305-4312.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) , 2012, **Global Warming Potentials[Online]**, Available : http://unfccc.int/ghg_data/items/3825.php [2013, February 2].

Yagi, K., Tsuruta, H. and Minami, K., 1997, "Possible Options for Mitigating Methane Emission from Rice Cultivation", **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Vol. 49, pp. 213-220.

Yao, H., Conrad, R., Wassmann, R. and Neue, H.U., 1999, "Effect of Soil Characteristics on Sequential Reduction and Methane Production in Sixteen Rice Paddy Soils from China, the Philippines and Italy", **Biogeochemistry**, Vol. 47, pp. 269-295.

Zhang, L., Keller, J. and Yuan, Z., 2009, "Inhibition of Sulfate-Reducing and Methanogenic Activities of Anaerobic Sewer Biofilms by Ferric Iron Dosing", **Water Research**, Vol. 43, pp. 4123-4132.

Zhang, T., Ding, L. and Ren, H., 2009, "Pretreatment of Ammonium Removal from Landfill Leachate by Chemical Precipitation", **Journal of Hazardous Materials**, Vol. 166, pp. 911-915.

Zhang, D.M., Chen, Y.X., Jilani, G., Wu, W.X., Liu, W.L. and Han, Z.Y., 2012, "Optimization of Struvite Crystallization Protocol for pretreating the Swine Wastewater and Its Impact on Subsequent Anaerobic biodegradation of Pollutants", **Bioresource Technology**, Vol. 116, pp. 386-395.

Zhou, J., Bruns, M.A. and Tiedje, J.M., 1996, "DNA Recovery from Soils of Diverse Composition", **Applied and Environmental Microbiology**, Vol. 62, No. 2, pp. 316-322.

ภาคผนวก ก.

ตารางผลการทดลองพารามิเตอร์ต่างๆ
จากกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยการใช้กระแสจริง

ตารางที่ ก.1 แสดงผลจากการคำนวณความเข้มข้นของฟอสฟอรัส

I (A)	Area (cm ²)	mA/cm ²	Time	Phosphorus (mg/l)			
				1	2	Avg	%Eff
1	104.5	9.57	0	32.50	35.03	33.77	0.00
			1	19.60	18.00	18.80	44.33
			2	12.40	13.33	12.87	61.90
			5	10.80	11.93	11.37	66.34
			10	7.80	7.53	7.67	77.30
			15	4.75	4.92	4.83	85.69
			30	5.10	5.43	5.27	84.40
			45	4.41	5.06	4.73	85.98
			60	5.20	5.33	5.27	84.40
2	104.5	19.14	0	33.77	33.77	33.77	0.00
			1	18.87	14.47	16.67	50.65
			2	18.53	13.17	15.85	53.06
			5	11.67	8.07	9.87	70.78
			10	9.43	6.37	7.90	76.61
			15	7.27	5.73	6.50	80.75
			30	7.20	3.77	5.48	83.76
			45	3.40	4.27	3.83	88.65
			60	1.17	1.80	1.48	95.61
3	104.5	28.71	0	35.80	23.70	29.75	0.00
			1	24.27	15.75	20.01	32.75
			2	12.53	12.65	12.59	57.68
			5	2.83	5.12	3.98	86.64
			10	1.67	3.37	2.52	91.54
			15	0.77	2.82	1.79	93.98
			30	0.47	1.37	0.92	96.92
			45	0.00	0.82	0.41	98.63
			60	0.00	0.28	0.14	99.52

ตารางที่ ก.2 แสดงผลจากการคำนวณความเข้มข้นของเหล็ก

I (A)	Area (cm ²)	mA/cm ²	Time	Fe (mg/l)		
				1	2	Avg
1	104.5	9.57	0	3.38	3.38	3.38
			1	24.50	20.50	22.50
			2	21.13	21.13	21.13
			5	38.63	51.63	45.13
			10	85.88	79.75	82.81
			15	127.50	118.63	123.06
			30	332.38	250.00	291.19
			45	343.75	363.00	353.38
			60	348.50	362.88	355.69
2	104.5	19.14	0	2.75	3.38	3.06
			1	18.75	22.25	20.50
			2	36.88	43.63	40.25
			5	73.00	80.00	76.50
			10	139.13	152.38	145.75
			15	195.38	264.13	229.75
			30	340.50	363.38	351.94
			45	369.75	364.88	367.31
			60	368.38	363.38	365.88
3	104.5	28.71	0	1.85	3.00	2.43
			1	28.06	28.00	28.03
			2	54.44	54.38	54.41
			5	122.63	120.75	121.69
			10	228.63	222.13	225.38
			15	327.75	319.50	323.63
			30	416.63	380.75	398.69
			45	377.13	380.13	378.63
			60	368.25	373.63	370.94

ตารางที่ ก.3 แสดงผลจากการคำนวณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูป COD

current density mA/cm ²	COD (mg/l)		% Removal COD
	Inf	Eff	
9.57	408	83.6	79.56
19.14	409.5	83.6	79.59
28.71	404.77	47.52	88.24

ตารางที่ ก.4 แสดงผลจากการคำนวณความเข้มข้นเหล็กในสารปรับปรุงคุณภาพดิน

current density mA/cm ²	Fe (mg Fe / g Soil conditioner mixing Iron)		
	1	2	Avg.
9.57	443.25	368.75	368.75
19.14	352.875	351.875	352.375
28.71	475	-	475

ตารางที่ ก.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA)

Control (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0	0	0	72	0	0	0	0	0	0	0	3.10
8/7/56	140.3	5.846	30.30	102.3	13782	13.3562	10.616456	10.6165	30.3312	30.3312	0.006066	
12/7/56	236.3	9.846	40.20	112.2	42040	33.5267	21.756383	32.3728	92.4892	62.1580	0.018498	
25/7/56	548.3	22.85	5.50	77.5	28902	35.3012	2.501323	34.8742	99.6355	7.1463	0.019927	

Control (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	3.00
8/7/56	140.3	5.85	27.85	99.85	10407	12.2342	9.491714	9.4917	27.1178	27.1178	0.005424	
12/7/56	236.3	9.85	42.9	114.90	37885	31.0027	20.834073	30.3258	86.6408	59.5229	0.017328	
25/7/56	548.3	22.85	6.20	78.20	30036	34.7774	3.787085	34.1129	97.4605	10.8197	0.019492	

ตารางที่ ก.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 9.57 mA/cm ² 0.05g (1)												
Date	Time		gas production	Total gas volume	gas analysis		CH ₄ production	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day	(ml)	(ml)	CH ₄ area	%CH ₄	(ml) at 0°C	(ml)	(mgCOD)	(mgCOD)		
1/7/56	0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.2
8/7/56	140.3	5.85	51.00	123.00	28251	29.4665	28.161429	28.1614	80.4572	80.4572	0.016091	
12/7/56	236.3	9.85	18.10	90.10	41100	33.0369	6.643635	34.8051	99.4381	18.9809	0.019888	
25/7/56	548.3	22.85	2.90	74.90	29521	35.4995	2.177587	36.9827	105.6594	6.2214	0.021132	

Soil conditioner from EC process at current density 9.57 mA/cm ² 0.05g (2)												
Date	Time		gas production	Total gas volume	gas analysis		CH ₄ production	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day	(ml)	(ml)	CH ₄ area	%CH ₄	(ml) at 0°C	(ml)	(mgCOD)	(mgCOD)		
1/7/56	0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.3
8/7/56	140.3	5.85	46.30	118.30	25128	26.6023	24.452595	24.4526	69.8611	69.8611	0.013972	
12/7/56	236.3	9.85	23.30	95.30	38773	33.2284	9.722608	34.1752	97.6386	27.7775	0.019528	
25/7/56	548.3	22.85	3.50	75.50	30973	36.2779	2.692590	36.8678	105.3313	7.6927	0.021066	

ตารางที่ ก.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 9.57 mA/cm ² 0.1g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Total gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.1
8/7/56	140.3	5.85	62.00	134.00	32944	34.8295	36.263779	36.2638	103.6056	103.6056	0.020721	
12/7/56	236.3	9.85	5.80	77.80	41629	34.1405	1.153122	37.4169	106.9001	3.2945	0.021380	
25/7/56	548.3	22.85	2.50	74.50	31360	36.788	2.195724	39.6126	113.1733	6.2732	0.022635	

Soil conditioner from EC process at current density 9.57 mA/cm ² 0.1g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Total gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.2
8/7/56	140.3	5.85	58.15	130.15	32603	33.4618	33.838764	33.8388	96.6773	96.6773	0.019335	
12/7/56	236.3	9.85	12.50	84.50	40056	33.5439	3.303881	37.1426	106.1165	9.4392	0.021223	
25/7/56	548.3	22.85	2.50	74.50	31274	36.0632	2.109925	39.2526	112.1446	6.0281	0.022429	

ตารางที่ ก.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 9.57 mA/cm ² 0.5g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Total gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.1
8/7/56	140.3	5.85	53.40	125.40	27662	33.407	32.550378	32.5504	92.9964	92.9964	0.018599	
12/7/56	236.3	9.85	2.10	74.10	35587	34.7249	1.303892	33.8543	96.7216	3.7252	0.019344	
25/7/56	548.3	22.85	1.80	73.80	32620	37.8666	2.287195	36.1415	103.2562	6.5345	0.020651	

Soil conditioner from EC process at current density 9.57 mA/cm ² 0.5g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Total gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.1
8/7/56	140.3	5.85	55.30	127.30	31384	33.3471	32.984317	32.9843	94.2362	94.2362	0.018847	
12/7/56	236.3	9.85	1.90	73.90	40398	34.1753	0.967858	33.9522	97.0014	2.7652	0.019400	
25/7/56	548.3	22.85	1.50	73.50	33911	38.997	3.151962	37.1041	106.0065	9.0052	0.021201	

ตารางที่ ก.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 19.14 mA/cm ² 0.05g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.1
8/7/56	140.3	5.85	48.95	120.95	27243	28.2937	26.589896	26.5899	75.9673	75.9673	0.015193	
12/7/56	236.3	9.85	9.70	81.70	35205	29.4131	2.843073	29.4330	84.0900	8.1227	0.016818	
25/7/56	548.3	22.85	1.80	73.80	27560	31.6674	1.704046	31.1370	88.9585	4.8685	0.017792	

Soil conditioner from EC process at current density 19.14 mA/cm ² 0.05g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.3
8/7/56	140.3	5.85	34.30	106.30	20211	20.682	17.082319	17.0823	48.8042	48.8042	0.009761	
12/7/56	236.3	9.85	24.10	96.10	36044	30.0495	10.867533	27.9499	79.8527	31.0485	0.015971	
25/7/56	548.3	22.85	1.80	73.80	28575	32.0096	1.544245	29.4941	84.2646	4.4119	0.016853	

ตารางที่ ก.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 19.14 mA/cm ² 0.1g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.1
8/7/56	140.3	5.85	61.00	133.00	32545	34.5298	35.683441	35.6834	101.9476	101.9476	0.020390	
12/7/56	236.3	9.85	5.10	77.10	41265	34.3444	1.257245	36.9407	105.5395	3.5920	0.021108	
25/7/56	548.3	22.85	1.80	73.80	31411	36.7825	1.878411	38.8191	110.9062	5.3666	0.022181	

Soil conditioner from EC process at current density 19.14 mA/cm ² 0.1g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.2
8/7/56	140.3	5.85	54.00	126.00	26969	33.3149	32.615953	32.6160	93.1838	93.1838	0.018637	
12/7/56	236.3	9.85	11.30	83.30	41968	33.7748	3.222748	35.8387	102.3912	9.2074	0.020478	
25/7/56	548.3	22.85	2.00	74.00	31680	36.4956	2.089266	37.9280	108.3602	5.9690	0.021672	

ตารางที่ ก.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 19.14 mA/cm ² 0.5g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Total gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.2
8/7/56	140.3	5.85	45.35	117.35	32327	33.8908	30.901953	30.9020	88.2869	88.2869	0.017657	
12/7/56	236.3	9.85	5.40	77.40	40832	34.574	1.832865	32.7348	93.5234	5.2365	0.018705	
25/7/56	548.3	22.85	1.20	73.20	32611	39.1017	2.897561	35.6324	101.8017	8.2783	0.020360	

Soil conditioner from EC process at current density 19.14 mA/cm ² 0.5g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Total gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.1
8/7/56	140.3	5.85	48.40	120.40	30859	33.6625	31.491538	31.4915	89.9713	89.9713	0.017994	
12/7/56	236.3	9.85	2.00	74.00	41014	34.9829	1.282319	32.7739	93.6349	3.6636	0.018727	
25/7/56	548.3	22.85	2.30	74.30	31020	37.866	2.289625	35.0635	100.1764	6.5415	0.020035	

ตารางที่ ก.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 28.71 mA/cm ² 0.05g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.2
8/7/56	140.3	5.85	55.45	127.45	26002	31.2625	30.958832	30.9588	88.4494	88.4494	0.017690	
12/7/56	236.3	9.85	12.20	84.20	41045	33.6975	4.556557	35.5154	101.4675	13.0181	0.020293	
25/7/56	548.3	22.85	3.10	75.10	28865	35.5474	1.891138	37.4065	106.8704	5.4030	0.021374	

Soil conditioner from EC process at current density 28.71 mA/cm ² 0.05g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.2
8/7/56	140.3	5.85	53.00	125.00	30427	30.9555	30.065529	30.0655	85.8972	85.8972	0.017179	
12/7/56	236.3	9.85	13.60	85.60	39134	32.0346	3.988852	34.0544	97.2934	11.3962	0.019459	
25/7/56	548.3	22.85	3.30	75.30	29330	34.7233	2.394506	36.4489	104.1345	6.8411	0.020827	

ตารางที่ ก.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 28.71 mA/cm ² 0.1g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.1
8/7/56	140.3	5.85	54.15	126.15	30562	32.9536	32.300641	32.3006	92.2829	92.2829	0.018457	
12/7/56	236.3	9.85	7.70	79.70	40235	33.9749	2.604040	34.9047	99.7227	7.4397	0.019945	
25/7/56	548.3	22.85	2.50	74.50	28966	36.1545	1.921657	36.8263	105.2128	5.4902	0.021043	

Soil conditioner from EC process at current density 28.71 mA/cm ² 0.1g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.1
8/7/56	140.3	5.85	62.45	134.45	30188	32.405	33.852742	33.8527	96.7173	96.7173	0.019343	
12/7/56	236.3	9.85	2.00	74.00	40271	32.3398	0.466085	34.3188	98.0489	1.3316	0.019610	
25/7/56	548.3	22.85	1.50	73.50	30351	35.7678	2.334634	36.6535	104.7189	6.6700	0.020944	

ตารางที่ ก.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 28.71 mA/cm ² 0.5g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Total gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.1
8/7/56	140.3	5.85	40.50	112.50	29184	30.8607	26.976109	26.9761	77.0707	77.0707	0.015414	
12/7/56	236.3	9.85	1.80	73.80	37501	31.7224	0.925739	27.9018	79.7156	2.6448	0.015943	
25/7/56	548.3	22.85	2.20	74.20	29317	36.2044	3.126288	31.0281	88.6474	8.9318	0.017729	

Soil conditioner from EC process at current density 28.71 mA/cm ² 0.5g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Total gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
1/7/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.2
8/7/56	140.3	5.85	37.10	109.10	29403	31.267	26.505255	26.5053	75.7255	75.7255	0.015145	
12/7/56	236.3	9.85	4.40	76.40	38348	31.362	1.125351	27.6306	78.9406	3.2151	0.015788	
25/7/56	548.3	22.85	1.70	73.70	30786	37.1363	3.720908	31.3515	89.5713	10.6306	0.017914	

ภาคผนวก ข.

ตารางผลการทดลองพารามิเตอร์ต่างๆ จากกระบวนการไฟฟ้าเคมี
โดยการใช้ น้ำเสืงสังเคราะห์ที่มีการปรับ pH ก่อนดำเนินงาน

ตารางที่ ข.1 แสดงผลจากการคำนวณความเข้มข้นของฟอสฟอรัส

Date	I(A)	Area of plate (cm ²)	Current density (mA/cm ²)	Time (min)	P(Soluble)							% Eff	Avg. %Eff
					Inf			Eff					
					ml	abs	mg/l	ml	abs	mg/l	Avg.		
17/9/2556	1	253.5	3.94	60	1	0.6090	40.60	2	0.0685	2.28	2.28	94.46	85.87
					1	0.6090	40.60	1	0.1405	9.37		77.28	
25/9/2556	1	253.5	3.94	30	1	0.6635	44.23	2	0.0880	2.93	2.83	94.00	94.22
					1	0.6635	44.23	2	0.0815	2.72		94.44	
26/9/2556	2	253.5	7.89	60	2	1.2295	40.98	2	0.1295	4.32	4.51	89.78	89.33
					2	1.2295	40.98	2	0.1410	4.70		88.88	
25/9/2556	2	253.5	7.89	30	2	1.0275	34.25	2	0.0925	3.08	3.18	91.77	91.50
					2	1.0275	34.25	2	0.0985	3.28		91.23	
30/9/2556	3	253.5	11.83	60	2	1.1400	38.00	2	0.1735	5.78	5.68	84.81	85.09
					2	1.1400	38.00	2	0.1670	5.57		85.38	
30/9/2556	3	253.5	11.83	30	2	1.2295	40.98	2	0.1920	6.40	6.26	84.85	84.39
					2	1.1400	38.00	2	0.1835	6.12		83.93	

ตารางที่ ข.2 แสดงค่า pH จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมี

Time	3.94 mA cm ⁻²					Avg.
0	9.493	9.439	9.509	9.507	9.509	9.49
5	9.56	9.518	9.528	9.627	9.632	9.57
10	9.564	9.523	9.533	9.629	9.65	9.58
15	9.578	9.531	9.627	9.632	9.662	9.61
20	9.608	9.544	9.673	9.658	9.705	9.64
25	9.628	9.558	9.676	9.672	9.748	9.66
30	9.635	9.568	9.699	9.709	9.81	9.68

Time	7.89 mA cm ⁻²				Avg.
0	9.488	9.559	9.468	9.539	9.51
5	9.571	9.874	9.642	10.315	9.85
10	9.522	9.85	9.663	10.438	9.88
15	9.67	9.865	9.668	10.506	9.91
20	9.691	9.901	9.67	10.661	9.97
25	9.702	9.936	9.686	10.763	10.01
30	9.709	9.939	9.688	10.803	10.03

Time	11.83 mA cm ⁻²							Avg.
0	9.483	9.515	9.49	9.51	9.50	9.50	9.50	9.50
5	9.895	9.677	9.59	10.11	9.87	10.12	9.88	9.88
10	9.925	9.712	9.594	10.25	9.98	10.49	10.10	10.01
15	9.959	9.721	9.676	10.39	10.01	10.69	10.39	10.12
20	9.99	9.767	9.687	10.5	10.04	10.72	10.40	10.16
25	10.011	9.782	9.717	10.57	10.14	10.73	10.42	10.20
30	10.085	9.801	9.759	10.73	10.31	10.76	10.50	10.28

ตารางที่ ข.2 แสดงค่า pH จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมี (ต่อ)

Time	3.94 mA cm ⁻²					Avg.
0	9.518	9.513	9.513	9.497	9.498	9.51
5	9.705	9.584	9.652	9.663	9.637	9.65
10	9.711	9.595	9.661	9.665	9.648	9.66
15	9.732	9.595	9.669	9.666	9.673	9.67
20	9.741	9.596	9.69	9.683	9.702	9.68
25	9.748	9.597	9.723	9.711	9.717	9.70
30	9.783	9.644	9.759	9.725	9.748	9.73
35	9.791	9.679	9.798	9.739	9.749	9.75
40	9.799	9.696	9.831	9.782	9.757	9.77
45	9.808	9.7	9.759	9.802	9.773	9.77
50	9.86	9.717	9.785	9.85	9.79	9.80
55	9.823	9.717	9.826	9.874	9.805	9.81
60	9.893	9.722	9.848	9.91	9.812	9.84

Time	7.89 mA cm ⁻²		Avg.
0	9.49	9.500	9.50
5	10.06	9.551	9.81
10	10.07	9.569	9.82
15	10.14	9.681	9.91
20	10.21	9.771	9.99
25	10.28	9.786	10.03
30	10.30	9.815	10.06
35	10.34	9.826	10.08
40	10.38	9.846	10.11
45	10.42	9.865	10.14
50	10.45	9.896	10.17
55	10.47	9.902	10.18
60	10.52	9.975	10.25

ตารางที่ ข.2 แสดงค่า pH จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมี (ต่อ)

Time	11.83 mA cm ⁻²								Avg.
0	9.51	9.446	9.471	9.51	9.51	9.50	9.50	9.50	9.49
5	9.757	9.651	9.668	9.85	9.86	9.92	9.87	9.96	9.82
10	9.796	9.769	9.708	9.94	10.33	10.40	9.95	10.05	9.99
15	9.908	9.881	9.778	10.03	10.33	10.47	10.02	10.15	10.07
20	9.918	9.982	9.887	10.06	10.40	10.63	10.26	10.28	10.18
25	9.946	9.986	9.986	10.08	10.52	10.69	10.33	10.3	10.23
30	9.972	10.015	9.988	10.08	10.54	10.70	10.40	10.37	10.26
35	9.957	10.061	10.06	10.13	10.66	10.74	10.61	10.45	10.33
40	9.985	10.064	10.23	10.13	10.75	10.74	10.65	10.47	10.38
45	10.006	10.065	10.23	10.20	10.76	10.80	10.68	10.54	10.41
50	10.026	10.069	10.25	10.21	10.83	10.81	10.68	10.56	10.43
55	10.043	10.082	10.47	10.24	10.85	10.88	10.69	10.60	10.48
60	10.049	10.09	10.55	10.33	10.90	11.09	10.97	10.64	10.58

ตารางที่ ข.3 แสดงผลจากการคำนวณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูป COD

Current density (mA cm ⁻²)	Time (min)	COD (mg/l)		%Removal
		Inf	Eff	
3.94	30	1000	773.55	22.64
	60	1000	727.87	27.21
7.89	30	1000	649.18	35.08
	60	1000	668.85	33.11
11.83	30	1000	786.89	21.31
	60	1000	786.89	21.31

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA)

Control (1)												
Date	Time		gas production	Tatal gas volume	gas analysis		CH ₄ production	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day	(ml)	(ml)	CH ₄ area	%CH ₄	(ml) at 0°C	(ml)	(mgCOD)	(mgCOD)		
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.5
24/10/56	36.0	1.50	11.25	83.25	434	0.6552	0.423818	0.4238	1.2108	1.2108	0.000242	
25/10/56	60.0	2.50	1.65	73.65	104	0.9537	0.179220	0.6030	1.7229	0.5120	0.000345	
29/10/56	156.5	6.52	2.55	74.55	245	1.4268	0.292941	0.8960	2.5598	0.8369	0.000512	
30/10/56	180.5	7.52	1.15	73.15	1435	2.2981	0.507975	1.4040	4.0111	1.4513	0.000802	
31/10/56	204.5	8.52	0.60	72.60	1023	2.3648	0.048339	1.4523	4.1492	0.1381	0.000830	
13/11/56	524.6	21.86	20.90	92.90	11191	16.6272	10.679098	12.1314	34.6594	30.5102	0.006932	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Control (2)												
Date	Time		gas production	Total gas volume	gas analysis		CH ₄ production	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day	(ml)	(ml)	CH ₄ area	%CH ₄	(ml) at 0°C	(ml)	(mgCOD)	(mgCOD)		
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.5
24/10/56	36.0	1.50	11.25	83.25	280	0.4306	0.278535	0.2785	0.7958	0.7958	0.000159	
25/10/56	60.0	2.50	1.90	73.90	482	0.7906	0.213070	0.4916	1.4045	0.6087	0.000281	
30/10/56	180.5	7.52	0.65	72.65	393	1.6235	0.474157	0.9658	2.7592	1.3547	0.000552	
1/11/56	229.5	9.56	0.90	72.90	1268	1.7407	0.077739	1.0435	2.9813	0.2221	0.000596	
13/11/56	524.6	21.86	21.40	93.40	10902	16.3318	10.878464	11.9220	34.0611	31.0798	0.006812	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner (no iron) 1g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.9
23/10/56	12.0	0.50	6.10	78.10	419	0.4372	0.265309	0.2653	0.7580	0.7580	0.000152	
24/10/56	36.0	1.50	3.15	75.15	1102	1.8614	0.842313	1.1076	3.1645	2.4065	0.000633	
25/10/56	60.0	2.50	1.40	73.40	2389	2.7366	0.519391	1.6270	4.6484	1.4839	0.000930	
26/10/56	84.0	3.50	2.90	74.90	529	3.6652	0.602084	2.2291	6.3685	1.7202	0.001274	
31/10/56	204.5	8.52	7.80	79.80	1429	14.4715	6.922536	9.1516	26.1462	19.7777	0.005229	
1/11/56	229.5	9.56	5.40	77.40	3743	18.1706	2.831827	11.9835	34.2367	8.0905	0.006847	
4/11/56	302.8	12.62	6.00	78.00	4652	22.5285	3.488262	15.4717	44.2027	9.9660	0.008841	
13/11/56	524.6	21.86	2.80	74.80	20962	31.7215	5.833065	21.3048	60.8678	16.6651	0.012174	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner (no iron) 1g (2)												
Date	Time		gas production	Total gas volume	gas analysis		CH ₄ production	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day	(ml)	(ml)	CH ₄ area	%CH ₄	(ml) at 0°C	(ml)	(mgCOD)	(mgCOD)		
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	1.1
23/10/56	12.0	0.50	6.10	78.10	476	0.5033	0.305421	0.3054	0.8726	0.8726	0.000175	
24/10/56	36.0	1.50	2.90	74.90	1316	2.0226	0.895532	1.2010	3.4311	2.5585	0.000686	
29/10/56	156.5	6.52	8.50	80.50	1440	12.232	6.519409	7.7204	22.0571	18.6260	0.004411	
30/10/56	180.5	7.52	4.90	76.90	5038	14.0763	1.567702	9.2881	26.5360	4.4789	0.005307	
31/10/56	204.5	8.52	5.15	77.15	3427	16.5134	2.024203	11.3123	32.3191	5.7831	0.006464	
1/11/56	229.5	9.56	4.40	76.40	1470	19.3247	2.233427	13.5457	38.7000	6.3809	0.007740	
8/11/56	397.3	16.55	4.40	76.40	7795	32.7123	8.607927	22.1536	63.2929	24.5928	0.012659	
13/11/56	524.6	21.86	10.15	82.15	19783	30.9488	1.454220	23.6078	67.4476	4.1547	0.013490	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner (no iron) 5g												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	3.0
23/10/56	12.0	0.50	5.85	77.85	711	0.756	0.457300	0.4573	1.3065	1.3065	0.000261	
24/10/56	36.0	1.50	4.65	76.65	1976	3.3525	1.573713	2.0310	5.8026	4.4961	0.001161	
25/10/56	60.0	2.50	3.90	75.90	3567	4.7244	0.910659	2.9417	8.4044	2.6018	0.001681	
26/10/56	84.0	3.50	4.90	76.90	288	5.1434	0.430230	3.3719	9.6335	1.2292	0.001927	
29/10/56	156.5	6.52	5.40	77.40	984.5	9.8944	3.073049	6.4450	18.4132	8.7797	0.003683	
30/10/56	180.5	7.52	3.15	75.15	3028	11.0328	0.906900	7.3519	21.0042	2.5910	0.004201	
31/10/56	204.5	8.52	3.90	75.90	2237	12.5721	1.242118	8.5940	24.5530	3.5487	0.004911	
1/11/56	229.5	9.56	4.40	76.40	8816	15.5386	2.190812	10.7848	30.8121	6.2592	0.006162	
4/11/56	302.8	12.62	25.00	97.00	7191	34.7211	17.476031	28.2608	80.7411	49.9290	0.016148	
8/11/56	397.3	16.55	16.00	88.00	12647	57.06	19.590973	47.8518	136.7126	55.9714	0.027343	
13/11/56	524.6	21.86	32.00	104.00	32423	50.1042	8.566556	56.4183	161.1872	24.4746	0.032237	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 3.94 mA/cm ² 30min 1g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.3
24/10/56	36.0	1.50	5.00	77.00	251	0.3849	0.230282	0.2303	0.6579	0.6579	0.000132	
30/10/56	180.5	7.52	3.95	75.95	1581	8.7464	4.946198	5.1765	14.7892	14.1313	0.002958	
31/10/56	204.5	8.52	0.90	72.90	1621	9.5516	0.517255	5.6937	16.2670	1.4778	0.003253	
1/11/56	229.5	9.56	1.15	73.15	4839	10.3263	0.525669	6.2194	17.7688	1.5018	0.003554	
4/11/56	302.8	12.62	0.70	72.70	1439	10.5726	0.195294	6.4147	18.3268	0.5580	0.003665	
8/11/56	397.3	16.55	1.90	73.90	4178	16.9055	3.792453	10.2072	29.1618	10.8350	0.005832	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	10967	15.0574	-0.987103	9.2200	26.3417	-2.8202	0.005268	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 3.94 mA/cm ² 30min 1g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.5
24/10/56	36.0	1.50	1.90	73.90	373	0.5732	0.329133	0.3291	0.9403	0.9403	0.000188	
25/10/56	60.0	2.50	0.44	72.44	370	0.9377	0.207122	0.5363	1.5321	0.5917	0.000306	
29/10/56	156.5	6.52	6.40	78.40	1371	9.857	5.479982	6.0162	17.1884	15.6563	0.003438	
30/10/56	180.5	7.52	4.15	76.15	2997.5	10.6372	0.779477	6.7957	19.4154	2.2270	0.003883	
31/10/56	204.5	8.52	2.15	74.15	1037	11.727	0.805583	7.6013	21.7169	2.3016	0.004343	
1/11/56	229.5	9.56	1.40	73.40	2756	11.7305	0.129562	7.7309	22.0871	0.3702	0.004417	
8/11/56	397.3	16.55	2.75	74.75	4469	18.4582	4.158150	11.8890	33.9669	11.8798	0.006793	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	11163	15.7139	-1.486432	10.4026	29.7202	-4.2467	0.005944	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 3.94 mA/cm ² 30min 5g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.3
24/10/56	36.0	1.50	1.20	73.20	147	0.2265	0.128825	0.1288	0.3681	0.3681	0.000074	
29/10/56	156.5	6.52	4.90	76.90	124	1.5446	0.796205	0.9250	2.6428	2.2748	0.000529	
30/10/56	180.5	7.52	0.40	72.40	1065	4.4745	1.653010	2.5780	7.3655	4.7226	0.001473	
31/10/56	204.5	8.52	0.40	72.40	1551	5.0363	0.329946	2.9080	8.3081	0.9427	0.001662	
1/11/56	229.5	9.56	0.40	72.40	3223	6.0044	0.560256	3.4682	9.9088	1.6007	0.001982	
8/11/56	397.3	16.55	1.10	73.10	3679	10.9296	2.848769	6.3170	18.0477	8.1389	0.003610	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	10913	15.5556	2.636316	8.9533	25.5797	7.5320	0.005116	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 3.94 mA/cm ² 30min 5g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.2
24/10/56	36.0	1.50	1.00	73.00	124	0.1951	0.110663	0.1107	0.3162	0.3162	0.000063	
30/10/56	180.5	7.52	1.00	73.00	717	3.6377	1.954193	2.0649	5.8993	5.5831	0.001180	
31/10/56	204.5	8.52	0.40	72.40	1058	4.3449	0.409140	2.4740	7.0682	1.1689	0.001414	
1/11/56	229.5	9.56	0.40	72.40	1585	4.7856	0.261419	2.7354	7.8151	0.7469	0.001563	
8/11/56	397.3	16.55	1.00	73.00	3010	8.784	2.305117	5.0405	14.4008	6.5857	0.002880	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	9813	13.2307	2.528783	7.5693	21.6255	7.2247	0.004325	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 3.94 mA/cm ² 60min 1g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.7
24/10/56	36.0	1.50	1.40	73.40	440	0.6803	0.387987	0.3880	1.1085	1.1085	0.000222	
26/10/56	84.0	3.50	0.80	72.80	348	2.9532	1.289908	1.6779	4.7937	3.6853	0.000959	
29/10/56	156.5	6.52	3.90	75.90	1392	11.0963	4.891827	6.5697	18.7697	13.9759	0.003754	
30/10/56	180.5	7.52	1.90	73.90	5290	12.8082	1.146793	7.7165	22.0461	3.2764	0.004409	
31/10/56	204.5	8.52	1.90	73.90	2336	15.0599	1.482020	9.1985	26.2802	4.2341	0.005256	
1/11/56	229.5	9.56	1.40	73.40	9338	16.4535	0.958617	10.1572	29.0190	2.7388	0.005804	
8/11/56	397.3	16.55	2.90	74.90	6294	21.7392	3.446881	13.6040	38.8667	9.8477	0.007773	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	16850	22.6361	0.572115	14.1761	40.5013	1.6345	0.008100	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 3.94 mA/cm ² 60min 1g (2)												
Date	Time		gas production	Total gas volume	gas analysis		CH ₄ production	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day	(ml)	(ml)	CH ₄ area	%CH ₄	(ml) at 0°C	(ml)	(mgCOD)	(mgCOD)		
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.6
24/10/56	36.0	1.50	3.00	75.00	399	0.6534	0.380769	0.3808	1.0879	1.0879	0.000218	
25/10/56	60.0	2.50	0.40	72.40	131	1.0639	0.232957	0.6137	1.7534	0.6656	0.000351	
30/10/56	180.5	7.52	2.40	74.40	2665	11.9231	6.297413	6.9111	19.7451	17.9917	0.003949	
31/10/56	204.5	8.52	1.90	73.90	1787	15.2344	2.077379	8.9885	25.6802	5.9351	0.005136	
1/11/56	229.5	9.56	0.65	72.65	9543	15.3226	0.126729	9.1152	26.0423	0.3621	0.005208	
8/11/56	397.3	16.55	2.40	74.40	5907	20.5706	3.319542	12.4348	35.5262	9.4839	0.007105	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	16223	22.0913	0.919400	13.3542	38.1529	2.6267	0.007631	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 3.94 mA/cm ² 60min 5g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.2
23/10/56	12.0	0.50	1.10	73.10	126	0.1341	0.076167	0.0762	0.2176	0.2176	0.000044	
24/10/56	36.0	1.50	0.90	72.90	283	0.4817	0.197830	0.2740	0.7828	0.5652	0.000157	
29/10/56	156.5	6.52	1.70	73.70	455	3.4377	1.699113	1.9731	5.6372	4.8544	0.001127	
30/10/56	180.5	7.52	0.40	72.40	698	1.6571	-0.990989	0.9821	2.8059	-2.8313	0.000561	
13/11/56	524.6	21.86	2.00	74.00	2553	3.4383	1.049906	2.0320	5.8055	2.9996	0.001161	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 3.94 mA/cm ² 60min 5g (2)												
Date	Time		gas production	Tatal gas volume	gas analysis		CH ₄ production	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day	(ml)	(ml)	CH ₄ area	%CH ₄	(ml) at 0°C	(ml)	(mgCOD)	(mgCOD)		
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.07
23/10/56	12.0	0.50	1.10	73.10	108	0.1342	0.076224	0.0762	0.2178	0.2178	0.000044	
24/10/56	36.0	1.50	0.65	72.65	249	0.3926	0.146542	0.2228	0.6364	0.4187	0.000127	
30/10/56	180.5	7.52	0.40	72.40	895	1.7121	0.743502	0.9663	2.7606	2.1242	0.000552	
13/11/56	524.6	21.86	1.60	73.60	2275	2.9437	0.725602	1.6919	4.8337	2.0730	0.000967	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 7.89 mA/cm ² 30min 1g (1)												
Date	Time		gas production	Tatal gas volume	gas analysis		CH ₄ production	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day	(ml)	(ml)	CH ₄ area	%CH ₄	(ml) at 0°C	(ml)	(mgCOD)	(mgCOD)		
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.6
23/10/56	12.0	0.50	5.10	77.10	135	0.1418	0.084948	0.0849	0.2427	0.2427	0.000049	
24/10/56	36.0	1.50	2.15	74.15	654	1.0769	0.541122	0.6261	1.7887	1.5460	0.000358	
30/10/56	180.5	7.52	1.95	73.95	1752	12.166	6.388019	7.0141	20.0393	18.2506	0.004008	
31/10/56	204.5	8.52	0.40	72.40	1005	13.5175	0.798096	7.8122	22.3194	2.2802	0.004464	
1/11/56	229.5	9.56	0.40	72.40	6127	13.421	-0.012273	7.7999	22.2843	-0.0351	0.004457	
8/11/56	397.3	16.55	0.80	72.80	4488	14.5671	0.731723	8.5316	24.3749	2.0905	0.004875	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	11341	15.6433	0.650689	9.1823	26.2339	1.8590	0.005247	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 7.89 mA/cm ² 30min 1g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.6
23/10/56	12.0	0.50	4.60	76.60	130	0.142	0.084516	0.0845	0.2415	0.2415	0.000048	
24/10/56	36.0	1.50	2.15	74.15	603	1.0026	0.498203	0.5827	1.6648	1.4234	0.000333	
29/10/56	156.5	6.52	2.30	74.30	1807	10.9202	5.743457	6.3262	18.0739	16.4091	0.003615	
30/10/56	180.5	7.52	0.40	72.40	1709	11.5517	0.389189	6.7154	19.1858	1.1119	0.003837	
31/10/56	204.5	8.52	0.40	72.40	2809	12.8152	0.746682	7.4620	21.3191	2.1333	0.004264	
1/11/56	229.5	9.56	0.40	72.40	4157	13.2789	0.300683	7.7627	22.1781	0.8591	0.004436	
8/11/56	397.3	16.55	0.40	72.40	4667	15.2516	1.151009	8.9137	25.4666	3.2884	0.005093	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	11219	15.4867	0.179657	9.0934	25.9798	0.5133	0.005196	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 7.89 mA/cm ² 30min 5g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.2
23/10/56	12.0	0.50	0.60	72.60	152	0.1667	0.094036	0.0940	0.2687	0.2687	0.000054	
24/10/56	36.0	1.50	0.40	72.40	253	0.5436	0.212542	0.3066	0.8759	0.6072	0.000175	
26/10/56	84.0	3.50	0.80	72.80	272	1.5785	0.588776	0.8954	2.5580	1.6821	0.000512	
30/10/56	180.5	7.52	0.40	72.40	1188	3.9788	1.355190	2.2505	6.4298	3.8718	0.001286	
31/10/56	204.5	8.52	0.40	72.40	1362	4.0712	0.064346	2.3149	6.6136	0.1838	0.001323	
1/11/56	229.5	9.56	0.40	72.40	1184	4.1967	0.083253	2.3981	6.8515	0.2379	0.001370	
8/11/56	397.3	16.55	0.80	72.80	1352	4.2099	0.033553	2.4317	6.9474	0.0959	0.001389	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	3382	4.4184	0.130376	2.5621	7.3198	0.3725	0.001464	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 7.89 mA/cm ² 30min 5g (2)												
Date	Time		gas production	Tatal gas volume	gas analysis		CH ₄ production	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day	(ml)	(ml)	CH ₄ area	%CH ₄	(ml) at 0°C	(ml)	(mgCOD)	(mgCOD)		
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.2
23/10/56	12.0	0.50	0.60	72.60	176	0.1929	0.108815	0.1088	0.3109	0.3109	0.000062	
24/10/56	36.0	1.50	0.40	72.40	374	0.6219	0.241933	0.3507	1.0021	0.6912	0.000200	
29/10/56	156.5	6.52	1.30	73.30	682	4.1003	1.987373	2.3381	6.6800	5.6779	0.001336	
30/10/56	180.5	7.52	0.40	72.40	769	4.6559	0.325295	2.6634	7.6094	0.9294	0.001522	
8/11/56	397.3	16.55	0.80	72.80	1680	6.0875	0.838734	3.5022	10.0056	2.3963	0.002001	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	4742	6.2924	0.134186	3.6363	10.3890	0.3834	0.002078	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 7.89 mA/cm ² 60min 1g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.6
23/10/56	12.0	0.50	5.85	77.85	160	0.1724	0.104284	0.1043	0.2979	0.2979	0.000060	
24/10/56	36.0	1.50	1.40	73.40	360	0.6913	0.297813	0.4021	1.1488	0.8509	0.000230	
26/10/56	84.0	3.50	0.80	72.80	313	2.7902	1.191552	1.5936	4.5531	3.4043	0.000911	
29/10/56	156.5	6.52	2.40	74.40	1033	9.5148	3.939442	5.5331	15.8080	11.2550	0.003162	
30/10/56	180.5	7.52	1.15	73.15	2046	11.3267	1.114859	6.6480	18.9932	3.1852	0.003799	
1/11/56	229.5	9.56	1.30	73.30	3445	13.1347	1.144141	7.7921	22.2620	3.2688	0.004452	
8/11/56	397.3	16.55	1.30	73.30	4767	17.2659	2.485561	10.2777	29.3633	7.1012	0.005873	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	12917	17.248	0.043593	10.3212	29.4878	0.1245	0.005898	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 7.89 mA/cm ² 60min 1g (2)												
Date	Time		gas production	Tatal gas volume	gas analysis		CH ₄ production	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day	(ml)	(ml)	CH ₄ area	%CH ₄	(ml) at 0°C	(ml)	(mgCOD)	(mgCOD)		
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.7
23/10/56	12.0	0.50	5.60	77.60	122	0.1375	0.082906	0.0829	0.2369	0.2369	0.000047	
24/10/56	36.0	1.50	1.90	73.90	530	0.8422	0.406671	0.4896	1.3987	1.1619	0.000280	
30/10/56	180.5	7.52	2.80	74.80	2770	11.4285	6.171038	6.6606	19.0294	17.6307	0.003806	
31/10/56	204.5	8.52	2.40	74.40	2220	15.1703	2.376208	9.0368	25.8182	6.7888	0.005164	
1/11/56	229.5	9.56	0.90	72.90	2576	16.1787	0.677277	9.7141	27.7532	1.9350	0.005551	
8/11/56	397.3	16.55	2.15	74.15	5660	20.346	2.671244	12.3853	35.3849	7.6317	0.007077	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	16517	21.8871	0.930178	13.3155	38.0424	2.6575	0.007608	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 7.89 mA/cm ² 60min 5g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.6
23/10/56	12.0	0.50	1.10	73.10	329	0.3636	0.206520	0.2065	0.5900	0.5900	0.000118	
24/10/56	36.0	1.50	0.90	72.90	669	1.0399	0.385621	0.5921	1.6917	1.1017	0.000338	
29/10/56	156.5	6.52	1.70	73.70	493	6.051	2.883337	3.4755	9.9294	8.2377	0.001986	
30/10/56	180.5	7.52	0.40	72.40	2629	7.2757	0.707759	4.1832	11.9515	2.0221	0.002390	
31/10/56	204.5	8.52	0.40	72.40	3452	8.8132	0.887530	5.0708	14.4872	2.5357	0.002897	
1/11/56	229.5	9.56	0.65	72.65	1823	10.0713	0.754697	5.8255	16.6434	2.1562	0.003329	
8/11/56	397.3	16.55	9.80	81.80	6543	22.1173	8.423158	14.2486	40.7083	24.0650	0.008142	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	18230	25.1538	1.776918	16.0255	45.7850	5.0767	0.009157	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 7.89 mA/cm ² 60min 5g (2)												
Date	Time		gas production	Total gas volume	gas analysis		CH ₄ production	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day	(ml)	(ml)	CH ₄ area	%CH ₄	(ml) at 0°C	(ml)	(mgCOD)	(mgCOD)		
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.2
23/10/56	12.0	0.50	0.85	72.85	214	0.2479	0.140322	0.1403	0.4009	0.4009	0.000080	
24/10/56	36.0	1.50	0.40	72.40	451	0.7466	0.281313	0.4216	1.2046	0.8037	0.000241	
30/10/56	180.5	7.52	0.80	72.80	949	4.0772	1.888615	2.3103	6.6004	5.3958	0.001320	
8/11/56	397.3	16.55	0.80	72.80	2566	8.8866	2.745810	5.0561	14.4452	7.8448	0.002889	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	8087	10.8247	1.117894	6.1740	17.6390	3.1938	0.003528	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 11.83 mA/cm ² 30min 1g (1)												
Date	Time		gas production	Tatal gas volume	gas analysis		CH ₄ production	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day	(ml)	(ml)	CH ₄ area	%CH ₄	(ml) at 0°C	(ml)	(mgCOD)	(mgCOD)		
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.5
23/10/56	12.0	0.50	3.85	75.85	337	0.3909	0.230379	0.2304	0.6582	0.6582	0.000132	
24/10/56	36.0	1.50	2.65	74.65	445	1.1754	0.463083	0.6935	1.9812	1.3230	0.000396	
30/10/56	180.5	7.52	2.70	74.70	1666	10.8685	5.650718	6.3442	18.1253	16.1441	0.003625	
31/10/56	204.5	8.52	1.65	73.65	3160	14.7549	2.363373	8.7076	24.8775	6.7522	0.004975	
1/11/56	229.5	9.56	1.65	73.65	3031	16.2569	1.048700	9.7563	27.8736	2.9961	0.005575	
8/11/56	397.3	16.55	5.30	77.30	6432	22.7701	4.581440	14.3377	40.9628	13.0892	0.008193	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	17339	23.5068	0.485199	14.8229	42.3490	1.3862	0.008470	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 11.83 mA/cm ² 30min 1g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.5
23/10/56	12.0	0.50	5.10	77.10	304	0.3433	0.205660	0.2057	0.5876	0.5876	0.000118	
24/10/56	36.0	1.50	1.65	73.65	809	1.2819	0.541525	0.7472	2.1347	1.5471	0.000427	
29/10/56	156.5	6.52	2.30	74.30	417	11.1167	5.700647	6.4478	18.4215	16.2867	0.003684	
30/10/56	180.5	7.52	1.90	73.90	1452	12.8745	1.173450	7.6213	21.7740	3.3525	0.004355	
31/10/56	204.5	8.52	2.15	74.15	2312	16.4509	2.275602	9.8969	28.2754	6.5014	0.005655	
8/11/56	397.3	16.55	3.40	75.40	7062	23.7162	4.691034	14.5879	41.6777	13.4023	0.008336	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	17411	23.6256	0.022743	14.6107	41.7427	0.0650	0.008349	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ

Soil conditioner from EC process at current density 11.83 mA/cm ² 30min 5g (1)												
Date	Time		gas production	Total gas volume	gas analysis		CH ₄ production	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day	(ml)	(ml)	CH ₄ area	%CH ₄	(ml) at 0°C	(ml)	(mgCOD)	(mgCOD)		
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.3
23/10/56	12.0	0.50	0.60	72.60	427	0.4597	0.259318	0.2593	0.7409	0.7409	0.000148	
24/10/56	36.0	1.50	0.40	72.40	597	1.1193	0.372485	0.6318	1.8051	1.0642	0.000361	
29/10/56	156.5	6.52	1.70	73.70	213	2.5163	0.814775	1.4466	4.1329	2.3278	0.000827	
30/10/56	180.5	7.52	0.40	72.40	1383	4.497	1.122059	2.5686	7.3386	3.2057	0.001468	
31/10/56	204.5	8.52	0.40	72.40	1594	5.4989	0.577594	3.1462	8.9888	1.6502	0.001798	
1/11/56	229.5	9.56	0.40	72.40	1721	5.0257	-0.249107	2.8971	8.2771	-0.7117	0.001655	
8/11/56	397.3	16.55	3.05	75.05	3617	12.1039	4.246672	7.1438	20.4098	12.1327	0.004082	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	10321	14.4481	1.356344	8.5001	24.2849	3.8751	0.004857	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 11.83 mA/cm ² 30min 5g (2)												
Date	Time		gas production	Tatal gas volume	gas analysis		gas production	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day	(ml)	(ml)	CH ₄ area	%CH ₄	(ml) at 0°C	(ml)	(mgCOD)	(mgCOD)		
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.4
23/10/56	12.0	0.50	0.60	72.60	414	0.4659	0.262815	0.2628	0.7509	0.7509	0.000150	
24/10/56	36.0	1.50	0.40	72.40	637	1.0363	0.322325	0.5851	1.6717	0.9209	0.000334	
30/10/56	180.5	7.52	0.80	72.80	1070	5.5875	2.580855	3.1660	9.0452	7.3735	0.001809	
31/10/56	204.5	8.52	0.40	72.40	1155	6.6435	0.611417	3.7774	10.7921	1.7468	0.002158	
1/11/56	229.5	9.56	0.40	72.40	1721	5.0257	-0.889442	2.8880	8.2509	-2.5411	0.001650	
8/11/56	397.3	16.55	4.40	76.40	4160	15.3522	6.301918	9.1899	26.2555	18.0046	0.005251	
13/11/56	524.6	21.86	2.40	74.40	12843	18.0738	1.859612	11.0495	31.5684	5.3129	0.006314	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 11.83 mA/cm ² 60min 1g (1)												
Date	Time		gas production	Tatal gas volume	gas analysis		CH ₄ production	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	t-amount of CH ₄	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day	(ml)	(ml)	CH ₄ area	%CH ₄	(ml) at 0°C	(ml)	(mgCOD)	(mgCOD)		
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.5
23/10/56	12.0	0.50	3.60	75.60	327	0.353	0.207356	0.2074	0.5924	0.5924	0.000118	
24/10/56	36.0	1.50	1.90	73.90	674	1.0856	0.425872	0.6332	1.8091	1.2167	0.000362	
26/10/56	84.0	3.50	0.80	72.80	288	2.1328	0.599103	1.2323	3.5208	1.7116	0.000704	
29/10/56	156.5	6.52	0.90	72.90	1416	9.1548	3.992407	5.2247	14.9271	11.4063	0.002985	
30/10/56	180.5	7.52	1.65	73.65	3828	11.1861	1.279802	6.5045	18.5835	3.6564	0.003717	
31/10/56	204.5	8.52	2.40	74.40	4427	14.1387	1.915461	8.4200	24.0559	5.4725	0.004811	
8/11/56	397.3	16.55	6.95	78.95	6203	22.1196	5.659326	14.0793	40.2246	16.1687	0.008045	
13/11/56	524.6	21.86	0.90	72.90	16078	22.0782	0.131232	14.2106	40.5996	0.3749	0.008120	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 11.83 mA/cm ² 60min 1g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.5
23/10/56	12.0	0.50	4.15	76.15	360	0.3984	0.235728	0.2357	0.6735	0.6735	0.000135	
24/10/56	36.0	1.50	2.15	74.15	708	1.153	0.441415	0.6771	1.9346	1.2611	0.000387	
30/10/56	180.5	7.52	2.80	74.80	2120	12.1409	6.411208	7.0884	20.2514	18.3168	0.004050	
31/10/56	204.5	8.52	2.40	74.40	4652	15.1069	1.941013	9.0294	25.7969	5.5455	0.005159	
1/11/56	229.5	9.56	1.90	73.90	1604	16.4269	0.980971	10.0103	28.5995	2.8026	0.005720	
8/11/56	397.3	16.55	1.90	73.90	6639	22.0563	3.474929	13.4853	38.5274	9.9279	0.007705	
13/11/56	524.6	21.86	0.90	72.90	16040	21.8877	0.058739	13.5440	38.6952	0.1678	0.007739	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 11.83 mA/cm ² 60min 5g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.05
23/10/56	12.0	0.50	0.60	72.60	282	0.3776	0.213005	0.2130	0.6086	0.6086	0.000122	
24/10/56	36.0	1.50	0.40	72.40	414	0.7255	0.196884	0.4099	1.1711	0.5625	0.000234	
30/10/56	180.5	7.52	1.60	73.60	608	2.5423	1.047996	1.4579	4.1652	2.9941	0.000833	
13/11/56	524.6	21.86	2.00	74.00	2646	3.7021	0.706369	2.1643	6.1833	2.0181	0.001237	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ

Soil conditioner from EC process at current density 11.83 mA/cm ² 60min 5g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		gas production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ - COD/mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
22/10/56	0.0	0.00	0.00	72.00	0	0	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.06
23/10/56	12.0	0.50	0.60	72.60	267	0.3013	0.169964	0.1700	0.4856	0.4856	0.000097	
24/10/56	36.0	1.50	0.40	72.40	453	0.7253	0.239457	0.4094	1.1697	0.6841	0.000234	
30/10/56	180.5	7.52	0.80	72.80	486	2.3213	0.907295	1.3167	3.7619	2.5921	0.000752	
8/11/56	397.3	16.55	1.20	73.20	1194	3.8411	0.886051	2.2028	6.2933	2.5314	0.001259	
13/11/56	524.6	21.86	0.40	72.40	3249	4.4866	0.375063	2.5778	7.3649	1.0716	0.001473	

ตารางที่ ข.5 แสดงผลจากการวิเคราะห์ XRF

Sample	Current density (mA/cm ²)	Operating time (minutes)	Chemical composition		
			%Fe ₂ O ₃	%P ₂ O ₅	%MgO
Soil conditioner (no iron)	-	-	0.72	50.30	23.55
Soil conditioner From EC process	3.94	30	28.35	31.30	14.75
		60	33.50	28.20	13.60
	7.89	30	49.05	18.55	10.77
		60	61.10	11.07	7.29
	11.83	30	60.65	13.35	7.72
		60	71.55	8.24	4.14

ตารางที่ ข.6 แสดงผลจากการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายสำหรับการดำเนินงาน 30 นาที

Curren density (mA/cm ²)	Avg. V	Avg. I	R=V/I	กำลังไฟฟ้า		พลังงาน	Unit	ค่าใช้จ่าย (บาท)	นน. สปด.	ค่าไฟ		ค่า NaOH	
	(V)	(A)	(Ohm)	P=VI(W)	P=VI(kW)	E=P*t(kWh)	บาท/kWh		g.	Bath/g	Bath/kg	Bath/g	Bath/kg
3.94	7.258	0.982	7.3882	7.1294	0.0071	0.0000	2.7628	0.0000	1.38095	0.026	25.97	0.71	709.66
	7.656	0.975	7.8547	7.4617	0.0075	0.0006	2.7628	0.0017					
	7.688	0.968	7.9394	7.4445	0.0074	0.0012	2.7628	0.0034					
	7.702	0.964	7.9869	7.4273	0.0074	0.0019	2.7628	0.0051					
	7.714	0.961	8.0274	7.4135	0.0074	0.0025	2.7628	0.0068					
	7.726	0.959	8.0560	7.4089	0.0074	0.0031	2.7628	0.0085					
	7.736	0.958	8.0780	7.4085	0.0074	0.0037	2.7628	0.0102					
รวม								0.0359					

หมายเหตุ สปด. หมายถึง สารปรับปรุงคุณภาพดิน

ตารางที่ ข.6 แสดงผลจากการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายสำหรับการดำเนินงาน 30 นาที (ต่อ)

Curren density (mA/cm ²)	Avg. V	Avg. I	R=V/I	กำลังไฟฟ้า		พลังงาน	Unit	ค่าใช้จ่าย (บาท)	นน. สปด.	ค่าไฟ		ค่า NaOH	
	(V)	(A)	(Ohm)	P=VI(W)	P=VI(kW)	E=P*t(kWh)	บาท/kWh		g.	Bath/g	Bath/kg	Bath/g	Bath/kg
7.89	13.300	1.866	7.1277	24.8183	0.0248	0.0000	2.7628	0.0000	2.41725	0.0550	55.00	0.41	405.42
	14.159	1.955	7.2444	27.6743	0.0277	0.0023	2.7628	0.0064					
	14.164	1.951	7.2597	27.6335	0.0276	0.0046	2.7628	0.0127					
	14.144	1.949	7.2580	27.5631	0.0276	0.0069	2.7628	0.0190					
	14.123	1.948	7.2507	27.5071	0.0275	0.0092	2.7628	0.0253					
	14.102	1.947	7.2428	27.4561	0.0275	0.0114	2.7628	0.0316					
	14.086	1.947	7.2356	27.4219	0.0274	0.0137	2.7628	0.0379					
รวม								0.1330					

หมายเหตุ สปด. หมายถึง สารปรับปรุงคุณภาพดิน

ตารางที่ ข.6 แสดงผลจากการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายสำหรับการดำเนินงาน 30 นาที (ต่อ)

Current density (mA/cm ²)	Avg. V	Avg. I	R=V/I	กำลังไฟฟ้า		พลังงาน	Unit	ค่าใช้จ่าย (บาท)	นน. สปด.	ค่าไฟ		ค่า NaOH	
	(V)	(A)	(Ohm)	P=VI(W)	P=VI(kW)	E=P*t(kWh)	บาท/kWh		g.	Bath/g	Bath/kg	Bath/g	Bath/kg
11.83	13.609	2.000	6.8043	27.2170	0.0272	0.0000	2.7628	0.0000	2.6653	0.1059	105.91	0.37	367.69
	19.967	2.950	6.7685	58.9027	0.0589	0.0049	2.7628	0.0136					
	19.929	2.949	6.7579	58.7706	0.0588	0.0098	2.7628	0.0271					
	19.888	2.947	6.7484	58.6085	0.0586	0.0147	2.7628	0.0405					
	19.819	2.947	6.7263	58.3967	0.0584	0.0195	2.7628	0.0538					
	19.781	2.946	6.7145	58.2748	0.0583	0.0243	2.7628	0.0671					
	19.738	2.946	6.6998	58.1467	0.0581	0.0291	2.7628	0.0803					
รวม								0.2823					

หมายเหตุ สปด. หมายถึง สารปรับปรุงคุณภาพดิน

ตารางที่ ข.7 แสดงผลจากการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายสำหรับการดำเนินงาน 60 นาที

Current density (mA/cm ²)	Avg. V	Avg. I	R=V/I	กำลังไฟฟ้า		พลังงาน	Unit	ค่าใช้จ่าย (บาท)	นน. สปด.	ค่าไฟ		ค่า NaOH	
	(V)	(A)	(Ohm)	P=VI(W)	P=VI(kW)	E=P*t(kWh)	บาท/kWh		g.	Bath/g	Bath/kg	Bath/g	Bath/kg
3.94	7.125	0.981	7.2643	6.9874	0.0070	0.0000	2.7628	0.0000	3.07935	0.0429	42.90	0.32	318.25
	7.604	0.973	7.8165	7.3963	0.0074	0.0006	2.7628	0.0017					
	7.645	0.967	7.9095	7.3884	0.0074	0.0012	2.7628	0.0034					
	7.667	0.963	7.9660	7.3797	0.0074	0.0018	2.7628	0.0051					
	7.679	0.960	8.0026	7.3675	0.0074	0.0025	2.7628	0.0068					
	7.685	0.957	8.0279	7.3562	0.0074	0.0031	2.7628	0.0085					
	7.697	0.956	8.0557	7.3547	0.0074	0.0037	2.7628	0.0102					
	7.710	0.955	8.0730	7.3628	0.0074	0.0043	2.7628	0.0119					
	7.716	0.953	8.0960	7.3529	0.0074	0.0049	2.7628	0.0135					
	7.725	0.952	8.1161	7.3518	0.0074	0.0055	2.7628	0.0152					
	7.732	0.951	8.1320	7.3507	0.0074	0.0061	2.7628	0.0169					
	7.737	0.950	8.1464	7.3482	0.0073	0.0067	2.7628	0.0186					
	7.740	0.949	8.1535	7.3470	0.0073	0.0073	2.7628	0.0203					
รวม								0.1321					

ตารางที่ ๗.7 แสดงผลจากการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายสำหรับการดำเนินงาน 60 นาที (ต่อ)

Current density (mA/cm ²)	Avg. V	Avg. I	R=V/I	กำลังไฟฟ้า		พลังงาน	Unit	ค่าใช้จ่าย (บาท)	หน. สพด.	ค่าไฟ		ค่า NaOH	
	(V)	(A)	(Ohm)	P=VI(W)	P=VI(kW)	E=P*t(kWh)	บาท/kWh		g.	Bath/g	Bath/kg	Bath/g	Bath/kg
7.89	8.089	1.163	6.9553	9.4075	0.0094	0.0000	2.7628	0.0000	4.11565	0.1157	115.68	0.24	238.12
	13.811	1.942	7.1117	26.8210	0.0268	0.0022	2.7628	0.0062					
	13.830	1.942	7.1215	26.8579	0.0269	0.0045	2.7628	0.0124					
	13.814	1.941	7.1170	26.8130	0.0268	0.0067	2.7628	0.0185					
	13.789	1.942	7.1004	26.7782	0.0268	0.0089	2.7628	0.0247					
	13.736	1.940	7.0804	26.6478	0.0266	0.0111	2.7628	0.0307					
	13.694	1.940	7.0588	26.5664	0.0266	0.0133	2.7628	0.0367					
	13.680	1.941	7.0479	26.5529	0.0266	0.0155	2.7628	0.0428					
	13.644	1.940	7.0330	26.4694	0.0265	0.0176	2.7628	0.0488					
	13.641	1.940	7.0314	26.4635	0.0265	0.0198	2.7628	0.0548					
	13.620	1.940	7.0206	26.4228	0.0264	0.0220	2.7628	0.0608					
	13.614	1.940	7.0175	26.4112	0.0264	0.0242	2.7628	0.0669					
	13.604	1.940	7.0124	26.3918	0.0264	0.0264	2.7628	0.0729					
รวม								0.4761					

ตารางที่ ๗.7 แสดงผลจากการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายสำหรับการดำเนินงาน 60 นาที (ต่อ)

Current density (mA/cm ²)	Avg. V	Avg. I	R=V/I	กำลังไฟฟ้า		พลังงาน	Unit	ค่าใช้จ่าย (บาท)	นน. สปด.	ค่าไฟ		ค่า NaOH	
	(V)	(A)	(Ohm)	P=VI(W)	P=VI(kW)	E=P*t(kWh)	บาท/kWh		g.	Bath/g	Bath/kg	Bath/g	Bath/kg
11.83	16.621	2.490	6.6749	41.3850	0.0414	0.0000	2.7628	0.0000	5.5481	0.1851	185.07	0.18	176.64
	19.873	2.954	6.7273	58.7034	0.0587	0.0049	2.7628	0.0135					
	19.851	2.951	6.7280	58.5704	0.0586	0.0098	2.7628	0.0270					
	19.803	2.948	6.7173	58.3778	0.0584	0.0146	2.7628	0.0403					
	19.711	2.946	6.6906	58.0671	0.0581	0.0194	2.7628	0.0535					
	19.619	2.945	6.6629	57.7681	0.0578	0.0241	2.7628	0.0665					
	19.562	2.944	6.6458	57.5807	0.0576	0.0288	2.7628	0.0795					
	19.489	2.943	6.6233	57.3464	0.0573	0.0335	2.7628	0.0924					
	19.430	2.943	6.6032	57.1728	0.0572	0.0381	2.7628	0.1053					
	19.377	2.942	6.5873	56.9960	0.0570	0.0427	2.7628	0.1181					
	19.331	2.941	6.5739	56.8413	0.0568	0.0474	2.7628	0.1309					
	19.280	2.940	6.5578	56.6832	0.0567	0.0520	2.7628	0.1436					
	19.237	2.940	6.5443	56.5472	0.0565	0.0565	2.7628	0.1562					
รวม								1.0268					

ตารางที่ ข.8 แสดงความเข้มข้นของเหล็กหลังจากการทดสอบ ATA

Sample	Fe concentration			
	ml sample	Abs	mg/l	Avg. mg/l
Blank	1	0.5680	142.00	168.63
control (1)	1	0.4950	123.75	115.38
control (2)	1	0.4280	107.00	
Soil conditioner(no iron) 1g (1)	1	0.6000	150.00	152.63
Soil conditioner(no iron) 1g (2)	1	0.6210	155.25	
Soil conditioner(no iron) 5g	1	0.6150	153.75	134.63
3.94 mA cm ⁻² 30min 1g (1)	1	0.2640	66.00	118.75
3.94 mA cm ⁻² 30min 1g (2)	1	0.6860	171.5	
3.94 mA cm ⁻² 30min 5g (1)	1	0.6050	151.25	129.63
3.94 mA cm ⁻² 30min 5g (2)	1	0.4320	108.00	
3.94 mA cm ⁻² 60min 1g (1)	1	0.5340	133.50	137.38
3.94 mA cm ⁻² 60min 1g (2)	1	0.5650	141.25	
3.94 mA cm ⁻² 60min 5g (1)	1	0.7130	178.25	161.25
3.94 mA cm ⁻² 60min 5g (2)	1	0.5770	144.25	
7.89 mA cm ⁻² 30min 1g (1)	1	0.7470	186.75	176.50
7.89 mA cm ⁻² 30min 1g (2)	1	0.6650	166.25	
7.89 mA cm ⁻² 30min 5g (1)	1	0.5100	127.50	136.88
7.89 mA cm ⁻² 30min 5g (2)	1	0.5850	146.25	
7.89 mA cm ⁻² 60min 1g (1)	1	0.6140	153.50	169.25
7.89 mA cm ⁻² 60min 1g (2)	1	0.7400	185.00	
7.89 mA cm ⁻² 60min 5g (1)	1	0.4680	117.00	143.50
7.89 mA cm ⁻² 60min 5g (2)	1	0.6800	170.00	

ตารางที่ ข.8 แสดงความเข้มข้นของเหล็กหลังจากการทดสอบ ATA (ต่อ)

Sample	Fe concentration			
	ml sample	Abs	mg/l	Avg. mg/l
11.83 mA cm ⁻² 30min 1g (1)	1	0.5710	142.75	129.00
11.83 mA cm ⁻² 30min 1g (2)	1	0.4610	115.25	
11.83 mA cm ⁻² 30min 5g (1)	1	0.5120	128.00	135.75
11.83 mA cm ⁻² 30min 5g (2)	1	0.5740	143.50	
11.83 mA cm ⁻² 60min 1g (1)	1	0.5270	131.75	85.75
11.83 mA cm ⁻² 60min 1g (2)	1	0.1590	39.75	
11.83 mA cm ⁻² 60min 5g (1)	1	0.4720	118.00	101.38
11.83 mA cm ⁻² 60min 5g (2)	1	0.3390	84.75	

ภาคผนวก ค.

ตารางผลการทดลองพารามิเตอร์ต่างๆ จากกระบวนการไฟฟ้าเคมี
โดยการใช้ น้ำเสืงสังเคราะห์ที่ไม่มีการปรับ pH ก่อนดำเนินงาน

ตารางที่ ค.1 แสดงผลจากการคำนวณความเข้มข้นของฟอสฟอรัส

Current density (mA cm ⁻²)	Time (min)	P (mg/l)		Avg P	% efficiency remove P		Avg. %eff
2.39	0	44.30	38.97	41.63	0.00	0.00	0.00
	5	33.70	32.58	33.14	23.93	16.40	20.17
	10	29.70	28.14	28.92	32.96	27.78	30.37
	15	27.52	25.20	26.36	37.87	35.33	36.60
	20	24.26	23.11	23.68	45.25	40.70	42.97
	25	22.08	19.80	20.94	50.15	49.19	49.67
	30	20.90	19.79	20.34	52.82	49.22	51.02
	35	18.27	17.45	17.86	58.75	55.22	56.99
	40	17.13	14.52	15.83	61.32	62.74	62.03
	45	13.41	12.64	13.02	69.73	67.58	68.66
	50	10.04	10.81	10.43	77.33	72.25	74.79
	55	8.82	9.54	9.18	80.09	75.52	77.80
	60	8.32	8.07	8.19	81.23	79.30	80.26
4.77	0	43.77	42.31	43.04	0.00	0.00	0.00
	5	36.30	36.82	36.56	17.07	12.97	15.02
	10	30.63	26.58	28.61	30.01	37.18	33.60
	15	22.92	23.05	22.99	47.63	45.52	46.58
	20	17.81	17.98	17.90	59.31	57.50	58.40
	25	14.13	13.74	13.94	67.71	67.52	67.62
	30	10.73	10.53	10.63	75.48	75.12	75.30
	35	7.18	6.03	6.60	83.61	85.76	84.68
	40	4.10	3.35	3.73	90.63	92.07	91.35
	45	1.39	1.37	1.38	96.83	96.77	96.80
	50	1.09	1.18	1.14	97.51	97.20	97.35
	55	1.28	1.09	1.19	97.07	97.42	97.24
	60	1.71	1.03	1.37	96.10	97.58	96.84

ตารางที่ ค.1 แสดงผลจากการคำนวณความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (ต่อ)

Current density (mA cm ⁻²)	Time (min)	P (mg/l)		Avg P	% efficiency remove P		Avg. %eff
7.16	0	43.49	41.44	42.47	0.00	0.00	0.00
	5	27.11	29.09	28.10	37.66	29.80	33.73
	10	23.89	19.83	21.86	45.07	52.14	48.61
	15	16.32	13.57	14.94	62.47	67.26	64.87
	20	10.12	9.00	9.56	76.73	78.28	77.50
	25	5.19	4.69	4.94	88.06	88.67	88.37
	30	1.05	1.76	1.40	97.59	95.76	96.67
	35	0.43	1.08	0.76	99.00	97.40	98.20
	40	0.71	0.96	0.83	98.36	97.69	98.03
	45	0.90	0.77	0.83	97.94	98.15	98.04
	50	0.94	0.64	0.79	97.83	98.44	98.14
	55	0.97	0.51	0.74	97.78	98.77	98.27
	60	1.05	0.47	0.76	97.59	98.86	98.22

ตารางที่ ค.2 แสดงค่า pH จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมี

Current density (mA cm ⁻²)	Time (min)	pH					Avg. pH
2.39	0	7.82	7.73	7.70	7.68	7.68	7.72
	5	7.88	7.84	7.82	7.79	7.74	7.81
	10	7.92	7.89	7.86	7.81	7.78	7.85
	15	7.96	7.91	7.91	7.84	7.82	7.89
	20	8.01	7.97	7.96	7.88	7.86	7.94
	25	8.05	8.01	8.01	7.93	7.90	7.98
	30	8.10	8.06	8.05	7.96	7.94	8.02
	35	8.16	8.12	8.12	8.02	7.99	8.08
	40	8.21	8.17	8.18	8.07	8.09	8.14

ตารางที่ ค.2 แสดงค่า pH จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมี (ต่อ)

Current density (mA cm ⁻²)	Time (min)	pH					Avg. pH
2.39	45	8.26	8.23	8.23	8.13	8.14	8.20
	50	8.30	8.28	8.28	8.18	8.18	8.24
	55	8.34	8.32	8.32	8.22	8.21	8.28
	60	8.37	8.36	8.36	8.28	8.28	8.33
4.77	0	7.74	7.74	7.68	7.66		7.70
	5	7.97	7.85	7.78	7.73		7.83
	10	8.05	7.93	7.87	7.79		7.91
	15	8.14	8.02	7.95	7.87		8.00
	20	8.27	8.13	8.03	8.01		8.11
	25	8.39	8.25	8.19	8.1		8.23
	30	8.49	8.34	8.27	8.18		8.32
	35	8.51	8.41	8.33	8.28		8.38
	40	8.62	8.48	8.40	8.34		8.46
	45	8.71	8.53	8.48	8.38		8.52
	50	8.77	8.60	8.52	8.49		8.59
	55	8.77	8.64	8.54	8.51		8.62
	60	8.79	8.65	8.57	8.52		8.63
7.16	0	7.77	7.66				7.71
	5	7.91	7.78				7.85
	10	8.02	7.90				7.96
	15	8.16	8.09				8.12
	20	8.31	8.22				8.26
	25	8.43	8.34				8.39
	30	8.54	8.44				8.49
	35	8.64	8.50				8.57
	40	8.68	8.55				8.61

ตารางที่ ค.2 แสดงค่า pH จากการดำเนินงานไฟฟ้าเคมี (ต่อ)

Current density (mA cm ⁻²)	Time (min)	pH		Avg. pH
7.16	45	8.70	8.58	8.64
	50	8.75	8.61	8.68
	55	8.78	8.65	8.71
	60	8.81	8.68	8.74

ตารางที่ ค.3 แสดงผลจากการคำนวณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูป COD

Current density (mA cm ⁻²)	Soluble COD						
	sample	N	Blank	ml sample	ml titrate	COD(mg/l)	%Eff
2.39	Inf	0.0902	6.50	1	5.33	848.12	2.13
	Eff	0.0902	6.50	1	5.35	830.08	
4.77	Inf	0.0902	6.35	1	5.38	703.76	2.56
	Eff	0.0902	6.35	1	5.40	685.71	
7.16	Inf	0.0952	6.10	1	4.95	876.19	8.70
	Eff	0.0952	6.10	1	5.05	800.00	

ตารางที่ ค.4 ความเข้มข้นของเหล็ก

Current density (mA cm ⁻²)	Time (min)	Fe (mg/l)		Avg. Fe
2.39	0	0.31	0.75	0.53
	5	6.00	7.63	6.81
	10	11.75	11.50	11.63
	15	19.13	19.88	19.50
	20	25.63	25.75	25.69
	25	30.00	34.63	32.31

ตารางที่ ค.4 ความเข้มข้นของเหล็ก (ต่อ)

Current density (mA cm ⁻²)	Time (min)	Fe (mg/l)		Avg. Fe
2.39	30	38.75	41.13	39.94
	35	44.00	48.88	46.44
	40	54.88	59.00	56.94
	45	59.25	64.88	62.06
	50	68.50	72.38	70.44
	55	74.63	78.50	76.56
	60	78.63	87.75	83.19
4.77	0	0.55	0.31	0.43
	5	11.13	15.50	13.31
	10	25.50	28.88	27.19
	15	39.00	44.25	41.63
	20	54.63	60.88	57.75
	25	68.88	74.25	71.56
	30	82.13	89.13	85.63
	35	99.25	106.50	102.88
	40	112.88	121.75	117.31
	45	126.88	133.00	129.94
	50	141.63	149.50	145.56
	55	148.38	154.50	151.44
	60	151.13	157.13	154.13
7.16	0	0.28	0.36	0.32
	5	12.25	20.50	16.38
	10	35.50	41.88	38.69
	15	58.00	69.38	63.69
	20	80.63	92.88	86.75
	25	100.75	123.00	111.88
	30	128.88	139.25	134.06

ตารางที่ ค.4 ความเข้มข้นของเหล็ก (ต่อ)

Current density (mA cm ⁻²)	Time (min)	Fe (mg/l)		Avg. Fe
7.16	35	149.88	150.75	150.31
	40	151.50	157.00	154.25
	45	163.25	162.50	162.88
	50	172.38	173.25	172.81
	55	175.75	178.00	176.88
	60	199.75	197.75	198.75

ตารางที่ ค.5 แสดงผลจากการวิเคราะห์ XRF

Sample	Current density (mA cm ⁻²)	Operating time (minutes)	Chemical composition		
			%Fe ₂ O ₃	%P ₂ O ₅	%MgO
Soil Conditioner (no iron)	-	-	0.72	50.30	23.55
Soil Conditioner From EC process	2.39	60	51.60	24.25	3.55
	4.77	60	63.85	20.00	1.88
	7.16	60	71.25	13.70	1.45

ตารางที่ ค.6 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA)

Control (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Total gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
11/4/2557	0.0	0.00	0	72	0	0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.3
30/4/2557	426.83	17.78	21.6	93.6	1190	1.5669	1.139562	1.139562	3.255730	3.255730	0.000326	
2/5/2557	472.83	19.70	1	73	4482	5.5352	2.263034	3.402597	9.721219	6.465489	0.000972	

ตารางที่ ค.6 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner (no iron) 1g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Total gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
11/4/2557	0.0	0.00	0	72	0	0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.6
17/4/2557	113.0	4.71	12	84	2769	3.3957	2.216305	2.216305	6.331985	6.331985	0.000633	
18/4/2557	136.5	5.69	1	73	3437	4.1302	0.443000	2.659306	7.597637	1.265652	0.000760	
24/4/2557	284.83	11.87	19.1	91.1	9700	20.1452	11.949120	14.608426	41.736273	34.138637	0.004174	
28/4/2557	377.00	15.71	9.6	81.6	11026	23.0079	3.317714	17.926140	51.214983	9.478709	0.005121	
30/4/2557	426.83	17.78	1.6	73.6	12328	25.23	1.556791	19.482931	55.662735	4.447752	0.005566	
2/5/2557	472.83	19.70	2.1	74.1	12312	26.4068	1.089229	20.572160	58.774661	3.111927	0.005877	

ตารางที่ ๑.๕ แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 2.39 mA/cm ² 60min 1g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Total gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
11/4/2557	0.0	0.00	0	72	0	0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.08
24/4/2557	284.83	11.87	19.1	91.1	3323	6.8063	4.817819	4.817819	13.764509	13.764509	0.001376	
28/4/2557	377.00	15.71	0.6	72.6	4298	8.6437	1.068212	5.886031	16.816391	3.051882	0.001682	
30/4/2557	426.83	17.78	0.6	72.6	4758	9.6357	0.599886	6.485917	18.530265	1.713875	0.001853	
2/5/2557	472.83	19.70	0.6	72.6	5270	9.8535	0.167783	6.653700	19.009621	0.479356	0.001901	
Soil conditioner from EC process at current density 2.39 mA/cm ² 60min 1g (2)												
11/4/2557	0.0	0.00	0	72	0	0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.5
24/4/2557	284.83	11.87	18.6	90.6	3307	6.9354	4.882258	4.882258	13.948611	13.948611	0.001395	
28/4/2557	377.00	15.71	0.6	72.6	4239	8.5724	2.104378	6.986636	19.960818	6.012207	0.001996	
30/4/2557	426.83	17.78	0.6	72.6	4659	9.6034	4.240024	11.226660	32.074567	12.113749	0.003207	
2/5/2557	472.83	19.70	0.6	72.6	4354	9.8443	3.181150	14.407810	41.163113	9.088546	0.004116	

ตารางที่ ค.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 2.39 mA/cm ² 60min 5g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Total gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
11/4/2557	0.0	0.00	0	72	0	0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.05
17/4/2557	113.0	4.71	9	81	1206	1.4893	0.937321	0.937321	2.677925	2.677925	0.000268	
18/4/2557	136.5	5.69	1	73	1563	1.9286	0.260747	1.198068	3.422880	0.744955	0.000342	
24/4/2557	284.83	11.87	0.6	72.6	1671	3.5415	0.918831	2.116899	6.047981	2.625101	0.000605	
28/4/2557	377.00	15.71	0.6	72.6	1892	3.8380	0.183767	2.300666	6.573003	0.525022	0.000657	
30/4/2557	426.83	17.78	0.6	72.6	1945	4.0717	0.149723	2.450389	7.000762	0.427760	0.000700	
2/5/2557	472.83	19.70	0.6	72.6	1830	4.2286	0.107490	2.557879	7.307861	0.307099	0.000731	

ตารางที่ ค.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 4.77 mA/cm ² 60min 1g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Total gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
11/4/2557	0.0	0.00	0	72	0	0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.3
17/4/2557	113.0	4.71	13.5	85.5	1426	1.7073	1.134219	1.134219	3.240464	3.240464	0.000324	
18/4/2557	136.5	5.69	1	73	1811	2.3036	0.351493	1.485712	4.244680	1.004216	0.000424	
24/4/2557	284.83	11.87	0.6	72.6	6213	13.3009	6.214338	7.700050	21.999044	17.754365	0.002200	
28/4/2557	377.00	15.71	0.6	72.6	7167	15.1758	1.119644	8.819694	25.197866	3.198822	0.002520	
30/4/2557	426.83	17.78	0.6	72.6	7868	16.8308	1.004338	9.824033	28.067261	2.869395	0.002807	
2/5/2557	472.83	19.70	0.6	72.6	1179	19.7136	1.704658	11.528691	32.937470	4.870209	0.003294	

ตารางที่ ค.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 4.77 mA/cm ² 60min 1g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
11/4/2557	0.0	0.00	0	72	0	0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.2
17/4/2557	113.0	4.71	15	87	1116	1.3349	0.902379	0.902379	2.578097	2.578097	0.000258	
18/4/2557	136.5	5.69	1	73	1436	1.8294	0.290858	1.193237	3.409077	0.830980	0.000341	
24/4/2557	284.83	11.87	0.6	72.6	4064	9.8594	4.538268	5.731504	16.374908	12.965831	0.001637	
28/4/2557	377.00	15.71	0.6	72.6	7250	15.6782	3.328361	9.059866	25.884036	9.509128	0.002588	
30/4/2557	426.83	17.78	0.6	72.6	8433	17.3546	1.018752	10.078618	28.794611	2.910575	0.002879	
2/5/2557	472.83	19.70	0.6	72.6	7061	16.4808	-0.412005	9.666613	27.617513	-1.177099	0.002762	

ตารางที่ ค.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 4.77 mA/cm ² 60min 5g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Total gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
11/4/2557	0.0	0.00	0	72	0	0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.06
17/4/2557	113.0	4.71	7.5	79.5	1099	1.3449	0.830765	0.830765	2.373495	2.373495	0.000237	
18/4/2557	136.5	5.69	1	73	1360	1.7089	0.216914	1.047679	2.993220	0.619724	0.000299	
24/4/2557	284.83	11.87	0.7	72.7	2217	4.1017	1.360937	2.408616	6.881417	3.888198	0.000688	
28/4/2557	377.00	15.71	0.6	72.6	2127	4.6568	0.332255	2.740872	7.830670	0.949253	0.000783	
30/4/2557	426.83	17.78	0.6	72.6	2483	5.1032	0.273525	3.014397	8.612131	0.781461	0.000861	
2/5/2557	472.83	19.70	0.6	72.6	1583	4.4096	-0.367470	2.646927	7.562269	-1.049862	0.000756	

ตารางที่ ค.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 4.77 mA/cm ² 60min 5g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Tatal gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
11/4/2557	0.0	0.00	0	72	0	0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.06
18/4/2557	136.5	5.69	7	79	1187	1.5046	0.923569	0.923569	2.638636	2.638636	0.000264	
24/4/2557	284.83	11.87	0.6	72.6	1815	3.9328	1.376767	2.300336	6.572059	3.933423	0.000657	
28/4/2557	377.00	15.71	0.6	72.6	1940	4.086	0.104755	2.405091	6.871344	0.299285	0.000687	
30/4/2557	426.83	17.78	0.6	72.6	2164	4.4767	0.239444	2.644534	7.555434	0.684090	0.000756	
2/5/2557	472.83	19.70	0.6	72.6	1425	4.0144	-0.239914	2.404620	6.870000	-0.685434	0.000687	

ตารางที่ ค.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 7.16 mA/cm ² 60min 1g (1)												
Date	Time		gas production (ml)	Total gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
11/4/2557	0.0	0.00	0	72	0	0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.2
18/4/2557	136.5	5.69	13	85	1374	1.7171	1.134059	1.134059	3.240006	3.240006	0.000324	
24/4/2557	284.83	11.87	0.6	72.6	3799	8.1757	3.651314	4.785373	13.671811	10.431805	0.001367	
28/4/2557	377.00	15.71	0.6	72.6	4439	9.2907	0.667089	5.452462	15.577683	1.905873	0.001558	
30/4/2557	426.83	17.78	0.6	72.6	5062	10.148	0.526918	5.979380	17.083088	1.505404	0.001708	
2/5/2557	472.83	19.70	0.6	72.6	3899	10.3863	0.181735	6.161115	17.602306	0.519218	0.001760	
Soil conditioner from EC process at current density 7.16 mA/cm ² 60min 1g (2)												
11/4/2557	0.0	0.00	0	72	0	0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.08
24/4/2557	284.83	11.87	13.6	85.6	3088	6.6023	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
28/4/2557	377.00	15.71	0.6	72.6	4148	8.4254	4.391269	4.391269	12.545855	12.545855	0.001255	
30/4/2557	426.83	17.78	0.6	72.6	4689	9.2652	1.059194	5.450463	15.571973	3.026118	0.001557	
2/5/2557	472.83	19.70	0.6	72.6	3423	9.2238	0.513012	5.963475	17.037649	1.465675	0.001704	

ตารางที่ ๕.5 แสดงผลจากการคำนวณค่า Anaerobic Toxicity Assay (ATA) (ต่อ)

Soil conditioner from EC process at current density 7.16 mA/cm ² 60min 5g (2)												
Date	Time		gas production (ml)	Total gas volume (ml)	gas analysis		CH ₄ production (ml) at 0°C	t-amount of CH ₄ (ml)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	t-amount of CH ₄ (mgCOD)	mgCH ₄ -COD /mgVSS	ATA (mgCH ₄ -COD /gVSS.day)
	hr	day			CH ₄ area	%CH ₄						
11/4/2557	0.0	0.00	0	72	0	0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.02
24/4/2557	284.83	11.87	8.5	80.5	1154	1.4680	0.918212	0.918212	2.623332	2.623332	0.000525	
28/4/2557	377.00	15.71	0.6	81.1	1167	1.4533	0.094535	1.012747	2.893417	0.270086	0.000579	
30/4/2557	426.83	17.78	1	82.1	1246	1.5011	0.144543	1.157290	3.306377	0.412960	0.000661	

ตารางที่ ๓.6 แสดงผลจากการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่าย

Current density (mA/cm ²)	Time		Volt.	I	R=V/I	กำลังไฟฟ้า		พลังงาน	Unit	ค่าใช้จ่าย (บาท)	นน.สปด.	ค่าไฟ	
	min	hr	(V)	(A)	(Ohm)	P=VI(W)	P=VI(kW)	E=P*t(kWh)	บาท/kWh		g.	Bath/g	Bath/kg
2.39	0	0.00	4.468	0.976	4.5779	4.3608	0.0044	0.0000	2.7628	0.0000	2.69	0.0335	33.50
	5	0.08	5.154	0.968	5.3244	4.9891	0.0050	0.0004	2.7628	0.0011			
	10	0.17	5.186	0.964	5.3797	4.9993	0.0050	0.0008	2.7628	0.0023			
	15	0.25	5.211	0.959	5.4338	4.9973	0.0050	0.0012	2.7628	0.0035			
	20	0.33	5.234	0.956	5.4749	5.0037	0.0050	0.0017	2.7628	0.0046			
	25	0.42	5.244	0.954	5.4969	5.0028	0.0050	0.0021	2.7628	0.0058			
	30	0.50	5.253	0.952	5.5179	5.0009	0.0050	0.0025	2.7628	0.0069			
	35	0.58	5.259	0.951	5.5300	5.0013	0.0050	0.0029	2.7628	0.0081			
	40	0.67	5.271	0.949	5.5543	5.0022	0.0050	0.0033	2.7628	0.0092			
	45	0.75	5.283	0.948	5.5728	5.0083	0.0050	0.0038	2.7628	0.0104			
	50	0.83	5.299	0.948	5.5897	5.0235	0.0050	0.0042	2.7628	0.0116			
	55	0.92	5.321	0.947	5.6188	5.0390	0.0050	0.0046	2.7628	0.0128			
	60	1.00	5.338	0.946	5.6427	5.0497	0.0050	0.0050	2.7628	0.0140			
รวม										0.0901			

ตารางที่ 3.6 แสดงผลจากการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่าย (ต่อ)

Current density (mA/cm ²)	Time		Volt.	I	R=V/I	กำลังไฟฟ้า		พลังงาน	Unit	ค่าใช้จ่าย (บาท)	นน.สปด.	ค่าไฟ	
	min	hr	(V)	(A)	(Ohm)	P=VI(W)	P=VI(kW)	E=P*t(kWh)	บาท/kWh		g.	Bath/g	Bath/kg
4.77	0	0.00	8.208	1.972	4.1623	16.1862	0.0162	0.0000	2.7628	0.0000	4.25	0.0753	75.35
	5	0.08	8.809	1.965	4.4830	17.3097	0.0173	0.0014	2.7628	0.0040			
	10	0.17	8.892	1.96	4.5367	17.4283	0.0174	0.0029	2.7628	0.0080			
	15	0.25	8.928	1.955	4.5668	17.4542	0.0175	0.0044	2.7628	0.0121			
	20	0.33	8.965	1.952	4.5927	17.4997	0.0175	0.0058	2.7628	0.0161			
	25	0.42	9.006	1.95	4.6185	17.5617	0.0176	0.0073	2.7628	0.0202			
	30	0.50	9.045	1.948	4.6432	17.6197	0.0176	0.0088	2.7628	0.0243			
	35	0.58	9.088	1.946	4.6701	17.6852	0.0177	0.0103	2.7628	0.0285			
	40	0.67	9.138	1.945	4.6982	17.7734	0.0178	0.0118	2.7628	0.0327			
	45	0.75	9.188	1.944	4.7263	17.8615	0.0179	0.0134	2.7628	0.0370			
	50	0.83	9.251	1.943	4.7612	17.9747	0.0180	0.0150	2.7628	0.0414			
	55	0.92	9.301	1.942	4.7894	18.0625	0.0181	0.0166	2.7628	0.0457			
	60	1.00	9.339	1.942	4.8090	18.1363	0.0181	0.0181	2.7628	0.0501			
รวม										0.3202			

ตารางที่ ๓.6 แสดงผลจากการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่าย (ต่อ)

Current density (mA/cm ²)	Time		Volt.	I	R=V/I	กำลังไฟฟ้า	พลังงาน		Unit	ค่าใช้จ่าย (บาท)	นน. สปด.	ราคา	
	min	hr	(V)	(A)	(Ohm)	P=VI(W)	P=VI(kW)	E=P*t(kWh)	บาท/kWh		g.	Bath/g	Bath/kg
7.16	0	0.00	8.827	2.175	4.0584	19.1987	0.0192	0.0000	2.7628	0.0000	4.98	0.1437	143.69
	5	0.08	12.974	2.97	4.3684	38.5328	0.0385	0.0032	2.7628	0.0089			
	10	0.17	13.073	2.964	4.4106	38.7484	0.0387	0.0065	2.7628	0.0178			
	15	0.25	13.148	2.96	4.4419	38.9181	0.0389	0.0097	2.7628	0.0269			
	20	0.33	13.214	2.957	4.4687	39.0738	0.0391	0.0130	2.7628	0.0360			
	25	0.42	13.289	2.955	4.4971	39.2690	0.0393	0.0164	2.7628	0.0452			
	30	0.50	13.378	2.953	4.5303	39.5052	0.0395	0.0198	2.7628	0.0546			
	35	0.58	13.467	2.952	4.5620	39.7546	0.0398	0.0232	2.7628	0.0641			
	40	0.67	13.513	2.952	4.5776	39.8904	0.0399	0.0266	2.7628	0.0735			
	45	0.75	13.557	2.951	4.5940	40.0067	0.0400	0.0300	2.7628	0.0829			
	50	0.83	13.597	2.95	4.6092	40.1112	0.0401	0.0334	2.7628	0.0923			
	55	0.92	13.638	2.949	4.6246	40.2185	0.0402	0.0369	2.7628	0.1019			
	60	1.00	13.693	2.949	4.6433	40.3807	0.0404	0.0404	2.7628	0.1116			
รวม										0.7156			

ภาคผนวก ง.

ตารางผลการทดลองพารามิเตอร์ต่างๆ จากการทดลองในแปลงเกษตร

ตารางที่ ง.1 แสดงความเข้มข้นของก๊าซมีเทนจากแปลงเกษตร

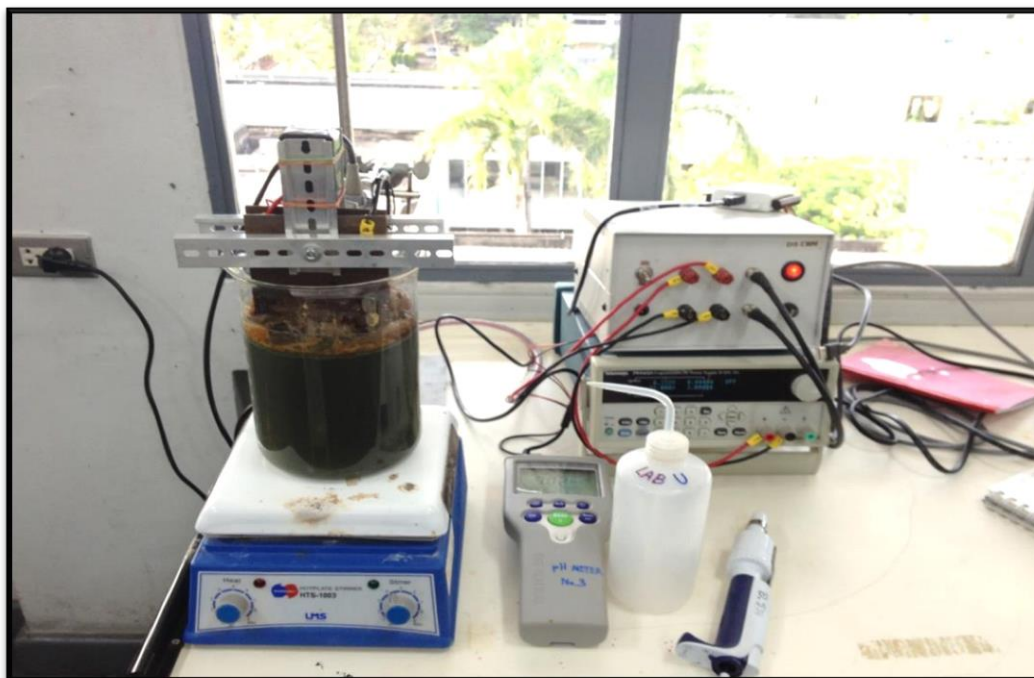
เดือน	เวลา (นาทึ่)	ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน (ppm)			
		ควบคุม	การใส่ปุ๋ยจากการ วิเคราะห์ดิน	การใส่สารปรับปรุง คุณภาพดินผสมหลัก	การใส่ปุ๋ยตาม วิธีเกษตรกร
ธันวาคม	0	2.94	2.26	2.33	2.08
	5	2.97	2.38	2.55	2.07
	10	2.99	2.35	2.61	2.27
	15	3.05	2.27	2.36	2.26
	20	3.06	2.23	2.63	2.29
มกราคม	0	2.19	1.89	1.87	1.87
	5	2.06	1.86	1.86	1.84
	10	2.06	1.92	1.84	1.85
	15	2.05	1.95	1.86	1.85
	20	2.03	1.86	1.85	1.81
ต้นเดือน กุมภาพันธ์	0	2.69	5.23	2.02	1.93
	5	2.66	5.27	2.04	1.95
	10	2.60	5.21	2.03	1.92
	15	2.72	4.80	2.00	1.94
	20	2.71	5.11	1.97	1.95
กลางเดือน กุมภาพันธ์	0	1.86	1.82	1.83	1.61
	5	1.87	1.83	1.74	1.83
	10	1.89	1.84	1.68	1.84
	15	1.88	1.89	1.67	1.89
	20	1.87	1.77	1.67	1.77
ปลาย เดือน กุมภาพันธ์	0	2.00	1.80	1.76	1.79
	5	1.95	1.76	1.72	1.69
	10	1.96	1.75	1.72	1.72
	15	1.96	1.71	1.68	1.69
	20	1.94	1.72	1.65	1.69

ตารางที่ ง.1 แสดงความเข้มข้นของก๊าซมีเทนจากแปลงเกษตร (ต่อ)

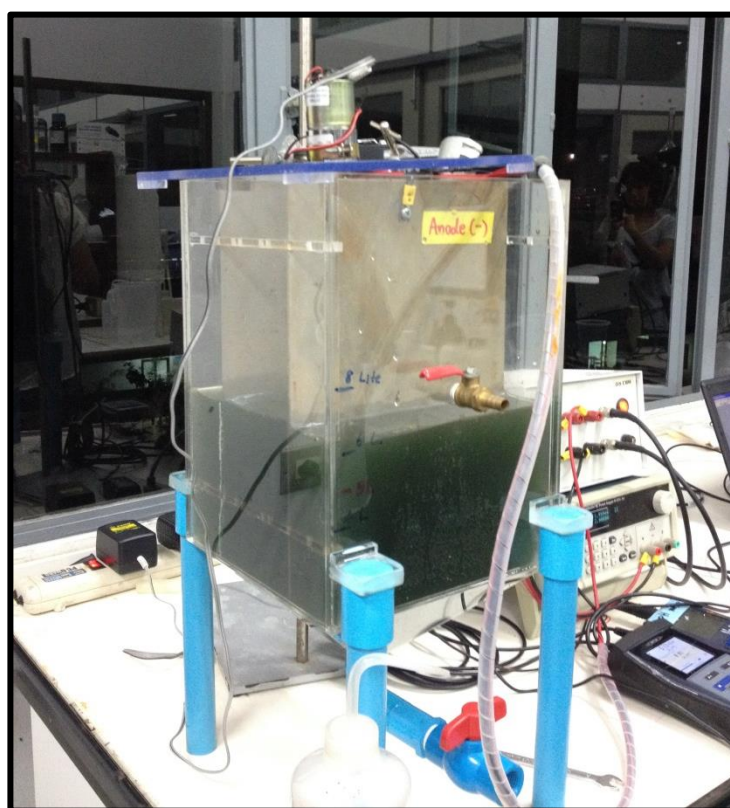
เดือน	เวลา (นาทึ่)	ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน (ppm)			
		ควบคุม	การใส่ปุ๋ยจากการ วิเคราะห์ดิน	การใส่สารปรับปรุง คุณภาพดินผสมหลัก	การใส่ปุ๋ยตาม วิธีเกษตรกร
มีนาคม	0	1.91	1.86	1.74	1.82
	5	1.87	1.84	1.78	1.81
	10	1.92	1.86	1.78	1.73
	15	1.89	1.89	1.76	1.83
	20	1.88	1.88	1.74	1.87
ต้นเดือน เมษายน	0	1.86	1.86	1.69	1.83
	5	1.94	1.84	1.69	1.80
	10	1.84	1.92	1.69	1.82
	15	1.99	1.92	1.70	1.89
	20	1.92	1.92	1.71	1.86
ปลาย เดือน เมษายน	0	2.26	1.93	1.79	1.84
	5	2.29	1.96	1.72	1.87
	10	2.28	1.97	1.78	1.86
	15	2.11	2.03	1.79	1.93
	20	2.40	2.03	1.78	1.90

ภาคผนวก จ.

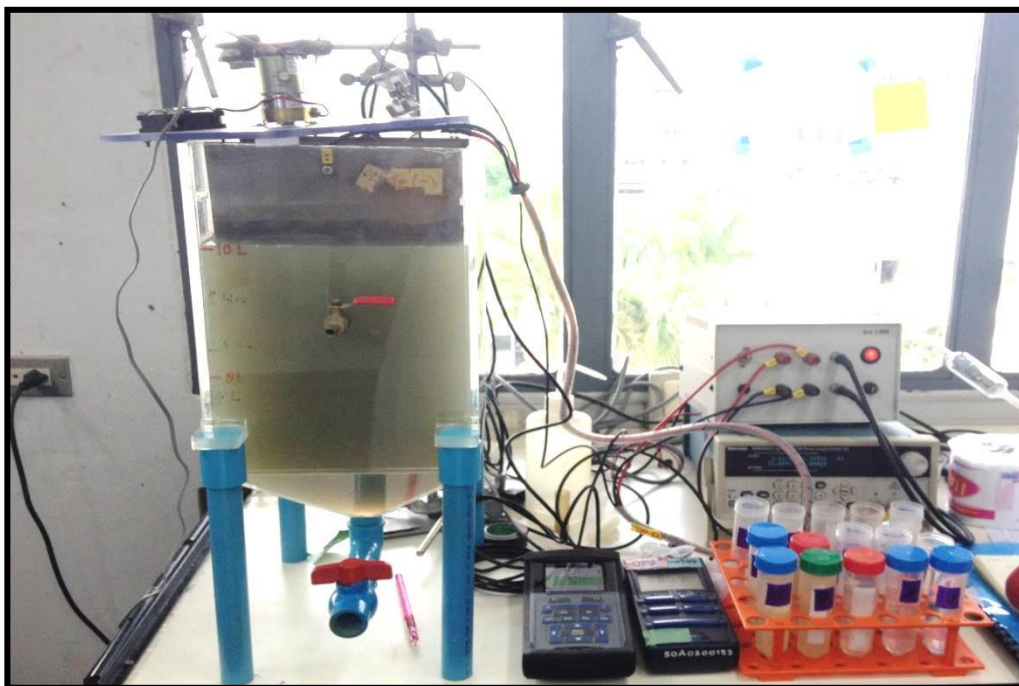
รูปต่างๆ จากการดำเนินงานตกตะกอนไฟฟ้าเคมี



รูปที่ จ.1 การดำเนินงานตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียฟาร์มสุกรจริง



รูปที่ จ.2 การดำเนินงานตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียฟาร์มสุกรสังเคราะห์ที่มีการปรับ pH



รูปที่ จ.3 การดำเนินงานตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำเสียฟาร์มสุกรสังเคราะห์ที่ไม่มีการปรับ pH

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล

พิมพ์พิชญ์ นิโกบ

วัน เดือน ปีเกิด

11 กุมภาพันธ์ 2532

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา

มัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย

โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย สตูล พ.ศ.2543

ระดับปริญญาตรี

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
(หลักสูตรสองภาษา)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2554

ระดับปริญญาโท

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2556

ทุนการศึกษาหรือทุนวิจัย

ทุนอุดหนุนสนับสนุนการวิจัยระดับบัณฑิต

ทุนอุดหนุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานพัฒนาการวิจัย
การเกษตร (องค์การมหาชน) โครงการการผลิตปุ๋ย(อจณริยะ)
ลดโลกร้อนโดยวิธีประหยัคแบบไฟฟ้าเคมี ระยะที่ 1

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

Nigob, P. and Yoochatchaval, W., 2014, “The Fe-Struvite
Production by Electrochemical Process for CH₄ Mitigation”, **The
3rd International Conference on Environmental Engineering,
Science and Management**, 26-28 March 2014, The Twin Towers
Hotel Bangkok, pp. 41-42.