

การเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสีของ
น้ำกากส่าด้วยการบำบัดรวมของวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้ากับวิธีโอโซนเนชั่น

BIODEGRADABILITY ENHANCEMENT AND DECOLORIZATION OF
MOLASSES-BASED WASTEWATER BY COMBINED
ELECTROCOAGULATION AND OZONATION

จิตฐิตา ชูเขียว

TITTITA CHUKEAW

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-016-070

การเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสีของ
น้ำกากส่าด้วยการบำบัดร่วมของวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้ากับวิธีโอโซนชั้น

BIODEGRADABILITY ENHANCEMENT AND DECOLORIZATION OF
MOLASSES-BASED WASTEWATER BY COMBINED
ELECTROCOAGULATION AND OZONATION

ทิตฐิตา ชูเขียว

TITTITA CHUKEAW

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษิตตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-016-070

BIODEGRADABILITY ENHANCEMENT AND DECOLORIZATION OF
MOLASSES-BASED WASTEWATER BY COMBINED
ELECTROCOAGULATION AND OZONATION

TITTITA CHUKEAW

A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

KMITL--2019-SC-M-016-070

COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสีของน้ำกากส่าด้วยการบำบัดร่วมของวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้ากับวิธีโอโซนเนชัน
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพิชิตฐิตา ชูเขียว
รหัสประจำตัว	59605045
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลของตัวแปรอิสระที่มีผลต่อการเพิ่มค่าดัชนีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำกากส่า (BI: อัตราส่วนบีโอดี 5 วัน ต่อซีโอดี) และการกำจัดสีโดยใช้วิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับวิธีโอโซนเนชัน เพื่อเป็นวิธีการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) ให้น้ำกากส่ามีความเหมาะสมในการนำไปบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพต่อไป จากผลการบำบัดน้ำกากส่าด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าพบว่าน้ำทิ้งหลังการบำบัดมีอัตราส่วนของบีโอดี 5 วัน ต่อซีโอดี (BOD_5/COD) เพิ่มขึ้นจาก 0.15 เป็น 0.47 และมีประสิทธิภาพการกำจัดสีประมาณ 36 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 5 โวลต์ ให้กับตัวอย่างน้ำกากส่าที่มีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นเมื่อนำน้ำที่ผ่านการบำบัดข้างต้นมาเจือจาง 100 เท่า และปรับพีเอชให้มีค่าเป็น 6 เพื่อเข้าสู่ระบบโอโซนเนชัน ผลจากการบำบัดพบว่าน้ำทิ้งที่ได้จากการบำบัดร่วมมีอัตราส่วนบีโอดี 5 วัน ต่อซีโอดี สูงขึ้นจาก 0.47 เป็น 0.63 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงถึง 84 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผ่านก๊าซโอโซนเข้าสู่ระบบนาน 60 นาที ซึ่งน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าและวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับวิธีโอโซนเนชันสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ดีกว่าน้ำตัวอย่างที่ยังไม่ได้รับการบำบัด โดยให้ผลผลิตมีเทน 110 และ 73 $mLCH_4 / g VS_{removed}$ และมีค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (% BMP) มากกว่า 0.2 และ 0.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวอย่างน้ำที่ไม่ผ่านการบำบัด

Keywords: ดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพ, การกำจัดสี, น้ำกากส่า, วิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้า, กระบวนการโอโซนเนชัน

Thesis Title	Biodegradability Enhancement and Decolorization of Molasses- based Wastewater from Distilleries by Combined Electrocoagulation and Ozonation Treatment Process
Student Name	Tittita Chukeaw
Student ID	59605045
Degree	Master of Science (Environmental Chemistry)
Department	Chemistry
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Usarat Thawornchaisit

Abstract

This research studied factors affecting enhancement of the biodegradability index (Biochemical Oxygen Demand (BOD) / Chemical Oxygen Demand (COD) : BOD_5/COD) and color removal from Molasses-based wastewater using combination of electrocoagulation (EC) and ozonation as a wastewater pretreatment for subsequent biological process. Treatment by EC showed that BOD_5/COD of the effluent increased from 0.15 to 0.43 and resulted in 36 % color removal efficiency when EC was operated at the applied voltage of 5V to treat the distillery wastewater with an initial pH of 6 for 90 min. Then the effluent at these conditions was diluted 100 times, and adjusted pH to 6 and treated by ozonation. Ozonation combined with electrocoagulation increased the biodegradability index from 0.47 to 0.63 and achieved decolorization up to 84% at 60 min of ozonation time. Methane yield of 73 and 110 ml CH_4 / g $VS_{removed}$ that obtained from fermentation of the EC+Ozonation effluent and the EC effluent for 14 day was higher than methane yield from fermentation of molasses- based wastewater. The biochemical methane potential (BMP) of the treated effluents were 0.1 and 0.2%, respectively.

Keywords: Biodegradability index, decolorization, distillery wastewater, electrocoagulation, ozonation

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่ายด้วยกัน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์สำหรับคำแนะนำ ตลอดจนช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อันเป็นประโยชน์ของการทำวิทยานิพนธ์อย่างยิ่งมาโดยตลอด จนทำให้งานวิจัยครั้งนี้มีความสมบูรณ์ ครบถ้วนและสำเร็จไปได้ด้วยดี รวมทั้งให้ความรู้ คำปรึกษา และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ ช่วยตรวจสอบชี้แนะข้อบกพร่อง ตลอดจนเสนอแนะแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำ เสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา และช่วยตรวจสอบให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบุคลากร เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ช่วยเหลือและจัดเตรียมอุปกรณ์ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆสำหรับการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณโรงงานผลิตสุรา กรมสรรพสามิต จังหวัดฉะเชิงเทรา ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำกากส่าที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว เพื่อน และผู้ที่อยู่เบื้องหลังทุกท่าน ที่เป็นแรงผลักดันและเป็นกำลังใจที่สำคัญยิ่งให้กับผู้วิจัย พร้อมทั้งสนับสนุนในทุกด้าน ขอขอบคุณการจัดเตรียมและนำพระทัยที่มาจากพระเจ้า เพื่อให้ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

นางสาวทิตติฉिता ชูเขียว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป	ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 น้ำกากส่า	5
2.1.1 ประเภทของน้ำกากส่า	6
2.1.2 ลักษณะน้ำกากส่า	6
2.1.3 การบำบัดน้ำกากส่าด้วยวิธีทางชีวภาพ.....	8
2.2 กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า (Electrocoagulation, EC).....	9
2.2.1 ส่วนประกอบของระบบ EC.....	9
2.2.2 ปฏิกิริยาเคมีและกลไกที่เกิดขึ้น	10
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อวิธีการรวมตะกอนทางไฟฟ้า.....	11
2.2.4 ข้อดีและข้อเสียของวิธีการรวมตะกอนทางไฟฟ้า	13
2.3 กระบวนการโอโซนเนชั่น (Ozonation)	14
2.3.1 คุณสมบัติของโอโซน	14
2.3.2 การผลิตโอโซน	15
2.3.3 การสลายตัวของโอโซนในน้ำ.....	16
2.3.4 การเกิดปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์	17
2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนเนชั่น.....	20
2.4 ตัวชี้วัดความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ	21
2.4.1 อัตราส่วนบีโอดี 5 วัน ต่อซีโอดี (BOD ₅ /COD).....	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Bichemical Methane Potential).....	22
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	25
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	25
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	25
3.1.2 สารเคมี.....	25
3.2 น้ำกากส่า.....	26
3.3 การศึกษาสมบัติน้ำกากส่า.....	26
3.4 ชุดการทดลอง	27
3.5 การศึกษาความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงดัชนีการ	
ย่อยสลายทางชีวภาพ และการกำจัดสีของน้ำกากส่าด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้า .	27
3.5.1 การศึกษาผลของระยะเวลาบำบัด	27
3.5.2 การศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้า	27
3.5.3 การศึกษาผลของพีเอช	28
3.6 การศึกษาประสิทธิภาพของวิธีโอโซนเนชั่นในการกำจัดสารอินทรีย์ การเพิ่มความ	
สามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสีของน้ำที่ผ่านการบำบัด	
ด้วยวิธี EC	28
3.6.1 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ศึกษา	28
3.6.2 การเดินระบบโอโซนเนชั่น	29
3.6.3 การศึกษาอัตราการผลิตก๊าซโอโซน	29
3.6.4 การศึกษาผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซน	29
3.6.5 การศึกษาผลของพีเอช	30
3.7 การศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน	30
3.7.1 วัตถุประสงค์ที่ป้อนเข้าระบบ	30
3.7.2 เชื้อจุลินทรีย์.....	31
3.7.3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	31
3.7.4 วิธีการคำนวณ.....	32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	33
4.1 คุณลักษณะของน้ำกากส่า.....	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงดัชนีการย่อย สลายทางชีวภาพและการกำจัดสีของน้ำกากส่าด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้า.....	34
4.2.1 ผลของระยะเวลาบำบัดต่อการกำจัดซีโอดี.....	34
4.2.2 ผลของระยะเวลาบำบัดต่อการกำจัดบีโอดี	36
4.2.3 ผลของระยะเวลาบำบัดต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพ..	37
4.2.4 ผลของระยะเวลาบำบัดที่มีต่อการกำจัดสี	37
4.2.5 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อการกำจัดซีโอดี.....	39
4.2.6 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อการกำจัดบีโอดี.....	40
4.2.7 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพ	41
4.2.8 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อการกำจัดสี.....	42
4.2.9 ผลของพีเอชต่อการกำจัดซีโอดี.....	43
4.2.10 ผลของพีเอชต่อการกำจัดบีโอดี.....	44
4.2.11 ผลของพีเอชต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพ.....	45
4.2.12 ผลของพีเอชต่อการกำจัดสี	46
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของวิธีโอโซนชั้นในการกำจัดสารอินทรีย์ การเพิ่ม..... ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสีของน้ำที่ผ่านการบำบัด ด้วยวิธี EC.....	47
4.3.1 อัตราการผลิตโอโซน	48
4.3.2 ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ การเพิ่มดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพ และการกำจัดสีในน้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดด้วย EC.....	49
4.4 ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน	59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	64
เอกสารอ้างอิง	66
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์.....	75
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง	86
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	94
ประวัติผู้เขียน.....	114

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะของน้ำากาส่าในประเทศไทย.....	7
2.2 การเปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารออกซิแดนท์ต่างๆ.....	16
3.1 วิธีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำากาส่า.....	26
3.2 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์	30
4.1 คุณลักษณะของน้ำากาส่าที่ใช้ศึกษา.....	33
4.2 คุณลักษณะของน้ำากาส่าที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี EC.....	49
4.3 คุณลักษณะของน้ำากาส่าที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี EC ภายหลังจากเจือจาง 100 เท่า	53
4.4 คุณสมบัติของน้ำตัวอย่างก่อนเข้าสู่ระบบ BMP.....	59
4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหยได้ในน้ำตัวอย่าง ปริมาตรและองค์ประกอบของก๊าซที่พบในถังหมัก	60
ก-1 BOD Measurable with Various Dilution of Sample	80
ก-2 ความยาวคลื่นที่ใช้วัดค่า %T.....	82
ข-1 สมบัติของน้ำากาส่าก่อนบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับวิธีโอโซนเนชั่น	86
ข-2.1 ผลของระยะเวลาบำบัด	87
ข-2.2 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้า	88
ข-2.3 ผลของพีเอช	89
ข-3.1 คุณลักษณะของน้ำากาส่าที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี EC	90
ข-3.2 คุณลักษณะของน้ำากาส่าที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี EC ภายหลังจากเจือจาง 100 เท่า.....	90
ข-4.1 การวัดอัตราการผลิตปริมาณโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซน	91
ข-5.1 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซน	91
ข-5.2 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนเมื่อเจือจางน้ำตัวอย่าง	92
ข-5.3 ผลของพีเอช	93
ข-6.1 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆหลังการหมักของชุดควบคุม กลูโคส-กลูตามิค	93
ค-1.1.1 ผลของระยะเวลาบำบัดกับค่าซีไอของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้	
One-way ANOVA.....	94
ค-1.1.2 ผลของระยะเวลาบำบัดกับค่าบีไอของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้.....	
One-way ANOVA.....	95
ค-1.1.3 ผลของระยะเวลาบำบัดกับค่าอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ	
ของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ One-way ANOVA	96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค-1.1.4 ผลของระยะเวลาบำบัดกับค่าสีในหน่วย ADMI ของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ One-way ANOVA.....	97
ค-1.2.1 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าซีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ One-way ANOVA.....	98
ค-1.2.2 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าบีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC..... โดยใช้ One-way ANOVA.....	99
ค-1.2.3 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ ของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ One-way ANOVA	100
ค-1.2.4 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าสีในหน่วย ADMI ของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC ... โดยใช้ One-way ANOVA.....	101
ค-1.3.1 ผลของพีเอชกับค่าซีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ One-way ANOVA..	102
ค-1.3.2 ผลของพีเอชกับค่าบีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ One-way ANOVA .	103
ค-1.3.3 ผลของพีเอชกับค่าอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำทิ้งหลัง การบำบัดด้วย EC โดยใช้ One-way ANOVA	104
ค-1.3.4 ผลของพีเอชกับค่าสีในหน่วย ADMI ของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ One-way ANOVA.....	105
ค-2.1.1 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนกับค่าซีโอดีของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัด ด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ One-way ANOVA.....	106
ค-2.1.2 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนกับค่าบีโอดีของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัด ด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ One-way ANOVA.....	107
ค-2.1.3 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนกับค่าอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทาง ชีวภาพของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น	108
ค-2.1.4 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนกับค่าสีในหน่วย ADMI ของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ One-way ANOVA	109
ค-2.2.1 ผลของพีเอชกับค่าซีโอดีของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น	110
ค-2.2.2 ผลของพีเอชกับค่าบีโอดีของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น	111

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค-2.2.3 ผลของพีเอชกับค่าอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำตัวอย่าง เจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ One-way ANOVA.....	112
ค-2.2.4 ผลของพีเอชกับค่าสีในหน่วย ADMI ของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัด ด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ One-way ANOVA.....	113

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการผลิตสุร่าของโรงงานสุร่ากลั่นขนาดใหญ่	5
2.2 โครงสร้างพื้นฐานของเมลานอยดิน	7
2.3 ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า	10
2.4 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของอะลูมิเนียมที่ค่าพีเอชต่างๆ	12
2.5 การผลิตโอโซนแบบ corona discharge	15
2.6 การผลิตโอโซนแบบ UV radiation	16
2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์กับโอโซน	18
2.8 การเกิดเรโซแนนซ์ของโมเลกุลของโอโซน	18
2.9 การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์แบบ Dipole-Mediate Attack	19
2.10 กลไกการออกซิไดซ์สารประกอบฟีนอล	19
3.1 แผนภาพอย่างง่ายแสดงส่วนประกอบของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า	27
3.2 แผนผังการทำงานของระบบโอโซนชั้น	29
3.3 ชุดการทดลองระบบหมักแบบ Batch	32
4.1 ผลของระยะเวลาในการบำบัดต่อ (ก) ซีไอดี และ (ข) %การกำจัดซีไอดี	
เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์	35
4.2 ผลของระยะเวลาในการบำบัดต่อ (ก) บีไอดี และ (ข) %การเพิ่มขึ้นของบีไอดี	
เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์	36
4.3 ผลของระยะเวลาในการบำบัดต่อ อัตราส่วนของบีไอดี 5 วันต่อซีไอดี	
เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์	37
4.4 ผลของระยะเวลาในการบำบัดต่อ (ก) ค่าสีที่วัดในหน่วย (ADMI) และ (ข) %การกำจัดสี	
เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์	38
4.5 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อ (ก) ซีไอดี และ (ข) %การกำจัดซีไอดี	
เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC นาน 90 นาที	39
4.6 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อ (ก) บีไอดี และ (ข) %การเพิ่มขึ้นของบีไอดี	
เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC นาน 90 นาที	40
4.7 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อ อัตราส่วนของบีไอดี 5 วันต่อซีไอดี	
เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC นาน 90 นาที	42
4.8 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อ (ก) ค่าสีที่วัดในหน่วย (ADMI) และ (ข) %การกำจัดสี	
เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC นาน 90 นาที	43

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ผลของพีเอชต่อ (ก) ซีโอดี และ (ข) %การกำจัดซีโอดี	
เมื่อเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นระยะเวลา 90 นาที.....	44
4.10 ผลของพีเอชต่อ (ก) บีโอดี และ (ข) %การเพิ่มขึ้นของบีโอดี.....	
เมื่อเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นระยะเวลา 90 นาที	45
4.11 ผลของพีเอชต่อ อัตราส่วนของบีโอดี 5 วันต่อซีโอดี.....	
เมื่อเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นระยะเวลา 90 นาที	46
4.12 ผลของพีเอชต่อ (ก) ค่าสีที่วัดในหน่วย (ADMI) และ (ข) %การกำจัดสี.....	
เมื่อเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นระยะเวลา 90 นาที	47
4.13 ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ที่เวลาต่างๆ	48
4.14 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนต่อ (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี	
(ค) %การเพิ่มขึ้นของซีโอดี (ง) %การเพิ่มขึ้นของบีโอดี	
และ (จ) อัตราส่วนของบีโอดี 5 วันต่อซีโอดี ของน้ำตัวอย่าง.....	50
4.15 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนต่อ (ก) ค่าสีที่วัดในหน่วย ADMI และ	
(ข) ประสิทธิภาพการกำจัดสี ของน้ำตัวอย่าง.....	52
4.16 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนต่อ (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี	
(ค) %การกำจัดซีโอดี (ง) %การเพิ่มขึ้นของบีโอดี.....	
และ (จ) อัตราส่วนของบีโอดี 5 วันต่อซีโอดี ของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัด.....	54
4.17 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนต่อ (ก) ค่าสีที่วัดในหน่วย ADMI และ	
(ข) ประสิทธิภาพการกำจัดสี ของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัด	55
4.18 ผลของพีเอชต่อ (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี (ค) %การกำจัดซีโอดี.....	
(ง) %การเพิ่มขึ้นของบีโอดี และ (จ) อัตราส่วนของบีโอดี 5 วันต่อซีโอดี.....	
เมื่อเดินระบบโอโซนเป็นเวลา 60 นาที	57
4.19 ผลของพีเอชต่อ (ก) ความเข้มข้นในหน่วย ADMI และ (ข) ประสิทธิภาพการกำจัดสี	
ของน้ำตัวอย่าง เมื่อเดินระบบโอโซนเป็นเวลา 60 นาที.....	58
4.20 ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (%BMP) ของน้ำตัวอย่างที่ศึกษา.....	63

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
มล.	มิลลิลิตร
ลบ.ซม.	ลูกบาศก์เซนติเมตร
มก.	มิลลิกรัม
BOD ₅ /COD	อัตราส่วนบีโอดี 5 วันต่อ ซีโอดี
°C	องศาเซลเซียส
EC	การรวมตะกอนทางไฟฟ้า
g/L	กรัมต่อลิตร
mg/l	มิลลิกรัมต่อลิตร
O ₃	โอโซน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการผลิตสุราจัดเป็นอุตสาหกรรมที่มีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องและพบได้ทั่วทุกภาคในประเทศไทย ดังจะเห็นได้จากข้อมูลของกรมสรรพสามิต ซึ่งระบุว่าในปี 2553 ประเทศไทยมีโรงงานสุรากลั่นขนาดใหญ่ ที่ขึ้นทะเบียนกับกรมโรงงานอุตสาหกรรมทั้งสิ้น 2,900 โรงงาน ประกอบกับในปี พ.ศ. 2544 รัฐบาลได้มีนโยบายส่งเสริมการผลิตสุราเสรี เพื่อเป็นการสนับสนุนเศรษฐกิจของชุมชนส่งผลให้มีโรงงานสุรากลั่นชุมชนเกิดขึ้นอีกจำนวนมากถึง 220 โรงงาน (ศูนย์วิจัยปัญหาสุรา, 2557) การผลิตสุรากลั่นจะมีน้ำกากส่าเป็นของเสียหลักจากกระบวนการ ซึ่งเกิดขึ้นหลังขั้นตอนการกลั่นแยกเอทานอลออก โดยน้ำเสียดังกล่าวมีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นกรด อยู่ระหว่าง 3.75 – 4.95 มีสารอินทรีย์เจือปนในปริมาณสูง คิดเป็นความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ในรูปบีโอดีและซีโอดีระหว่าง 50,000 - 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 110,000 - 190,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Wagh et al., 2015) นอกจากนี้ยังมีน้ำตาลเข้มข้นถึงดำซึ่งเป็นสีที่เกิดขึ้น จากกระบวนการที่ใช้แปรรูปกากน้ำตาลในอุณหภูมิสูง (ฐปน และคณะ, 2552) ทำให้การบำบัด น้ำกากส่าให้มีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานก่อนระบายลงสู่สิ่งแวดล้อมจึงเป็นเรื่องจำเป็นเพื่อป้องกัน ปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้น

กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยเฉพาะระบบหมัก เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ จัดเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานสุรา (ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549) และมีการประยุกต์ใช้ในโรงงานสุรากลั่น ของกรมสรรพสามิตในปัจจุบัน เนื่องจากระบบดังกล่าวสามารถรองรับน้ำเสียที่มีภาวะสารอินทรีย์ใน ปริมาณสูงได้ ช่วยให้คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพดีขึ้น อีกทั้งยังได้ก๊าซชีวภาพที่สามารถใช้ เป็นแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงภายในโรงงานได้เช่นกัน (วรรณวิจิตร และ สมชาย, 2555) การหาแนวทางเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากระบบบำบัดทางชีวภาพแบบ ไม่ใช้ออกซิเจนจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ควรพัฒนา ทั้งนี้ประสิทธิภาพและความสามารถของ กระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนขึ้นอยู่กับความเหมาะสมต่อการย่อยสลายทาง ชีวภาพของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ ซึ่งการตัดสินความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability) ของน้ำเสียสามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วนของบีโอดี 5 วันต่อซีโอดี (BOD₅/COD) ซึ่งโดยทั่วไปกำหนดให้น้ำเสียที่มี BOD₅/COD เท่ากับ 0.6 จัดเป็นน้ำเสียที่สามารถย่อย สลายทางชีวภาพได้สูง ส่วนน้ำเสียที่มี BOD₅/COD ระหว่าง 0.3-0.6 จัดเป็นน้ำเสียที่สามารถย่อย สลายทางชีวภาพได้ดี ในขณะที่ค่า BOD₅/COD ต่ำกว่า 0.3 แสดงว่าเป็นน้ำเสียเกิดการย่อยสลายทาง

ชีวภาพได้น้อยมาก (Abdallaa and Hammam, 2014) เมื่อพิจารณาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำกากสำจากอัตราส่วน BOD₅/COD พบว่าน้ำกากสำมีค่าดังกล่าวน้อยกว่า 0.2 (Gupta et al., 2015) จัดเป็นน้ำเสียที่มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพค่อนข้างต่ำ อาจเป็นผลมาจากสารประกอบอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสีน้ำกากสำ เนื่องจากสารประกอบจำพวกนี้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระซึ่งมีความเสถียรต่อการย่อยสลายทางชีวภาพทำให้มีความเป็นพิษ หรือส่งผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียได้ (Patel and Jamaluddin., 2018) และอาจต้องใช้ระยะเวลาในการเดินระบบนานเพื่อกำจัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในปริมาณสูง จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์และสีในน้ำกากสำด้วยวิธีการทางชีวภาพอาจไม่เป็นไปตามที่ระบบบำบัดได้ออกแบบไว้ ด้วยเหตุนี้การปรับปรุงคุณลักษณะของน้ำกากสำด้วยวิธีการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำเสียก่อนนำไปบำบัดต่อด้วยกระบวนการทางชีวภาพจึงเป็นเรื่องจำเป็น

ในปัจจุบันมีแนวทางต่างๆในการบำบัดเพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำกากสำเกิดขึ้น เช่น งานวิจัยของ Sangav and Pandit (2004) ได้ศึกษาการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำเสียจากการกลั่นสุราด้วยการบำบัดขั้นต้นโดยใช้อัลตราโซนิก (Ultrasonic irradiation) พบว่ากระบวนการนี้สามารถเปลี่ยนรูปโมเลกุลของสารอินทรีย์ให้เล็กลงและเหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ได้ และในปีค.ศ. 2006 Sangav and Pandit (2006) ยังได้ทำการศึกษาการบำบัดขั้นต้นด้วยเอนไซม์เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (Enzymatic treatment) พบว่าการใช้เอนไซม์จะช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการย่อยสลายให้สูงขึ้น และสามารถลดค่าซีโอดีของน้ำกากสำได้ ทำให้น้ำกากสำมีความเหมาะสมต่อการบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพต่อไป ทั้งนี้การบำบัดด้วยวิธีเหล่านี้ยังคงมีข้อจำกัดของค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการเดินระบบ ในขณะที่วิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้า (Electrocoagulation, EC) เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ เนื่องจากใช้สารโคแอกกูแลนทีในรูปไอออนของโลหะที่ได้จากการละลายของโลหะจากขั้วอิเล็กโทรดแทนการใช้สารเคมีในการรวมตะกอน และใช้ระยะเวลาในการเดินระบบสั้น (Kobya and Gengec, 2012) อีกทั้งสามารถกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีได้มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ (Asha et al., 2014; Esfandyari et al., 2014; Wagh et al., 2015) จึงช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำกากสำได้ (Asha et al., 2014; Esfandyari et al., 2014) อย่างไรก็ตามการบำบัดด้วยวิธีดังกล่าวไม่สามารถกำจัดสีของน้ำกากสำได้เพียงพอ ทำให้น้ำทิ้งหลังการบำบัดยังคงมีสีน้ำตาลเข้มหลงเหลืออยู่ แสดงให้เห็นว่าการใช้กระบวนการบำบัดขั้นต้นเพียงหนึ่งวิธีอาจไม่เพียงพอต่อการบำบัด วิธีโอโซนเนชัน (Ozonation) เป็นอีกวิธีที่สามารถกำจัดสีในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยโอโซนจะเข้าไปออกซิไดซ์พันธะคู่ของสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสีทั้งทางตรงและทางอ้อม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายขึ้นและมีพิษน้อยลง ส่งผลให้ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน (Gomes et al.,

2013; Gupta et al, 2015) อย่างไรก็ตามการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มความสามารถการย่อยสลายทางชีวภาพน้ำกากส่าด้วยวิธี EC ร่วมกับ Ozonation มีอยู่ค่อนข้างจำกัด งานวิจัยนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำกากส่าด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับวิธีโอโซนชั้นเพื่อเป็นแนวทางในการบำบัดขั้นต้นของน้ำกากส่าก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดทางชีวภาพต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสีของน้ำกากส่าด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับวิธีโอโซนชั้น
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำกากส่าด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับวิธีโอโซนชั้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) ตัวอย่างที่ใช้ศึกษาคือน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตสุรากลั่น ที่เก็บรวบรวมมาจากโรงงานผลิตสุรา กรมสรรพสามิต จังหวัดฉะเชิงเทรา

2) ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นน้ำกากส่า ได้แก่ พีเอช, ซีโอดี (COD), บีโอดี (BOD) และค่าสีในหน่วย ADMI

3) ศึกษาความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสีของน้ำกากส่าด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้า

ปัจจัยที่ศึกษา/ตัวแปรต้น ได้แก่

- ระยะเวลาบำบัด โดยแปรระยะเวลาที่ 30, 60, 90 และ 120 นาที
- ความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยแปรค่าปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 5, 10, และ 15 โวลต์
- พีเอช โดยแปรค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำตัวอย่างที่ 2, 4, 6, 8 และ 10

ตัวแปรตาม ได้แก่ COD, BOD, BOD₅/COD และค่าสีในหน่วย ADMI

4) ศึกษาประสิทธิภาพของวิธีโอโซนชั้นในการกำจัดสารอินทรีย์ การเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสีของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

ปัจจัยที่ศึกษา/ตัวแปรต้น ได้แก่

- ระยะเวลาเวลาการผ่านก๊าซโอโซน โดยแปรระยะเวลาในช่วงระหว่าง 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 นาที
- พีเอช โดยแปรค่าพีเอชของน้ำเสียที่ 2, 4, 6, 8 และ 10

ตัวแปรตาม ได้แก่ COD, BOD, BOD₅/COD และค่าสีในหน่วย ADMI

5) ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (BMP) ของน้ำทิ้งจากการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับวิธีโอโซนชั้น เทียบกับน้ำทิ้งจากการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าและน้ำกากส่า

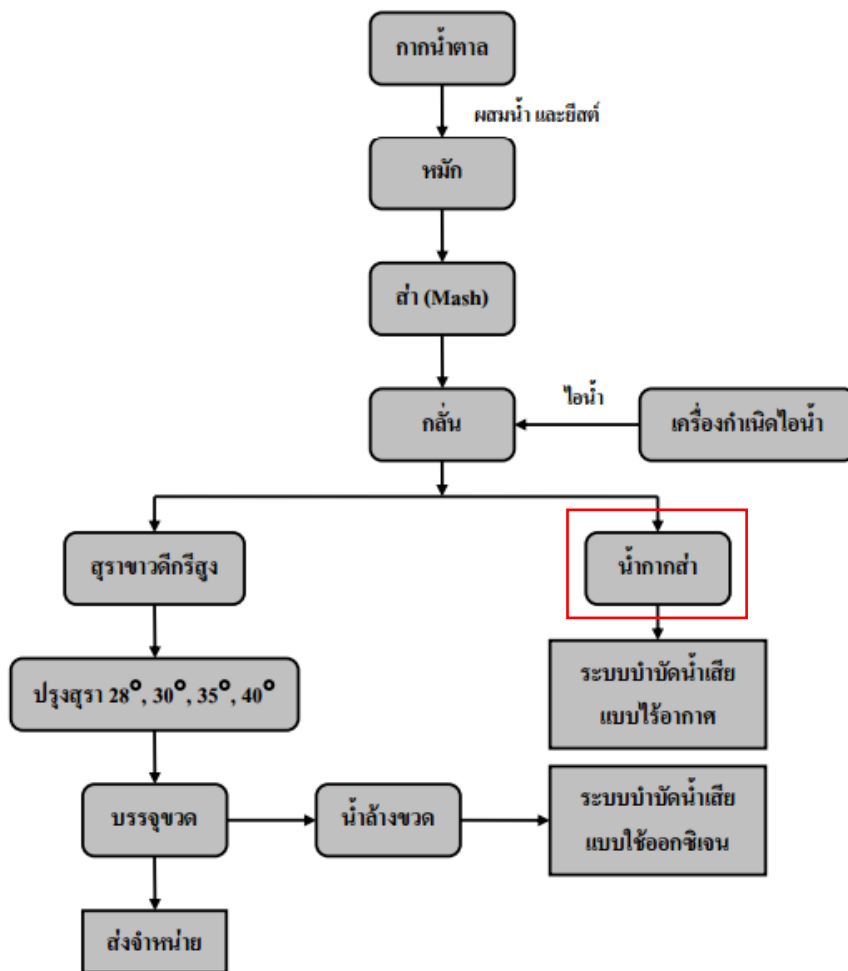
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้แนวทางในการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสื่อน้ำกากสำ
- 2) สามารถประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและวิธีโอโซนชั้นในการบำบัดขั้นต้นของน้ำกากสำก่อนผ่านเข้าสู่กระบวนการชีวภาพต่อไปได้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำกากสำ

น้ำกากสำ มีชื่อเรียกภาษาอังกฤษที่หลากหลาย เช่น Distillery Slop, Alcohol slop เป็นของเหลวที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการกลั่น “สำเหล้าหรือแมช (Mash)” ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักวัตถุดิบจำพวกกากน้ำตาลหรือข้าวเหนียวให้เป็นเอทิลแอลกอฮอล์โดยยีสต์ เพื่อแยกเอาส่วนที่กลั่นได้ไปใช้ในการผลิตสุราต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตของโรงงานสุรากลั่นขนาดใหญ่
(คณะกรรมการวิสามัญพิจารณาสอบสวนและศึกษาเรื่องเกี่ยวกับการทุจริตวุฒิสภา, 2549)

2.1.1 ประเภทของน้ำกากส่า

น้ำกากส่าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตสุรา (คณะกรรมการวิสามัญพิจารณาสอบสวนและศึกษาเรื่องเกี่ยวกับการทุจริตวุฒิสภา, 2549)

1. *กากส่าแดง* เป็นน้ำกากส่าที่เกิดขึ้นมาจากกระบวนการผลิตสุรากลั่นซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ ในการผลิตน้ำกากส่าประเภทนี้พบได้เกือบทุกแห่งในประเทศไทย โดยการผลิตสุรากลั่นที่กำลังการผลิต 90 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะมีน้ำกากส่าเกิดขึ้นในปริมาณ 300 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน หรือประมาณ 3.5 เท่าของปริมาตรสุราที่ผลิตได้ (มาลี, 2530 อ้างถึงใน คณะกรรมการวิสามัญพิจารณาสอบสวนและศึกษาเรื่องเกี่ยวกับการทุจริตวุฒิสภา, 2549)

2. *กากส่าขาว* เป็นน้ำกากส่าที่เกิดขึ้นจากการใช้ข้าวเหนียวเป็นวัตถุดิบในการผลิตสุรากลั่น มักพบในกระบวนการผลิตสุราในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย เนื่องจากข้าวเหนียวเป็นวัตถุดิบที่มีราคาแพงกว่าจึงไม่เป็นที่นิยมใช้ ทำให้ปริมาณน้ำกากส่าที่เกิดขึ้น น้อยกว่ากากส่าแดงที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ นอกจากนี้ยังแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ น้ำกากส่าสด, น้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน และน้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดแบบเติมอากาศ

2.1.2 ลักษณะน้ำกากส่า

น้ำกากส่าจัดเป็นน้ำเสียประเภทเข้มข้นที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ได้แก่ น้ำตาลชนิดต่างๆ อาทิ ซูโครส กลูโคส ฟรุคโตสและราฟไฟโนส วัดในรูป COD มีค่าอยู่ระหว่าง 56,970 – 193,600 มิลลิกรัม/ลิตร และค่า BOD₅ มีค่าอยู่ระหว่าง 17,500 – 45,000 มิลลิกรัม/ลิตร สมบัติอื่นๆของน้ำกากส่าแสดงดังตารางที่ 2.1 และมีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งสีน้ำตาลเข้มในน้ำกากส่านั้นเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการที่ใช้ในการแปรรูปกากน้ำตาลที่อุณหภูมิสูง ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีของสารต่างๆที่มีอยู่ในกากน้ำตาล ได้แก่

1) ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) เป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวกับกรดอะมิโนของโปรตีนและสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ ทำให้เกิดสารสีน้ำตาลที่เรียกว่า เมลานอยดิน (melanoidins)

สารเมลานอยดินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก มีสมบัติเป็นทั้งกรดและเป็นพอลิเมอร์ (Polymeric) ที่มีสภาพเป็นประจุลบจากการแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่ฟีนอลิก (Koby and Gengec, 2012) เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบ polymerization ทำให้สารเมลานอยดินมีโครงสร้างไม่แน่นอน ส่วนใหญ่พบว่าเป็นพันธะคู่และประกอบด้วยธาตุ 4 ชนิด คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ดังรูปที่ 2.2 สารชนิดนี้มีการเปลี่ยนแปลงด้านกลิ่นและสี ซึ่งก่อให้เกิดความเป็นพิษได้จากปฏิกิริยา Maillard Reaction (กุนที, 2549) และเป็นสารที่ถูกละลายได้ยาก จึงเป็นปัญหาที่ต้องการกำจัดก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

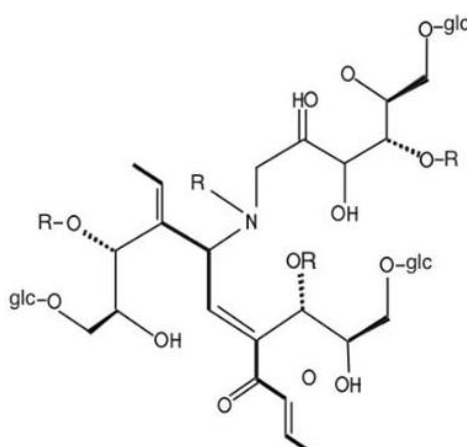
ตารางที่ 2.1 ลักษณะของน้ำกากส่าในประเทศไทย

ลักษณะ	ต่ำสุด	สูงสุด	ค่าเฉลี่ย
pH	2.3	5.5	3.66
อุณหภูมิ (°C)	53	100	88.6
COD (mg/L)	56,970	193,600	118,098
BOD (mg/L)	17,500	45,000	27,475
Suspended Solids (mg/L)	5,240	23,830	11,318
Total Solids (mg/L)	36,280	123,640	75,829
Total Volatile Solids (mg/L)	30,280	59,220	58,523
Settleable Solids (mg/L)	trace	250	26.67

(ไชยยุทธ, 2524)

2) ปฏิกริยาการเกิดคาราเมล (Caramelization) เป็นปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ แต่เกิดจากการสลายตัวของน้ำตาลชนิดต่างๆที่มีเหลือในกากน้ำตาลที่ยีสต์ไม่ใช้ในการหมักแอลกอฮอล์ ด้วยความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 100-140 องศาเซลเซียส และมีการเกิดพอลิเมอร์ (polymerization) ของสารประกอบคาร์บอน ได้เป็นสารสีน้ำตาลเข้มที่มีกลิ่นเฉพาะตัว เรียกว่า คาราเมล (พรพิมล และคณะ, 2557)

3) ปฏิกริยาออกซิเดชันของ phenol กับสารประกอบอะมิโนหลังจากพอลิเมอร์ไรเซชันที่อุณหภูมิสูง กระบวนการต่างๆเหล่านี้ ทำให้เกิดสีน้ำตาลเข้มขึ้นถึงดำและทำให้กากน้ำตาลมีรสขม โดยพบว่าสีน้ำตาลของน้ำกากส่าส่วนใหญ่ เกิดจากสารเมลานอยดินจากปฏิกริยาเมลลาร์ดนั่นเอง (กุนที, 2549)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของเมลานอยดิน (Kobyas and Gengec, 2012)

2.1.3 การบำบัดน้ำกากส่าด้วยวิธีทางชีวภาพ (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2551)

การปนเปื้อนของน้ำกากส่าจากกระบวนการผลิตสุรากลั่นทำให้เกิดปัญหาหมอกควันในแม่น้ำลำคลอง ซึ่งสิ่งสกปรกดังกล่าวอาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสิ่งแวดล้อมได้ การปรับปรุงคุณภาพของน้ำกากส่าที่เป็นน้ำทิ้งโดยการแยกสิ่งสกปรกต่างๆ ตลอดจนสีน้ำตาลเข้มของน้ำกากส่าให้มีปริมาณลดลงจนอยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาจึงเป็นสิ่งจำเป็น ในประเทศไทยได้สร้างระบบกำจัดน้ำกากส่าหลายระบบด้วยกันในอดีต อาทิเช่น ระบบเคี้ยวและเผา, การเคี้ยว, การทำปุ๋ยหมัก, ราวถนน, ใช้เป็นอาหารปลา และใช้ในการเกษตรโดยตรง เป็นต้น (สุจินต์, 2528 อ้างถึงในคณะกรรมการวิสามัญพิจารณาสอบสวนและศึกษาเรื่องเกี่ยวกับการทุจริตวุฒิสภา, 2549) นอกจากนี้ยังมีการนำกระบวนการทางชีวภาพมาใช้ในการบำบัดน้ำกากส่า และเริ่มเป็นที่นิยมนำมาใช้เมื่อเทียบกับวิธีการบำบัดอื่นๆ เนื่องจากเป็นวิธีการบำบัดที่สามารถรับภาระสารอินทรีย์ได้สูง และสามารถลดขนาดของถังปฏิกรณ์ลงได้ โดยวิธีการบำบัดทางชีวภาพที่ใช้ในบำบัดน้ำกากส่าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) ระบบบำบัดทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน โดยสารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ขึ้นจำนวนมาก ได้แก่ ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ (activated sludge, AS) ระบบคลองวนเวียน (oxidation ditch, OD) ระบบจานหมุนชีวภาพ (rotating biological contactors, RBC) ระบบบ่อผึ่ง (oxidation pond, OP) และระบบสระเติมอากาศ (aerated lagoon, AL) เป็นต้น ข้อได้เปรียบของกระบวนการบำบัดแบบนี้ คือระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงและใช้ระยะเวลาในการบำบัดสั้น จากรายงานของ Jiranuntipon (2009) ระบุว่าเมื่อเริ่มต้นเดินระบบเป็นเวลา 7 วัน ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ สามารถกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีและบีโอดีได้ถึง 93% และ 97.5% ตามลำดับ แต่มีข้อเสียคือมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงเนื่องจากค่าใช้จ่ายในการพ่นอากาศให้กับระบบ และการกำจัดตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกิน

2) ระบบบำบัดทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยสารอินทรีย์ในน้ำเสียประมาณร้อยละ 80-90 ที่แบคทีเรียย่อยสลายได้จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพในรูปของก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนน้ำมันเตาที่ใช้ในเครื่องผลิตไอน้ำ และมีความสามารถในการกำจัดบีโอดีถึง 82-92 เปอร์เซ็นต์ (Jiranuntipon, 2009) รายงานของชวลิตและภาคีส (2549) กล่าวว่าระบบบำบัดทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตสุรากลั่นจากกากน้ำตาลที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าระบบบำบัดทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนมาก อย่างไรก็ตามระบบจุลินทรีย์ที่ใช้ในการย่อยสลายในระบบนี้มีการเจริญเติบโตค่อนข้างช้าทำให้ระบบเริ่มต้นได้ช้า อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดได้ ดังนั้นการหาแนวทางเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากระบบบำบัดทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ควรพัฒนา (ชวลิต และภาคีส, 2549)

อย่างไรก็ตามวิธีการบำบัดทางชีวภาพที่กล่าวมาข้างต้นยังมีข้อจำกัด เนื่องจากแบคทีเรียยังไม่สามารถกำจัดสีของน้ำกากส่าบางชนิดได้เพียงพอ ทำให้ยังหลงเหลือสีของน้ำกากส่าในน้ำทิ้ง ด้งานวิจัยของ Patel and Jamaluddin (2018) ระบุว่าในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพทั้งแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน สามารถกำจัดสารเมลานอยดิน ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลเข้มในน้ำกากส่าได้เพียง 6-7 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น

2.2 กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation, EC)

การรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ใช้บำบัดน้ำเสียได้หลากหลายลักษณะ เช่น น้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ หรือแม้แต่จุลินทรีย์ กระบวนการนี้ใช้หลักการในการบำบัดน้ำเสียเช่นเดียวกับวิธีการตกตะกอนทางเคมีแบบดั้งเดิมด้วยการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์โดยใช้สารโคแอกกูแลนต์ที่ได้จากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ที่เกิดจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าในการกำจัดสารแขวนลอยหรือสารละลายที่ปนเปื้อนในน้ำ

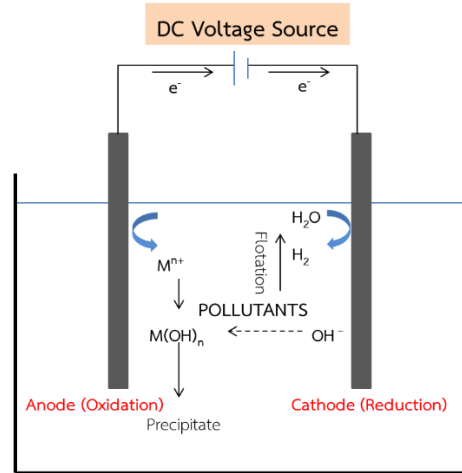
2.2.1 ส่วนประกอบของระบบ EC

กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีองค์ประกอบหลักคือ เซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งเซลล์ที่ใช้ในการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้านี้เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) (รูปที่ 2.3) ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเคมี จากการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในเซลล์แล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ ดังนี้

1) แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Voltage) ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าแก่ระบบให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านและเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากศักย์ไฟฟ้าสูงไปหาศักย์ไฟฟ้าต่ำ

2) ขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรด (Electrode) ทำหน้าที่เป็นขั้วที่ให้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าและออกจากเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยทั่วไปเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ง่ายที่สุดจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดอย่างน้อย 2 ขั้ว จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ ขั้วแอโนด (Anode) คือ ขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และขั้วแคโทด (Cathod) คือขั้วที่เกิดรีดักชัน ซึ่งขั้วทั้งสองอาจเป็นโลหะชนิดเดียวกับหรือต่างชนิดกันก็ได้ โดยทั่วไปใช้แผ่นโลหะ เช่น เหล็กหรืออะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด เพื่อผลิตไอออนประจุบวกอย่างต่อเนื่อง

3) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) คือ สารที่มีสถานะเป็นของเหลว นำไฟฟ้าได้ เพราะมีไอออนเคลื่อนที่ไปมาอยู่ในสารละลาย ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.3 ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

2.2.2 ปฏิกิริยาเคมีและกลไกที่เกิดขึ้น

เซลล์ไฟฟ้าเคมีของระบบ ประกอบด้วยแผ่นขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว ได้แก่ แอโนด (Anode) และแคโทด (Cathode) เมื่อต่อเข้ากับแหล่งพลังงานภายนอก จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรด โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดเป็นดังต่อไปนี้



เมื่อให้กระแสไฟฟ้าคร่อมบนขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรด จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด ดังสมการที่ 2.1 โดยเกิดการละลายของอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ซึ่งเป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่มีประจุตรงข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำเสียที่มักเป็นประจุลบ เมื่ออะลูมิเนียมไอออนที่เกิดขึ้นนี้ทำปฏิกิริยากับประจุบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์โดยการดูดซับประจุให้กลายเป็นกลางจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์ลดลงเป็นผลให้แรงผลักระหว่างอนุภาคอ่อนลงและสามารถจับตัวกันเป็นตะกอนขึ้น เป็นการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ผ่านกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and Charge Neutralization) (พรศักดิ์, 2556) ในขณะที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังสมการที่ 2.2 ทำให้อะลูมิเนียมไอออนที่ยังคงละลายออกมาในน้ำสามารถทำปฏิกิริยาต่อกับไฮดรอกไซด์ไอออน เกิดเป็นผลึกอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่ไม่ละลายน้ำ (สมการที่ 2.3) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเป่าสัมผัสให้สารอินทรีย์มาเกาะจับและรวมตัวกันเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้นจนสามารถตกตะกอนได้ เรียกว่ากลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับ (Sweep Coagulation) (พรศักดิ์, 2556) นอกจากนี้ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด จะช่วยทำให้อนุภาคที่รวมตัวกันเป็นตะกอนลอยตัวขึ้น สามารถกำจัดออกด้วยการกวาดทิ้ง

จากผิวน้ำ และแยกออกจากน้ำได้ด้วยวิธีการปล่อยให้ตกตะกอน หรือการลอยตะกอน นิยมเรียกว่า การทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า (Electroflotation) (สมพงษ์, 2551)

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อวิธีการรวมตะกอนทางไฟฟ้า

2.2.3.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะเวลาสัมผัส

ความต่างศักย์ไฟฟ้า คือค่าความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุด ในสนามไฟฟ้า หรือวงจรไฟฟ้า โดยความต่างศักย์ระหว่างขั้วเซลล์เป็นแรงดันไฟฟ้า (สมการที่ 2.4) ที่สามารถดันให้ กระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วบวกผ่านตัวต้านทานภายนอกไปสู่ขั้วลบได้ และยังเป็น การเพิ่มความหนาแน่น ของกระแสไฟฟ้าเช่นกัน เมื่อเขียนเป็นสมการจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้ คือ

$$V = E \quad (2.4)$$

เมื่อ V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์) และ E คือแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)

และ

$$J = GE \quad (2.5)$$

เมื่อ G คือ ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนส์ต่อเมตร)

โดยความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (J) ที่เพิ่มขึ้น ยังชี้ให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบต่อพื้นที่อิเล็กโทรดที่ใช้ ดังสมการ 2.6

$$J = I/A \quad (2.6)$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) และ A คือพื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)

และตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ได้กล่าวว่าการผ่านปริมาณกระแสไฟฟ้า ให้แก่ระบบ 1 ฟาราเดย์ จะทำให้มีอิเล็กตรอนเกิดขึ้น 1 โมล (สมการ 2.7) ซึ่งมีผลต่อปริมาณไอออน ของโลหะ เช่น Al^{3+} และ Fe^{2+} ที่ถูกออกซิไดซ์ออกมาจากขั้วอิเล็กโทรด โดยในกรณีของอะลูมิเนียม จะมีค่าสมมูลเคมีไฟฟ้าเท่ากับ 335.6 มก./แอมแปร์-ชั่วโมง และสำหรับเหล็กมีค่าเท่ากับ 1,041 มก./แอมแปร์-ชั่วโมง

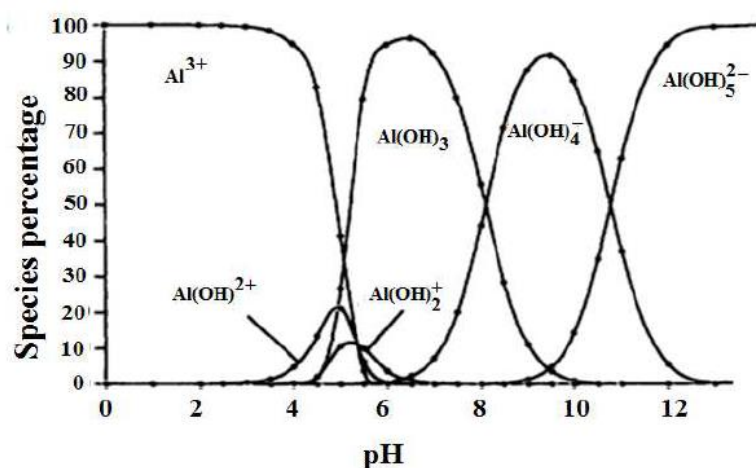
$$\begin{aligned} 1 \text{ Faraday} &= 96,485 \text{ คุลอมป์} \\ &= 6.022 \times 10^{23} \text{ อิเล็กตรอน} \\ &= 1 \text{ โมล } e^- \end{aligned} \quad (2.7)$$

อย่างไรก็ตามการใช้กระแสไฟฟ้าที่ปริมาณสูงเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสีย กระแสไฟฟ้าในการให้ความร้อนแก่น้ำ (Joule heating effect) ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัด ลดลงและเกิดการกัดกร่อนอิเล็กโทรดได้ นอกจากนี้ปริมาณกระแสไฟฟ้า (I) และระยะเวลาสัมผัส (t) ยังเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลร่วมกันต่อระบบของ EC ดังจะเห็นได้จากสมการ 2.8 จึงสรุปได้ว่าคุณภาพน้ำ ที่ผ่านการบำบัดจะขึ้นกับปริมาณไอออนที่ละลายจากอิเล็กโทรด ซึ่งเท่ากับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้ และระยะเวลาสัมผัส (สมพงษ์, 2551)

$$I \times t = \text{คูลอมบ์} \quad (2.8)$$

2.2.3.2 พีเอช

การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำเสียจะส่งผลต่อรูปฟอร์มของสารคอมเพล็กซ์ที่เกิดขึ้นระหว่าง Al^{3+} กับ OH^- ซึ่งเป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เมื่อเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรด Al^{3+} ที่ละลายออกมาในน้ำบางส่วนจะรวมตัวกับ OH^- เกิดโมโนเมอร์ต่างๆของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ปะปนในน้ำซึ่งเป็นสารคอมเพล็กซ์ที่อาจมีประจุลบหรือบวกขึ้นกับค่าพีเอชของตัวกลาง โดยในสภาพที่เป็นกรด หรือพีเอชของน้ำต่ำกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้าของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ จะพบโมโนเมอร์ เช่น $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_3$ โมโนเมอร์ดังกล่าวสามารถเกิดโพลีเมอร์ขึ้นเป็นโมโนเมอร์ที่มีประจุบวกจำนวนมาก เช่น $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ และ $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ และดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่ไม่ละลายน้ำได้ (รูปที่ 2.4) ซึ่งเป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่สำคัญในการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ Sweep coagulation พบได้เป็นหลักในน้ำที่มีเอชอยู่ระหว่าง 6-7 นอกจากนี้ที่พีเอชเป็นกลางและกรดจะทำให้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากขั้วอิเล็กโทรดมีขนาดเล็กที่สุด ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับอนุภาคสารอินทรีย์ของกระบวนการรวมตะกอนทางเคมีไฟฟ้า (EC) และการลอยตะกอน (EF) ได้ดีกว่า (Vepsalainen, 2012) เมื่อพีเอชของน้ำเพิ่มขึ้นสูงกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้า (Zero Point of Charge) ของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ หรือพีเอชเป็นด่าง จะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุลบเป็นหลัก เช่น $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$ ทำให้ $\text{Al}(\text{OH})_3$ (s) ที่ทำหน้าที่เป็นสารรวมตะกอนมีปริมาณลดลงและไม่เพียงพอต่อการเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ (สมพงษ์, 2551) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารเจือปนในน้ำ โดยเฉพาะสารอินทรีย์และสีลดลง



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาไฮโดรลีสของอะลูมิเนียมที่พีเอชต่างๆ

(Lekhlif et al., 2014)

2.2.3.3 ประเภทของโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรด

วัสดุที่นิยมใช้ทำอิเล็กโทรดในกระบวนการ EC ได้แก่ อะลูมิเนียมหรือเหล็ก โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมหรือแผ่นเหล็ก หรืออาจใช้เศษโลหะทั้งสองชนิดที่เหลือจากงานการตัดหรืองานโลหะอื่น ๆ และควรเป็นวัสดุที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ากับตัวยัดจับอิเล็กโทรดที่ทำจากเศษโลหะเหล่านี้ ในการใช้งานจะต้องระมัดระวังการเกิดสัลดั้สะสมระหว่างอิเล็กโทรด และควรทำความสะอาดผิวหน้าของอิเล็กโทรดเป็นประจำ และเนื่องจากการกำจัดมลสารจะต้องใช้อีออนโลหะที่มากเพียงพอกับปริมาณมลสารที่ต้องการกำจัด อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดสังเวจจะขึ้นกับคุณลักษณะของน้ำเสีย โดยเฉพาะในกรณีที่มีน้ำเสียมีมลสารมากจะต้องใช้อีออนโลหะจำนวนมากในการตกตะกอน

โดยการใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า OH^- ที่เกิดขึ้นจะไม่กัดเซาะขั้วไฟฟ้าและเกิดเป็น $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ เช่นที่เกิดในอะลูมิเนียม ดังนั้นการใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าจะคงทนมากกว่าการใช้อะลูมิเนียม อย่างไรก็ตามการใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้ามีข้อดีที่มีการเกิดโพลีเมอร์เรซิน และเกิดเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีประจุหลากหลายรูปแบบ ซึ่งมีสมบัติในการดูดซับดี ดังนั้นการเลือกชนิดของขั้วไฟฟ้าจึงต้องพิจารณาถึงข้อดีข้อด้อยของวัสดุขั้วไฟฟ้างดกล่าว อีกทั้งชนิดของสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำก็ให้ผลแตกต่างกันอีกด้วย

2.2.4 ข้อดีและข้อเสียของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (สมพงษ์, 2551)

2.2.4.1 ข้อดี

- ระบบ EC ใช้เครื่องมือแบบธรรมดาที่ไม่มีระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า จึงทำให้การบำรุงรักษาทำได้ง่าย
- สามารถนำไปใช้ได้ทั่วไป แม้ในที่ที่ไม่มีไฟฟ้าใช้โดยสามารถใช้แสงผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงต่อเข้ากับแบตเตอรี่และจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบ ซึ่งอาจเพียงพอสำหรับการเดินระบบขนาดเล็ก
- ระบบ EC ไม่ต้องใช้สารเคมี เมื่อเกิดปัญหาการเติมสารเคมีที่มากเกินไปจึงไม่มีปัญหาการใช้สารเคมีในการปรับค่า pH
- กระบวนการ EC สามารถกำจัดคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กได้ดีกว่า
- ฟองก๊าซขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจะเกาะติดกับของแข็งแขวนลอยและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำทำให้สามารถกำจัดออกได้ง่าย
- น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบ EC มีลักษณะใส ไม่มีสี และไม่มีกลิ่น
- น้ำทิ้งจากระบบ EC มีค่าของแข็งละลายน้ำน้อยกว่าการใช้สารเคมีตกตะกอนซึ่งทำให้ค่าบำบัดน้ำสำหรับการนำน้ำกลับไปใช้ใหม่มีค่าต่ำกว่า
- ตะกอนหรือฟล็อกที่เกิดขึ้นจาก EC มีลักษณะเดียวกับสัลดั้ที่ได้จากการเติมสารเคมี แต่มีขนาดใหญ่กว่าและคงตัวกว่า ทำให้สามารถกำจัดออกด้วยการกรองได้เร็ว

- สลัดจ์ที่ได้ตกตะกอนได้เร็วและรีดน้ำออกได้ง่าย และเกิดสลัดจ์ในปริมาณที่น้อยกว่า
การใช้สารเคมีในการตกตะกอน

2.2.4.2 ข้อเสีย

- โลหะจากอิเล็กโทรดละลายลงสู่น้ำเสียทำให้ต้องทำการเปลี่ยนอิเล็กโทรดตาม
ระยะเวลาการใช้งาน

- การใช้ไฟฟ้าอาจมีราคาแพงในบางพื้นที่

- อาจเกิดฟิล์มออกไซด์ของเกลือโลหะบนผิวของอิเล็กโทรด ทำให้ประสิทธิภาพของ
ระบบ EC ลดลง ทำให้ต้องทำการล้างอิเล็กโทรดเป็นครั้งคราว

- น้ำเสียที่บำบัดด้วยระบบ EC ต้องมีค่าการนำไฟฟ้าสูงเพียงพอ

- เกลือไฮดรอกไซด์ที่ได้มีลักษณะเป็นเจลอาจละลายน้ำได้ในบางกรณี

2.3 กระบวนการโอโซนเนชัน (Ozonation)

กระบวนการโอโซนเนชัน จัดเป็นกระบวนการทางออกซิเดชันทางเคมีที่ใช้โมเลกุลโอโซน (O_3)
เป็นตัวออกซิแดนต์ ถูกนำมาใช้ในการสลายพันธะของสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน
ให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายยิ่งขึ้น ปัจจุบันจึงมีการใช้โอโซนร่วมกับระบบบำบัดอื่นๆ
มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นก่อนทำการบำบัดทางชีวภาพต่อไป ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพในการ
ย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดียิ่งขึ้น (จิตาภาและภัชราภรณ์, 2560)

2.3.1 คุณสมบัติของโอโซน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

โอโซน (O_3) เป็นสารที่อยู่ในสถานะก๊าซที่อุณหภูมิและความดันปกติ ประกอบไปด้วย
โมเลกุลของออกซิเจน 3 โมเลกุล ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลอิสระของออกซิเจน (O^\bullet)
กับก๊าซออกซิเจนโมเลกุลอื่น (O_2) มีจุดเดือดเท่ากับ $-111.9^\circ C$ ที่ความดันบรรยากาศ และไม่เสถียร
มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาทั้งในน้ำ สารละลายและอากาศ ความสามารถในการละลายของ
โอโซนในน้ำหรือน้ำเสียจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน รวมทั้งค่าความเป็นกรดต่าง
สามารถคำนวณปริมาณโอโซนในของเหลวได้ด้วยกฎของเฮนรี่ (Grima, 2009) ดังสมการที่ 2.9
จะเห็นได้ว่าการละลายของโอโซนในน้ำยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโอโซนในอากาศเช่นกัน

$$H_u = \frac{C_g}{C_s} \quad (2.9)$$

H_u = ค่าคงที่ของเฮนรี่ (3.97 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส)

C_g = ความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซ (mol m^{-3}_g)

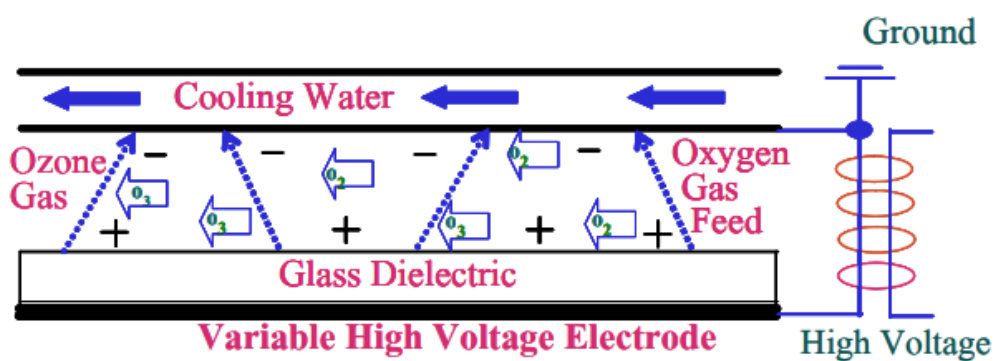
C_s = ความเข้มข้นของโอโซนในของเหลว (mol m^{-3}_{aq})

โอโซนเป็น Oxidizing agent ที่รุนแรง (สามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าคลอรีน 3,000 เท่า) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ (Toxic Organic) และสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพยากได้ดี ผลกระทบของปฏิกิริยาส่วนมากจะมีพิษน้อยลงและถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ โดยโอโซนมีประสิทธิภาพในการทำลายสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสีในน้ำได้ประมาณ 20 เท่า เมื่อเทียบกับออกซิเจน ค่าพลังงานอิสระ (Free Energy) ของโอโซนมีค่าเท่ากับ -400 kJ/mol ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าปฏิกิริยาออกซิไดซ์โดยโอโซนจะดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

2.3.2 การผลิตโอโซน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

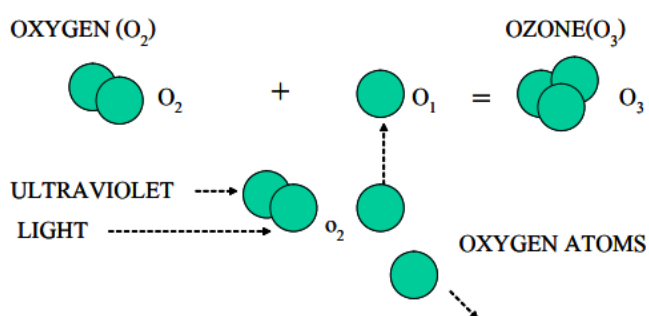
โอโซน (O_3) เป็นก๊าซที่ไม่เสถียร มีแนวโน้มสลายตัวกลับไปเป็นออกซิเจนได้ง่าย ซึ่งมีครึ่งชีวิต 12 ชั่วโมงในบรรยากาศ และมีครึ่งชีวิตเพียง 20-30 นาที เมื่อละลายอยู่ในน้ำ ส่งผลให้ไม่สามารถสร้างโอโซนเก็บไว้ได้ จึงต้องมีการผลิตโอโซน ณ แหล่งที่ใช้งานโดยตรง (on site) โดยวิธีการที่นิยมใช้การผลิตโอโซนในปัจจุบันมี 2 วิธี ดังนี้

(ก) Corona discharge เป็นวิธีจำลองการเกิดโอโซนตามปรากฏการณ์ฟ้าผ่า โดยให้ก๊าซออกซิเจนแห้งและบริสุทธิ์ผ่านเข้าไปในสนามไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูง สนามไฟฟ้าแห่งนี้มีผลให้โมเลกุลของออกซิเจนถูกทำลาย แล้วลดพลังงานของโมเลกุลลงเพื่อให้เกิดการจับกันกับอนุมูลอิสระของออกซิเจน (O^\bullet) ได้ง่าย ได้เป็นก๊าซโอโซนออกมาด้วยความเข้มข้นสูง 1-10% โดยน้ำหนัก วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีต้นทุนต่ำและสร้างโอโซนได้ในปริมาณมาก (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 การผลิตโอโซนแบบ corona discharge
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

(ข) UV radiation เป็นวิธีการจำลองการเกิดโอโซนในธรรมชาติ โดยใช้รังสี UV ที่ความยาวคลื่นสั้น 254 นาโนเมตร ซึ่งมีพลังงานมากพอในการทำให้โมเลกุลของออกซิเจนในอากาศไม่เสถียร และแตกกระจายออกเป็นอนุมูลอิสระของออกซิเจน (O^\bullet) และรวมตัวกับออกซิเจนโมเลกุลอื่นได้เป็นก๊าซโอโซนที่มีความเข้มข้นต่ำ 0.01-0.1% โดยน้ำหนัก เป็นวิธีที่มีต้นทุนสูงและผลิตโอโซนได้ในปริมาณน้อยกว่า (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 การผลิตโอโซนแบบ UV radiation

(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

2.3.3 การสลายตัวของโอโซนในน้ำ (ทัศนดา, 2553 ; ปิยะวิทย์, 2553)

การสลายตัวของโอโซนในน้ำเป็นลักษณะที่สำคัญที่นำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการโอโซนชันได้ เนื่องจากโอโซนสามารถทำการออกซิไดซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนในน้ำจะขึ้นกับค่าพีเอชของสารละลาย อุณหภูมิและความดัน โดยโอโซนสามารถสลายตัวในน้ำเป็นออกซิเจน และแตกตัวให้แรดิคัลต่างๆ ได้แก่ Hydroxyl radical (OH[•]), HO₃[•], HO₄[•] และ Super oxide (O₂^{•-}) ซึ่งเป็นสารออกซิแดนซ์ที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา (strong oxidant) กับสารต่างๆ มีค่าศักย์ออกซิเดชัน ดังตารางที่ 2.2

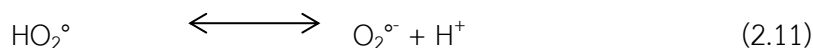
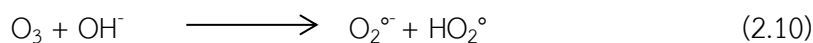
ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการออกซิไดซ์ (Oxidation potential) ของสารออกซิแดนซ์ต่างๆ

Oxidizing agent	Oxidation potential (mV)
Hydroxyl radical	2.8
Sulfate radical	2.6
Ozone	2.1
Hydrogen peroxide	1.8
Permanganate	1.7
Chlorine	1.4
Oxygen	1.2
Bromide	1.1

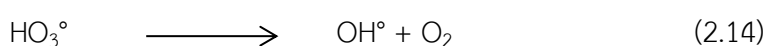
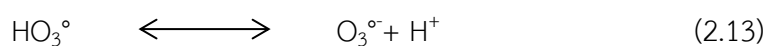
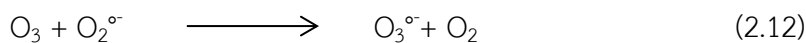
(United States Environmental Protection Agency, 2017)

การสลายตัวของโอโซนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นด่างเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้โอโซนทำปฏิกิริยากับน้ำและไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคัล (Superoxide anion Radical ; O₂^{•-}) และไฮโดรเปอร์ออกซิลแรดิคัล (hydroperoxyl radical, HO₂[•]) ดังสมการ 2.8 และ

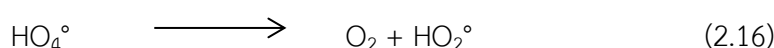
เมื่อไฮโดรเปอร์ออกซิลแรดิคอลลอยอยู่ในสมดุลกรด-เบส (Acid - Base Equilibrium) จะสามารถเปลี่ยนเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคอลล ดังสมการ 2.10



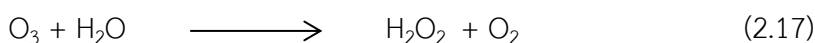
จากนั้นโอโซนและซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคอลลทำให้เกิดเป็นโอโซนไนด์แอนไอออนแรดิคอลล (O_3^\cdot) ซึ่งสามารถสลายตัวทันทีที่ไฮดรอกซิลแรดิคอลล (OH^\cdot) เป็นผลิตภัณฑ์ ดังสมการ 2.12 ถึง 2.14 ซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออน จะเป็นตัว promoter ของปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซน ดังนั้นครึ่งชีวิตของโอโซนจึงค่อนข้างสั้นในสภาพที่เป็นต่าง โดยที่พีเอชเท่ากับ 10 ครึ่งชีวิตของโอโซนในน้ำบริสุทธิ์มีค่าประมาณ 30 นาที



ไฮดรอกซิลแรดิคอลลที่เกิดขึ้นอาจทำปฏิกิริยาต่อเนืองกับโอโซน เกิดเป็นไฮโดรเตตระออกซิลแรดิคอลล (HO_4^\cdot) ได้ดังสมการที่ 2.15 และ 2.16 และไฮโดรเตตระออกซิลแรดิคอลลสามารถสลายตัว (HO_4^\cdot) เป็นออกซิเจนและไฮโดรเปอร์ออกซิลแรดิคอลล ทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ใหม่อีกครั้ง (Radical Chain) ตั้งแต่ปฏิกิริยา 2.9



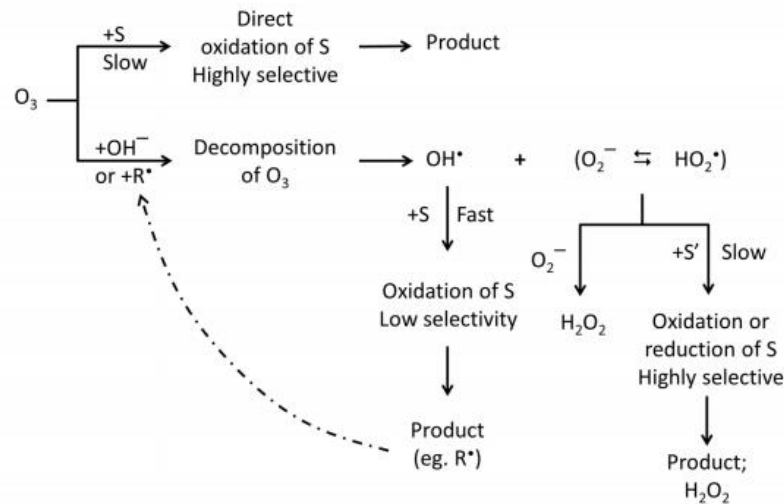
นอกจากนี้การสลายตัวของโอโซนในสารละลายที่เป็นน้ำ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวี (UV) จะได้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์ หลังจากเกิดปฏิกิริยาต่อเนืองกันไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะแตกตัวออกเป็น hydroxyl radical (OH^\cdot) 2 โมเลกุลได้เช่นกัน ดังสมการ 2.17 และ 2.18 โดยที่แสง UV มีอิทธิพลต่อการสลายตัวของโอโซนเมื่อสารละลายเป็นกรด (pH ต่ำสุดเท่ากับ 2) และอิทธิพลของแสง UV ต่อการสลายตัวของโอโซนจะลดลงเมื่อ pH ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น



2.3.4 การเกิดปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร สามารถแตกตัวเป็นแรดิคอลลต่างๆ ที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้ โดยการเกิดปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์เกิดขึ้นได้ 2 ทาง

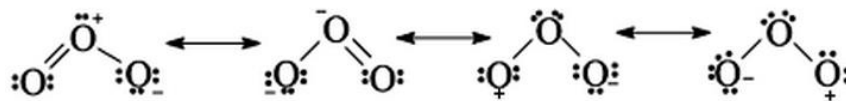
คือ ทางตรง (Direct oxidation) และทางอ้อม (Indirect oxidation) ซึ่งจะมีความจำเพาะเจาะจงกับหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบจำพวก aromatic และ aliphatic ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโอโซนอาจเกิดขึ้นสมบูรณ์หรือไม่สมบูรณ์ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของสารอินทรีย์ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันออกไป



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์กับโอโซน
(สุรชัย, 2553)

2.3.4.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรง (Direct oxidation)

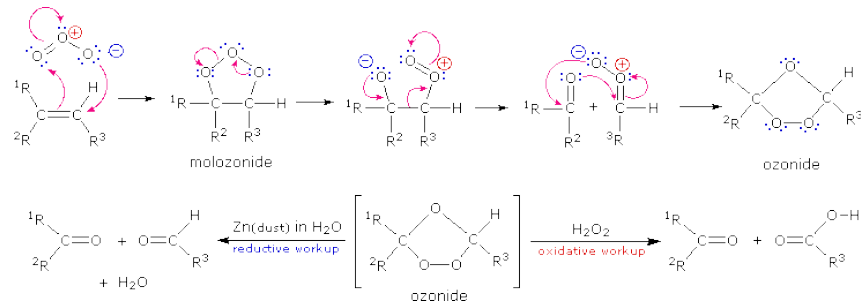
โมเลกุลของโอโซนมีโครงสร้างลิวอิสได้มากกว่าหนึ่งแบบหรือเกิดการเรโซแนนซ์ได้ดังรูปที่ 2.8 ประกอบกับการเรียงตัวของโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบมุมงอ ที่มีมุมระหว่างอะตอม 116° ทำให้โมเลกุลของโอโซนมีสภาพความเป็นไดโพลจึงจัดเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว สามารถเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารตั้งต้นได้ทั้งแบบ Dipole-mediated attack และแบบ Electrophilic attack



รูปที่ 2.8 การเกิดเรโซแนนซ์ของโมเลกุลของโอโซน
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

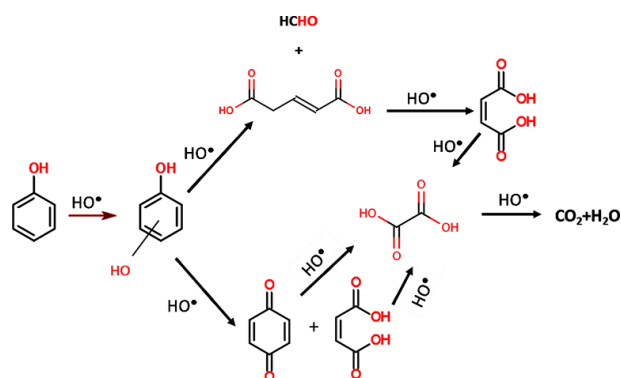
1. *Dipole-media attack* ในการทำปฏิกิริยาแบบนี้ โมเลกุลของโอโซนจะเข้าร่วมตัวกับสารตั้งต้นเกิดเป็นรูปร่างแหวน โดยการหันส่วนปลายของโมเลกุลด้านที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ของอะตอมของคาร์บอนซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่มาก เช่น C=C, C=C-O-R, C=C-X เกิดเป็นสารมัธยันต์ที่ไม่เสถียรเรียกว่า โมโลโซไนด์ (Molozonide) ด้วยการจับตัวใหม่

ของซวิทเทอเรียน (Zwitterion) จะได้ผลิตภัณฑ์ คือ โอโซนไนด์ (ozonide) ดังรูปที่ 2.9 หนังสือบางเล่มเรียกปฏิกิริยาชนิดนี้ว่า ปฏิกิริยาไดโพลไซโคลแอดดิชัน (Dipolar cyclo-addition) ซึ่งในขั้นสุดท้ายเมื่อรีดิวซ์ด้วยสังกะสีในน้ำ จะได้แอลดีไฮด์ และ/หรือ คีโตน ในขณะที่การออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จะได้คีโตนและกรดคาร์บอกซิลิกดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์แบบ Dipole-Mediate Attack (Chemistry Libretexts. 2019)

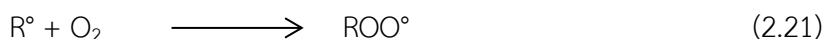
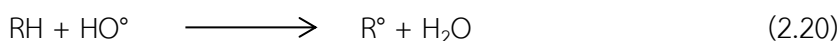
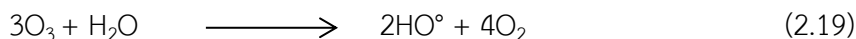
2. *Electrophilic attack* โอโซนสามารถทำหน้าที่เป็นอิเล็กโตรไฟล์ (Electrophile) โดยหันด้านที่มีประจุบวกของโมเลกุลเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในบริเวณที่มีอิเล็กตรอนหนาแน่น เช่น N, P, O, S และ Nucleophilic C โอโซนยังทำปฏิกิริยาได้ดีกับสารอินทรีย์พวก Aromatic ที่มีหมู่ฟังก์ชัน OH, CH_3 , NH_2 หรือ OCH_3 อยู่ในตำแหน่ง Ortho และ para ในทางกลับกันถ้ามีหมู่แทนที่ เช่น ไนโตร (Nitro, NO_2) คาร์บอกซิลิก ($COOH$) หรือ คาร์บอกซาลดีไฮด์ (Carboxaldehyde, CHO) ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ช้า และโมเลกุลโอโซนจะไม่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์จำพวกไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว และ halogen aliphatic compound ได้ (ธัญลักษณ์, 2553) จากรูปที่ 2.10 แสดงการเข้าทำปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลแรดิคัลกับสารประกอบฟีนอล จะเห็นได้ว่าฟีนอลมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับโอโซนเนื่องจากมีหมู่ OH ทำให้โอโซนสามารถออกซิไดซ์ฟีนอลได้อย่างสมบูรณ์ ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ



รูปที่ 2.10 กลไกการออกซิไดซ์สารประกอบฟีนอล (Chowdhury et al., 2017)

2.3.4.2 ปฏิกริยาออกซิเดชันโดยอ้อม (Indirect oxidation)

โอโซนสามารถทำปฏิกริยาออกซิเดชันทางอ้อมกับสารอินทรีย์ด้วยแรดิคัลต่างๆที่เกิดจากการทำปฏิกริยากันระหว่างน้ำกับไฮดรอกไซด์ไอออนจากปฏิกริยาขั้นแรก ได้แก่ HO° และ HO_2° (Deng and Zhoo, 2015) ซึ่งแรดิคัลเหล่านี้สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ประเภท acid aldehyde ketone และ พวก less high activated aromatic ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีกลไกการเกิดปฏิกริยาดังสมการ 2.19 ถึง 2.22 (Barrera et al., 2014)



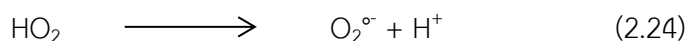
2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนเนชัน

2.3.5.1. ระยะเวลาในการเติมโอโซน

การเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันของกระบวนการเติมโอโซนจะเกิดจากโมเลกุลโอโซนหรือแรดิคัลต่างๆที่เกิดจากการสลายตัวของโอโซน ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณโอโซนเข้าไปในระบบหรือเพิ่มระยะเวลาการเติมโอโซนจะส่งผลให้มีโมเลกุลโอโซนหรือแรดิคัลเพื่อทำปฏิกริยาออกซิเดชันในระบบเพิ่มขึ้น (Singh, 2012) ซึ่งงานวิจัยของ Pena et al. (2003) ได้ทำการทดลองกำจัดสีของน้ำเสียจากกากน้ำตาลก่อนเข้าระบบบำบัดทางชีวภาพด้วยก๊าซโอโซน พบว่าการเติมโอโซน (Ozone dosages) มากกว่า 4.2 g/hr สามารถกำจัดสีได้มากกว่า 80% ในเวลา 20 นาที และสามารถกำจัดสีได้มากกว่า 90% ในเวลา 30 นาที ในขณะที่การเติมโอโซนน้อยกว่า 3.7 g/hr ต้องใช้เวลา 30 นาที สำหรับการกำจัดสีให้มีค่ามากกว่า 80% ดังงานวิจัยของสุรชัย (2553) ที่ทำการศึกษาการกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานผลิตเบียร์ด้วยโอโซน พบว่า สีของน้ำตัวอย่างจากบ่อรวบรวมน้ำเสียจะลดลงอย่างรวดเร็วภายในเวลา 30 นาทีแรกที่เติมโอโซน ซึ่งมีค่าเริ่มต้น 550 Pt-Co Unit เหลือ 28 Pt-Co Unit คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 94.91% และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการบำบัดเป็น 60 นาทีพบว่า สามารถกำจัดสีได้ 100%

2.3.5.2 ค่าพีเอช

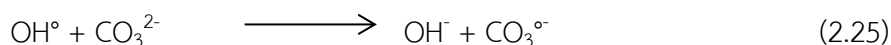
โอโซนสามารถบำบัดน้ำเสียได้ทั้งในสถานะที่ค่าพีเอชของน้ำเสียเป็นกรดและเบส โมเลกุลโอโซนจะเกิดปฏิกริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่พีเอชเป็นกรด ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดได้ช้า ในขณะที่ในสถานะที่เป็นเบส ปฏิกริยาสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยโอโซนจะเกิดการสลายตัวในน้ำเกิดเป็นแรดิคัลหรืออนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลและซูเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงกว่าโอโซน ดังสมการ 2.23 และ 2.24



นอกจากนี้การได้รับสัมผัสโอโซนเป็นเวลานานอาจทำให้พีเอชมีค่าลดลง จากการเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ได้เป็นกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโอโซนเนชั่น ดังงานวิจัยของ Victorio et al. (2007) กล่าวว่า การที่ค่าพีเอชของสารละลายมีค่าลดลงจาก 6.45 เป็น 5.31, 4.95 และ 4.58 เมื่อเวลาผ่านไปทั้งสิ้น 60 นาที อาจส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทานอยดินลดลง โดยมีปริมาณเมทานอยดินคงเหลืออยู่ในระบบ 21.92%, 41.10% และ 65.75% ที่เวลา 15, 30 และ 60 นาที

2.3.5.3 ค่าอัลคาไลน์ตี

อัลคาไลน์ตี คือ สภาพต่างของสารละลายใดๆมักจะเกิดจากเกลือของกรดอ่อน เช่น ไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) และ คาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) น้ำเสียที่มีไอออนดังกล่าวเป็นองค์ประกอบอาจทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยโอโซนลดลงได้ เนื่องจากไอออนเหล่านี้สามารถดักจับ OH° ซึ่งจะไม่เกิดการสร้างไฮโดรเปอร์ออกซิลเรดิคัลหรือซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนทำให้เกิดได้ช้าหรือสิ้นสุดลง ดังจะเห็นได้จากอัตราการเกิดปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ลดลงเมื่อมีไบคาร์บอเนตไอออนและคาร์บอเนตไอออนอยู่ในระบบเป็น $0.85 - 1.5 \times 10^7 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ และ $2 - 4.2 \times 10^8 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$



2.3.3.4 อุณหภูมิ

โอโซนละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้โอโซนละลายน้ำได้น้อยลง ส่งผลให้โอโซนสลายตัวเป็นออกซิเจนได้รวดเร็ว ดังสมการที่ 2.27 และมีครึ่งชีวิตที่สั้น ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิจึงมีความสำคัญต่อการยืดเวลาครึ่งชีวิตของโอโซน (Galdeano et al., 2018)

$$\text{Log}_{10}S = -0.25 - 0.013 T \quad (2.27)$$

S = การละลายของโอโซนในน้ำ (mg per liter in water/mg per liter in gas)

T = อุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)

2.4 ตัวชี้วัดความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำเสีย

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นน้ำเสียที่ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ หรือสารประกอบที่มีธาตุคาร์บอน และองค์ประกอบอื่นๆไม่ว่าจะเป็น ไนโตรเจน หรือออกซิเจน เป็นองค์ประกอบ กระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปนั้นจึงเกี่ยวข้องกับการแปลงปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ทั้งนี้ก่อนการบำบัดน้ำเสียใดๆ จำเป็นต้องทราบคุณลักษณะเฉพาะของน้ำเสียนั้นๆก่อน

เนื่องจากคุณลักษณะต่างๆสามารถบ่งบอกถึงองค์ประกอบของน้ำเสีย เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบในการออกแบบการจัดการระบบบำบัดให้เป็นไปตามเป้าหมาย (Abdallaa and Hammam, 2014)

2.4.1 อัตราส่วนบีโอดี 5 วัน ต่อ ซีโอดี (BOD₅/COD)

การวัดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นการวัดเชิงปริมาณ พารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการจำแนกคุณลักษณะของน้ำเสีย ได้แก่ ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ซึ่งเป็นการวัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทั้งหมด หรือ อาจวัดได้จากค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวภาพ (BOD) ที่เป็นการวัดปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ โดยที่ COD มักจะมีค่าสูงกว่าค่า BOD และสามารถนำอัตราส่วนระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสองชนิดนี้มาใช้เป็นตัวชี้วัดคุณลักษณะของสารอินทรีย์เพื่อจำแนกน้ำเสียได้ (Yustiani and Komoariah, 2017) เรียกว่าดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability index, BI) หรืออัตราส่วนบีโอดี 5 วัน ต่อ ซีโอดี (BOD₅/COD) ซึ่งจะนำไปใช้ในการพิจารณาความสามารถในการย่อยสลายด้วยวิธีทางชีวภาพของน้ำเสีย (Abdallaa and Hammam, 2014) โดยถ้าอัตราส่วน BOD₅/COD มีค่ามากกว่า 0.6 จะเป็นการระบุว่าน้ำเสียมีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายเป็นองค์ประกอบ และสามารถนำไปบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากอัตราส่วน BOD₅/COD มีค่าระหว่าง 0.3 – 0.6 แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียดังกล่าวควรได้รับการบำบัดขั้นต้นก่อนนำไปย่อยสลายด้วยวิธีทางชีวภาพ และต้องใช้เวลาในการปรับสภาพของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการย่อยสลาย และหากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 0.3 น้ำเสียเหล่านั้นจะมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำจนไม่สามารถนำไปบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพได้ เนื่องจากมีสารอินทรีย์ที่ยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ (Abdallaa and Hammam, 2014) งานวิจัยของ Choi et al. (2017) ยังได้ระบุว่าหากน้ำเสียมีอัตราส่วน BOD₅/COD มากกว่า 0.5 แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียดังกล่าวมีองค์ประกอบที่สามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว ทั้งนี้หากอัตราส่วน BOD₅/COD อยู่ในช่วงระหว่าง 0.2-0.4 การย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำเสียนั้นจะเกิดขึ้นได้ในสภาพความร้อนที่ต่ำกว่านั้น จึงเห็นได้ว่าข้อมูลของอัตราส่วน BOD₅/COD สามารถช่วยในการวิเคราะห์หาวิธีการบำบัดที่เหมาะสมแก่ลักษณะของน้ำเสียนั้นๆได้

2.4.2 ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Bichemical Methane Potential, BMP)

ปัจจุบันสารอินทรีย์ที่มักนำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ คือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ทั้งนี้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำเสียแต่ละประเภท ซึ่งการวิเคราะห์ BMP เป็นเทคนิคที่ใช้เวลาในการวิเคราะห์ไม่นาน และมีค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก นิยมใช้ในการศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสียในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อกรัมของของแข็งระเหยได้ที่ถูกย่อยสลายไป (อัมพรรค์, 2560) ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะสามารถบ่งบอกถึงความยาก-ง่ายในการย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำเสีย ดังนั้นจึงได้นำวิธีการดังกล่าวมาใช้เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

ของน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพต่อไป (Filer et al., 2019) ซึ่งการวิเคราะห์ BMP จะทำในถังปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของการย่อยสลายทางชีวภาพ แบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยมีสมการที่ใช้ในการคำนวณค่า BMP ดังสมการที่ 2.28 และ 2.29

$$Y_{\text{CH}_4} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{\text{CH}_4}}{m} \times (\% \text{CH}_4) \quad (2.28)$$

$$\% \text{BMP} = \frac{Y_{\text{CH}_4}}{T_{\text{CH}_4}} \times 100 \quad (2.29)$$

เมื่อ Y_{CH_4} คือ ผลผลิตมีเทน (methane yield)

V_{CH_4} คือ ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (cumulative methane) (มิลลิลิตร)

T_{CH_4} คือ ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี (มิลลิลิตร)

m คือ ของแข็งระเหยได้ที่ถูกกำจัด (กรัม)

(จากทฤษฎี COD 1 kg เปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน 350 l)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุรัชย์ (2553) ทำการศึกษาการกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานผลิตเบียร์ด้วยโอโซน พบว่า สีของน้ำตัวอย่างจากบ่อรวบรวมน้ำเสียจะลดลงอย่างรวดเร็วภายในเวลา 30 นาทีแรกที่เติมโอโซน คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 94.91% และลดลง 100% หลังการบำบัด 60 นาที ในขณะที่ COD และ BOD ถูกกำจัดได้เพียง 18.62 และ 5.06% ตามลำดับ และ TOC มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ลดลงเพียง 3.46% แสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยโอโซนเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย FT-IR ที่พบว่ากลุ่มคาบอนิล (C=O) มีปริมาณลดลง Hydroxyl group ถูกกำจัดไป ในขณะที่พันธะ C-H มีการเลื่อนตำแหน่งยอดไปจากจุดเดิมหลังเติมโอโซน ซึ่งเป็นการยืนยันว่ากระบวนการโอโซนเนชั่น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี

วีรยา (2549) ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีจากน้ำทิ้งของโรงงานเบียร์ที่ผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพแล้วด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น ในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ pH เท่ากับ 10 อัตราการผลิตโอโซนเท่ากับ 200 mg/l/hr และระยะเวลาในการบำบัดเท่ากับ 25 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี 74.26% อีกทั้งน้ำที่ผ่านการบำบัดมี BOD/COD เพิ่มขึ้น 77.88% และค่าของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้น 92.15% ให้ผลสอดคล้องเช่นเดียวกับการนำสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวไปทำการทดลองกระบวนการโอโซนเนชั่นในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยมีประสิทธิภาพในการลดสี 74.12% น้ำที่ผ่านการบำบัดมี BOD/COD เพิ่มขึ้น 44.44% และค่าของของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้น 77.01% ค่า BOD/COD ของน้ำทิ้งที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าสี

ในน้ำตัวอย่างบางส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนและย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก แต่เมื่อถูกออกซิไดซ์ด้วยโอโซนจะทำให้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายขึ้นและไม่ก่อให้เกิดสี

Gubta et al. (2015) การบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตยา โดยใช้กระบวนการโอโซนชันในการบำบัดขั้นต้น สามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (BI= BOD/COD) ถึง 0.44 และมีค่าซีไอดีและสีลดลง 42% และ 33% ส่วนน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพเพียงอย่างเดียวมีค่าซีไอดีและสีลดลง 73% และ 62% ตามลำดับ เมื่อนำน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชันมาเข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพสูงขึ้น จากผลการทดลองพบว่า น้ำที่ผ่านการบำบัดใช้กระบวนการโอโซนชันตามด้วยกระบวนการทางชีวภาพ มีค่าซีไอดีโดยรวมลดลงสูงสุดถึง 93% และมีค่าสีลดลงถึง 93%

Asha et al. (2014) ศึกษาสถานะในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยวิธีรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ออกซิเดชันทางไฟฟ้า และโฟโตแคโทด ที่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ พบว่าวิธีการรวมรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าสามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีกว่ากระบวนการโฟโตแคโทด โดยสามารถเพิ่มค่าความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุด จาก 0.13 เป็น 0.42 ที่ระยะเวลาบำบัด 40 นาที นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้หลอดยูวีในกระบวนการโฟโตแคโทดนั้นยังเป็นอันตรายต่อมนุษย์อีกด้วย

Koby and Gengec (2012) ศึกษาการกำจัดสีจากเมลานอยดินด้วยวิธีการรวมรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลในการบำบัด เช่น พีเอชเริ่มต้น กระแสไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้า ความเข้มข้นของเมลานอยดิน และระยะเวลาสัมผัส พบว่าที่พีเอช 4.2 กระแสไฟฟ้า, 5 A/m^2 , ค่าการนำไฟฟ้า $2500 \mu\text{S/cm}$, $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ และเวลา 20 นาที สามารถกำจัดสีของเมลานอยดินได้ดีที่สุด พบว่าเมื่อพีเอชเริ่มต้นมีค่าต่ำ ประสิทธิภาพในการกำจัดจะลดลง เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที โมเลกุลของเมลานอยดินสามารถแตกตัวได้มากขึ้น และให้ประจุที่เป็นลบ เนื่องจากที่พีเอชต่ำๆยังไม่มีพอลิเมอร์คอลลอยด์ของอะลูมิเนียมเพียงพอ จึงยังไม่เกิดการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์หรือเกิดการตกตะกอน หลัง 20 นาทีผ่านไปจึงพบว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึง 98% เนื่องจากเกิดกลไกการดูดติดผิวและกลไกการกวาดตะกอนขึ้น (adsorption and sweep coagulation)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. แผ่นอะคริลิกที่ใช้ในการทำ chamber ขนาด 10 x 15 x 15 เซนติเมตร
2. แผ่นเหล็กขนาด 10 x 15 x 0.2 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น
3. สายไฟหัวคิบสำหรับต่อกระแสไฟฟ้า จำนวน 2 เส้น
4. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) รุ่น GPS-3030 บริษัท GW Instek ประเทศมาเลเซีย
5. เครื่องผลิตโอโซน (Ozone Generator) รุ่น OZ-A1-FT บริษัท Ozzon
6. เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น T60 บริษัท TG Instrument ประเทศอังกฤษ
7. เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic stirrer) พร้อมแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic bar)
8. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น UB-10 ยี่ห้อ Denver Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา
9. เครื่องวัดค่าการละลายออกซิเจน (DO meter) รุ่น 5000-115V บริษัท YSI ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. ตู้อบ (Oven) รุ่น 737F บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
11. เตาเผา รุ่น Controller P 320 บริษัท Nabertherm ประเทศเยอรมนี
12. เครื่องปั่นกวน (Stirrer) รุ่น HTS-1003 บริษัท Harmony ประเทศญี่ปุ่น
13. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น MS204TS บริษัท Mettler Toledo ประเทศสหรัฐอเมริกา
14. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
15. หลอดย่อยสลาย (Digestion Vessels)
16. ขวดบีโอดี ขนาดมาตรฐาน 300 มิลลิลิตร

3.1.2 สารเคมี

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย
3. โซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
4. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี

5. ซิลเวอร์ซัลเฟต (AgSO_4) เกรตวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
6. เพอร์ริสแอมโมเนียมซัลเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เกรตวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
7. แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เกรตวิเคราะห์ บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
8. เพอร์ริคคลอไรด์ (FeCl_3) เกรตทางการค้า บริษัท เอเพกซ์ เคมิคัล จำกัด
9. แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) เกรตวิเคราะห์ บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
10. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) เกรตวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
11. ไดโพแทสเซียมฟอสเฟต (K_2HPO_4) เกรตวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
12. ไตรโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) เกรตวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
13. แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) เกรตวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
14. เมอคิวริก (II) ซัลเฟต (HgSO_4) เกรตวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

3.2 น้ำกากสำ

น้ำกากสำที่ใช้ในการศึกษา เป็นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตสุรากลั่นได้รับความอนุเคราะห์ในการเก็บรวบรวมจากโรงงานสุรากลั่น (Distillery slop) กรมสรรพสามิต จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบในการผลิตสุรา ทำการเก็บตัวอย่างน้ำ 2 ครั้ง คือ วันที่ 10 ตุลาคม 2559 และวันที่ 2 เมษายน 2561 ซึ่งตัวอย่างนี้จะถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4°C ก่อนนำไปศึกษาต่อไป

3.3 การศึกษาสมบัติน้ำกากสำ

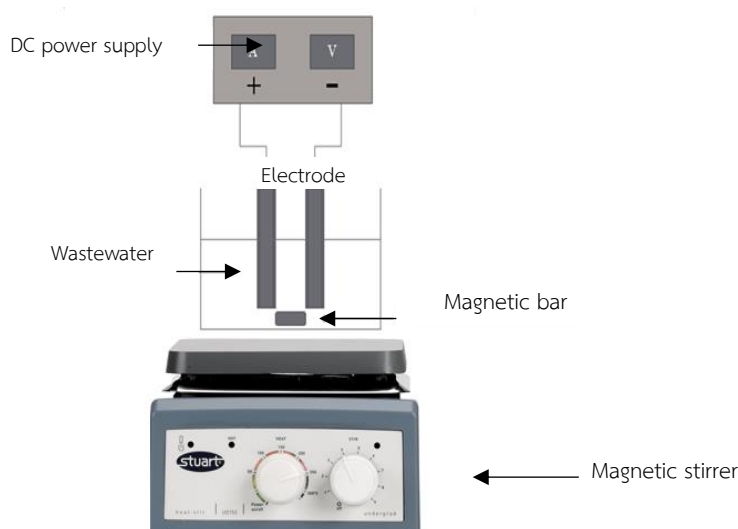
นำตัวอย่างน้ำกากสำมาวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำกากสำ

พารามิเตอร์	เครื่องมือที่ใช้วัด/วิธีการ
พีเอช (pH)	pH meter
ซีโอดี (COD, mg/L)	Close reflux, Titrimetric Method (Method 5220C, APHA et al., 2012)
บีโอดี (BOD, mg/L)	5-Day BOD Test (Method 5210B, APHA et al., 2012)
สี (ADMI)	Spectrophotometric, ADMI weighted ordinate method (Method 2120F, APHA et al., 2012)
BOD ₅ /COD	วิธีการคำนวณ

3.4 ชุดการทดลอง

ถังปฏิกริยาระบบ EC ที่ใช้ในการศึกษาเป็นถังทรงสี่เหลี่ยมทำจากอะคริลิกขนาด 10 cm x 15 cm x 15 cm โดยใช้อะลูมิเนียมขนาด 10 cm x 15 cm x 0.1 cm เป็นอิเล็กโทรด จัดวางให้ระยะระหว่างแผ่นเท่ากับ 2 เซนติเมตร และมีช่องว่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดกับกันลึง 5 เซนติเมตร ต่ออิเล็กโทรดกับเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และใช้ปากคีบสายไฟเพื่อเชื่อมต่อระหว่างเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้ากับแผ่นอะลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพอย่างง่ายแสดงส่วนประกอบของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

3.5 การศึกษาความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสีของน้ำกากส่าด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้า

3.5.1 การศึกษาผลของระยะเวลาบำบัด

1. เติมตัวอย่างน้ำกากส่าในถังปฏิกริยาปริมาตร 500 มิลลิลิตร
2. จ่ายไฟฟ้าจากเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่ระบบ กำหนดความต่างศักย์ไฟฟ้าไว้ที่ 5 โวลต์ ทำการปั่นกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้านาน 30 นาที
3. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด วิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียหลังจากผ่านการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้า ดังระบุในตารางที่ 3.1
4. ทำการทดลองข้อ 1-3 ซ้ำ แต่เปลี่ยนระยะเวลาบำบัดเป็น 60, 90 และ 120 นาที
5. ทำการทดลองข้อ 2-4 ซ้ำ อีก 2 ครั้ง

3.5.2 การศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้า

1. เติมตัวอย่างน้ำกากส่าในถังปฏิกริยาปริมาตร 500 มิลลิลิตร

2. จ่ายไฟฟ้าจากเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับระบบที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าไว้ที่ 5 โวลต์ และปั่นกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้เวลาในการบำบัดที่เหมาะสมจากข้อ 3.5.1
3. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด วิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียหลังจากผ่านการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้า ได้แก่ พีเอช, ซีโอดี, บีโอดี และความเข้มข้นในหน่วย ADMI
4. ทำการทดลองซ้ำเช่นเดียวกับข้อ 1-3 โดยแปรค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้ระบบ เป็น 10 และ 15 โวลต์
5. ทำการทดลองข้อ 1-4 ซ้ำ อีก 2 ครั้ง

3.5.3 การศึกษาผลของพีเอช

1. เติมตัวอย่างน้ำกากส่าที่ปรับพีเอชเริ่มต้นเป็น 2 ลงในถังปฏิกรณ์ปริมาตร 500 มิลลิลิตร
2. จ่ายไฟฟ้าจากเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ที่ความต่างศักย์ที่เหมาะสมจากข้อ 3.5.2 ปั่นกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าตามระยะเวลาบำบัดที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.5.1
3. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด วิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียหลังจากผ่านการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้า ดังระบุในตารางที่ 3.1
4. ทำการทดลองข้อ 1-3 ซ้ำ แต่เปลี่ยนเป็นตัวอย่างน้ำที่มีการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4, 6, 8 และ 10 ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 นอร์มอล หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5 นอร์มอล
5. ทำการทดลองข้อ 1-4 ซ้ำ อีก 2 ครั้ง

3.6 การศึกษาประสิทธิภาพของวิธีโอโซนชันในการกำจัดสารอินทรีย์ การเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสีของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี EC

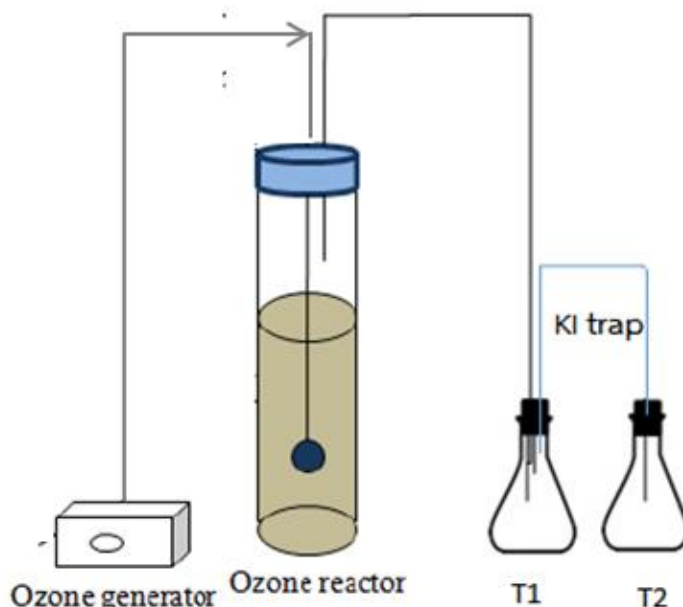
3.6.1 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ศึกษา

ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษา คือน้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี EC ด้วยสภาวะที่เหมาะสมซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- (ก) น้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี EC แบบไม่เจือจาง โดยนำน้ำกากส่าในหัวข้อ 3.5.3 มาบำบัดด้วยโอโซนโดยศึกษาผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนที่แตกต่างกัน
- (ข) น้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี EC แบบเจือจาง โดยการนำน้ำกากส่าในหัวข้อมาทำการเจือจางด้วยน้ำ ในอัตราส่วนน้ำทั้งจากการบำบัดด้วย EC ในข้อ 3.5.3 ต่อน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 : 100 โดยปริมาตร ก่อนนำไปศึกษาผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซน

3.6.2 การเดินระบบโอโซนเซน

การเดินระบบในงานวิจัยนี้เป็นแบบครั้ง (Batch test) ซึ่งแผนผังการทำงานของระบบแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังการทำงานของระบบโอโซนเซน

3.6.3 การศึกษาอัตราการผลิตก๊าซโอโซน

1. จัดเตรียมระบบการทดลองดังรูปที่ 3.2
2. บรรจุสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ความเข้มข้น 2% ลงในถังปฏิกิริยาและขวดดักจับก๊าซโอโซน (T1,T2) ปริมาตร 500 mL และ 200 mL ตามลำดับ
3. เปิดเครื่องผลิตโอโซนเพื่อเริ่มเดินระบบเป็นเวลา 15 นาที
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำสารละลาย 2% KI ในถังปฏิกิริยาและขวด T1,T2 ไปวิเคราะห์ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้
5. ทำการทดลองข้อ 2-4 ซ้ำ แต่เปลี่ยนระยะเวลาการเดินระบบเป็น 30, 45, 60, 75 และ 90 นาที ตามลำดับ
6. ทำการทดลองข้อ 2-5 ซ้ำ อีก 2 ครั้ง

3.6.4 การศึกษาผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซน

1. จัดเตรียมระบบดังรูปที่ 3.2
2. เติมตัวอย่างน้ำที่จะศึกษาลงในถังปฏิกิริยาปริมาตร 100 mL และสารละลาย 2% KI ลงในขวด ดักจับโอโซน (T1,T2) ขวดละ 100 mL
3. เปิดเครื่องผลิตโอโซนเพื่อเริ่มเดินระบบบำบัดตามเป็นระยะเวลา 15 นาที เมื่อครบตามกำหนดเวลาทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำดังแสดงในตารางที่ 3.1

4. ทำการทดลองข้อ 2-4 แต่เปลี่ยนเวลาในการผ่านก๊าซโอโซนเป็น 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 ตามลำดับ

3.6.5 การศึกษาผลของพีเอช

1. จัดเตรียมระบบดังรูปที่ 3.2
2. นำตัวอย่างน้ำที่ผ่านการเจือจาง 100 เท่ากับ 2 โดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 นอร์มอล จากนั้นตวงน้ำเสียปริมาตร 100 mL เทลงในถังปฏิกรณ์
3. เติมสารละลาย 2% KI ลงในขวดดักจับโอโซน T1 และ T2 ขวดละ 100 mL
4. เปิดเครื่องผลิตโอโซนเพื่อเริ่มเดินระบบบำบัดตามระยะเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 5-6 ใน 3.6.2 เมื่อครบตามกำหนดเวลาทำการวิเคราะห์คุณลักษณะตของน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.1
5. ทำการทดลองข้อ 2-5 ซ้ำแต่เปลี่ยนค่า pH ของน้ำตัวอย่างเป็น 4, 6, 8 และ 10
6. ทำการทดลองข้อ 2-6 ซ้ำอีก 2 ครั้ง

3.7 ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (BMP)

3.7.1 วัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ (Feed)

วัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ คือ ตัวอย่างน้ำกากส่า ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำกากส่าที่ยังไม่ผ่านการบำบัด (Untreat) น้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้า (EC treated) และวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับวิธีโอโซนชัน (EC + Ozone treated) ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์เริ่มต้นของน้ำตัวอย่าง ดังตารางที่ 3.2 จากนั้นเตรียมตัวอย่างน้ำโดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นให้อยู่ในช่วง 6.8-7.2 และเติมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต 50 g/L 10% ของปริมาตรขวดทดลอง

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	เครื่องมือที่ใช้วัด/วิธีการ
พีเอช	pH meter
ซีไอดี	Close reflux, Titrimetric Method (Method 5220C, APHA et al., 2012)
บีไอดี	5-Day BOD Test (Method 5210B, APHA et al., 2012)
ของแข็งทั้งหมด	(Method 2540B, APHA et al., 2012)
ของแข็งระเหยได้	(Method 2540E, APHA et al., 2012)
ไนโตรเจนทั้งหมด	TOC-TN Analyser

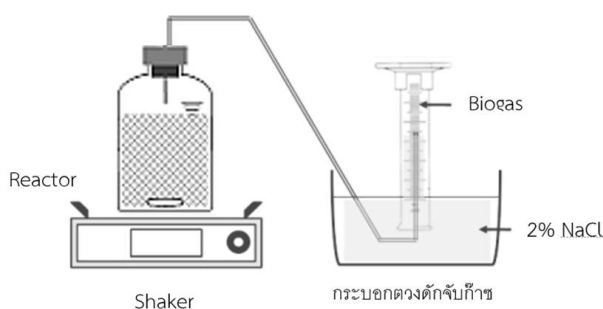
3.7.2 เชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ มาจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตมีเทนของระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ EGSB (Extended Granular Sludge Bed) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทเพอร์ซิเดนท์ เบเกอร์ จำกัด (มหาชน) นิคมอุตสาหกรรม เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

3.7.3 วิธีดำเนินการทดลอง

วิธีการศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของตัวอย่างน้ำ อ้างอิงตามวิธีการของ Owen et al. (1979) อ้างถึงใน Filer et al. (2019) โดยมีรายละเอียดของวิธีการทดลองเป็นดังนี้

1. เติมน้ำตัวอย่างน้ำกากส่าที่ยังไม่ผ่านการบำบัด (Untreat) ที่เตรียมไว้ ปริมาตร 1500 มิลลิลิตร ลงในขวดหมักขนาด 2400 มิลลิลิตร
2. เติมเชื้อจุลินทรีย์ 20% (v/v) หรือประมาณ 400 มิลลิลิตร
3. ฟนก๊าซไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศ เป็นเวลา 5 นาที แล้วปิดฝาให้สนิท
4. ต่อท่อนำก๊าซ ที่เชื่อมอยู่กับท่อสายยางเข้ากับกระบอกตวงขนาด 500 มิลลิลิตร ที่บรรจุ 2% NaCl และคว่ำอยู่ในอ่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.3
5. ทำการเดินระบบด้วยการปั่นกวน จดบันทึกปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นทุกวันโดยดูจากระดับน้ำในกระบอกตวง จนสิ้นสุดปฏิกิริยา (ปริมาตรน้ำในกระบอกตวงคงที่)
6. วัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ โดยใช้เครื่อง Gas data meter
7. ดูด effluent ออกจากขวดหมัก 400 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยได้
8. เติมน้ำตัวอย่างเดิมที่เตรียมไว้เข้าสู่ระบบอีกครั้งประมาณ 400 มิลลิลิตร และทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4-7
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 1-8 แต่เปลี่ยนวัตถุดิบป้อนเข้าเป็นน้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนทางเคมีไฟฟ้า (EC treated) และน้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนทางเคมีไฟฟ้าร่วมกับวิธีโอโซนชัน (EC + Ozone treated)
10. ทำชุดควบคุมการทดลองโดยใช้กลูโคส-กลูตามิค ซึ่งเตรียมได้จากวิธีที่แสดงใน ก-2 ภาคผนวก ก (ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นในรูปซีโอดีประมาณ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร)



รูปที่ 3.3 ชุดทดลองระบบหมัก

3.7.4 วิธีการคำนวณ

1. การคำนวณหาค่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์ (Specific Methane Yield) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Y_{\text{CH}_4} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{\text{CH}_4}}{m} \times (\% \text{CH}_4) \quad (3.1)$$

เมื่อ Y_{CH_4} คือ ผลผลิตมีเทน (methane yield)

V_{CH_4} คือ ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (cumulative methane) (มิลลิลิตร)

m คือ ของแข็งระเหยได้ที่ถูกกำจัด (กรัม)

2. การคำนวณหาค่าศักยภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้ก๊าซมีเทน (% BMP) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\% \text{BMP} = \frac{Y_{\text{CH}_4}}{T_{\text{CH}_4}} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ T_{CH_4} คือ ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี (มิลลิลิตร)

(จากทฤษฎี COD 1 kg เปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน 350 l) (Filer et al., 2019)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานสุรากลั่นด้วยวิธีการรวมตะกอนทางไฟฟ้า (Electrocoagulation, EC) ร่วมกับวิธีโอโซน (Ozonation, O₃) ทำการศึกษาผลของตัวแปรอิสระต่อการเพิ่มขึ้นของดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biological index, BI: อัตราส่วนบีโอดี 5 วันต่อซีโอดี) และประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำกากส่า เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดในการบำบัดน้ำกากส่าด้วยวิธี EC จากนั้นนำน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย EC ณ สภาวะที่กำหนดไปบำบัดต่อด้วย O₃ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ EC ร่วมกับ O₃ ในการบำบัดขั้นต้นของน้ำกากส่าก่อนผ่านเข้าสู่กระบวนการชีวภาพต่อไป ผลการศึกษาที่ได้เป็นดังนี้

4.1 คุณลักษณะของน้ำกากส่า

น้ำกากส่าที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนกระบวนการผลิตสุรากลั่น ซึ่งเก็บรวบรวมมาจากโรงงานสุรากลั่น กรมสรรพสามิต จังหวัดฉะเชิงเทรา ผลการศึกษาคุณสมบัติของน้ำกากส่าเป็นดังตารางที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-1. ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของน้ำกากส่าที่ใช้ศึกษา

คุณลักษณะ	ก่อนบำบัด
พีเอช	4.21 ±0.03
ซีโอดี (COD, mg/L)	372,960 ±5760
บีโอดี (BOD ₅ , mg/L)	56,950 ±631
BOD ₅ /COD	0.15 ±0.006
ค่าสี (ADMI)	256,203 ±6317
สีปรากฏ	น้ำตาลเข้ม

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ตัวอย่างน้ำกากส่าที่ได้รับมีพีเอชค่อนข้างต่ำ มีฤทธิ์เป็นกรด และมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์วัดในรูปบีโอดีและซีโอดีในปริมาณสูงมาก เมื่อนำค่าดังกล่าวไปคำนวณอัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดี (BOD₅/COD) พบว่าน้ำกากส่ามี BOD₅/COD ต่ำกว่า 0.3 แสดงให้เห็นว่าน้ำกากส่ามีสารอินทรีย์ที่ยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพเป็นส่วนประกอบ (Abdallaa and Hammam, 2014) นอกจากนี้สีในน้ำกากส่าที่วัดได้ยังมีค่าเฉลี่ยสูงถึง 256,203 เอดีเอ็มไอ (ADMI)

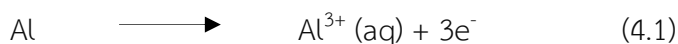
และมีสีน้ำตาลเข้ม โดยสีที่พบในน้ำกากสำนั้นเกิดจากสีของคาราเมลจากน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่มีเหลือในกากน้ำตาลที่ยีสต์ไม่ใช้ในการหมักแอลกอฮอล์ และเกิดจากสารเมลานอยดิน ซึ่งเกิดจากการรวมตัวระหว่างน้ำตาลกับกรดอะมิโนชนิดต่างๆ ผ่านกระบวนการปฏิกิริยาบราวน์นิ่ง (Browning Reaction) ของกากน้ำตาลในขั้นตอนที่มีการใช้อุณหภูมิสูง (Santal and Singh, 2013) ลักษณะของน้ำดังกล่าวข้างต้น อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำกากสำด้วยวิธีการทางชีวภาพ มีค่าลดลงหรือไม่เป็นไปตามที่ระบบออกแบบไว้ ทำให้การบำบัดขั้นต้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยเฉพาะในประเด็นเกี่ยวกับความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสีของน้ำกากสำจึงเป็นขั้นตอนที่จำเป็น

4.2 ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสีของน้ำกากสำด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้า

ผลการบำบัดน้ำกากสำด้วยวิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation, EC) ทำการทดลองโดยใช้ตัวอย่างน้ำ 500 มิลลิลิตร ซึ่งมีซีไอดีและบีไอดี ดังแสดงในตารางที่ 4.1 มาบำบัดด้วยวิธี EC พร้อมกับแปรค่าระยะเวลาในการบำบัด ความต่างศักย์ไฟฟ้า และพีเอชเริ่มต้นของน้ำกากสำ ผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

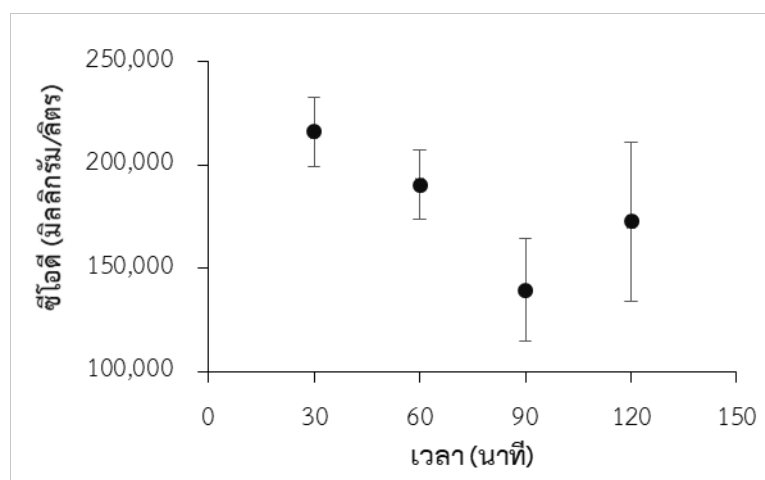
4.2.1 ผลของระยะเวลาบำบัดต่อการกำจัดซีไอดี

เมื่อนำน้ำกากสำมาบำบัดด้วยวิธี EC โดยแปรผันระยะเวลาในการเดินระบบ EC จาก 30 นาที เป็น 60, 90 และ 120 นาที พบว่าระยะเวลาบำบัดมีผลต่อการกำจัดซีไอดีในน้ำกากสำ โดยซีไอดีในน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าลดลงจาก $216,000 \pm 15460$ มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น $139,336 \pm 24804$ มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.1ก) ที่ช่วงเวลาดังกล่าว พบว่าความสามารถในการกำจัดซีไอดีของระบบ EC มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 42% เป็น 63% (รูปที่ 4.1ข) ทั้งนี้การเพิ่มระยะเวลาในการเดินระบบ ทำให้เกิดการกัดกร่อนของขั้วอะลูมิเนียมเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มากขึ้นของขั้วแอโนด (Anode) หรือขั้วบวก ส่งผลให้เกิดการละลายของอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ในปริมาณมากขึ้นในน้ำเสีย (สมการที่ 4.1) ประกอบกับผลของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่มากขึ้นของขั้วแคโทด (cathode) ทำให้ระบบมีปริมาณไฮดรอกไซด์ (OH^-) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เกิดมากขึ้นด้วยดังแสดงในสมการที่ (4.2) จึงส่งผลให้อะลูมิเนียมไอออนและไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นตะกอนเบาของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) (สมการที่ 4.3) ซึ่งทำหน้าที่เป็นเป้าสัมผัสให้สารแขวนลอยต่างๆรวมทั้งสารอินทรีย์มาเกาะเกิดเป็นตะกอนทำให้แยกออกจากน้ำเสียได้ อีกทั้งฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันของขั้วลบ ยังสามารถสัมผัสกับอนุภาคสารอินทรีย์เป็นตัวพาให้ตะกอนลอยขึ้นผิวน้ำ (Electroflotation) ทำให้เกิดการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำได้เช่นกัน

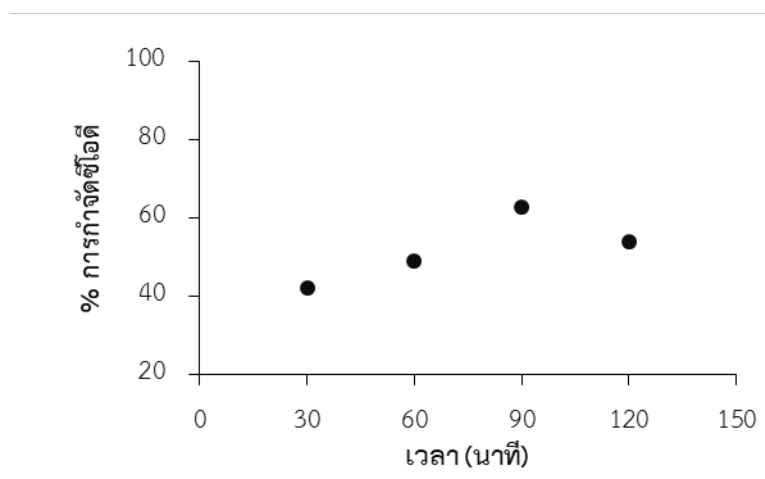




อย่างไรก็ตามพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเดินระบบจาก 90 เป็น 120 นาที ดังแสดงใน รูปที่ 4.1 ข (ดูรายละเอียดในตาราง ข-2.1 ภาคผนวก ข) สันนิษฐานว่าการเพิ่มระยะเวลาเดินระบบที่มากขึ้น อาจทำให้มีปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นประจุจำนวนมาก จนเกิดการเหนียวน้ำให้ประจุบนพื้นผิวของอนุภาคมีประจุเป็นบวกและเกิดแรงผลักระหว่างกัน ทำให้เสถียรภาพของคอลลอยด์กลับมา (Phalakornkulea et al., 2010)



(ก)

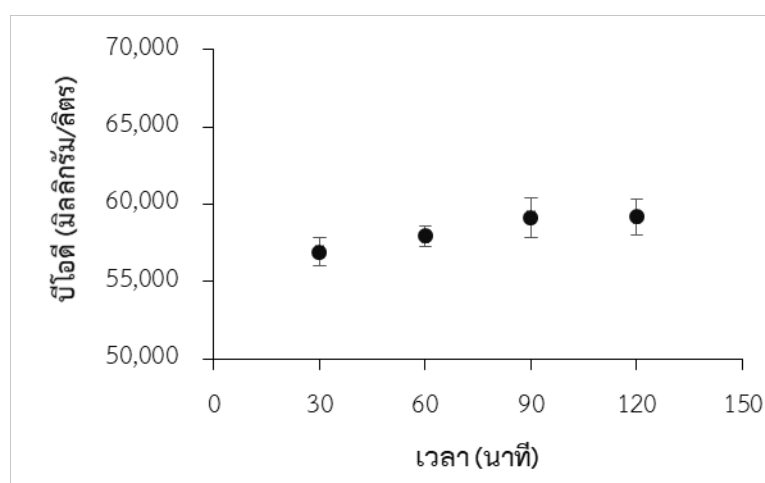
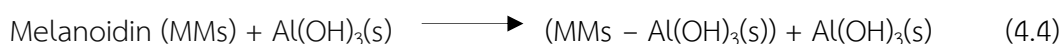


(ข)

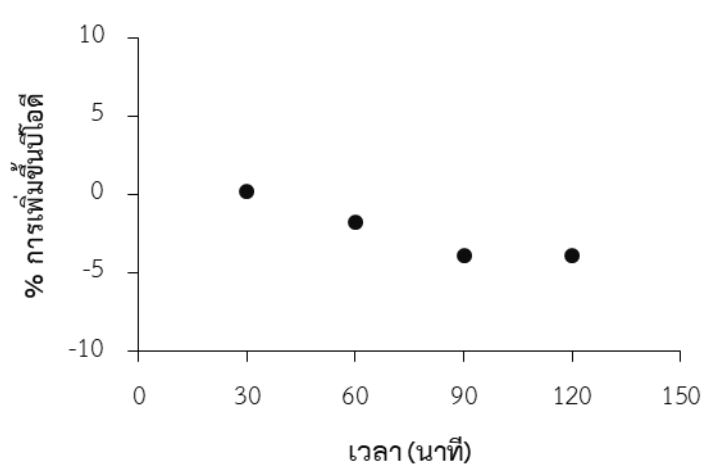
รูปที่ 4.1 ผลของระยะเวลาในการบำบัดต่อ (ก) ซีโอติ และ (ข) %การกำจัดซีโอติ เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์

4.2.2 ผลของระยะเวลาบำบัดต่อการกำจัดบีโอติ

จากการศึกษาผลของระยะเวลาบำบัดต่อค่าบีโอดีในน้ำกากส่า พบว่า ค่าบีโอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย EC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 56,950 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 56,491, 57,945, 59,167 และ 59,193 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อใช้เวลาในการบำบัด 30, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากตะกอบเบาของ $Al(OH)_3$ ซึ่งเกิดมากขึ้นตามระยะเวลาในการเดินระบบ ทำปฏิกิริยากับสารประกอบเมลานอยดิน ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดสีในน้ำกากส่าผ่านกลไกของปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ (4.4) ตามที่ระบุไว้ในรายงานของ Kobya and Gengec (2012) ส่งผลให้เกิดการลดลงของสารอินทรีย์โดยเฉพาะพวกที่ยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ ซีโอดีที่วัดได้จึงมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่บีโอดีของน้ำตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



(ก)

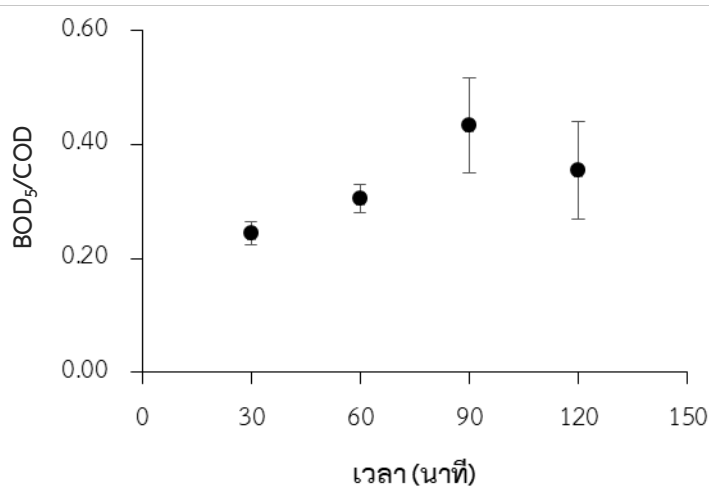


(ข)

รูปที่ 4.2 ผลของระยะเวลาในการบำบัดต่อ (ก) บีโอดี และ (ข) %การเพิ่มขึ้นของบีโอดี เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์

4.2.3 ผลของระยะเวลาบำบัดต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพ

ผลการคำนวณอัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดี (BOD_5/COD) ของน้ำกากส่าที่เปลี่ยนแปลงไปหลังผ่านการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ EC ช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำกากส่า ดังจะเห็นได้จากดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งวัดในรูป BOD_5/COD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 0.24 เป็น 0.31 และ 0.43 เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเดินระบบจาก 30 นาที เป็น 60 และ 90 นาที ตามลำดับ ให้ผลการทดสอบที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่เวลา 90 นาที เมื่อทดสอบโดยวิธีทางสถิติ One Way – Anova และเปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Turkey Pairwise Comparison (ดูรายละเอียดใน ค-1.1 ภาคผนวก ค) อย่างไรก็ตามพบว่า การเพิ่มระยะเวลาการเดินระบบ EC ให้นานขึ้นเป็น 120 นาที ไม่มีส่วนช่วยให้ดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-2.1 ภาคผนวก ข)

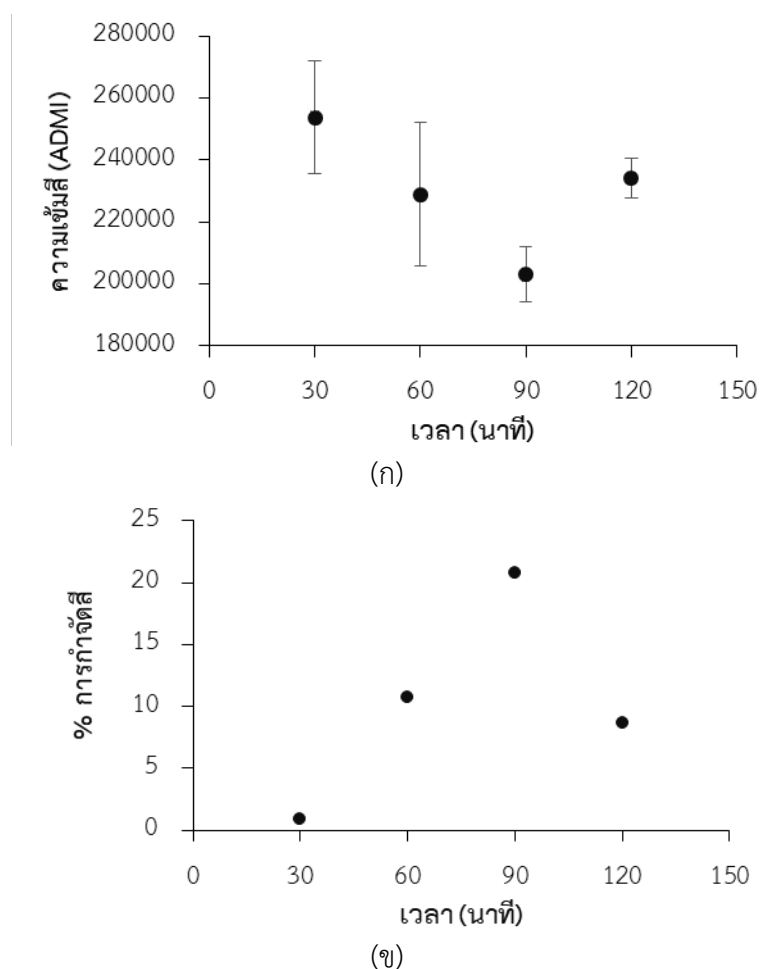


รูปที่ 4.3 ผลของระยะเวลาในการบำบัดต่ออัตราส่วนของบีโอดี 5 วันต่อซีโอดี เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ 5 โวลต์

4.2.4 ผลของระยะเวลาบำบัดที่มีต่อการกำจัดสี

เมื่อพิจารณาจากผลของระยะเวลาในการเดินระบบ EC ต่อความสามารถในการกำจัดสีของน้ำกากส่า พบว่าระยะเวลาการเดินระบบ EC ที่นานขึ้น สามารถลดสีของน้ำกากส่า โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญที่เวลา 90 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ดูรายละเอียดใน ค-1.1 ภาคผนวก ค) ที่ระยะเวลาดังกล่าวประสิทธิภาพในการกำจัดสีด้วยระบบ EC มีค่าเท่ากับ 20.78% ซึ่งจัดว่ามีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับความสามารถในการบำบัดสีของน้ำกากส่าด้วยระบบ EC ในงานวิจัยของ David et al. (2015) ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำกากส่าที่พีเอชในงานวิจัยดังกล่าว มีค่าระหว่าง 40-50% ความแตกต่างที่พบระหว่างงานวิจัยของ David et al. (2015) และผลการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คาดว่าเป็นผลมาจากธรรมชาติของน้ำที่ต่างกัน โดยเฉพาะปริมาณ

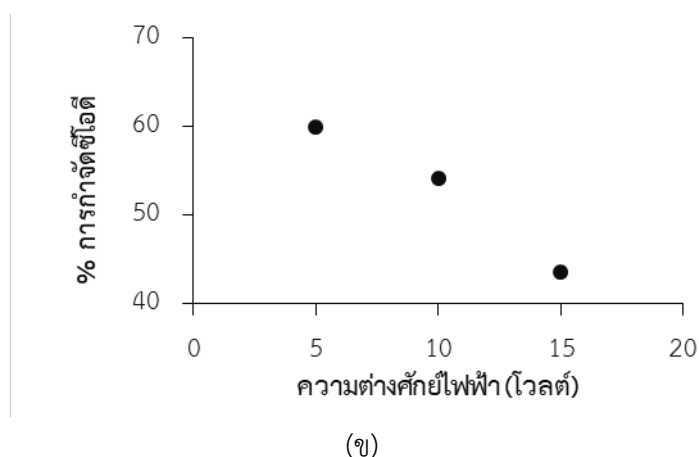
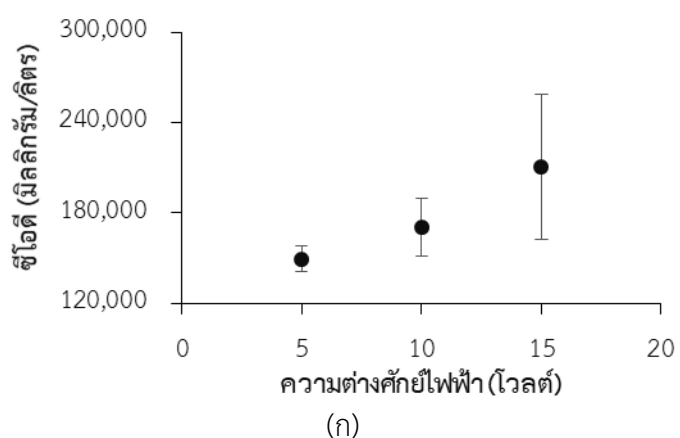
สารอินทรีย์ในน้ำตัวอย่าง สำหรับตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่าในงานวิจัยของ David et al. (2015) อยู่หลายเท่า ซึ่งอาจส่งผลให้สารประกอบอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสีในน้ำเสียมีปริมาณมากด้วยเช่นกัน ปริมาณสารประกอบอินทรีย์ที่มากขึ้นโดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่ยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของวิธีการ EC ในการกำจัดสี ดังระบุไว้ในงานวิจัยของ Kobya and Gengec (2012) เกี่ยวกับการลดลงของประสิทธิภาพการกำจัดสีของระบบ EC เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารประกอบเมลานอยดิน ซึ่งมักพบเป็นส่วนประกอบสำคัญและเป็นสารที่ทำให้เกิดสีในน้ำกากส่า นอกจากนี้พบว่าความสามารถในการกำจัดสีมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเดินระบบ EC จาก 90 นาที เป็น 120 นาที ดังแสดงใน รูปที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-2.1 ภาคผนวก ข) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากเกิดการสร้างฟิล์มพาสซีฟ (passive film) คลุมทั่วผิวหน้าขั้วอะลูมิเนียม มีผลทำให้เกิดการกัดกร่อนขั้วน้อยลงส่งผลต่อปริมาณการละลายของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Bhagawan et al., 2014)



รูปที่ 4.4 ผลของระยะเวลาในการบำบัดต่อ (ก) ค่าสีที่วัดในหน่วย ADMI และ (ข) %การกำจัดสีเมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ 5 โวลต์

4.2.5 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อการกำจัดซีโอดี

จากการศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อการบำบัดน้ำกากส่า โดยแปรค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 5, 10 และ 15 โวลต์ ใช้ระยะเวลาบำบัดที่เหมาะสม 90 นาที พบว่าการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า ทำให้ความสามารถในการกำจัดซีโอติด้วยระบบ EC มีแนวโน้มลดลง ดังจะเห็นได้จากซีโอติในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยความต่างศักย์ 5 โวลต์ มีค่าเท่ากับ $149,360 \pm 8847$ มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าให้ระบบ EC จาก 10 โวลต์ เป็น 15 โวลต์ พบว่าซีโอติที่วัดได้ในน้ำมีค่าเท่ากับ $170,602 \pm 19117$ และ $210,229 \pm 48183$ มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.5ก (ดูรายละเอียดในตาราง ข-2.2 ภาคผนวก ข) คิดเป็นความสามารถในการกำจัดซีโอติเท่ากับ 60%, 54% และ 44 % เมื่อใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 5, 10 และ 15 โวลต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5ข



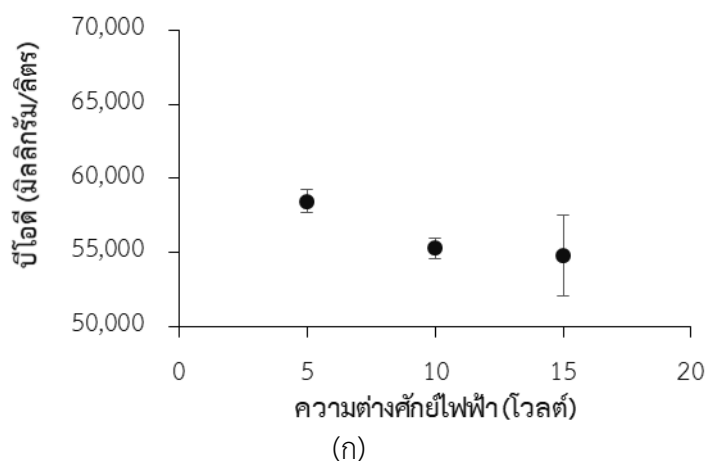
รูปที่ 4.5 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อ (ก) ซีโอติ และ (ข) %การกำจัดซีโอติ เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC นาน 90 นาที

ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ EC การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่อิเล็กโทรดหรือเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในระบบบำบัด ส่งผลให้ปริมาณของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในสารละลาย ที่แตกตัวจากขั้วอิเล็กโทรดมีปริมาณ

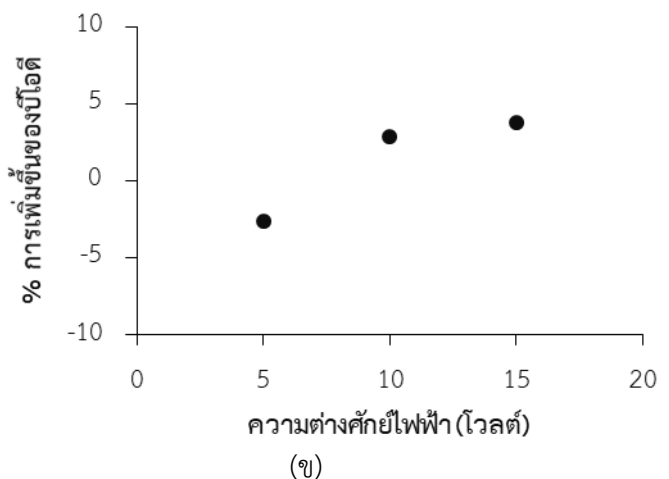
เพิ่มขึ้นตามกฎของฟาราเดย์ (Bazrafshan et al., 2013) ทำให้เกิดตะกอนเบาของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น จนสามารถเข้าทำปฏิกิริยาร้าง-รวมตะกอนกับสารอินทรีย์ได้มากขึ้นนั่นเอง อย่างไรก็ตามพบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากเกินไป ทำให้ขั้วอะลูมิเนียมเกิดการกัดกร่อนมากขึ้น และเกิดเป็นฟลอคของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เกาะอยู่บริเวณพื้นผิวขั้วอิเล็กโทรดอย่างหนาแน่นแทนที่การเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ ส่งผลต่อความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลไม่คงที่ (Bazrafshan et al., 2013) และจะทำให้มีฟองก๊าซเพิ่มขึ้นจำนวนมาก จนทำให้ฟลอคของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ลอยตัวขึ้น แทนที่การสัมผัสระหว่างสารรวมตะกอนกับสารอินทรีย์ สารอินทรีย์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Phalakornkulea et al. (2010) ที่พบว่าเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ระบบสูงถึง 80 A/m^2 เป็นระยะเวลาานาน การเคลื่อนที่ของฟองก๊าซขึ้นสู่ด้านบนอาจจำกัดการทำงานของระบบ EC และทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์มีค่าลดลงถึง 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการให้กระแสไฟฟ้าแก่ระบบเพียง 20 A/m^2

4.2.6 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อการกำจัดบีโอดี

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าบีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัด ดังแสดงในรูปที่ 4.6ก ค่าบีโอดีที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยจากค่าเริ่มต้น $56,950 \pm 1750$ มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น $58,476 \pm 751$ มิลลิกรัมต่อลิตร $55,300 \pm 700$ มิลลิกรัมต่อลิตร และ $54,800 \pm 2722$ มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 5, 10 และ 15 โวลต์ คิดเป็นร้อยละเพิ่มขึ้นของบีโอดีเท่ากับ 7 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.6ข)



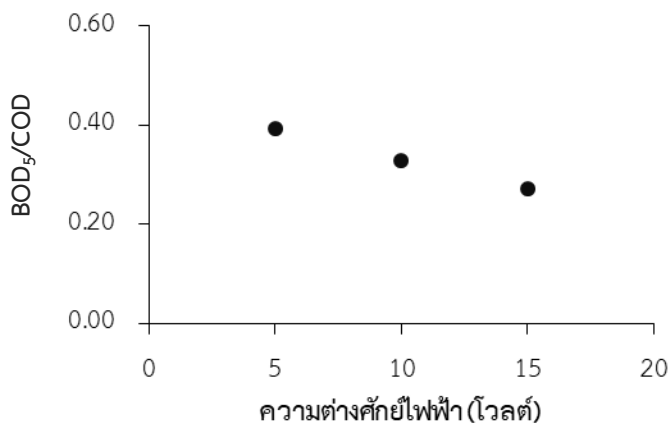
รูปที่ 4.6 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อ (ก) บีโอดี และ (ข) %การเพิ่มขึ้นของบีโอดี เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC นาน 90 นาที



รูปที่ 4.6 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อ (ก) บีโอดี และ (ข) %การเพิ่มขึ้นของบีโอดี เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC นาน 90 นาที

4.2.7 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพ

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินระบบ EC มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำกากส่า การเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ ทำให้อัตราส่วน BOD₅/COD ในน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ดูรายละเอียดใน ค-1.2 ภาคผนวก ค) เป็น 0.39 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-2.2 ภาคผนวก ข) เมื่อเทียบกับอัตราส่วน BOD₅/COD เริ่มต้นในน้ำกากส่าที่ใช้ในการศึกษา (ตารางที่ 4.1) การเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ และ 15 โวลต์ ช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพให้กับน้ำกากส่าได้เช่นเดียวกัน แต่มีสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ (รูปที่ 4.7) ทั้งนี้อัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบ ส่งผลให้มีปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นในระบบเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยากำจัดสารอินทรีย์ได้ 50-60% ส่งผลให้น้ำทิ้งหลังการบำบัดมีสารอินทรีย์ที่สามารถนำไปย่อยสลายด้วยระบบบำบัดทางชีวภาพได้ดี ดังงานวิจัยของ Bazrafshan et al. (2013) ที่ระบุว่าภาระสารอินทรีย์ทั้งหมดในรูปของซีโอดีที่เหลืออยู่ 50 % หลังการบำบัดด้วย EC จะเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถนำไปย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพ จึงทำให้อัตราส่วน BOD₅/COD ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบ EC มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า ไม่สามารถเพิ่มอัตราส่วน BOD₅/COD ได้ เนื่องจากการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากเกินไปส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ลดลง ดังจะเห็นได้จากความสามารถในการกำจัดซีโอดีที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.7 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ออัตราส่วนของบีโอดี 5 วันต่อซีโอดี เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC นาน 90 นาที

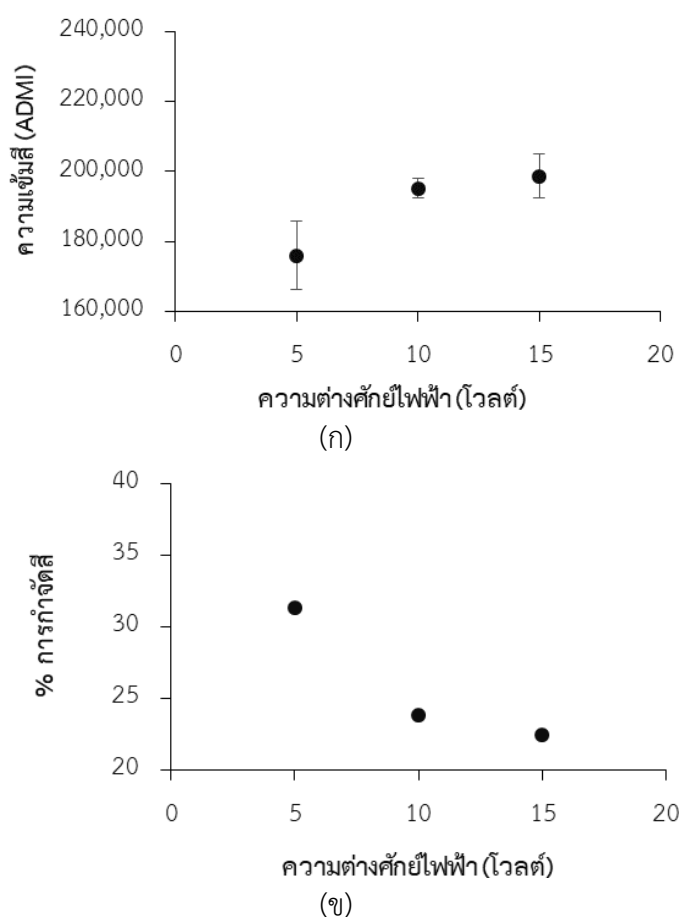
4.2.8 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อการกำจัดสี

เมื่อพิจารณาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้ระบบ EC ต่อความสามารถในการกำจัดสีของน้ำกากส่า พบว่าการกำจัดสีเกิดขึ้นได้ดีที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ดูรายละเอียดใน ค-1.2 ภาคผนวก ค) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 5 โวลต์ โดยมีค่าสีลดลงเป็น $175,896 \pm 9786$ ADMI (รูปที่ 4.8ก) คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับ 31.35 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 10 โวลต์ และ 15 โวลต์ สีของน้ำกากส่ามีค่าลดลงเป็น $195,239 \pm 2656$ และ $198,653 \pm 6203$ ADMI ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับ 23.80 และ 22.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-2.2 ภาคผนวก ข) โดยความสามารถในการกำจัดสีที่ลดลงอาจสัมพันธ์กับความหนาแน่นของตะกอนเบาของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่พื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรดตั้งอธิบายไว้ในเนื้อหาก่อนหน้านี้ นอกจากนี้การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า ทำให้ฟองก๊าซขนาดเล็กเพิ่มจำนวนมากขึ้น จนทำให้ฟลอค $Al(OH)_3$ ลอยตัวขึ้น แทนที่การเข้าสัมผัสกับสารอินทรีย์ จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ได้ (Phalakornkulea et al., 2010)

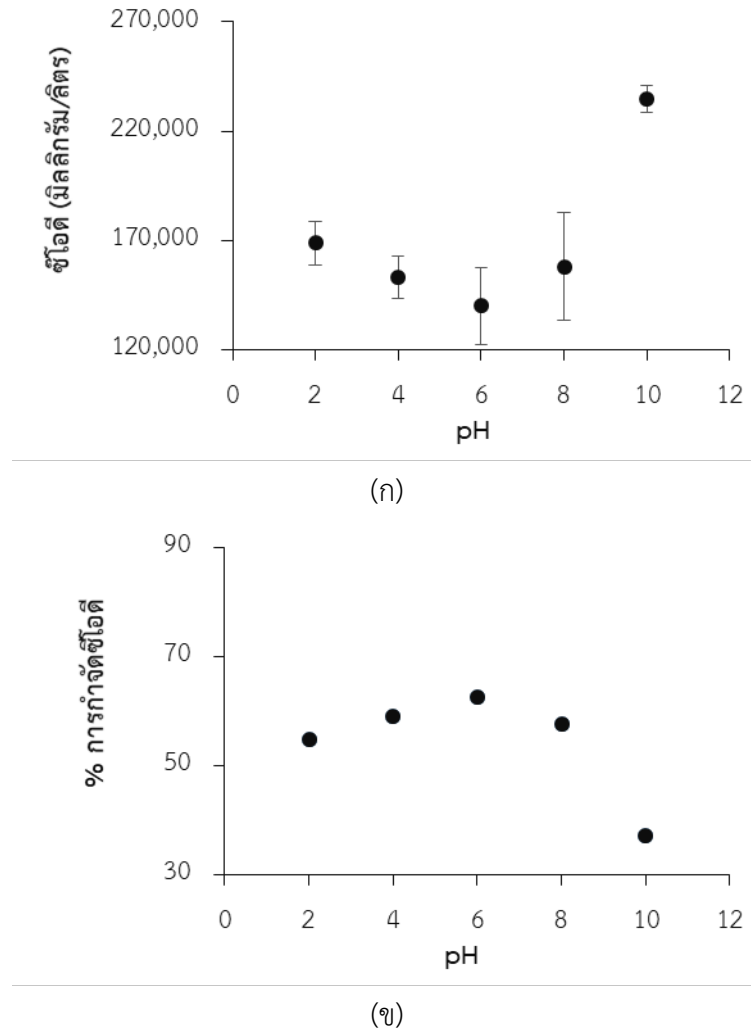
4.2.9 ผลของพีเอชต่อการกำจัดซีโอดี

จากการทดลองศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำกากส่าต่อความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยระบบ EC โดยใช้เดินระบบที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ นาน 90 นาที พบว่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำกากส่ามีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ค่าซีโอดีของน้ำกากส่าที่วัดได้หลังการบำบัดด้วย EC มีแนวโน้มลดลงจากค่าเริ่มต้นที่ $372,960 \pm 5760$ มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น $168,735 \pm 9756$, $153,147 \pm 9780$ และ $140,027 \pm 17844$ มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 2 ถึง 6 ดังแสดงในรูปที่ 4.9ก (ดูรายละเอียดในตาราง ข-2.3 ภาคผนวก ข) คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 54.77%, 89.94% และ 62.64% (รูปที่ 4.9ข) ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีขึ้น อาจเนื่องจากพีเอชมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของสารรวมตะกอนที่เกิดขึ้นระหว่างอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al^{3+})

กับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) โดยเมื่อพีเอชของน้ำเป็นกรดมากขึ้น จะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุบวก เช่น $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ และ $\text{Al}(\text{OH})_3$ (Mirji and Kalaburgi, 2015) ซึ่งสามารถกำจัดซีโอดีได้โดยทำปฏิกิริยากับประจุลบบนผิวของอนุภาคสารอินทรีย์โดยการดูดซับประจุให้เป็นกลาง ส่งผลให้แรงผลักระหว่างอนุภาคอ่อนลงจนสามารถจับตัวกันเป็นตะกอนและกำจัดออกจากน้ำเสียได้ (พรศักดิ์, 2556) ซีโอดีที่วัดได้จึงมีค่าลดลง ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อพีเอชของน้ำมีค่าเท่ากับ 6 อาจเป็นผลจากการเกิดสารคอมเพล็กซ์ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่พบได้เมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 6-7 เป็นหลัก (Vepsalainen, 2012) ซึ่งสารดังกล่าวจะทำหน้าที่เหมือนเป็นเป้าสัมผัสให้สารอินทรีย์มาเกาะติดและแยกออกจากน้ำได้ ในขณะที่การเพิ่มพีเอชเริ่มต้นของน้ำเป็น 8 และ 10 ส่งผลให้ค่าซีโอดีที่วัดได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น $158,167 \pm 24706$ และ $234,565 \pm 6219$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีค่าลดลงเป็น 57.59% และ 37.11% ตามลำดับ (รูปที่ 4.9ข) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเกิดสารประกอบที่มีประจุลบที่สำคัญคือ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ ในสถานะที่เป็นต่าง ทำให้ $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ ที่ทำหน้าที่เป็นสารรวมตะกอนมีปริมาณลดลง (สมพงษ์, 2551)



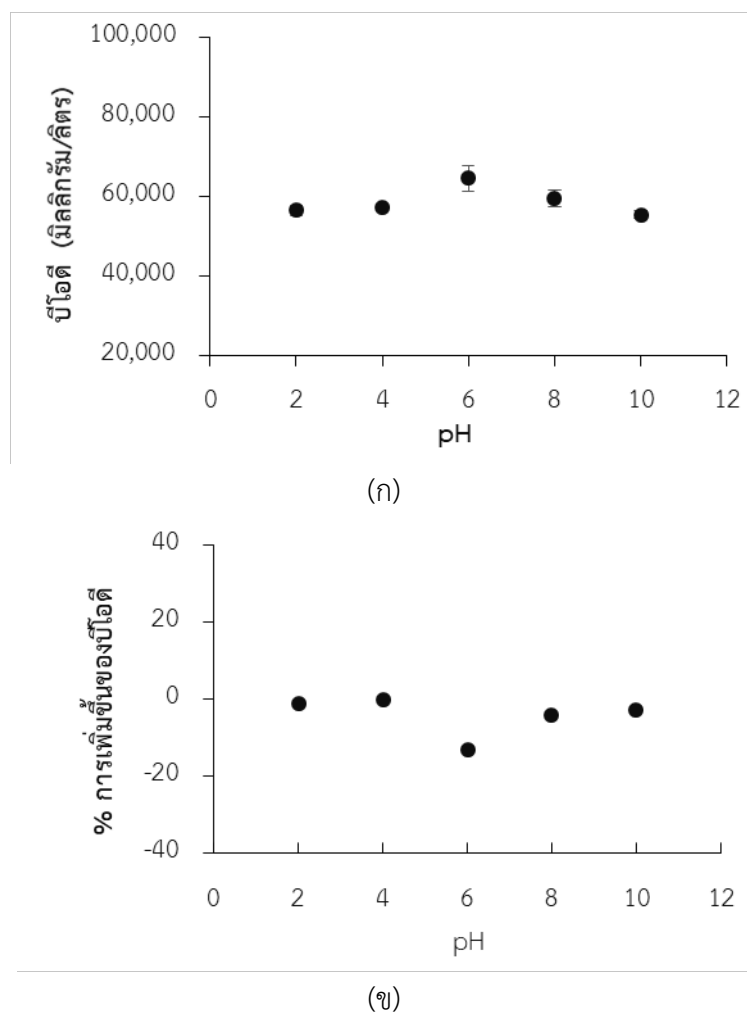
รูปที่ 4.8 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อ (ก) ค่าซีโอดีในหน่วย (ADMI) และ (ข) %การกำจัดเมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมมีค่าเท่ากับ 4 และเดินระบบ EC นาน 90 นาที



รูปที่ 4.9 ผลของพีเอชต่อ (ก) ซีโอติ และ (ข) %การกำจัดซีโอติ เมื่อเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นระยะเวลา 90 นาที

4.2.10 ผลของพีเอชต่อการกำจัดบีโอติ

จากการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อการเปลี่ยนแปลงบีโอติของน้ำกากส่าพบว่าบีโอติของน้ำกากส่ามีค่าสูงสุดเมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำมีค่าเท่ากับ 6 ในขณะที่พีเอชของน้ำที่เป็นกรดหรือต่างมากขึ้น ทำให้ค่าบีโอติที่วัดได้มีแนวโน้มลดลง สอดรับกับการลดลงของวีโอติที่พบว่าค่าต่ำสุดที่พีเอชเท่ากับ 6 สะท้อนให้เห็นว่า EC สามารถเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากให้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี

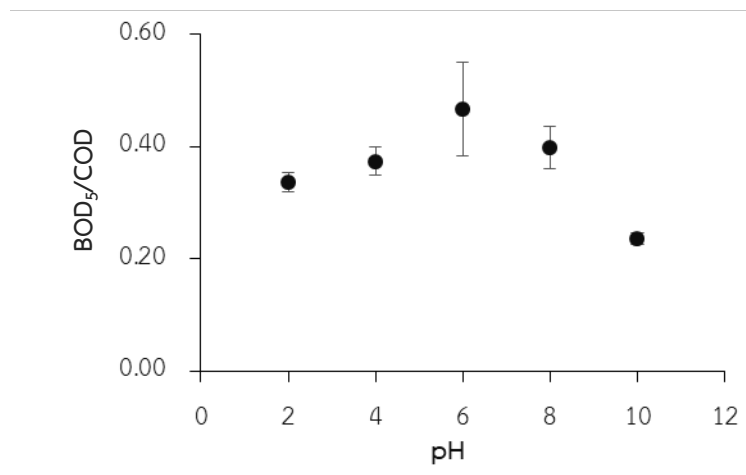


รูปที่ 4.10 ผลของพีเอชต่อ (ก) บีโอดี และ (ข) %การเพิ่มขึ้นของบีโอดี เมื่อเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นระยะเวลา 90 นาที

4.2.11 ผลของพีเอชต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพ

พีเอชของน้ำกากส่ามีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ EC ในแง่ของการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ ดังจะเห็นได้จากผลของอัตราส่วน BOD_5/COD ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 0.33 และ 0.37 ที่พีเอช 2 และ 4 ตามลำดับ และมีค่าสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ดูรายละเอียดใน ค-1.3 ภาคผนวก ค) เท่ากับ 0.47 เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำกากส่ามีค่าเท่ากับ 6 แสดงให้เห็นว่าการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากจะเกิดได้ที่พีเอชเท่ากับ 6 งานวิจัยของ Phalakornkulea et al. (2010) ได้กล่าวไว้ว่าการกำจัดสารอินทรีย์เกิดขึ้นได้ดีเมื่อขึ้นอยู่กับกลไกการสร้างผลึกอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ขึ้นมาให้อนุภาคสารอินทรีย์มาเกาะจับและพบว่าอะลูมิเนียมที่แตกตัวเป็นไอออนสามารถเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันอย่างต่อเนื่องเป็นผลึกอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ได้ดีที่พีเอช 6 นั่นเอง (Bazrafshan et al., 2013) ทั้งนี้ปริมาณตะกอนเบาของ $Al(OH)_3$ จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อน้ำมีค่าพีเอชเป็นต่างมากขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการกำจัด

สารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและบีไอดีมีแนวโน้มลดลง ส่งผลให้อัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพมีค่าลดลง เป็น 0.4 และ 0.24 ที่พีเอชเท่ากับ 8 ถึง 10 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-2.3 ภาคผนวก ข)

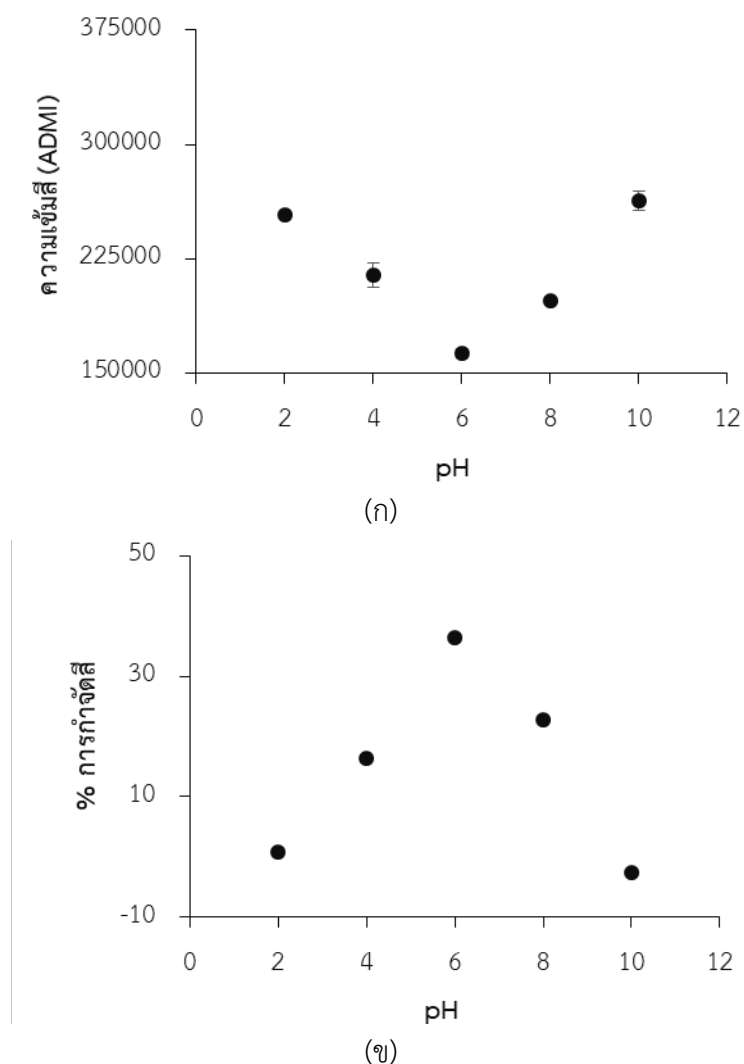


รูปที่ 4.11 ผลของพีเอชต่ออัตราส่วนของบีไอดี 5 วันต่อซีไอดี เมื่อเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นระยะเวลา 90 นาที

4.2.12 ผลของพีเอชที่มีต่อการกำจัดสี

เมื่อวิเคราะห์ผลของพีเอชต่อการกำจัดสีด้วยระบบ EC พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อตัวอย่างน้ำมีค่าพีเอชเริ่มต้นในช่วง 2 - 6 โดยมีค่าสีลดลงเป็น $254,015 \pm 1243$, $214,387 \pm 8034$ และ $163,010 \pm 2690$ ADMI ดังแสดงในรูปที่ 4.12ก (ดูรายละเอียดในตาราง ข-2.3 ภาคผนวก ข) คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดสี 0.85, 16.32 และ 36.37% ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการปรับค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างให้มากกว่าจุดไอโซอิเล็กทริกของสารเมลานอยดินซึ่งเป็นสารประกอบหลักที่ทำให้เกิดสีในน้ำกากส่า (pH 2.5) ทำให้สารเมลานอยดินซึ่งยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพมีประจุโดยรวมเป็นลบสามารถจับกับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และทำให้ประจุโดยรวมเป็นศูนย์ (Charge neutralization) เป็นการกำจัดสารอินทรีย์และสีของเมลานอยดินผ่านกลไกทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีด้วย EC เกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชเท่ากับ 6 ให้ผลเช่นเดียวกับกับ BOD₅/COD ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่พีเอช 6 เช่นกัน ซึ่งให้เห็นว่าระบบ EC สามารถช่วยเพิ่มดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำกากส่าได้ เนื่องจาก EC ไปช่วยกำจัดสารอินทรีย์ที่ยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพอย่างเมลานอยดินได้นั่นเอง เมื่อค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 6 เป็น 8 และ 10 พบว่าค่าสีของน้ำกากส่ามีแนวโน้มลดลงเป็น $197,657 \pm 1822$ และ $263,127 \pm 6277$ ADMI ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสี 22.85 และ -2.7 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.12ข) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากพีเอชของน้ำตัวอย่างสูงกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้า (Zero Point of Charge) ของ $Al(OH)_3$ ทำให้เกิด Polymeric สปีชีส์ของอะลูมิเนียมในรูปของ

$\text{Al}(\text{OH})_4^-$ มากกว่า ส่งผลให้ปริมาณสารรวมตะกอนไม่เพียงพอในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ (สมพงษ์, 2551)



รูปที่ 4.12 ผลของพีเอชต่อ (ก) ค่าสีที่วัดในหน่วย และ (ADMI) และ (ข) %การกำจัดสี เมื่อเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นระยะเวลา 90 นาที

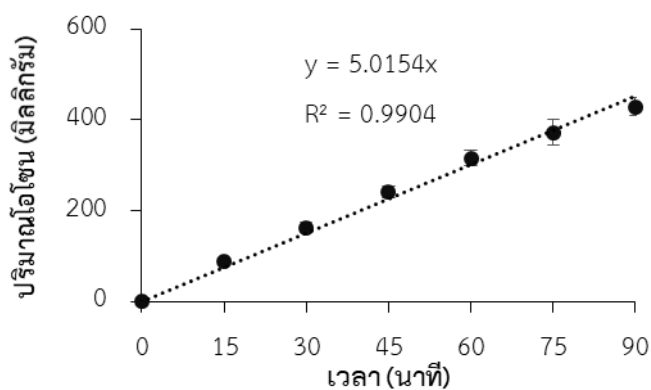
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของวิธีโอโซนเนชันในการกำจัดสารอินทรีย์ การเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสีของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี EC

ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้วิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation, EC) ร่วมกับวิธีโอโซนเนชัน (Ozonation, O_3) เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานสุรากลั่น ทำการทดลองโดยบำบัดน้ำจากสาด้วยวิธีการ EC

ภายใต้สภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองก่อนหน้านี้ จากนั้นนำน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย EC มาบำบัดต่อด้วย O_3 ผลการทดลองที่ได้เป็นดังนี้

4.3.1 อัตราการผลิตโอโซน

อัตราการผลิตโอโซนของเครื่องผลิตโอโซน Ozzon รุ่น OZ-A1-FT ทำการวัดโดยการพ่นก๊าซโอโซนจากเครื่องผลิตเข้าสู่ถังปฏิกิริยาและขวดดักจับโอโซนจำนวน 2 ขวด (T1,T2) ที่บรรจุสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ปริมาตร 500 และ 200 มิลลิลิตร ตามลำดับตามระยะเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์หาปริมาณโอโซนด้วยวิธีการไทเทรตแบบย้อนกลับกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตจะถูกนำมาคำนวณค่าปริมาณก๊าซโอโซนและพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนกับระยะเวลาในการผ่านก๊าซโอโซนนั้นๆ กราฟที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.13 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-4.1 ภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.13 ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.13 พบว่าการเพิ่มเวลาในการผ่านก๊าซโอโซนลงในสารละลาย KI ณ อัตราการไหลของการอากาศคงที่ จะทำให้ปริมาณการเกิดโอโซนในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยในช่วงเวลาที่ทดสอบนาน 90 นาที ปริมาณของโอโซนที่ผลิตได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงเทียบกับเวลาที่ใช้ในการผ่านก๊าซโอโซนลงในสารละลาย จากการพลอตกราฟพร้อมกับการหาฟังก์ชันสมการถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธี ordinary least square fit จะได้ฟังก์ชันสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปร คือ $y = 4.7015x + 14.7$ ($R^2 = 0.9924$) ผลการหาอัตราการผลิตก๊าซโอโซน ซึ่งคำนวณได้จากความชันของสมการถดถอยเชิงเส้นดังกล่าว พบว่าเครื่องผลิตโอโซน Ozzon รุ่น OZ-A1-FT ผลิตก๊าซโอโซนได้ 5.02 มิลลิกรัมต่อนาที หรือ 301 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

4.3.2 ความสามารถของวิธีโอโซนเนชันในการกำจัดสารอินทรีย์ การเพิ่มดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพ และการกำจัดสีในน้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดด้วย EC

4.3.2.1 สมบัติของตัวอย่างน้ำที่ใช้ศึกษา

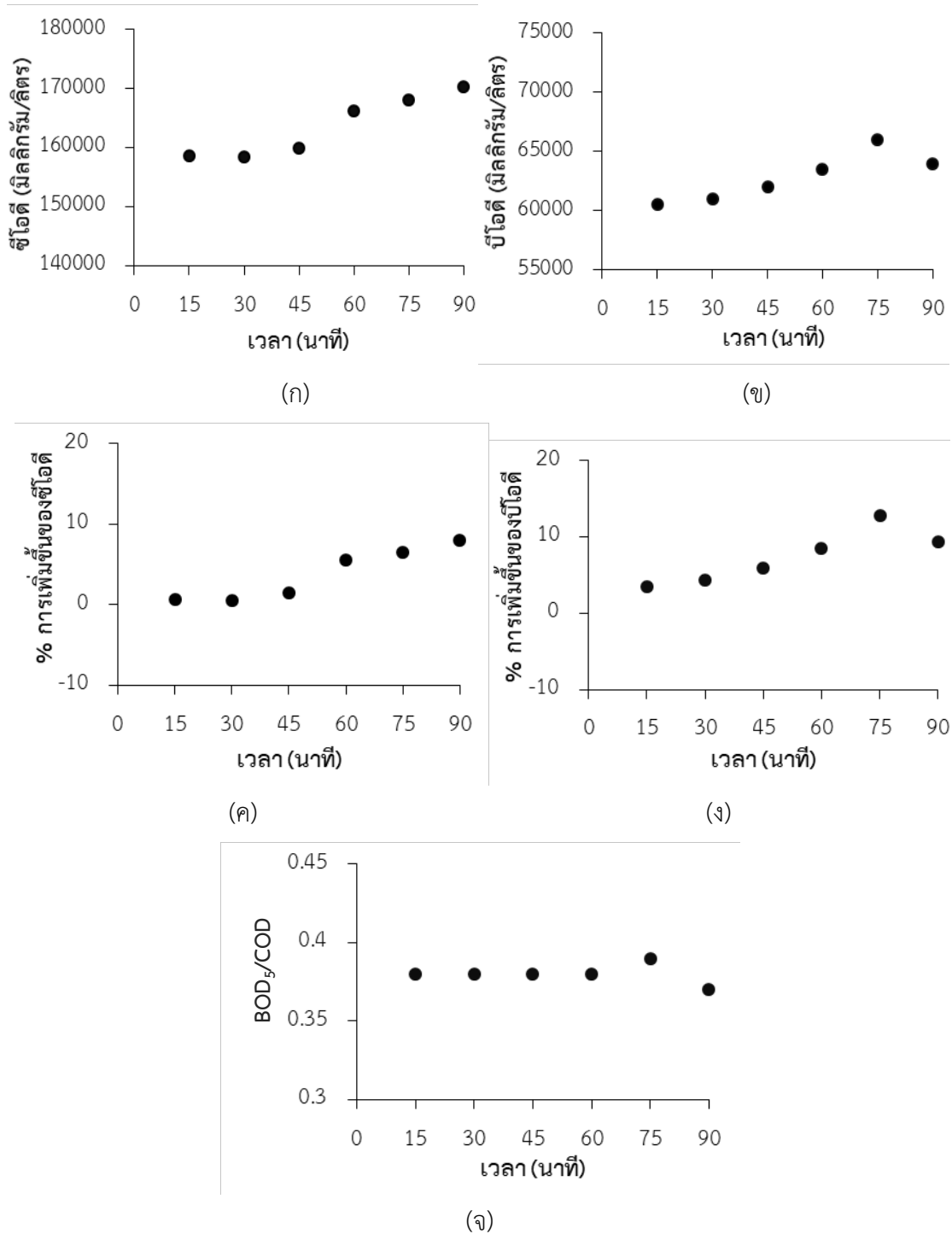
ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษาในหัวข้อนี้จะเป็นน้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการ EC สภาวะที่ใช้ในการบำบัดน้ำคือ ใช้น้ำกากส่าที่มีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 เติมนระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 5 โวลต์ เป็นเวลา 90 นาที น้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดที่สภาวะดังกล่าวมีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-3.1 ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะของน้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี EC

คุณลักษณะ	ก่อนบำบัด
พีเอช	6.75±0.2
ซีโอดี (COD, mg/L)	157,680±23419
บีโอดี (BOD ₅ , mg/L)	58,500±707
BOD ₅ /COD	0.38±0.05
ค่าสี (ADMI)	321,474±6882

4.3.2.1 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซน

เมื่อนำตัวอย่างน้ำที่มีสมบัติดังระบุในตารางที่ 4.2 มาบำบัดด้วยวิธี O₃ โดยแปรค่าระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนในระบบ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.14 ซึ่งพบว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่วัดในรูปซีโอดีและบีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการผ่านก๊าซโอโซน โดยซีโอดีมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 157,680 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 170,300 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนให้นานขึ้นจาก 15 นาที เป็น 90 นาที เช่นเดียวกับค่าบีโอดีในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนที่พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 58,500 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 64,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-5.1 ภาคผนวก ข) การเพิ่มขึ้นของซีโอดีในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซน อาจเป็นผลมาจากความสามารถในการออกซิไดซ์ของโอโซนที่ทำให้สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ถูกออกซิไดซ์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ขนาดเล็กลงที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ เช่น สารประกอบจำพวก กรดอะซิติก อัลดีไฮด์ หรือคีโตน และสารเหล่านี้ไม่ได้ถูกเกิดการออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ในระยะเวลาที่ทำการศึกษา ส่งผลให้ค่าซีโอดีและค่าบีโอดีที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น (กุนูรหยาหม และคณะ, 2551; Lin and Lai., 2000; Souza et al., 2010)

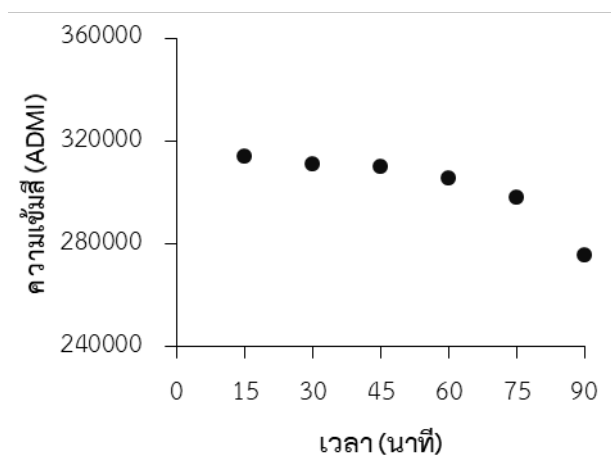


รูปที่ 4.14 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซไอโซนต่อ (ก) ซีไอที (ข) บีไอที (ค) เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของซีไอที (ง) เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของบีไอที และ (จ) อัตราส่วนของบีไอที 5 วันต่อซีไอทีของน้ำตัวอย่าง

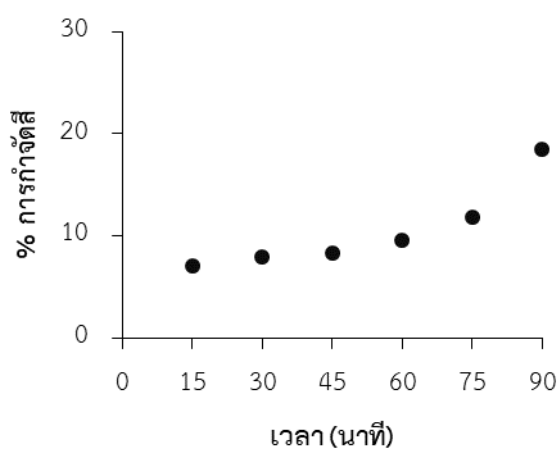
ผลการคำนวณอัตราส่วน BOD₅/COD เพื่อตัดสินใจเปลี่ยนแปลงความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของตัวอย่างน้ำ พบว่าวิธีไอโซนชั้นในสถานะที่ทำการทดสอบไม่สามารถเพิ่ม

ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของตัวอย่างน้ำได้ โดยอัตราส่วน BOD_5/COD ของตัวอย่างน้ำมีค่าที่อยู่ในช่วง 0.37-0.39 (รูปที่ 4.14จ) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากน้ำกากส่ามีปริมาณสารอินทรีย์สูงมาก ถึงแม้ว่าการบำบัดด้วยระบบ EC จะช่วยลดปริมาณสารอินทรีย์ได้ในระดับหนึ่ง แต่ซีไอดีและบีไอดีของตัวอย่างน้ำที่นำมาบำบัดด้วยวิธีโอโซนชั้น ยังจัดว่าเป็นน้ำตัวอย่างที่มีสารอินทรีย์สูง ประกอบกับเครื่องกำเนิดโอโซนที่ใช้ในการวิจัยมีอัตราการผลิตค่อนข้างต่ำ อีกทั้งข้อจำกัดของเครื่องมือคือไม่สามารถปรับอัตราการไหลของอากาศเพื่อเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซโอโซนได้ ทำให้โอโซนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาอาจไม่เพียงพอต่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารอินทรีย์ รวมถึงดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพดังที่พบในงานวิจัยของ Gomes et al. (2013) และ Aquino and Pires (2015) ด้วยเหตุนี้การเจือจางตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย EC เพื่อให้มีปริมาณสารอินทรีย์ลดลงก่อนนำมาบำบัดด้วยวิธีโอโซนชั้น จึงเป็นวิธีการทดลองที่สามารถยืนยันค่าอภิปรายดังกล่าวข้างต้น อีกทั้งยังช่วยให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลของโอโซนชั้นต่อการกำจัดสารอินทรีย์และการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำตัวอย่างได้ ซึ่งผลดังกล่าวจะถูกรายงานในหัวข้อต่อไป

เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาในการผ่านก๊าซโอโซนต่อการกำจัดสีของน้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดด้วย EC พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนในระบบ (รูปที่ 4.15) เมื่อสีของน้ำกากส่าที่วัดได้ในหน่วย ADMI มีค่าลดลงจาก 314,431 ADMI เหลือ 298,470 ADMI เมื่อเพิ่มเวลาการผ่านก๊าซโอโซนจาก 15 นาทีเป็น 90 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.15ก (ดูรายละเอียดในตาราง ข-5.1 ภาคผนวก ข) และมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีเพิ่มขึ้น เป็น 18.43 % หลังผ่านก๊าซโอโซนนาน 90 นาที (รูปที่ 4.15ข) สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาของโอโซนกับหมู่ Chromophores ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของสารอินทรีย์ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะคู่ และสามารถดูดซับแสงที่มองเห็นได้จึงทำให้เกิดสีในน้ำเสีย ทำให้พันธะคู่ที่เชื่อมต่อกันในโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ถูกทำลายส่งผลให้เกิดโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงและสูญเสียความสามารถในการดูดซับแสงที่มองเห็น สีจึงหายไป ระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนที่นานขึ้น ทำให้มีปริมาณโอโซนในระบบมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีในระบบจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา อย่างไรก็ตามพบว่ากระบวนการโอโซนชั้นสามารถลดสีลงได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น อาจเพราะปฏิกิริยาการกำจัดที่เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้สารมัธยันต์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสียังมีความคงตัวอยู่ (Shriram and Kanmani, 2014)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.15 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนต่อ (ก) ค่าสีที่วัดสีในหน่วย ADMI และ (ข) ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำตัวอย่าง

4.3.2.2 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนในการบำบัดตัวอย่างน้ำเจือจาง

ด้วยอัตราการผลิตของโอโซนของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ไม่สูงมาก และมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถเพิ่มกำลังการผลิตของเครื่องมือให้สูงขึ้นได้ จึงทำให้ปริมาณโอโซนที่ผลิตออกมาอาจไม่เพียงพอต่อการเข้าทำปฏิกิริยากับปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำตัวอย่าง ด้วยเหตุนี้ การเจือจางน้ำตัวอย่างเพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์ และสารที่ทำให้เกิดสีก่อนนำมาบำบัดด้วยวิธีโอโซนชั้น จึงเป็นแนวทางที่เลือกใช้ในงานวิจัย เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้โอโซนในการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการกำจัดสี ความสามารถของวิธีโอโซนชั้นในการกำจัดสารอินทรีย์ การเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายชีวภาพและการลดสีของตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย EC จะถูกนำมาเจือจางด้วยน้ำในอัตราส่วนน้ำทิ้งจากการบำบัดด้วย EC ต่อน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:100

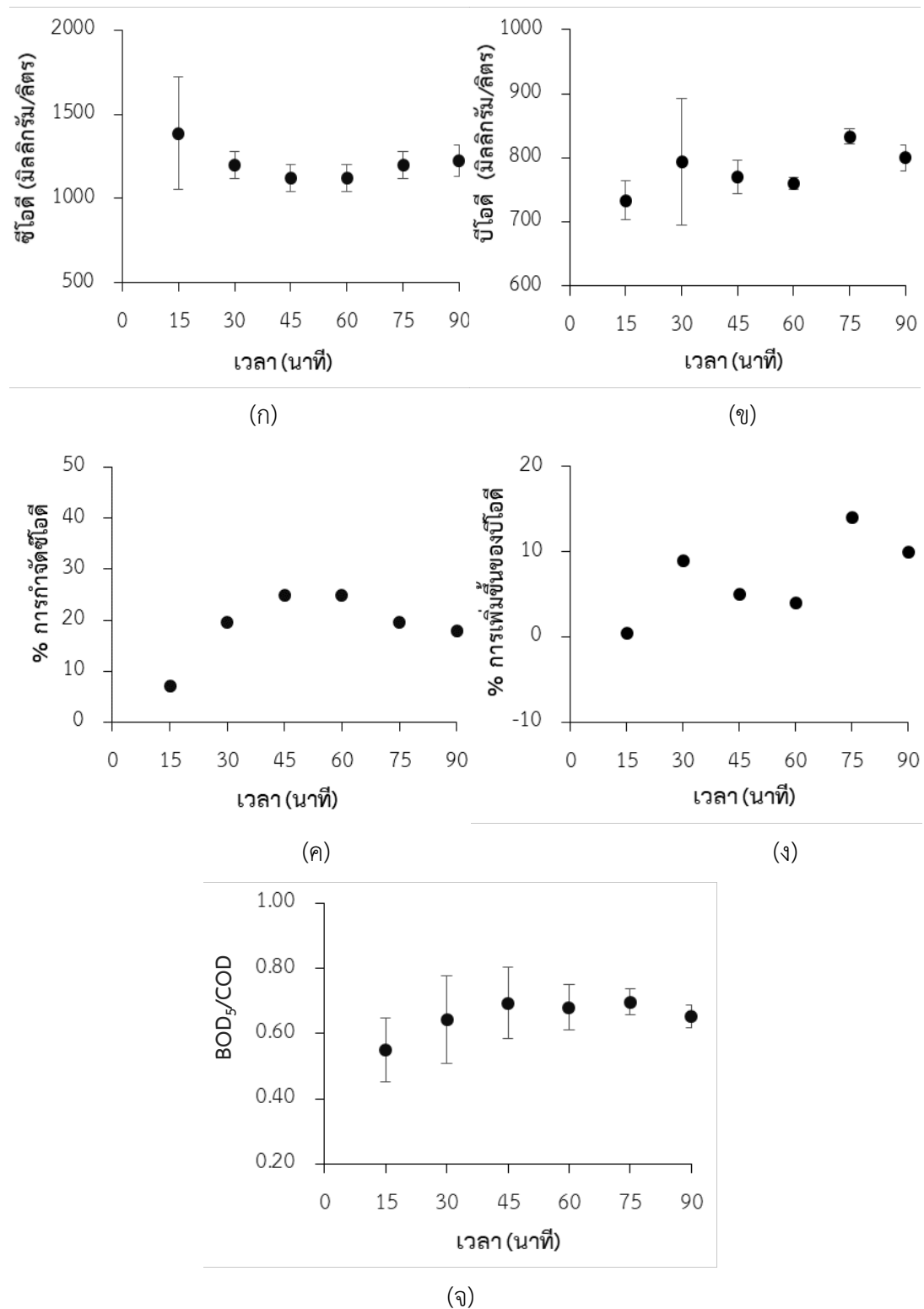
โดยปริมาตร ตัวอย่างน้ำที่ผ่านการเจือจางมีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-3.2 ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.3 คุณลักษณะของน้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี EC ภายหลังจากการเจือจาง 100 เท่า

คุณลักษณะ	ก่อนบำบัด
พีเอช	6.52±0.1
ซีโอดี (COD, mg/L)	1,493±281
บีโอดี (BOD ₅ , mg/L)	730±30
BOD ₅ /COD	0.5±0.1
ค่าสี (ADMI)	3,182±33

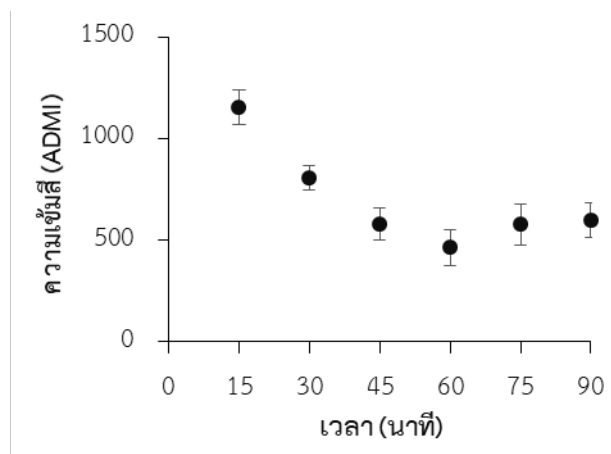
เมื่อนำน้ำที่ผ่านการเจือจาง 100 เท่า มาบำบัดด้วยวิธีโอโซนเนชั่น โดยแปรค่าระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซน พบว่าซีโอดีของน้ำตัวอย่างมีค่าลดลงตามระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซน โดยมีค่าลดลงจาก 1,493 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 1,387±113 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1,120±80 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.16ก) เมื่อเพิ่มระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนจาก 15 เป็น 45 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าสูงขึ้นจาก 7% เป็น 25% เมื่อเพิ่มระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนจาก 15 นาที เป็น 45 นาที (รูปที่ 4.16ค) ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนนานขึ้น ในขณะที่ค่าบีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัส โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าบีโอดีเริ่มต้น 730 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.16ข) คิดเป็นร้อยละของการเพิ่มขึ้นของบีโอดีในช่วงระหว่าง 10 - 14 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนนาน 90 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.16ง (ดูรายละเอียดในตาราง ข-5.2 ภาคผนวก ข)

เมื่อนำมาคำนวณอัตราส่วน BOD₅/COD พบว่าโอโซนมีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำตัวอย่าง ดังจะเห็นได้จากอัตราส่วน BOD₅/COD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 0.55 เป็น 0.65 เมื่อระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนในระบบนานขึ้นจาก 15 เป็น 90 นาที (รูปที่ 4.16ค) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gupta et al. (2015) ที่พบว่าการใช้โอโซนในการบำบัดขั้นต้น สามารถเพิ่มค่าดัชนีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของตัวอย่างน้ำที่นำมาเจือจางได้ โดยเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการผ่านก๊าซโอโซนให้นานขึ้น ค่าดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นจาก 0.15 เป็น 0.58 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้ถึง 33 เปอร์เซ็นต์

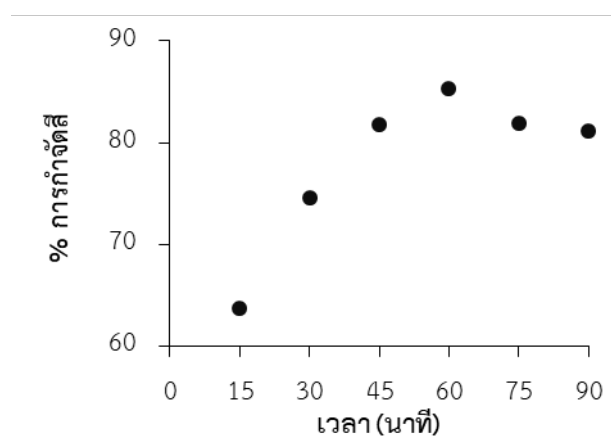


รูปที่ 4.16 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนต่อ (ก) ซีโอดี (ข) ฟรีคลอรีน (ค) เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดี (ง) เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของฟรีคลอรีน และ (จ) อัตราส่วนของฟรีคลอรีน 5 วัน ต่อซีโอดีของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัด

เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนต่อความสามารถในการกำจัดสีพบว่าโอโซนสามารถลดค่าสีของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย EC ให้มีค่าลดลงได้อีก โดยสีของตัวอย่างน้ำที่นำมาบำบัดด้วยโอโซนมีค่าลดลงจาก $1,154 \pm 84$ ADMI เหลือ 600 ± 99 ADMI เมื่อเพิ่มระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนจาก 15 เป็น 90 นาที คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นจาก 60 เปอร์เซ็นต์ เป็น 81 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.17ข (ดูรายละเอียดในตาราง ข-5.3 ภาคผนวก ข) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Abidin et al. (2015) พบว่าการกำจัดสีในสารละลายสีย้อมเอโซมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาให้มีการสัมผัสโอโซนได้นานขึ้น โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงสุดอยู่ที่ 85.4 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาบำบัด 60 นาที และให้ผลการทดสอบที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทดสอบโดยวิธีทางสถิติ One Way - Anova และเปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Turkey Pairwise Comparison (ดูรายละเอียดใน ค-2.1 ภาคผนวก ค) ดังนั้นจึงเลือกใช้ระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนคงที่ที่ 60 นาที สำหรับการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นที่ส่งผลต่อการบำบัดในการทดลองต่อไป



(ก)



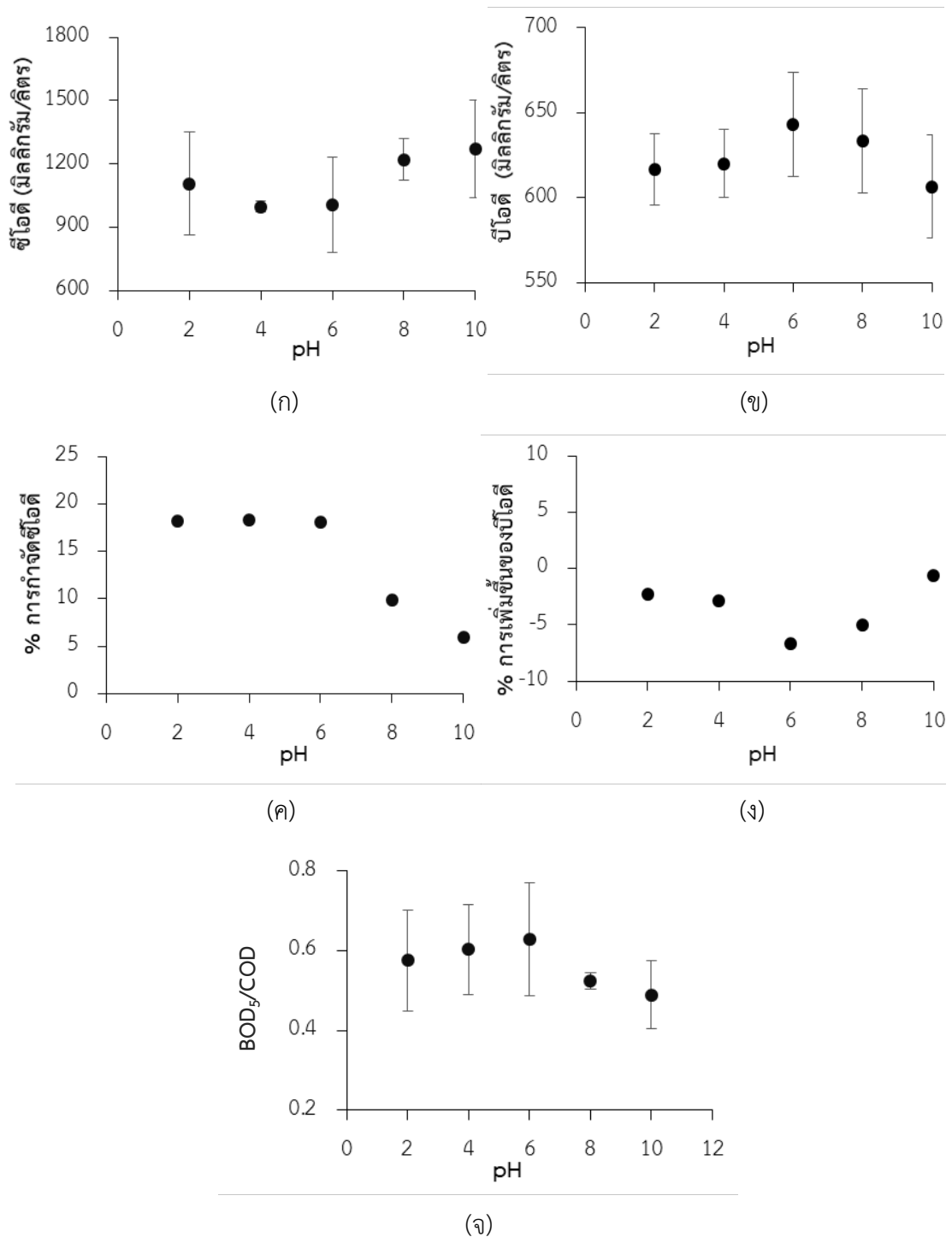
(ข)

รูปที่ 4.17 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนต่อ (ก) ค่าสีที่วัดได้สีในหน่วย ADMI และ (ข) ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัด

ผลการทดสอบการบำบัดน้ำกากส่าซึ่งผ่านการบำบัดด้วยวิธี EC ทั้งแบบไม่เจือจางและแบบเจือจาง 100 เท่า ด้วยวิธีโอโซนเนชัน แสดงให้เห็นว่าวิธีการโอโซนเนชันเมื่อใช้ร่วมกับวิธีการ EC สามารถลดปริมาณสารอินทรีย์และเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำกากส่าได้ ทั้งนี้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพขึ้นกับสัดส่วนความเข้มข้นของสารอินทรีย์กับปริมาณโอโซนที่มีในระบบ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ พันธกานต์ (2558) ที่ระบุว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จะลดลงเมื่อ COD เริ่มต้นมีปริมาณสูงขึ้น ทำให้ปริมาณโอโซนที่มีในระบบซึ่งมีค่าคงเดิม อาจไม่เพียงพอต่อการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพของวิธีการโอโซนเนชันในการบำบัดตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย EC โดยมีการเจือจาง 100 เท่าพร้อมกับเลือกใช้ระยะเวลาในการผ่านก๊าซโอโซนคงที่ที่ 60 นาที ในการทดลองต่อไป

4.3.3.2 ผลของพีเอช

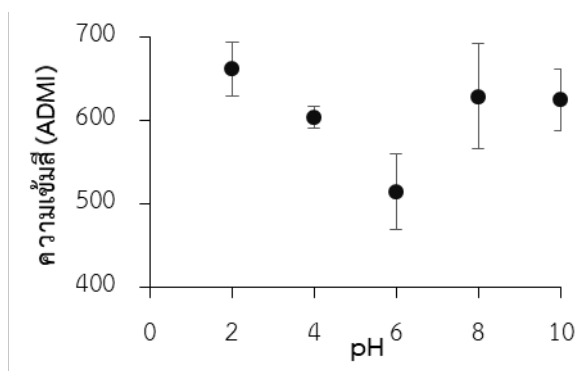
ในการทดลองนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการโอโซนเนชันในการบำบัดตัวอย่างน้ำที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นแตกต่างกัน ได้แก่ 2, 4, 6, 8 และ 10 ทำการทดลองโดยนำตัวอย่างน้ำเจือจางที่มีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 4.3 มาปรับพีเอชให้มีค่าเริ่มต้นตามที่กำหนด จากนั้นผ่านก๊าซโอโซนลงในน้ำเสียนาน 60 นาที ผลการศึกษาเป็นดังรูปที่ 4.18 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-5.3 ภาคผนวก ข) ซึ่งพบว่าความสามารถในการกำจัดซีโอดีเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อตัวอย่างน้ำมีฤทธิ์เป็นกรด ทั้งนี้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าซีโอดีลดลงจากค่าความเข้มข้นเริ่มต้น $1,353 \pm 203$ มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือค่าเฉลี่ยโดยประมาณ $1,106 \pm 210$ มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำตัวอย่างมีค่าระหว่าง 2-6 ในขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเมื่อตัวอย่างน้ำที่มีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 8 และ 10 มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการบำบัดในสภาวะที่เป็นกรด นอกจากนี้พบว่าบีโอดีที่วัดได้ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 617 ± 21 เป็น 620 ± 20 และ 643 ± 31 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อน้ำตัวอย่างมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2, 4 และ 6 ตามลำดับ ในทางกลับกันพบว่าบีโอดีของน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มพีเอชเริ่มต้นของน้ำตัวอย่างเป็น 8 และ 10 (รูปที่ 4.18ข) ผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าวิธี EC ร่วมกับวิธี O_3 สามารถกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำกากส่าได้ดี ซึ่งโอโซนสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาทางตรง (Direct oxidation) โดยเลือกทำปฏิกิริยาเฉพาะเจาะจงกับหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ และแรดิคัลของโอโซนยังสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาทางอ้อม (Indirect oxidation) กับสารอินทรีย์ได้เช่นกัน ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการบำบัดเกิดขึ้นได้ดีในช่วงพีเอชที่เป็นกรดมากกว่าพีเอชที่เป็นเบส เนื่องจากในการเดินระบบโอโซนเนชันนั้นจะมีปริมาณโอโซนที่ละลายในน้ำมากกว่าสัดส่วนของไฮดรอกซิลแรดิคัลที่ละลายในน้ำ จึงทำให้การกำจัดสารอินทรีย์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายใต้ปฏิกิริยา Direct ozonation ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด (Summer et al., 2005)



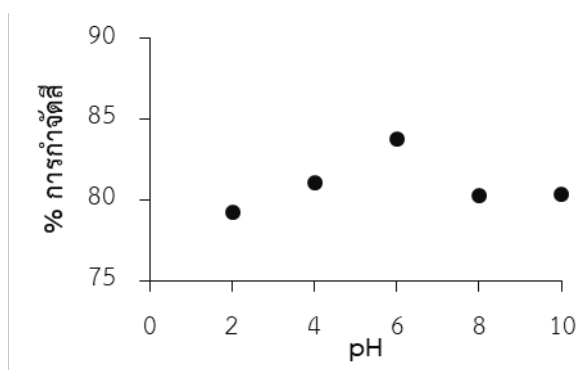
รูปที่ 4.18 ผลของพีเอชต่อ (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี (ค) เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดี (ง) เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นบีโอดี และ (จ) อัตราส่วนของบีโอดี 5 วันต่อซีโอดี เมื่อเดินระบบโอโซนเป็นเวลา 60 นาที

เมื่อพิจารณาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำตัวอย่างที่นำมาบำบัดด้วยวิธีโอโซนเช่น พบว่าอัตราส่วน BOD₅/COD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น ทั้งนี้การเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพเกิดขึ้นได้ดีในช่วงพีเอชเป็นกรด อาจเนื่องมาจากที่พีเอชดังกล่าว จะเกิดกลไกการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบจำเพาะเจาะจงของ

โมเลกุลโอโซนกับหมู่ฟีนอลิก ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพได้เป็นอย่างดี (Aquino and Pires, 2015; Gomes et al., 2013) และพบว่าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่พีเอชเท่ากับ 6 เนื่องจากโอโซนสามารถเข้าทำปฏิกิริยาทั้งทางตรงและยังสามารถทำปฏิกิริยาทางอ้อมกับสารอินทรีย์พร้อมกันได้ดีที่พีเอช 6 (Gottschalk et al., 2010, Alfafara et al., 2000) สอดรับกับผลการเปลี่ยนแปลงของซีไอดีและบีไอดี สะท้อนให้เห็นว่าโอโซนสามารถออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากให้เป็นสารที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพได้ ดังงานของวิจัยของ Otieno et al. (2019) ที่ระบุว่าน้ำกากส่าหลังการบำบัดด้วยโอโซนที่สภาวะพีเอชเท่ากับ 4.35 มีดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้นจาก 0.48 เป็น 0.72 และมีองค์ประกอบของน้ำทิ้งเปลี่ยนแปลงไป โดยพบว่ามีปริมาณสารประกอบอะโรมาติกที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพลดลง



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.19 ผลของพีเอชต่อ (ก) ค่าสีที่วัดในหน่วย ADMI และ (ข) ประสิทธิภาพการกำจัดสี ของน้ำตัวอย่าง เมื่อเดินระบบโอโซนเป็นเวลา 60 นาที

เมื่อพิจารณาความสามารถในการกำจัดสีของตัวอย่างน้ำที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นต่างกันด้วยวิธีโอโซนเช่น พบว่าสีของน้ำตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ดูรายละเอียดใน ค-2.2 ภาคผนวก ค) จาก 662 ADMI เป็น 515 ADMI เมื่อเพิ่มพีเอชเริ่มต้นของตัวอย่างจาก 2 เป็น 6 คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดสีจาก 79 เปอร์เซ็นต์ เป็น 84 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามการเพิ่ม

พีเอชเริ่มต้นเป็น 8 และ 10 ทำให้ความสามารถในการกำจัดสีย้อมด้วยวิธีโอโซนชั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับการบำบัดที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 สีในน้ำตัวอย่างหลังบำบัดมีค่าเป็น 629 ADMI และ 624 ADMI ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-5.3 ภาคผนวก ข) ทั้งนี้จะเห็นว่าความสามารถในการกำจัดสีย้อมด้วยโอโซนเกิดขึ้นได้ดีในสภาวะกรดมากกว่าต่าง สอดรับกับผลของการเพิ่มดัชนีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวโอโซนสามารถเกิดปฏิกิริยาทางตรงแบบเจาะจงกับหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสี ซึ่งมีความว่องไวต่อการออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (ัญลักษณ์, 2553) เช่น OH° ที่พบในโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลหรือเมลานอยดิน ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดสีน้ำตาลเข้มในน้ำกากส่าเป็นหลัก ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่โมเลกุลเล็กลง เช่น กรดคาร์บอกซิลิก ทำให้สีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดมีค่าลดลง (Victoiro et al., 2007)

4.4 ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน

ผลการศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) ของตัวอย่างน้ำ 3 ประเภท ได้แก่ น้ำกากส่าที่ยังไม่ผ่านการบำบัด (Untreated) น้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนทางเคมีไฟฟ้า (EC) และน้ำกากส่าที่บำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับวิธีโอโซนชั้น (EC + Ozone) ทำได้โดยหมักตัวอย่างน้ำที่ปรับให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6.8 ในถังหมักที่มีขนาดความจุ 2 ลิตร นาน 14 วัน พร้อมกับมีการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่ระบบเพิ่มจำนวน 1 ครั้ง คือวันที่ 1 และวันที่ 8 ของการเดินระบบ ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำตัวอย่างแต่ละแบบซึ่งปรับพีเอชเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ 6.8 ± 0.15 ก่อนเข้าสู่ระบบหมัก ได้แก่ ซีโอดีทั้งหมด (tCOD) ซีโอดีที่ละลายน้ำได้ (sCOD) ของแข็งทั้งหมด (TS), ของแข็งระเหยได้ (VS) และอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของน้ำตัวอย่างก่อนเข้าสู่ระบบ BMP

พารามิเตอร์	ตัวอย่าง		
	Untreated	EC treated	EC+Ozone treated
tCOD (mg/L)	170,240	140,740	156,800
SCOD (mg/L)	144,704	127,680	125,696
BOD (mg/L)	56,500	58,500	65,500
BOD/COD	0.33	0.42	0.42
TS (g/L)	3.983	4.199	4.289
VS (g/L)	3.104	3.154	3.196
TS/VS	1.28	1.33	1.34
C/N	18.02	17.86	16.66

จากตารางที่ 4.4 พบว่าตัวอย่างน้ำทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้ในการทดลอง มีอัตราส่วน BOD₅/COD มีค่าเท่ากับ 0.3, 0.42 และ 0.42 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าน้ำดังกล่าวมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีดังเกณฑ์ที่ระบุไว้ในงานวิจัยของ Abdallaa and Hammam (2014) เมื่อนำค่าของแข็งทั้งหมด (TS) และของแข็งระเหยได้ (VS) คำนวณหาเป็นอัตราส่วน TS/VS พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.28, 1.33, 1.34 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างน้ำแต่ละชนิด มีคุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้น ที่สามารถเกิดการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี ดังงานวิจัยของ Mollera et al. (2004) ซึ่งกล่าวไว้ว่า น้ำเสียที่มีค่า TS/VS มากกว่า 1 จะสามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ดี และความสามารถในการผลิตก๊าซมีเทนจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น (Karim et al., 2005) ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนดังกล่าวของน้ำตัวอย่าง EC และ EC + Ozone มีค่าใกล้เคียงกันและมากกว่า Untreated บ่งบอกได้ว่าน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดทั้ง 2 ชนิดนี้อาจมีแนวโน้มผลิตแก๊สมีเทนได้ดีกว่าน้ำกากส่าที่ไม่ผ่านการบำบัด อย่างไรก็ตามพบว่าตัวอย่างน้ำทั้ง 3 ชนิด มี C/N ratio ค่อนข้างต่ำ (ตารางที่ 4.4) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆและตามทฤษฎี ซึ่งควรมีค่าอยู่ในช่วง 23-35 จึงอาจส่งผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตของสารอินทรีย์และทำให้มีอัตราการผลิตแก๊สมีเทนต่ำได้ (เกียรติศักดิ์ และคณะ, 2558)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณและองค์ประกอบของก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมด รวมถึงผลผลิตมีเทนที่ได้จากกระบวนการหมัก แบ่งออกเป็น 2 ช่วง ตามระยะเวลาในการเดินระบบ (1-7 วัน และ 8-14 วัน) แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหยได้ในน้ำตัวอย่าง ปริมาตรและองค์ประกอบของก๊าซที่พบในถังหมัก

พารามิเตอร์	ระยะเวลาการเดินระบบ					
	7 วัน			14 วัน		
	Untreated	EC	EC + Ozone	Untreated	EC	EC + Ozone
VS _{out} (g/L)	2.391	2.604	2.859	2.251	2.342	2.753
ปริมาตรก๊าซ (ml)	200	250	20	370	900	650
องค์ประกอบก๊าซ						
- %CH ₄	0.9	3.5	0.4	1.3	9.9	5
- %CO ₂	8.5	58.9	44.8	77.8	82.3	80.5
- %O ₂	2.8	2.6	2.4	1.6	3.5	1.8
Methane yield (mlCH ₄ /gVS _{removed})	2.6	15.9	0.24	6.5	110	73.2

จากตารางที่ 4.5 พบว่าของแข็งระเหยได้ในน้ำตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด ที่วิเคราะห์ได้ในวันที่ 7 มีปริมาณของแข็งระเหยง่ายหลังออกจากระบบต่ำกว่าค่าของแข็งระเหยง่ายก่อนเข้าสู่ระบบ และมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึงวันที่ 14 ของการเดินระบบ อาจเนื่องมาจากสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFA) ได้มากขึ้นโดยจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดในขั้นตอนของกระบวนการ Hydrolysis และพบว่าตัวอย่างน้ำ untreated และ EC มีปริมาณของก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นมากที่สุด 200 มิลลิลิตร และ 250 มิลลิลิตร ตัวอย่างน้ำที่บำบัดด้วย EC + Ozone มีปริมาณของก๊าซเกิดขึ้นน้อยที่สุด 20 มิลลิลิตร โดยในระยะแรกของการเดินระบบ จุลินทรีย์อาจไม่มีความคุ้นเคยกับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย จุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนจึงมีการเจริญเติบโตช้าทำให้ย่อยสลาย VFA ที่เกิดขึ้นในระบบเป็นก๊าซมีเทนได้น้อย ผลการทดลองที่ได้จึงไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งความสามารถในการย่อยสลายจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการหมัก โดยเมื่อป้อนวัตถุดิบเข้าสู่ระบบอีกครั้งในวันที่ 8 และหมักต่อจนครบ 14 วัน ส่งผลให้ปริมาณของก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละถังที่ค่าเพิ่มขึ้น เป็น 370 มิลลิลิตร, 900 มิลลิลิตร และ 650 มิลลิลิตร ในตัวอย่าง untreated, EC และ EC+Ozone จะเห็นได้ว่าปริมาณของก๊าซในตัวอย่างน้ำที่บำบัดด้วย EC มีค่ามากที่สุด รองลงไปที่น้ำที่ผ่านการบำบัดร่วมและน้ำกากส่าก่อนการบำบัด แสดงให้เห็นว่าการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าและการบำบัดร่วมของวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับโอโซนชั้นสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำกากส่าได้ สอดคล้องกับอัตราส่วน BOD_5/COD ที่กล่าวไว้ข้างต้นในคุณสมบัติของน้ำตัวอย่างก่อนเข้าสู่ระบบ BMP

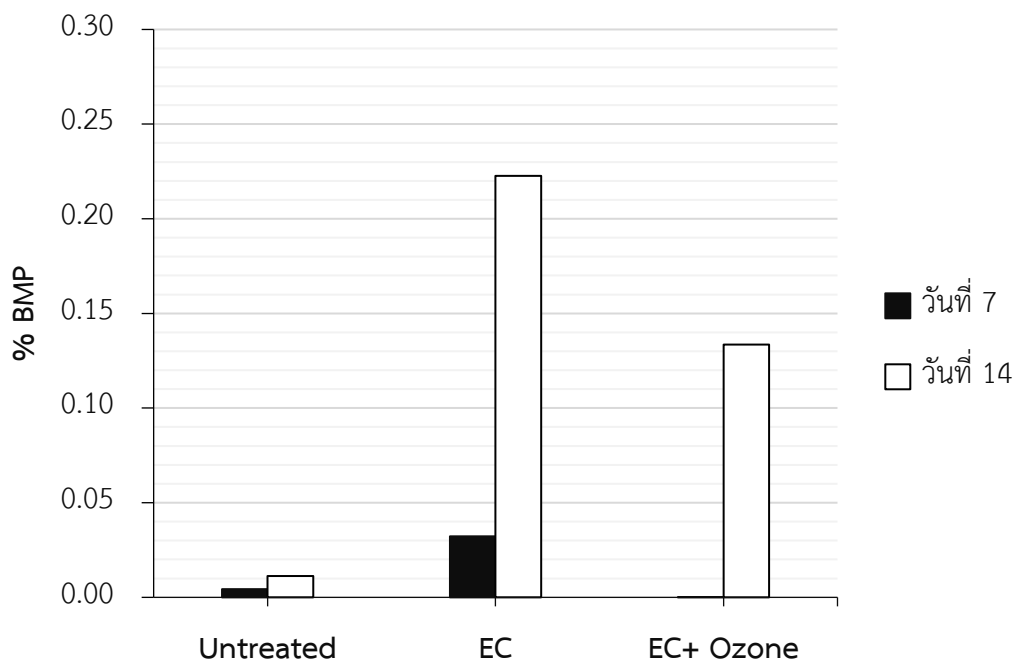
เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซที่เกิดขึ้นด้วย Gas data meter ภายหลังการหมักเป็นเวลา 7 วัน พบว่าตัวอย่าง EC มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเกิดขึ้นสูงสุด 3.5% คิดเป็นผลผลิตมีเทน (methane yield) และ $15.9 \text{ mlCH}_4 / \text{g VS}_{\text{removed}}$ ตามลำดับ รองลงไปที่ ตัวอย่างน้ำ untreated มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่วัดได้เพียง 0.9 % ในกรณีของการบำบัดร่วม EC+ Ozone ซึ่งในทางทฤษฎีควรช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ แต่พบว่ามีส่วนของก๊าซมีเทนเกิดขึ้นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ untreated คิดเป็น 0.4 % และมีผลผลิตมีเทนเพียง $0.24 \text{ mlCH}_4 / \text{g VS}_{\text{removed}}$ ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากความสามารถในการเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงของโอโซน อาจก่อให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัวหรือเป็นพิษ ซึ่งอาจมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียรวมไปถึงจุลินทรีย์ในกลุ่ม Methanogen ซึ่งทำหน้าที่ในการผลิตก๊าซมีเทนในระบบบำบัดทางชีวภาพได้ (Yasar and Tabinda, 2010; Botheju and Bakke, 2011) ทั้งนี้เมื่อทำการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่ระบบและหมักต่อจนครบ 14 วัน สัดส่วนของก๊าซมีเทนของตัวอย่างน้ำ untreated และ EC+Ozone มีค่าเพิ่มเป็น 1.3%, 9.99% ตามลำดับ และมีผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้นเป็น 7 และ $110 \text{ mlCH}_4 / \text{g VS}_{\text{removed}}$ โดยน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดร่วมของ EC + Ozone มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นในระบบมากกว่า untreated คิดเป็น 5 % และมี methane yield เพิ่มขึ้นเป็น $73 \text{ mlCH}_4 / \text{g VS}_{\text{removed}}$ ยืนยันให้เห็นว่าการ

บำบัดด้วยวิธี EC ร่วมกับ O₃ สามารถบำบัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพ ให้เป็นสารตั้งต้นที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนได้ ทั้งนี้สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่ได้มีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนก๊าซมีเทนที่ควรเกิดขึ้นตามทฤษฎีคือประมาณร้อยละ 50-70 ของก๊าซชีวภาพทั้งหมด อาจเนื่องมาจากมีระยะเวลาในการหมักไม่เพียงพอการทำงานของจุลินทรีย์จึงอาจอยู่ในช่วงสร้างความคุ้นเคยกับน้ำเสียและยังไม่ถึงขั้นตอนที่สามารถปรับตัวได้ดี เช่นเดียวกับผลของชุดควบคุมกลูโคส-กลูตามิก ที่พบว่ามอดูล์ประกอบก๊าซมีเทนเกิดขึ้นประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ (ดังแสดงในตารางที่ ค-6.1 ภาคผนวก ค) และอาจเป็นผลมาจากตัวอย่างน้ำทั้ง 3 ชนิด มีอัตราส่วน C/N ต่ำ จากการที่มีไนโตรเจนมากเกินไปจนความจำเป็น ไนโตรเจนจึงถูกเปลี่ยนมาสะสมอยู่ในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งเป็นตัวยับยั้งการทำงานในระบบ และมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ทำให้จำนวนแบคทีเรียลดลงและไม่เพียงพอต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ (เกียรติศักดิ์ และคณะ, 2558)

จากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ได้ พบว่าในช่วงแรกของการผลิตก๊าซชีวภาพมีสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในตัวอย่างน้ำ untreated อยู่ที่ 8.5% ในขณะที่ตัวอย่างน้ำ EC และ EC+ Ozone มีสัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 58.9% และ 44.8% เนื่องจากการย่อยสลายทั้งหมดที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงของการย่อยสลายสารอินทรีย์ (hydrolysis) และการผลิตเป็นกรดอินทรีย์ (acidogenesis) เป็นส่วนใหญ่ทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา (กิตติยาและคณะ, 2560) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบหมักอาจเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์จนถึงขั้นตอนที่ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นก๊าซมีเทน และเป็นเหตุให้มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพต่ำ นอกจากนี้ผลของสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวอย่างน้ำแต่ละชนิดในวันที่ 14 ยังให้ผลในทางเดียวกับสัดส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้ในวันที่ 7 เท่ากับ 77.8%, 82.3% และ 80.5% สำหรับตัวอย่างน้ำ untreated, น้ำที่ผ่านการบำบัด EC และน้ำที่บำบัดด้วยวิธี EC+ Ozone ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด จะเห็นได้ว่าแม้ในช่วงแรกของการหมัก (วันที่ 7) น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย EC และน้ำที่บำบัดด้วยวิธี EC+ Ozone จะมีปริมาตรก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นต่ำ และมีสัดส่วนก๊าซมีเทนไม่สูงมาก ในทางกลับกันจะเห็นว่ามีส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์สูงทั้งในช่วงแรกและช่วงสุดท้ายของการเดินระบบ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการหมักนี้จะเป็นสารตั้งต้นที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการผลิตมีเทนต่อได้ (เกียรติศักดิ์ และคณะ, 2558) จึงส่งผลให้ปริมาตรก๊าซชีวภาพ สัดส่วนของก๊าซมีเทนและผลผลิตมีเทนที่วัดได้ในน้ำตัวอย่างหลังการหมักต่อจนครบ 14 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นได้นั่นเอง เมื่อนำค่า Methane yield ที่ได้จากรายงานที่ 4.3 ไปคำนวณหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) โดยการเทียบกับปริมาณของการก๊าซมีเทนที่ควรจะได้ตามทฤษฎีตาม ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2 ผลการทดลองที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.20 โดยพบว่าในช่วงแรกหลังจากการเดินระบบ 7 วัน %BMP ของตัวอย่างน้ำแบบ EC มีค่าสูงสุด รองลงไปคือ untreated และ EC+Ozone ตามลำดับ

จากนั้นเมื่อป้อนวัตถุดิบเข้าสู่ระบบหมักเพิ่มเติม และทำการหมักต่อจนครบ 14 วัน พบว่า %BMP ของตัวอย่างน้ำทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้น โดยในตัวอย่าง EC มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.0323% เป็น 0.2226% รองลงไปคือตัวอย่าง EC+Ozone ที่มีค่า %BMP เพิ่มขึ้นจาก 0.0004% เป็น 0.1335 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ตัวอย่างน้ำกากส่าที่ไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น (Untreated) มีค่า BMP เท่ากับ 0.0113% แสดงให้เห็นว่าการบำบัดเบื้องต้นของน้ำกากส่าด้วยวิธีรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า หรือวิธีการบำบัดร่วมระหว่างการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ากับวิธีโอโซนชัน ช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำกากส่าได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4.20 ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (%BMP) ของน้ำตัวอย่างที่ศึกษา

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการลดสีของน้ำกากส่า จากโรงงานสุรากลั่น ด้วยวิธีรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับวิธีโอโซนเนชัน ซึ่งสรุปผลได้ดังนี้

1. น้ำกากส่าที่ใช้ในการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในปริมาณสูงมาก ทำให้มีอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพค่อนข้างต่ำเท่ากับ 0.15 และมีสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ ซึ่งวัดค่าสีได้ 254,015 ADMI เมื่อนำน้ำกากส่ามาบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้สภาวะที่เหมาะสม คือ ที่พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 6 โดยเดินระบบเป็นระยะเวลา 90 นาที และให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ พบว่าค่าซีโอดีของน้ำกากส่าหลังผ่านการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงจาก 372,960 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 140,027 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่บีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 56,950 เป็น 64,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้มีอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (BOD_5/COD) สูงขึ้น จาก 0.15 เป็น 0.47 และมีค่าสีลดลงจากเป็น 163,010 ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดสีประมาณ 36 เปอร์เซ็นต์

2. เมื่อนำน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าด้วยสภาวะที่เหมาะสมมาเจือจาง 100 เท่า ให้มีค่าซีโอดี, บีโอดี และสีเริ่มต้นเท่ากับ 1,493 มิลลิกรัมต่อลิตร, 730 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 3,182 ADMI ตามลำดับ เพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์และความเข้มข้นที่อาจส่งผลต่อการบำบัดเพื่อเข้าสู่ระบบโอโซนเนชัน พบว่าการใช้สภาวะที่เหมาะสมโดยใช้ระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนนาน 60 นาที ให้กับตัวอย่างน้ำที่มีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 ทำให้ค่าซีโอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าลดลงเท่ากับ 1,106 ต่อลิตร และบีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเป็น 643 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้มีอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (BOD_5/COD) สูงขึ้นเป็น 0.63 และสามารถลดสีได้เป็นอย่างดี โดยมีค่าสีลดลงเหลือ 515 ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงสุดถึง 84 เปอร์เซ็นต์

3. จากการศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential) พบว่าการบำบัดขั้นต้นด้วยวิธีรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (EC) และวิธีการบำบัดร่วมระหว่าง EC+Ozone สามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำกากส่าได้เป็นอย่างดี โดยตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยวิธี EC มีค่าผลผลิตมีเทน (methane yield) และศักยภาพในการย่อยสลายทางชีวภาพ (%BMP) สูงสุดเท่ากับ 110 mlCH₄ / g VS_{removed} และ 0.2226% รองลงมาคือตัวอย่าง

น้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยวิธีการบำบัดรวมของ EC+Ozone ซึ่งมีผลผลิตมีเทน และ %BMP เท่ากับ $73 \text{ mlCH}_4 / \text{g VS}_{\text{removed}}$ และ 0.1335% ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างน้ำกากส่าที่ไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น (Untreated) มีผลผลิตมีเทนที่ได้เพียง $7 \text{ mlCH}_4 / \text{g VS}_{\text{removed}}$ คิดเป็น %BMP เท่ากับ 0.0113%

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการวิเคราะห์ Fourier transform infrared (FT-IR) spectrometry หรือ X-ray diffraction (XRD) เพื่อศึกษาโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสีในน้ำกากส่า

2. ควรทำการวิเคราะห์และควบคุมปริมาณอะลูมิเนียมที่เหลืออยู่ในน้ำกากส่าหลังจากผ่านการบำบัดด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดเพื่อป้องกันอันตรายที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อแก่มนุษย์

3. ควรศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดของวิธีโอโซนเข้มข้น เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำ

4. ควรหาข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องผลิตโอโซนที่มีอัตราการผลิตสูงๆ เพื่อช่วยเพิ่มอัตราการผลิตโอโซนให้เพียงพอและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์ในปริมาณสูงได้

5. ควรประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เช่น ต้นทุนเครื่องผลิตโอโซน ค่าไฟฟ้า ค่าซ่อมบำรุง และ ค่าดำเนินการ เป็นต้น เพื่อประกอบการพิจารณาในการนำไปประยุกต์ใช้จริง

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2552. **เทคโนโลยีการบำบัดและปรับสภาพน้ำด้วยโอโซน.** [Online]. เข้าถึงจาก : http://dede-at3.brightce.com/Vol1/Asset/New_Technology/Ozone_Compact.pdf.
- กุนทรหายน ยามิรุเต็ง, ภัทรธร เอื้อกฤดาธิการ, อุดมผล พิชนไพบูลย์ และพนาลี ชิวกิตาการ. 2551. “การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยโอโซนเนชั่น.” หน้า 488-492. ใน **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6.** สงขลา : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- กุนที ประเสริฐสงค์. 2549. “การฟอกสีน้ำจากสาโตโดยใช้อะซิโตแบคเตอร์สายพันธุ์ BP 103 ในระบบเอสปีอาร์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- กิตติยา ป้อมเงิน, ประภา โห้ชะสลาม และรัชพล พะวงศ์รัตน์. 2560. “การผลิตแก๊สชีวภาพจากต้นธูปฤาษีที่ผ่านการปรับสภาพ (*Typha angustifolia* L.).” *Veridian E-Journal*. 4(5) : 2408-1248.
- เกียรติศักดิ์ พันธุ์พงศ์, นวิทย์ เอ็มเอก และจิวาริ โอภิธาการ. 2558. **การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่าของโรงงานสุรากลั่นชุมชนโดยใช้กลยุทธ์การหมักร่วม.** [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://ird.skru.ac.th/RMS/file/52534.pdf>.
- คณะกรรมการวิสามัญพิจารณาสอบสวนและศึกษาเรื่องเกี่ยวกับการทุจริตวุฒิสภา. 2549. **รายงานฉบับสมบูรณ์การศึกษาวิจัยหลักเกณฑ์และเงื่อนไขการพิจารณาอนุญาตโรงงานสุรากลั่น.** [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www2.diw.go.th/sura/ปนเปื้อน/chapter2.doc>.
- จิตภา โสภาประดิษฐ์, ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา. 2560. “การกำจัดฮิวมิกด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นที่มี TiO₂ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” หน้า 306-313. ใน **การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 55.** กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ชวลิต รัตนธรรมสกุล และภาศัลย์ ใจรังษี. 2549. **รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ : การวิจัยและพัฒนากระบวนการเมมเบรนในถังปฏิกริยาชีวภาพสำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุรา.** กองทุนเพื่อลดผลกระทบจากนโยบายสุราเสรีของรัฐ. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://www2diw.go.th/sura/นโยบายสุราเสรีของรัฐ/DIW/chapter%201doc>.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. 2524. **โครงการก่อสร้างสุราใหม่. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (สวท.).** [Online]. เข้าถึงได้จาก : [https:// www2diw.go.th/sura/ปณเปื้อน/chapter2.doc](https://www2diw.go.th/sura/ปณเปื้อน/chapter2.doc).
- ฐปน ชื่นบาล, ศิราภรณ์ ชื่นบาล และปิยบุตร โพธิคามบำรุง. 2552. “การกำจัดสีในน้ำกากสาโดยใช้เชื้อผสมระหว่างเชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่ม *White-Rot Fungi* และเชื้อยีสต์.” ใน **รายงานการวิจัยมหาวิทยาลัยแม่โจ้**. เชียงใหม่.
- ทัศนาก่อเส่ง. 2553. “การลดปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำดิบประปาจากอ่างเก็บน้ำศรีตรังด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการโอโซนชัน.” **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**.
- ธัญลักษณ์ หลักแหลม. 2553. “การปรับปรุงการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการโอโซนชัน.” **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**.
- ปิยะวิทย์ ทิพรส. 2552. “โอโซน : สมบัติทางเคมีกายภาพและการประยุกต์ใช้เพิ่มความขาวผลิตภัณฑ์เนื้อปลา.” **วารสารสุทธิปริทัศน์**. 23(70) : 105-120.
- พรพิมล ม่วงไทย, ยลรวี วิวัฒน์ชายกิจ และมะยูโซ๊ะ กูโน. 2557. “การศึกษาการเกิดไฮดรอกซีเมทิลเพอร์ฟิวรัลดีไฮด์จากปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชันและปฏิกิริยาเมลลาร์ดในระบบต้นแบบ.” **วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)**. 6(12) : 59-76.
- พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ. 2556. **กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยไฟฟ้า**. การประปานครหลวง. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.mwa.co.th/ewt_dl_linl.php?nid=441.
- พันธกานต์ ยันต์ฉิมพลี. 2558. “การบำบัดสีน้ำยาโบราณที่ใช้ซ้ำในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราด้วยกระบวนการโอโซนชัน.” **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**.
- มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. 2551. **กระบวนการบำบัดน้ำเสีย**. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.efe.or.th>. ค้นเมื่อวันที่ 6 ตุลาคม 2559.
- วรรณวิจิตร พนมเชิง และสมชาย พัวจินดาเนตร. 2555. “การศึกษาเทคโนโลยีบำบัดน้ำกากสาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในอุตสาหกรรมผลิตสุรา.” หน้า 1079-1084. ใน **การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม**. เพชรบุรี.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- วีรยา อางองค์. 2549. “การบำบัดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเบียร์โดยกระบวนการโอโซนชั้น.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2549. **การศึกษาสำรวจโรงงานสุรากลั่น.** [Online]. เข้าถึงจาก : <http://www2.diw.go.th/sura/บำบัดน้ำเสีย/รายงานฉบับสมบูรณ์/บทที่3.pdf>.
- ศูนย์วิจัยปัญหาสุรา (ศวส.). 2557. **รายงานสถานการณ์การบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์และผลกระทบต่อในประเทศไทยปี 2556.** กรุงเทพฯ : ศูนย์วิจัยปัญหาสุรา (ศวส.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ.
- สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ. 2551. “กระบวนการโคเอคกูเลชัน (elecgrocoagulation).” *วารสารเทคนิค*. 24(283) : 138-144.
- สุรัชย์ จอดพิมาย. 2553. “การกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานผลิตเบียร์ด้วยกระบวนการโอโซนชั้น.” การค้นคว้าอิสระ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อัมพรรค์ วรรณโกมล. 2560. “การผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียจากฟาร์มกุ้ง.” **รายงานการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.** นครราชสีมา.
- Abidin, C.Z.A., Fahmi, M.R., Soon-An, O., Makhtar, S.N.N.M., and Rahmat, N.R. 2015. “Decolorization of an Azo Dye in Aqueous Solution by Ozonation in a Semi-Batch Coloumn Reactor.” *ScienceAsia*. 41 : 1-4.
- Abdallaa, K.Z., and Hammam, G. 2014. “Correlation between Biochemical Oxygen Demand and Chemical Oxygen Demand for Various Wastewater Treatment Plants in Egypt to Obtain the Biodegradability Indices.” *International Journal of Sciences : Basic and Applied Research*. 9 : 69-91.
- Alfafara, C.G., Migo, V.P., Amrante, J.A., Dallo, R.F., and Matsumara, M. 2000. “Ozone Treatment of Distillery Slop Waste.” *Water Science and Technology*. 42(3-4) : 193-198.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation (APHA, AWWA and WEF). 2012. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 22nd ed. Washington DC : American Public Health Association.
- Asha, A., Keerthi, MuthukrishnarajN A., and Balasubramanian, N. 2014. “Improvement of Biodegradability Index through Electrocoagulation and Advanced Oxidation Process.” *International Journal of Industrial Chemistry.* 5(4) : 1-6.
- Aquino, S., and Pires, E.C. 2015. “Assessment of Ozone as a Pretreatment to Improve Anaerobic Digestion of Vinasse.” *Brazilian Journal of Chemical Engineering.* 33(2) : 279-285.
- Barrera-Diaz, C., Canizares, P., Fernandez, F.J., Natividad, R., and Rodrigo, M.A. 2014. “Electrochemical Advanced Oxidation Process: An overview of the current applications to actual industrial effluents.” *Journal of the Mexican Chemical Society.* 58(3) : 256-275.
- Bazrafshan, E., Moein, H., Ferdos, K.M., and Nakhaie, S., 2013. “Application of Electrocoagulation Process for Dairy Wastewater Treatment.” *Journal of Chemistry.* 2013 : 1-8.
- Bhagawan, D., Poodari, S., Golla, S., Himabindu, V., and Vidyavathi, S. 2014. “Treatment of the Petroleum Refinery Wastewater Using Combined Electrochemical Method.” *Desalination and Water Treatment.* 2(10) : 1-8.
- Botheju, D., and Bakke, R. 2011. “Oxygen Effects in Anaerobic Digestion – A Review.” *The Open Waste Management Journal.* 4 : 1-19.
- Choi, Y.Y., Baek, S.R., Kim, J.I., Choi, J.W., Hur, J., Lee, T.U., Park, C.J., and Lee, B.J. 2017. “Characteristics and Biodegradability of Wastewater Organic Matter in Municipal Wastewater Treatment Plants Collecting Domestic Wastewater and Industrial Discharge.” *Water.* 9(409) : 1-12.
- Chowdhury, P., Nag, S., and Ray, A.K. 2017. “Degradation of Phenolic Compounds through UV and Visible-Light-Driven Photocatalysis: Technical and Economic Aspects.” **Natural Sources, Importance and Applications country.** Vienna : Intechopen.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- David, C., Arivazhagan, M., and Tuvakara, F. 2015. “Decolorization of Distillery Spent Wash Effluent by Electrooxidation (EC and EF) and Fenton Processes : A Comparative Study.” *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 121 : 142-148.
- Deng, Y., and Zhao, R. 2015. “Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment.” *Current Pollution Report*. 1 : 167-176.
- Esfandyari, Y., Mahdavi, Y., Seyedsalehi, M., and Hoseini, M. 2014. “Degradation and Biodegradability Improvement of the Olive Mill Wastewater by Peroxi-Electrocoagulation/ Electrooxidation- Electroflotation Process with Bipolar Aluminium Electrodes.” *Environmental Science and Pollution Research*. 22 : 6288-6297
- Filer, J., Ding, H.H., and Chang, S. 2019. “Biochemical Methane Potential (BMP) Assay Method for Anaerobic Digestion Research.” *Water*. 11(921) : 1-29.
- Galdeano, C.M., Wilhelm, E.A., Goulart, B.I., Tonon, V.R., Freitas-Silva, O., and Chavez, D.W.H. 2018. “Effect of Water Temperature an pH on the Concentration and Time of Ozone Saturation.” *Brazilian Journal of Food Technology*. 21 : 1-8.
- Gomes, AC., Fernandes, LR., and Simões, RM. 2013. “Oxidation Rates of Two Textile Dyes by Ozone: Effect of pH and Competitive Kinetics.” *Chemical Engineering Journal*. 81 : 175-189.
- Gottschalk, C., Libra, J.A., and Saupe, A. 2010. **Ozonation of Water and Waste Water: A Practical Guide to Understanding Ozone and its Application**. New Jersey : WILEY-VCH.
- Grima, N.M.M. 2009. **Kinetic and Mass Transfer Studies of Ozone Degradation of Organic in Liquid/Gas-Ozone and Liquid Solid-Ozone Susters**. [Online]. Available : <https://pdfs.semanticscholar.org>.
- Gupta, S., Saratchandra, T., Malik, S., Sharma, A., Lokhande, S., Waindeskar, V., and Mudliar, S. 2015. “Ozone-Induced Biodegradability Enhancement and Color Reduction of a Complex Pharmaceutical Effluent.” *The Journal of the International Ozone Association*. 37(6) : 538-545.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Jiranuntipon, S. 2009. “Decolorization of Molasses Wastewater from Distilleries using Bacteria Consortium.” Doctor of Philosophy in Biotechnology, Chulalongkorn University.
- Karim, K., Klasson, K.T., Hoffmann, R., Drescher, S.R., Depoli, D.W., and Al-Dahhan, M.H. 2005. “Anaerobic Digestion of Animal Waste : Effect of mixing.” *Bioresource Technology*. 39(15) : 3597-606.
- Koby, M. , and Gengec, E. 2012. “ Decolorization of Melanoidins by a Electrocoagulation Process using Aluminium Electrodes. ” *Environmental Technology*. 33(19-21) : 2429-2438.
- Lekhlif, B., Oudrhiri, L., Zidane, F., Drogui, P., and Blais, J.F. 2014. “ Study of the Electrocoagulation of Electroplating Industry Wastewaters Charged by Nickel (II) and Chromium (VI).” *Journal of Materials and Environmental Science* . 5(1) : 111-120.
- Lin, S. H., and Lai C. L. 2000. “Kinetic Characteristics of Textile Wastewater Ozonation in Fluidized and Fixed Activated Carbon Beds.” *Water Research*. 34(3) : 763–772.
- Mirji, G., and Kalaburgi, P.B. 2015. “Application of Electrocoagulation Mechanism for COD Removal of Dairy Wastewater.” *International Journal of Mechanical And Production Engineering*. 3(11) : 86-88.
- Mollera, H.B., Sommer, S.G., and Ahring, B.K. 2004. “Methane Productivity of Manure, Straw and Solid Fraction of Manure. Biomass.” *Biomass and Bioenergy*. 26 : 485-495.
- Otieno, B., Apollo, S., Naidoo, B., and Ochieng, A. 2019. “ Modeling Ozonation Pretreatment Parameters of Distillery Wastewater for Improved Biodegradability. ” *Journal of Environmental Science and Health Part A Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*. 21 : 1-9.
- Patel, S., and Jamaluddin. 2018. “ Treatment of Distillery Wastewater: A Review. ” *International Journal of Theoretical & Applied Sciences*. 10(1) : 117-139.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Pena, M., Coca, M., Gonzalez, G., Rioja, R., and Garcia, M. T. 2003. "Chemical Oxidation of Wastewater from Molasses Fermentation with Ozone." *Chemosphere*. 51 : 893-900.
- Phalakornkulea, C., Mangmeemak, J., Intrachod, K., and Nuntakumjorna, B. 2010. "Pretreatment of Palm Oil Mill Effluent by Electrocoagulation and Coagulation." *Environmental Engineering Science*. 36 : 142-149.
- Sangave, P. C., and Pandit A. B. 2004. "Ultrasound pre-Treatment for Enhanced Biodegradability of the Distillery Wastewater." *Ultrasonics Sonochemistry*. 11 : 197-203.
- Sangave, P.C., and Pandit A.B. 2006. "Ultrasound and enzyme assisted biodegradation of distillery wastewater" *Journal of Environmental Management*. 78 : 77-85.
- Santal, R. A., and Singh, P. N. 2013. "Biodegradability of Melanoidin from Distillery Effluent: Role of Microbes and their Potential Enzymes." **Biodegradation of Hazardous and Special Products**. Vienna : Intechopen.
- Shiram, B., And Kanmani, S. 2014. "Ozonation of Textile Dyeing Wastewater-Review." *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 15(3) : 46-50.
- Singh, S. 2012. "Ozone Treatment of Municipal Wastewater Effluent for Oxidation of Emerging Contaminants and Disinfection." Master of Applied Science in Environmental Engineering, University of Windsor, Canada.
- Souza, S. M., Bonilla, K. A., and Souza, AA. 2010 "Removal of COD and Color from Hydrolyzed Textile Azo Dye by Combined Ozonation and Biological Treatment." *Journal of Hazardous Materials*. 179(1-3) : 35-42.
- Summer, R. S., Chowdhury, Z., and Kommineni, S. 2005. **Ozone- Enhanced Biofiltration for Geosimin and MIB Removal**. AWWA research foundation.
- United States Environmental Protection Agency. 2017. **How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies For Underground Storage Tank Sites**. [Online]. Available : <https://www.epa.gov/ust>.
- Vepsalainen, M. 2012. **Electrocoagulation in the Treatment of Industrial Waters and Wastewater**. VTT Technical Research Centre of Finland.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Victorio, J.D., Buquiran, D.P, and Rosario, E.J.D. 2007. “Decolorization of Glucose-Glycine Melanoidin as Model Color Pollutant using Ozonation and Bacterial Treatment.” *Philippine Journal of Science*. 136(1) : 65-73.
- Wagh, P.M., Nemade, P.D., and Dhasal, R.S. 2015. “Colour and COD Removal of Distillery Spent Wash by using Electro Coagulation.” *International Journal of Engineering Research and General Science*. 3(3) : 1159-1173.
- Yasar, A., and Tabinda, B.A. 2010. “Anerobic Treatment of Industrial Wastewater by UASB Reactor Intregated with Chemical Oxidation Process; an Overview.” *Polish Journal of Environmental Studies*. 19(5) : 1051-1061.
- Yustiani, Y.M., and Komoariah, I. 2017. “Investigation on the Biodegradation Capacity of Urban Rivers in Jakarta, Indonesia.” *International Journal of GEOMATE*. 12(34) : 45-50.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์

ก-1 การวิเคราะห์ซีโอติโดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด/การไทเทรต (Closed-Reflux, Titrimetric Method)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย (Digest Vessel)
ควรใช้หลอดทดลองแก้วชนิดบอโรซิ-ลิเคต (Borosilicate Glass) ซึ่งมีขนาด 16 x 100 มิลลิเมตร พร้อมทั้งฝาจุก
2. ฮีตติ้งบล็อก (heating block)
เป็นอลูมิเนียมหล่อมีช่องหลายๆช่องซึ่งมีความลึก 45 ถึง 50 มิลลิเมตร เป็นช่องที่จะให้หลอดหรือแอมพลูตั่งอยู่ได้พอดีและให้ความร้อนแก่สารละลายได้ทั่วถึง

สารเคมี

1. น้ำย่อยสลายสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate Digestion Solution) ความเข้มข้น 0.0167 โมลาร์

วิธีการเตรียม

ชั่งสารมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary Standard) โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate) หนัก 4.913 กรัม ซึ่งถูกทำให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถทำแห้ง (Desiccator) ใส่ลงไปใต้น้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร ค่อยๆเติมกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 167 มิลลิลิตร เติมเมอร์คิวริกซัลเฟต 33.3 กรัม คนให้ละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วเจือจางให้มีปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2. กรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์

วิธีการเตรียม

ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver Sulfate; Ag_2SO_4) จำนวน 5.5 กรัมต่อกรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid) จำนวน 1 กิโลกรัม หรือ ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต จำนวน 22 กรัมในกรดซัลฟิวริก 4.0 กิโลกรัม (2.5 ลิตร) โดยต้องใช้เวลาในการละลายนาน 1 - 2 วัน

3. เฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์

วิธีการเตรียม

ละลาย 1,10 - Phenanthroline Monohydrate ($C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$) หนัก 1.48 กรัม และ Ferrous Sulfate Heptahydrate ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) หนัก 0.7 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วทำให้เจือจางเป็น 100 มิลลิลิตร

4. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตหรือสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) แอมโมเนียม ซัลเฟต (Ferrous Ammonim Sulfate; FAS) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

วิธีการเตรียม

ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต [$Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$] 39.2 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ทิ้งให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 1000 mL สารละลายนี้ต้องเทียบมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้งที่น่ามาใช้

การหาความเข้มข้น

เติมสารเคมีตามตารางก-4 ในภาชนะย่อยสลาย แต่ใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วไทเทรตด้วย Ferrous Ammonium Sulfate โดยใช้เฟอร์โรอินเป็นอินดิเคเตอร์ เมื่อถึงจุดยุติสีจะเปลี่ยนจากฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง

การคำนวณ

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) คำนวณได้จากสมการ

$$M_f = (6V_p M_p) / V_f$$

เมื่อ M_f = ความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเป็นโมลาร์

V_f = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้เป็นมิลลิลิตร

V_p = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้เป็นมิลลิลิตร

M_p = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตเป็นโมลาร์

5. สารละลายมาตรฐานกลูโคส (Standard Glucose Solution)

วิธีการเตรียม

ละลายกลูโคส หนัก 469 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางจนได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร โดยสารละลายกลูโคสที่เตรียมได้จะมีค่าซีไอดีเท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. ล้างหลอดย่อยสลาย (Digestion Tubes) และฝาจุกด้วยกรดซัลฟิวริกร้อยละ 20 ก่อนนำไปใช้ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์
2. นำตัวอย่างน้ำที่เจือจางแล้วจำนวน 2.5 มิลลิลิตร มาใส่หลอดย่อยสลายที่เตรียมไว้ เติมสารละลายที่สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตจำนวน 1.5 มิลลิลิตร
3. ค่อยๆ เทกรดซัลฟิวริกเอเจนต์จำนวน 3.5 มิลลิลิตร ลงไปในหลอดโดยให้กรดซัลฟิวริกเอเจนต์ไหลลงก้นหลอดแก้วเพื่อให้ชั้นของกรดอยู่ใต้ชั้นตัวอย่างน้ำและน้ำย่อยสลาย
4. ปิดจุกหลอดแก้วให้แน่นแล้วคว่ำหลอดแก้วไปมาหลายๆ ครั้งเพื่อผสมให้เข้ากัน
5. นำหลอดทดลองเหล่านี้ไปใส่ในฮีตติงบล็อก (heating block) ที่กำหนดอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง
6. เปิดฝาจุก เทของผสมลงในขวดรูปชมพู่ ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในหลอดทดลองให้หมด เติมเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด แล้วนำไปไทเทรตกับ Ferrous Ammonium Sulfate ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จุดยุติจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วจากฟ้าอมเขียวเป็นน้ำตาลแดง
7. ทำ blank โดยใช้ น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่าง แล้วทำการวิเคราะห์ตามขั้นตอนข้างต้น
8. ใช้สารละลายละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต แทนตัวอย่างน้ำ โดยใช้รีเอเจนต์ต่างๆ เหมือนกับที่ใช้กับตัวอย่างน้ำ แล้วคำนวณหาค่าซีโอดีเพื่อตรวจสอบวิธีการวิเคราะห์ว่าถูกต้องหรือไม่

การคำนวณหาซีโอดี

$$\text{COD} = (A-B) (8000M)/C$$

เมื่อ	COD	= ค่าซีโอดี หน่วยเป็นมิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร
	A	= ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต แบลงค์ หน่วยเป็นมิลลิลิตร
	B	= ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต ตัวอย่าง หน่วยเป็นมิลลิลิตร
	M	= ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต หน่วยเป็นโมลาร์
	C	= ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ หน่วยเป็นมิลลิลิตร

ก-2 การวิเคราะห์บีโอดีแบบเจือจาง

(Biological Oxygen Demand, BOD : Dillution method)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดบีโอดี_ ขนาด 300 ml พร้อมจุกแก้ว และฝาพลาสติกที่ปิดสนิทได้
2. ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask)
3. บิวเรต (burette)
4. ขวดรูปชมพู่ (Pfeffer flask) ขนาด 500 ml
5. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (incubator) ควบคุมอุณหภูมิที่ 20 ± 1 °C
6. ปิเปต (pipette)
7. กระบอกตวง (cylinder) ขนาด 1000 ml
8. อุปกรณ์เติมอากาศ

สารเคมี

1. น้ำกลั่น (Distilled Water : DW)
2. Magnesium sulfate solution

วิธีการเตรียม

ชั่ง Magnesium sulfate heptahydrate ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) 22.5 g ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร

1. Calcium chloride solution

วิธีการเตรียม

ชั่ง Calcium chloride ($CaCl_2$) 27.5 g ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร

2. Ferric chloride solution

วิธีการเตรียม

ชั่ง Ferric chloride hexahydrate ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) 0.25 g ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร

3. Phosphate buffer solution

วิธีการเตรียม

ชั่ง Potassium dihydrogen phosphate (KH_2PO_4) 8.5 g Dipotassium hydrogen phosphate (K_2HPO_4) 21.75 g และ Disodium hydrogen phosphate heptahydrate ($Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$) 33.4 g และ Ammonium chloride (NH_4Cl)

1.7 g ละลายในน้ำกลั่น 500 mL และปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร สารละลายนี้จะมีค่า pH เท่ากับ 7.2

4. Glucose-Glutamic acid solution

วิธีการเตรียม

ชั่ง Glucose และ Glutamic acid ชนิด reagent grade (อบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง) อย่างละ 0.15 g ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร สารละลายนี้ควรเตรียมใหม่ทุกครั้งเว้นแต่จะเก็บไว้ในสภาวะที่ปลอดเชื้อ ในที่ที่มีอุณหภูมिन้อยกว่าหรือเท่ากับ 4 °C

การเตรียมตัวอย่าง

วิธีทำให้เจือจาง (Dilution method) ใช้ในกรณีที่น้ำตัวอย่างมีความสกปรกสูง (มีค่า BOD มากกว่า 7 mg/L) จำเป็นต้องทำให้น้ำตัวอย่างมีความสกปรกเจือจางลง และควรทำหลายๆความเข้มข้น (อย่างน้อย 2 ความเข้มข้น)

1. การเตรียมน้ำสำหรับผสมเจือจาง (Dilution water)

- นำน้ำกลั่นมาปรับอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 20 ± 1 °C และปรับ pH เป็นกลาง ปรับคุณภาพให้เหมาะกับการดำรงชีวิตของจุลชีพ โดยเติมสารละลายอาหาร ฟอสเฟตบัฟเฟอร์, แมกนีเซียมซัลเฟต, แคลเซียมคลอไรด์ และไอโรอน(III)คลอไรด์ อย่างละ 1 mL ต่อน้ำกลั่น 1 L
- เติมหอากาศให้มีออกซิเจนละลายอิ่มตัว อย่างน้อย 1 ชั่วโมง (มีค่า DO อยู่ระหว่าง 8 - 9 mg/L)

2. วิธีเลือกอัตราส่วนในการผสมเจือจาง

เนื่องจากการทดสอบค่า BOD อาศัยปฏิกิริยาทางชีวเคมีโดยมีจุลินทรีย์เป็นตัวการย่อยสลาย สภาวะแวดล้อมจะมีผลต่อการทดสอบมากทำให้ค่า BOD มีความผันแปรสูง การทดสอบตัวอย่างหนึ่งๆจึงควรผสมเจือจางหลายๆความเข้มข้น (ไม่ควรน้อยกว่า 2 ความเข้มข้น) โดยประมาณ จากค่า COD (Chemical Oxygen Demand) ของตัวอย่างน้ำเสียที่ต้องการทดสอบ (ตาราง ก-1)

ตัวอย่าง

ตัวอย่างน้ำเสียมีค่าซีโอดี (หลักแสน) = 100,000 mg/L

ค่าบีโอดีโดยประมาณ = ค่า COD/2 = 100,000/2 = 50,000 mg/L

เลือกอัตราส่วนที่ต้องใช้เจือจางตัวอย่างน้ำเสียจากตารางที่ ก-1 เพื่อใช้ทดสอบค่า BOD ได้ 3 ความเข้มข้น คือ 0.01%, 0.02% และ 0.05%

ตาราง ก -1 BOD Measurable with Various Dilution of Sample

Using percent mixtures	
% Dilution	Range of BOD mg/L
0.01	50,000 - 70,000
0.02	10,000 - 35,000
0.05	4,000 - 14,000
0.1	2,000 - 7,000
0.2	1,000 - 3,500
0.5	400 - 1,400
1.0	200 - 700
2.0	100 - 350
5.0	40 - 140
10.0	20 - 70
20.0	10 - 35
50.0	4 - 14
100	0 - 7

วิธีวิเคราะห์

1. ค่อย ๆ ริน dilution water ที่เตรียมไว้ ลงในกระบอกตวงขนาด 1,000 มิลลิลิตรประมาณ 300 มิลลิลิตร โดยให้น้ำค่อย ๆ ไหลลงตามข้างกระบอกตวง
2. เติมตัวอย่างน้ำตามส่วนที่คำนวณได้จากตาราง ก-2 เช่น 0.1 มิลลิลิตร (0.01 %)
3. เติม dilution water ลงจนครบ 1,000 มิลลิลิตร
4. กวนให้เข้ากันโดยใช้แท่งพลาสติกเสียบจุกยางไว้ที่ปลายชักขึ้นลงเบาๆ ระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศ
5. ค่อย ๆ รินสารละลายที่ผสมเข้ากันดีแล้วนี้ใส่ลงในขวด BOD ที่แห้งสะอาด จนเต็ม 3 ขวด ปิดจุกให้สนิท ขวดหนึ่งนำไปทดสอบหาค่า DO_0 อีกสองขวดนำไปเก็บใน incubator ที่อุณหภูมิ 20 ± 1 °C เป็นเวลา 5 วัน ก่อนเก็บ ให้ตรวจดูน้ำหล่อที่ปากขวดและใช้ฝาพลาสติก (BOD Cap) ครอบป้องกันนาระเหยและป้องกันการสูญเสียออกซิเจน
6. หลังจาก incubate ที่อุณหภูมิ 20 ± 1 °C ครบ 5 วันแล้ว นำมาหาค่า

การคำนวณ

บีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร) = $[(DO_0 - DO_5) \times 100]$ เปอร์เซ็นต์เจือจาง

หมายเหตุ

1. ตัวอย่างที่ใช้ได้จะต้องมีค่าออกซิเจนละลายเหลืออยู่อย่างน้อย 1 mg/L และมีการใช้ออกซิเจนไปอย่างน้อย 2 mg/L จึงจะทำให้ค่าบีโอดีที่คำนวณออกมาได้นั้นถูกต้อง
2. ค่าบีโอดีที่คำนวณได้จากสูตรในทุกความเข้มข้นที่ทำเจือจางควรมีค่าใกล้เคียงกัน ถ้าค่าบีโอดีที่ได้แตกต่างกันเกินกว่า 20% ให้ตัดค่านั้นทิ้ง นำเฉพาะค่าที่แตกต่างกันไม่เกิน 20% มาเฉลี่ยกันเท่านั้น

ก-3 การวัดสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI)

1. นำตัวอย่างมาแยกตะกอนโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปวัดค่า %T ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นที่แสดงในตาราง ก-2 ซึ่งแบ่งออกเป็นความยาวคลื่นในแกน x, y และ z โดยใช้น้ำกลั่นเป็น blank

2. เมื่อได้ค่า %T ของแต่ละความยาวคลื่นแล้วให้นำค่า %T ของความยาวคลื่นในแกนเดียวกัน บวกกัน และคูณด้วย factor ของแกนนั้นๆ นำค่าที่คำนวณได้ไปใส่ในโปรแกรม UVWin5 Software v5.1.1 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณค่า ADMI (ชวลิตและคณะ, 2552)

ตาราง ก-2 ความยาวคลื่นที่ใช้วัดค่า %T

Ordinate No.	Wavelength (nm)		
	X	Y	Z
2	435.5	489.5	422.2
5	461.2	515.2	432.0
8	544.3	529.8	438.6
11	564.1	541.4	444.4
14	577.4	551.8	450.1
17	588.7	561.9	455.9
20	599.6	572.5	462.0
23	610.9	584.8	468.7
26	624.2	600.8	477.7
29	645.9	627.3	495.2
Factor when 10 Ordinate Used	0.09806	0.100 00	0.118 14

ก-4 การวัดปริมาณโอโซน

การวัดปริมาณโอโซนสามารถทำได้ด้วยวิธีไอโอดิเมทรี (Iodometry) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

สารเคมี

1. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2%
2. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0.1 N

หมายเหตุ ต้องหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตโดยนำมาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิ KIO_3 ดังนี้ ปิเปตสารละลาย KIO_3 10.00 mL ลงใน Erlenmeyer flask เติม 10% KI ประมาณ 1 mL และ 1 M H_2SO_4 ปริมาตร 1 mL นำไปไทเทรตกับ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่เตรียมไว้ จนกระทั่งได้สารละลายสีเหลืองอ่อน จึงเติมน้ำแปปงไป 2 mL จะได้สารละลายสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อไปจนไม่มีสี บันทึกปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ในการไทเทรต ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

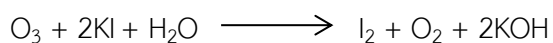
3. น้ำแปปง

การทดลอง

1. การดูดซึมก๊าซโอโซนโดยผ่านก๊าซโอโซนลงในขวดดักก๊าซที่บรรจุสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2% (KI 2%)
2. นำสารละลาย KI (มีสีเหลืองหรือส้ม) มาเติม 1 M H_2SO_4 ปริมาตร 1 mL เพื่อปรับ pH
3. นำมาไทเทรตกับสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จนสารละลายมีสีเหลืองอ่อนๆ (สีม่วงขาว) เติมน้ำแปปง 2 mL จะได้สารละลายสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อไปจนไม่มีสี
4. บันทึกปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ในการไทเทรต เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณก๊าซโอโซนที่มีอยู่ในระบบ

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น คือ

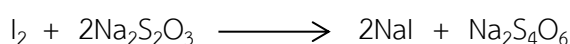
- การดูดซึมโอโซนโดยใช้สารละลาย KI



ไม่มีสี

สีเหลืองหรือส้ม

- การไทเทรตโดยใช้ 0.1 N $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$



สีน้ำเงิน

ไม่มีสี

การคำนวณหาปริมาณก๊าซโอโซน สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\text{Ozone Production Rate (OPR)} = \frac{(V_{\text{titrant1}} \times N_1 + V_{\text{titrant2}} \times N_2) \times 24}{\text{time}}$$

เมื่อ OPR คือ ปริมาณของโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน (mg/min.)

V_{titrant} คือ ปริมาณของโซเดียมไทโอซัลเฟต เข้มข้น 0.1 นอร์มอล (0.1 N $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)
ที่ใช้ไทเทรตกับสารละลาย 2% KI ในขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

N คือ ความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไทโอซัลเฟต

time คือ เวลาที่สัมผัสโอโซน (min)

ก-5 การวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยได้ (Total solids and Volatile solids)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถ้วยกระเบื้องเคลือบ (Evaporation dish)
2. กระจกบกดวง ขนาด 50 มิลลิลิตร
3. เครื่องให้ความร้อน (hotplet)
4. เตาเผา (Muffle furnace) อุณหภูมิ 550°C
5. โถดูดความชื้น (Desiccator)

วิธีวิเคราะห์

1. เตาถ้วยกระเบื้องเคลือบ (Evaporation dish) ในเตาเผา (Muffle furnace) อุณหภูมิ 550°C นาน 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น 30 นาที (Desiccator) ชั่งและบันทึกน้ำหนักเริ่มต้นไว้ (A)
2. เขย่าตัวอย่างน้ำให้เข้ากันให้ดี ใช้กระจกบกดวงๆ ตัวอย่างน้ำ 25 มิลลิลิตร ใส่ในถ้วยกระเบื้องเคลือบ น้ำจะระเหยบนเครื่องให้ความร้อนจนแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) แล้วชั่งน้ำหนัก (B)
3. นำถ้วยระเหยที่มีของแข็งอยู่ไปเผาในเตาเผา (Muffle furnace) อุณหภูมิ 550°C นาน 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (C)

วิธีคำนวณ

$$\text{ของแข็งทั้งหมด (กรัม/ลิตร)} = (B - A) \times (10^3 / V)$$

$$A = \text{น้ำหนักถ้วยระเหยอย่างเดียว (กรัม)}$$

$$B = \text{น้ำหนักถ้วยระเหยและของแข็ง (กรัม)}$$

$$V = \text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)}$$

$$\text{ของแข็งระเหยได้ (กรัม/ลิตร)} = (B - C) \times (10^3 / V)$$

$$B = \text{น้ำหนักถ้วยระเหยและของแข็ง (กรัม)}$$

$$C = \text{น้ำหนักถ้วยระเหยและของแข็งที่ได้จากการเผา (กรัม)}$$

$$V = \text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)}$$

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ข-1 น้ำกากส่าก่อนการบำบัด

ตารางที่ ข-1. สมบัติของน้ำกากส่าก่อนบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า

ร่วมกับวิธีโอโซนชั้น

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
พีเอช	4.28	4.2	4.15
ซีโอดี (COD, mg/L)	378,720	372,960	367,200
บีโอดี (BOD, mg/L)	55,200	58,700	57,888
BOD ₅ /COD	0.146	0.157	0.155
ค่าสี (ADMI)	258,045	249,170	261,395

ข-2 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำกากส่าด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้า

ตารางที่ ข-2.1 ผลของระยะเวลาบำบัด

ระยะเวลาสัมผัส (นาทีก)		สมบัติของน้ำกากส่า				
		pH	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	BOD ₅ /COD	ความเข้มข้น (ADMI)
30	ครั้งที่ 1	4.34	239,790	56,830	0.237	245,599
	ครั้งที่ 2	4.29	245,000	56,105	0.229	241,106
	ครั้งที่ 3	4.39	216,000	57,888	0.268	274,660
60	ครั้งที่ 1	4.52	171,600	57,134	0.334	217,891
	ครั้งที่ 2	4.47	195,840	58,586	0.299	255,490
	ครั้งที่ 3	4.42	204,000	57,936	0.284	213,099
90	ครั้งที่ 1	4.68	113,688	59,800	0.526	222,576
	ครั้งที่ 2	4.75	141,120	57,700	0.409	213,723
	ครั้งที่ 3	4.72	163,200	60,000	0.367	218,278
120	ครั้งที่ 1	5.22	197,616	59,280	0.299	227,360
	ครั้งที่ 2	5.15	192,000	60,300	0.314	240,175
	ครั้งที่ 3	5.20	128,000	58,000	0.453	234,675

ตารางที่ ข-2.2 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้า

ความต่างศักย์ไฟฟ้า (นาที)		สมบัติของน้ำกากส่า				
		pH	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	BOD ₅ /COD	ความเข้มข้น (ADMI)
5	ครั้งที่ 1	4.73	158,000	59,200	0.375	164,692
	ครั้งที่ 2	4.82	141,120	58,500	0.414	182,767
	ครั้งที่ 3	4.77	148,960	57,700	0.387	180,231
10	ครั้งที่ 1	5.25	192,307	55,000	0.286	197,521
	ครั้งที่ 2	5.15	156,267	56,100	0.359	195,872
	ครั้งที่ 3	5.32	163,233	54,800	0.342	192,324
15	ครั้งที่ 1	5.71	259,488	52,300	0.201	193,265
	ครั้งที่ 2	5.51	208,000	54,400	0.262	197,259
	ครั้งที่ 3	5.69	163,200	57,700	0.353	205,434

ตารางที่ ข-2.3 ผลของพีเอช

pH เริ่มต้นของ น้ำกากส่า		สมบัติของน้ำกากส่า				
		pH	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	BOD ₅ /COD	ความเข้มข้น (ADMI)
2	ครั้งที่ 1	3.1	180,000	57,600	0.320	255,152
	ครั้งที่ 2	2.90	163,017	55,000	0.338	252,688
	ครั้งที่ 3	2.98	163,188	56,300	0.354	254,204
4	ครั้งที่ 1	5.11	164,434	56,730	0.345	220,969
	ครั้งที่ 2	4.98	147,179	57,400	0.390	216,757
	ครั้งที่ 3	5.05	147,829	57,210	0.387	205,434
6	ครั้งที่ 1	6.68	158,080	61,000	0.385	159,953
	ครั้งที่ 2	6.80	122,400	67,400	0.551	165,016
	ครั้งที่ 3	6.72	139,600	64,900	0.465	164,060
8	ครั้งที่ 1	7.80	141,120	61,100	0.432	198,320
	ครั้งที่ 2	8.1	146,880	57,000	0.357	192,880
	ครั้งที่ 3	7.9	186,500	59,900	0.408	190,304
10	ครั้งที่ 1	8.89	240,910	54,100	0.225	258,743
	ครั้งที่ 2	9.05	228,480	56,100	0.245	270,318
	ครั้งที่ 3	8.90	234,304	55,500	0.237	260,320

ข-3 น้ำกากส่าหลังการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า

ตารางที่ ข-3.1 คุณลักษณะของน้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี EC

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
พีเอช	6.88	6.62
ซีโอดี (COD, mg/L)	170,240	141,120
บีโอดี (BOD, mg/L)	59,000	58,000
BOD ₅ /COD	0.41	0.38
ค่าสี (ADMI)	326,341	316,609

ตารางที่ ข-3.2 คุณลักษณะของน้ำกากส่าที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี EC ภายหลังจากเจือจาง 100 เท่า

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
พีเอช	6.40	6.60	6.55
ซีโอดี (COD, mg/L)	1,760	1,200	1,520
บีโอดี (BOD, mg/L)	760	730	700
BOD ₅ /COD	0.43	0.61	0.46
ค่าสี (ADMI)	3,217	3,176	3,152

ข-4 อัตราการผลิตโอโซนที่ได้จากเครื่องผลิตโอโซน

ตารางที่ ข-4.1 การวัดอัตราการผลิตปริมาณโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซน

เวลา (นาทีก)	ปริมาณโอโซน (มิลลิกรัม)			อัตราการผลิตโอโซนที่ได้จาก เครื่องผลิต (มก./ชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
15	86.4	96	88.29	90.23 ± 5.08
30	151.2	168	170.69	163.30 ± 10.56
45	230.4	208.8	228.76	222.65 ± 12.02
60	307.2	305.01	335.77	315.99 ± 17.16
75	396	340.8	381.27	372.69 ± 28.58
90	398.4	436.8	421.8	419 ± 19.37

ข-5 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำกากส่าด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับวิธีโอโซนเนชัน

ตารางที่ ข-5.1 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซน

ระยะเวลาการผ่าน ก๊าซโอโซน (นาทีก)	สมบัติของน้ำกากส่า				
	pH หลังการ บำบัด	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	BOD ₅ /COD	ความเข้มข้น (ADMI)
15	6.34	158,600	60,500	0.38	314,431
30	6.19	158,400	61,000	0.38	311,589
45	6.10	160,000	62,000	0.38	310,161
60	5.87	166,320	63,500	0.38	306,024
75	5.62	168,000	66,000	0.39	298,470
90	5.37	170,300	64,000	0.37	275,931

ตารางที่ ข-5.2 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนเมื่อเจือจางน้ำตัวอย่าง

ระยะเวลาการผ่าน ก๊าซโอโซน (นาทื)		สมบัติของน้ำกากส่า				
		pH หลัง บำบัด	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	BOD ₅ /COD	ความเข้มข้น (ADMI)
15	ครั้งที่ 1	6.30	1,120	740	0.66	1,069
	ครั้งที่ 2	6.42	1,280	760	0.59	1,237
	ครั้งที่ 3	6.50	1,760	700	0.40	1,155
30	ครั้งที่ 1	5.37	1,280	680	0.53	752
	ครั้งที่ 2	5.27	1,200	860	0.75	907
	ครั้งที่ 3	5.40	1,120	840	0.65	763
45	ครั้งที่ 1	4.55	1,040	790	0.76	539
	ครั้งที่ 2	4.36	1,200	740	0.62	649
	ครั้งที่ 3	4.39	1,120	780	0.70	553
60	ครั้งที่ 1	3.10	1,040	750	0.72	429
	ครั้งที่ 2	3.25	1,200	770	0.64	554
	ครั้งที่ 3	2.98	1,120	760	0.68	413
75	ครั้งที่ 1	2.18	1,120	820	0.73	503
	ครั้งที่ 2	1.98	1,280	840	0.66	554
	ครั้งที่ 3	2.11	1,200	840	0.70	675
90	ครั้งที่ 1	1.97	1,280	820	0.64	601
	ครั้งที่ 2	1.90	1,280	780	0.61	501
	ครั้งที่ 3	1.85	1,120	800	0.71	699

ตารางที่ ข-5.3 ผลของพีเอช

ระยะเวลาการผ่าน ก๊าซไอโซน (นาทื)		สมบัติของน้ำกากส่า				
		pH หลังการ บำบัด	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	BOD ₅ /COD	ความเข้มข้น (ADMI)
2	ครั้งที่ 1	2.21	1,331	640	0.48	650
	ครั้งที่ 2	2.15	1,142	600	0.53	698
	ครั้งที่ 3	1.92	848	610	0.72	637
4	ครั้งที่ 1	2.42	1,331	640	0.48	603
	ครั้งที่ 2	2.93	979	620	0.63	616
	ครั้งที่ 3	2.75	1,018	600	0.70	591
6	ครั้งที่ 1	3.07	1,165	610	0.52	559
	ครั้งที่ 2	2.95	1,306	650	0.58	516
	ครั้งที่ 3	2.9	848	670	0.79	468
8	ครั้งที่ 1	3.16	1,331	660	0.50	686
	ครั้งที่ 2	2.95	1,142	600	0.53	638
	ครั้งที่ 3	3.05	1,187	640	0.54	561
10	ครั้งที่ 1	3.16	1,331	580	0.44	659
	ครั้งที่ 2	3.27	1,469	640	0.44	628
	ครั้งที่ 3	3.10	1,018	600	0.59	585

ข-6 ผลของศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนในชุดควบคุม กลูโคส-กลูตามิค

ตารางที่ 6.1 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆหลังการหมักของชุดควบคุม กลูโคส-กลูตามิค

VS _{out} (g/L)	ปริมาตรก๊าซ (ml)	% CH ₄	% CO ₂	% O ₂	Methane yield (mlCH ₄ /gVS _{removed})	%BMP
2.844	370	34.9	35.2	2.7	45.04	12.87

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ค-1 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำกากส่าด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้า

ค-1.1 ผลของระยะเวลาบำบัด

ตารางที่ ค-1.1.1 ผลของระยะเวลาบำบัดกับค่าซีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้

One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
Time	5	0, 30, 60, 90, 120

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Time	4	99589314090	24897328522	46.68	0.000
Error	10	5334167693	533416769		
Total	14	1.04923E+11			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระยะเวลาบำบัดที่แตกต่างกันกับค่าซีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยวิธี Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Time	N	Mean	Grouping
0	3	372960	A
30	3	233597	B
60	3	190480	B C
120	3	172539	B C
90	3	139336	C

ตารางที่ ค-1.1.2 ผลของระยะเวลาบำบัดกับค่าบีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้

One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
Time	5	0, 30, 60, 90, 120

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Time	4	15013247	3753312	2.60	0.101
Error	10	14445082	1444508		
Total	14	29458329			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระยะเวลาบำบัดที่แตกต่างกันกับค่าบีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Time	N	Mean	Grouping
120	3	59193	A
90	3	59167	A
60	3	57945	A
0	3	56950	A
30	3	56941	A

ตารางที่ ค-1.1.3 ผลของระยะเวลาบำบัดกับค่าอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
Time	5	0, 30, 60, 90, 120

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Time	4	0.13077	0.032692	7.90	0.004
Error	10	0.04139	0.004139		
Total	14	0.17215			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระยะเวลาบำบัดที่แตกต่างกันกับค่าอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Time	N	Mean	Grouping
90	3	0.4340	A
120	3	0.3320	A B
60	3	0.3057	A B C
30	3	0.2447	B C
0	3	0.15267	C

ตารางที่ ค-1.1.4 ผลของระยะเวลาบำบัดกับค่าสีในหน่วย ADMI ของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
time	5	0, 30, 60, 90, 120

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
time	4	5580512968	1395128242	6.76	0.007
Error	10	2063511173	206351117		
Total	14	7644024141			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระยะเวลาบำบัดที่แตกต่างกันกับค่าสีในหน่วย ADMI ของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

time	N	Mean	Grouping
0	3	256203	A
30	3	253788	A
120	3	234070	A B
60	3	228827	A B
90	3	203081	B

ค-1.2 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้า

ตารางที่ ค-1.2.1 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าซีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้

One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
voltage	4	0, 5, 10, 15

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
voltage	3	92365100046	30788366682	44.12	0.000
Error	8	5583108173	697888522		
Total	11	97948208219			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันกับค่าซีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยวิธี Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

voltage	N	Mean	Grouping
0	3	372960	A
15	3	210229	B
10	3	170602	B
5	3	149360	B

ตารางที่ ค-1.2.2 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าบีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้

One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
voltage	4	0, 5, 10, 15

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
voltage	3	25025625	8341875	2.90	0.102
Error	8	23051667	2881458		
Total	11	48077292			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันกับค่าบีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยวิธี Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

voltage	N	Mean	Grouping
5	3	58467	A
0	3	56950	A
10	3	55300	A
15	3	54800	A

ตารางที่ ค-1.2.3 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
voltage	4	0, 5, 10, 15

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
voltage	3	0.09317	0.031058	16.04	0.001
Error	8	0.01549	0.001936		
Total	11	0.10866			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันกับค่าอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

voltage	N	Mean	Grouping
5	3	0.3920	A
10	3	0.3290	A B
15	3	0.2720	B
0	3	0.15267	C

ตารางที่ ค-1.2.4 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าสีในหน่วย ADMI ของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
voltage	4	0, 5, 10, 15

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
voltage	3	10786128299	3595376100	79.37	0.000
Error	8	362406576	45300822		
Total	11	11148534875			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันกับค่าสีในหน่วย ADMI ของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

voltage	N	Mean	Grouping
0	3	256203	A
15	3	198653	B
10	3	195239	B
5	3	175897	C

ค-1.3 ผลของพีเอช

ตารางที่ ค-1.3.1 ผลของพีเอชกับค่าซีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้

One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
pH	5	2, 4, 6, 8, 10

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
pH	4	26509248800	6627312200	4.64	0.022
Error	10	14290231179	1429023118		
Total	14	40799479979			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพีเอชที่แตกต่างกันกับค่าซีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

pH	N	Mean	Grouping
10	3	234565	A
2	3	168735	A B
8	3	158167	A B
4	3	153147	A B
6	3	103307	B

ตารางที่ ค-1.3.2 ผลของพีเอชกับค่าบีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้

One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
pH	5	2, 4, 6, 8, 10

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
pH	4	159994027	39998507	11.29	0.001
Error	10	35418467	3541847		
Total	14	195412493			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพีเอชที่แตกต่างกันกับค่าบีโอดีของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

pH	N	Mean	Grouping
6	3	64433	A
8	3	59333	B
4	3	57113	B
2	3	56300	B
10	3	55233	B

ตารางที่ ค-1.3.3 ผลของพีเอชกับค่าอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำทิ้ง
หลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
pH	5	2, 4, 6, 8, 10

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
pH	4	0.08731	0.021829	11.63	0.001
Error	10	0.01877	0.001877		
Total	14	0.10608			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพีเอชที่แตกต่างกันกับค่าอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทาง
ชีวภาพของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

pH	N	Mean	Grouping
6	3	0.4670	A
8	3	0.3990	A B
4	3	0.3740	A B
2	3	0.33733	B C
10	3	0.23567	C

ตารางที่ ค-1.3.4 ผลของพีเอชกับค่าสีในหน่วย ADMI ของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้

One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
pH	5	2, 4, 6, 8, 10

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
pH	4	14060318923	3515079731	0.94	0.481
Error	10	37542268099	3754226810		
Total	14	51602587022			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพีเอชที่แตกต่างกันกับค่าสีในหน่วย ADMI ของน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วย EC โดยใช้ Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

pH	N	Mean	Grouping
2	3	254015	A
4	3	214387	A
8	3	193835	A
10	3	186460	A
6	3	163010	A

ค-2 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำอากาศด้วยวิธีรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับวิธีโอโซนชั้น

ค-2.1 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซน

ตารางที่ ค-2.1.1 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนกับค่าซีไอทีของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
time	8	15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
time	7	165333	23619	1.05	0.434
Error	16	358400	22400		
Total	23	523733			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนที่แตกต่างกันกับค่าซีไอทีของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

time	N	Mean	Grouping
15	3	1387	A
90	3	1226.7	A
75	3	1200.0	A
30	3	1200.0	A
120	3	1173.3	A
105	3	1120.0	A
60	3	1120.0	A
45	3	1120.0	A

ตารางที่ ค-2.1.2 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนกับค่าบีโอดีของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
time	8	15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
time	7	24362	3480	1.75	0.166
Error	16	31733	1983		
Total	23	56096			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนที่แตกต่างกันกับค่าบีโอดีของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

time	N	Mean	Grouping
75	3	833.33	A
120	3	826.7	A
105	3	806.67	A
90	3	800.0	A
30	3	793.3	A
45	3	770.0	A
60	3	760.00	A
15	3	733.3	A

ตารางที่ ค-2.1.3 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนกับค่าอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
time	8	15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
time	7	0.06465	0.009236	1.45	0.255
Error	16	0.10213	0.006383		
Total	23	0.16678			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนที่แตกต่างกันกับค่าอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

time	N	Mean	Grouping
105	3	0.7267	A
120	3	0.7100	A
75	3	0.6967	A
45	3	0.6933	A
60	3	0.6800	A
90	3	0.6533	A
30	3	0.6433	A
15	3	0.5500	A

ตารางที่ ค-2.1.4 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนกับค่าสีในหน่วย ADMI ของน้ำตัวอย่าง
เจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
time	8	15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
time	7	1085546	155078	16.00	0.000
Error	16	155122	9695		
Total	23	1240668			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนที่แตกต่างกันกับค่าสีที่วัดในหน่วย
ADMIของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ Tukey Pairwise
Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

time	N	Mean	Grouping
15	3	1153.7	A
30	3	807.3	B
90	3	600.3	B C
45	3	580.3	B C
75	3	577.3	B C
105	3	527.0	C
120	3	503.0	C
60	3	465.3	C

ค-2.2 ผลของพีเอช

ตารางที่ ค-2.2.1 ผลของพีเอชกับค่าซีโอดีของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น

โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
pH	5	2, 4, 6, 8, 10

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
pH	4	48933242	12233311	0.72	0.599
Error	10	170691957	17069196		
Total	14	219625199			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพีเอชที่แตกต่างกันกับค่าซีโอดีของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

pH	N	Mean	Grouping
2	3	5107	A
8	3	4553	A
10	3	1273	A
4	3	1109	A
6	3	1106	A

ตารางที่ ค-2.2.2 ผลของพีเอชกับค่าบีโอดีของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น
โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
pH	5	2, 4, 6, 8, 10

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
pH	4	2493	623.3	0.86	0.521
Error	10	7267	726.7		
Total	14	9760			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพีเอชที่แตกต่างกันกับค่าบีโอดีของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัด
ด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

pH	N	Mean	Grouping
6	3	643.3	A
8	3	633.3	A
4	3	620.0	A
2	3	616.7	A
10	3	606.7	A

ตารางที่ ค-2.2.3 ผลของพีเอชกับค่าอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
pH	5	2, 4, 6, 8, 10

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
pH	4	0.03957	0.009893	0.87	0.513
Error	10	0.11340	0.011340		
Total	14	0.15297			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพีเอชที่แตกต่างกันกับค่าอัตราส่วนความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

pH	N	Mean	Grouping
6	3	0.6300	A
4	3	0.6033	A
2	3	0.5767	A
8	3	0.5233	A
10	3	0.4900	A

ตารางที่ ค-2.2.4 ผลของพีเอชกับค่าสีในหน่วย ADMI ของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
pH	5	2, 4, 6, 8, 10

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
pH	4	36993	9248	5.37	0.014
Error	10	17237	1724		
Total	14	54229			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพีเอชที่แตกต่างกันกับค่าสีในหน่วย ADMI ของน้ำตัวอย่างเจือจางที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนชั้น โดยใช้ Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

pH	N	Mean	Grouping
2	3	661.7	A
8	3	628.3	A
10	3	624.0	A B
4	3	603.33	A B
6	3	514.3	B

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวจิตฐิตา ชูเขียว
วัน เดือน ปีเกิด 26 พฤษภาคม 2537
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2559 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม เกรดเฉลี่ย 3.05
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง