

การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

นางสาวณัฐณี แก้ววิเชียร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

Remediation of wastewater from biodiesel production plant by electro-Fenton process

Miss Nattinee Kaewichain

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

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วย กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน
โดย	นางสาวณัฐณี แก้ววิเชียร
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เฟื่องปรีชา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤษชาทร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานดา ว่องไวลิขิต)

ณัฐินี แก้ววิเชียร : การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน. (Remediation of wastewater from biodiesel production plant by electro-Fenton process) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก : วจ.ดร.มะลิ หุ่นสม, 146 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของตัวแปรและภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราการป้อนอากาศ (0.5-2.5 ลิตรต่อนาที) ชนิดของขั้วแคโทด (แกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม และไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์) ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสีย (2-7) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (78-233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) และระยะเวลาในการบำบัด (15-180 นาที) พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย คือ การใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 4 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และอัตราการป้อนอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีไอดี บีไอดี และปริมาณน้ำมัน-ไขมันเท่ากับร้อยละ 54.9 63.9 และ 85.9 ตามลำดับ โดยอัตราการลดลงของซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมันจะดำเนินตามปฏิกิริยาอันดับ 2 ส่วนการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมาบำบัดซ้ำด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันจะให้น้ำมีสมบัติที่ดีขึ้น โดยค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมันลดลงจาก 50,725 เหลือ 13.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อน้ำเสียผ่านการบำบัดครั้งที่ 9 ส่วนซีไอดีและบีไอดีมีค่าลดลง แต่ค่าเหล่านี้ยังสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

สาขาวิชา...วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม...ลายมือชื่อ.....

ปีการศึกษา.....2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5287160720 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : BIODIESEL WASTEWATER / ELECTRO-FENTON / HYDROGEN PEROXIDE

NATTINEE KAEVVICHAIN : REMEDIATION OF WASTEWATER FROM BIODIESEL PRODUCTION PLANT BY ELECTRO-FENTON PROCESS.

ADVISOR : ASSOC. PROF. Dr. MALI HUNSOM, Ph.D., 146 pp.

This work was carried out to study the effect of parameters and optimum condition for treating wastewater from biodiesel production plant. The investigated parameters were air flow rate (0.5-2.5 l/min), types of cathode (graphite, stainless steel, Ti/RuO₂), operating time (15-180 min), initial pH of wastewater (2-7) and current density (78-233 A/m²). At optimum condition: initial pH of wastewater of 4, current density of 78 A/m², operating time of 180 min, air flow rate of 1.5 l/min by using graphite electrode, greater than 54.9, 63.9 and 85.9% of COD, BOD and oil&grease were removed, respectively. The reduction rate of COD BOD and oil&grease were the 2nd order reaction. The re-treatment of wastewater by electro-Fenton process can enhance a more reduction of pollutant in treated wastewater. The concentration of oil&grease was reduced from 50,725 to 13.5 mg/l after the 9th times of wastewater treatment. Significant reductions of COD and BOD were also observed, but their concentrations were still higher than the acceptable value for discharging.

Field of Study : Environmental Science..... Student's Signature

Academic Year : 2011..... Advisor's Signature

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย.....	5
2.2 ความรู้เกี่ยวกับไบโอดีเซล.....	6
2.2.1 ข้อดีของการใช้น้ำมันไบโอดีเซล.....	6
2.2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล.....	6
2.2.3 สมบัติของไบโอดีเซลและมาตรฐานคุณภาพ.....	9
2.2.4 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล.....	12
2.3 การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	16
2.3.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพ.....	16
2.3.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี.....	16
2.3.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ.....	17

2.4 ทฤษฎีทางเคมีไฟฟ้า.....	22
2.4.1 องค์ประกอบทางเคมีไฟฟ้า.....	23
2.4.2 ชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	24
2.4.3 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า.....	24
2.4.4 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์.....	25
2.4.5 หลักการอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า.....	25
2.4.6 สมการเนิร์นสต์.....	26
2.4.7 กฎของฟาราเดย์.....	28
2.4.8 การควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า.....	29
2.5 การประยุกต์โดยใช้หลักการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสีย.....	30
2.5.1 กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	30
2.5.2 กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้า.....	33
2.5.3 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า.....	34
2.5.4 กระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า.....	40
2.5.5 กระบวนการเฟนตันและอิเล็กโตรเฟนตัน.....	45
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	50
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	55
3.1 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในงานวิจัย.....	55
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	55
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	56
3.4 สารเคมี.....	56
3.4.1 การวิเคราะห์ซีไอดี.....	56
3.4.2 การวิเคราะห์บีไอดี.....	56
3.4.3 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน-ไขมัน.....	57

3.5	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	57
3.6	การบำบัดซ้ำ.....	61
3.7	การวิเคราะห์ผล.....	61
บทที่ 4	ผลและการอภิปรายผลการทดลอง.....	62
4.1	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและน้ำเสีย ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น.....	62
4.2	การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน.....	65
4.2.1	ผลของตัวแปรในการบำบัด.....	66
4.2.1.1	ผลของการเติมและไม่เติมอากาศ.....	66
4.2.1.2	ผลของเวลา.....	70
4.2.1.3	ผลของชนิดของขั้วแคโทด.....	72
4.2.1.4	ผลของอัตราการไหลของอากาศ.....	74
4.2.1.5	ผลของค่าความเป็นกรด-เบส.....	77
4.2.1.6	ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า.....	80
4.3	ศึกษาการบำบัดซ้ำโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน.....	85
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	87
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	87
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	88
	รายการอ้างอิง.....	89
	ภาคผนวก.....	93
	ภาคผนวก ก ความหมายของค่าพารามิเตอร์ในน้ำเสีย.....	94
	ภาคผนวก ข มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	97
	ภาคผนวก ค การหาสมบัติของน้ำเสีย.....	101
	ภาคผนวก ง การคำนวณหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	115
	ภาคผนวก จ จลนพลศาสตร์ของการลดลงของค่าซีโอดี บีโอดี และน้ำมัน-ไขมัน.....	117

ญ

หน้า

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 146

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	10
2.2	39
2.3	48
4.1	63
4.2	69
4.3	70
4.4	71
4.5	72
4.6	74
4.7	74
4.8	76
4.9	77
4.10	79

ตารางที่	หน้า
4.11 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ อเล็กโตรเฟนตัน.....	80
4.12 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ อเล็กโตรเฟนตัน.....	83
4.13 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ อเล็กโตรเฟนตัน.....	83
4.14 สมบัติของน้ำเสียหลังการบำบัดขั้นต้นและเมื่อผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ อเล็กโตรเฟนตัน เปรียบเทียบกับสมบัติต่างๆ ของน้ำเสียก่อนการบำบัด.....	84
ข.1 มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	94
ค.1 ปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ค่าซีไอดี.....	104
ค.2 ขนาดของหลอดแก้ว ปริมาณตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม.....	105
ค.3 การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วงบีไอดี.....	113
จ.1 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ อเล็กโตรเฟนตัน.....	118
จ.2 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ อเล็กโตรเฟนตัน.....	118
จ.3 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ อเล็กโตรเฟนตัน.....	122
จ.4 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ อเล็กโตรเฟนตัน.....	122
จ.5 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ อเล็กโตรเฟนตัน.....	124
จ.6 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ อเล็กโตรเฟนตัน.....	124

ตารางที่	หน้า
๑.๗ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ อเล็กโทรเฟนตัน.....	128
๑.๘ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ อเล็กโทรเฟนตัน.....	128
๑.๙ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ อเล็กโทรเฟนตัน.....	134
๑.๑๐ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ อเล็กโทรเฟนตัน.....	134
๑.๑๑ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ อเล็กโทรเฟนตัน.....	140
๑.๑๒ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ อเล็กโทรเฟนตัน.....	140

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันสำหรับการผลิตไบโอดีเซล.....	6
2.2 เมล็ดเรพ.....	7
2.3 ถั่วเหลืองและน้ำมันถั่วเหลือง.....	7
2.4 สบู่ดำและน้ำมันสบู่ดำ.....	8
2.5 น้ำมันใช้แล้ว.....	9
2.6 ปาล์มและน้ำมันปาล์ม.....	9
2.7 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	15
2.8 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง.....	18
2.9 ตัวอย่างการวางบ่อของระบบบ่อปรับความเสถียร	20
2.10 หลักการทำงานของระบบบ่อปรับความเสถียร.....	20
2.11 ระบบบึงประดิษฐ์แบบ FWS.....	22
2.12 ระบบบึงประดิษฐ์แบบ VSB.....	22
2.13 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์กระบวนการเคมีไฟฟ้าระบบของเซลล์อิเล็กโทรไลต์.....	24
2.14 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Tank cell.....	31
2.15 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบมอโนโพลาร์ และแบบไบโพลาร์.....	31
2.16 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Filter press.....	32
2.17 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Rotating cylinder electrode.....	32
2.18 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Cylinder electrode	37
2.19 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Packed bed.....	37
2.20 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Bi-polar trickle tower.....	38
2.21 โครงสร้างของ Poly-nuclear hydroxyl aluminum (III) complexes.....	42
2.22 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน.....	44
2.23 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม.....	44

ภาพที่	หน้า
2.26 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าแบบไปโพลาร์.....	45
3.1 ตัวอย่างน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างไปโอดีเซล.....	55
3.2 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบเบตซ์ที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน.....	58
3.3 โทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ แกรไฟต์ และเหล็กกล้าไร้สนิม.....	58
3.4 เครื่องปั๊มอากาศ ยี่ห้อ Atman รุ่น At-A9500.....	58
3.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ยี่ห้อ GW Instek รุ่น GPR-60060D.....	59
4.1 (ก) ลักษณะน้ำเสียก่อนทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบส (ข) ลักษณะน้ำเสียหลังจากปรับ ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ด้วยกรดซัลฟิวริก.....	63
4.2 โครมาโตแกรมของแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมทรี ของ (ก) น้ำเสียจากกระบวนการ การผลิตไปโอดีเซล และ (ข) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น.....	64
4.3 ผลของการเติมอากาศและไม่เติมอากาศต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการ การผลิตไปโอดีเซล เมื่อใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และอัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที เวลา 180 นาที.....	69
4.4 ผลของเวลาต่อการลดลงของสารมลพิษและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำเสียจาก กระบวนการผลิตไปโอดีเซลที่เวลา 0-180 นาที เมื่อใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด- เบสเท่ากับ 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และอัตราการไหลของ อากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที.....	71
4.5 ผลของชนิดของขั้วแคโทดต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิต ไปโอดีเซลที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อ ตารางเมตร และอัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที เวลา 180 นาที.....	73
4.6 ผลของที่อัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการลดลงของสารมลพิษและปริมาณไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไปโอดีเซลที่อัตราการไหลของอากาศ 0.5-2.0 ลิตรต่อนาที เมื่อใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียเท่ากับ 2 ความหนา แน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และเวลา 180 นาที.....	76

ภาพที่	หน้า
4.7 ผลของความเป็นกรด-เบสต่อร้อยละการลดลงของสารมลพิษและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำเสียจากระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ความเป็นกรด-เบสในช่วง 2-7 อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เมื่อใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด และเวลา 180 นาที.....	79
4.8 ผลของควมหนาแน่นต่อการลดลงของสารมลพิษและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำเสียจากระบวนการผลิตไบโอดีเซลในช่วง 78-233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด และเวลา 180 นาที.....	81
4.9 ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ.....	82
4.10 ลักษณะของน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน.....	85
4.11 ความสัมพันธ์ของค่าร้อยละการลดลงของซีไอดี บีไอดี และปริมาณน้ำมัน-ไขมันกับการบำบัดครั้งต่างๆ โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และอัตราการป้อนอากาศเท่ากับ 1.5 ลิตรต่อนาที เวลา 180 นาที.....	86
จ.1 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 เวลา 480 นาที.....	119
จ.2 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 เวลา 480 นาที.....	119
จ.3 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	120

ภาพที่	หน้า
๑.4 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	120
๑.5 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 อัตราการไหลของ อากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	121
๑.6 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 อัตราการไหลของ อากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 240 นาที.....	121
๑.7 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 อัตราการไหลของ อากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	123
๑.8 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 อัตราการไหลของ อากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 240 นาที.....	123
๑.9 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	125

ภาพที่	หน้า
จ.10 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	125
จ.11 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	126
จ.12 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	126
จ.13 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้ไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อ ตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	127
จ.14 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้ไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อ ตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	127
จ.15 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	129

ภาพที่	หน้า
จ.16 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	129
จ.17 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.0 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	130
จ.18 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.0 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	130
จ.19 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	131
จ.20 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	131
จ.21 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 2.0 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	132

ภาพที่	หน้า
จ.22 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 2.0 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	132
จ.23 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 2.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	133
จ.24 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 2.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	133
จ.25 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	135
จ.26 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	135
จ.27 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	136

ภาพที่	หน้า
จ.28 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	136
จ.29 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	137
จ.30 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	137
จ.31 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	138
จ.32 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	138
จ.33 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	139

ภาพที่	หน้า
จ.34 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	139
จ.35 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	141
จ.36 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	141
จ.37 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 116 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	142
จ.38 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 116 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	142
จ.39 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 155 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	143

ภาพที่	หน้า
จ.40 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 155 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	143
จ.41 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 194 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	144
จ.42 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 194 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	144
จ.43 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	145
จ.44 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณ น้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที.....	145

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

จากแนวโน้มของวิกฤตการณ์ด้านพลังงานที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการใช้น้ำมันปิโตรเลียมที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการใช้พลังงานจากปิโตรเลียมที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทำให้มีการมองหาพลังงานทางเลือกใหม่มาทดแทน เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ รวมถึงไบโอดีเซล (Biodiesel) ซึ่งเป็นพลังงานทดแทนที่กำลังได้รับการยอมรับและสนับสนุนจากรัฐบาลเป็นพลังงานทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมเพื่อการพัฒนาพลังงานที่ยั่งยืนในประเทศและลดการนำเข้าจากต่างประเทศ

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์นำมาทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) ร่วมกับแอลกอฮอล์ เกิดเป็นสารประกอบเอสเทอร์ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่กลั่นจากปิโตรเลียม เรียกว่า ไบโอดีเซล (B100) ขั้นตอนในการผลิตสามารถแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน คือ การเตรียมวัตถุดิบน้ำมันพืช การเตรียมสารเร่งปฏิกิริยา การทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไบโอดีเซล การนำเมทานอลกลับคืน การแยกส่วนผลิตภัณฑ์ การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ และการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ ขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการกำจัดกลีเซอรอลและสารปนเปื้อนอื่น ๆ ที่สามารถละลายน้ำได้ โดยในการผลิตไบโอดีเซล 100 ลิตร จะก่อให้เกิดน้ำเสีย 20 ลิตร (Jaruwat และคณะ 2010) ในปัจจุบันประเทศไทยมีกำลังการผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 2.40 ล้านลิตรต่อวัน ส่งผลให้เกิดปริมาณน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล 480,000 ลิตรต่อวัน (กระทรวงพลังงาน 2555) องค์ประกอบหลักของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นประกอบด้วยไขมัน คาร์บอน และของแข็งในปริมาณสูง นอกจากนี้ในกระบวนการกำจัดสบู่ที่อยู่ในรูปกรดไขมันด้วยการเติมกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ทำให้มีฟอสฟอรัสปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งเป็นจำนวนมาก เมื่อน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลถูกปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายวิธี เช่น กระบวนการทางเคมี กระบวนการบำบัดโดยใช้จุลินทรีย์ แต่วิธีดังกล่าวยังมีข้อบกพร่องอยู่ เช่น เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้วทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ใช้พื้นที่

จำนวนมากในการบำบัด เป็นต้น (Jaruwat และคณะ 2010) งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางในการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน ซึ่งเป็นวิธีการบำบัดร่วมกันระหว่างกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrocoagulation) และกระบวนการเฟนตัน (Fenton) โดยกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นกระบวนการสร้างสารก่อการจับตัว (Coagulant) ด้วยกระแสไฟฟ้า ส่วนกระบวนการเฟนตันจะสร้างอนุมูลอิสระของ OH^\bullet จากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเฟอรัสไอออน (Fe^{2+}) ซึ่งอนุมูลอิสระของ OH^\bullet เป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงจึงสามารถลดสารมลพิษในน้ำเสียได้ วิธีนี้มีข้อดีคือ ใช้พื้นที่น้อยในการบำบัด ไม่เกิดสารเคมีตกค้างในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด และมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารมลพิษ

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของตัวแปรและภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากการกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

1.3 ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากการกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ค่าซีไอดี (Chemical Oxygen Demand) ค่าบีไอดี (Biochemical Oxygen Demand) ค่าปริมาณน้ำมันและไขมัน (Oil & Grease) ปริมาณของแข็งละลายน้ำ (Total dissolved solid) และปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากการกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากการกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ ความเป็นกรด-เบส ปริมาณน้ำมัน-ไขมัน ค่าบีไอดี และค่าซีไอดี
2. บำบัดน้ำเสียเบื้องต้นเพื่อแยกน้ำมันไบโอดีเซลและกรดไขมันอิสระ โดยการปรับค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ด้วยกรดซัลฟิวริก

3. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบเบตซ์ ตัวแปรที่ศึกษา คือ

3.1 ผลของการเติมและไม่เติมอากาศ ศึกษาผลของระบบบำบัดที่มีการเติมและไม่เติมอากาศ โดยใช้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาค่าร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน

3.2 ผลของเวลา ศึกษาผลของเวลาต่อค่าร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน ในช่วง 0-240 นาที โดยใช้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาค่าร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน

3.3 ผลของขั้วแคโทด ศึกษาผลของขั้วแคโทดต่อร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน ขั้วแคโทดที่ทำการศึกษา ได้แก่ แกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม และไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ โดยใช้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ในเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.2) จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาค่าร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน

3.4 ผลของอัตราการไหลของอากาศ ศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศในช่วย 1.0-2.5 ลิตรต่อนาที ต่อค่าร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน ที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ภายในเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.2) และใช้ขั้วแคโทดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.3) จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาค่าร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน

3.5 ผลของค่าความเป็นกรด-เบส ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-เบสในช่วง 2-7 ต่อร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน ภายในเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.2) โดยใช้ขั้วแคโทดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.3) อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.4) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมันวิเคราะห์หาร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน

3.6 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ในช่วง 78-233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ต่อย้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน ภายในเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.2) โดยใช้ขั้วแคโทดที่เหมาะสม จากการทดลองในข้อ (3.3) อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.4) ค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.5) จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมันวิเคราะห์หาร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน

4. ศึกษาการบำบัดซ้ำ
5. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา
6. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ระบบและภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า
2. เป็นแนวทางในการพัฒนาและขยายขนาดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้จริงในอุตสาหกรรม

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

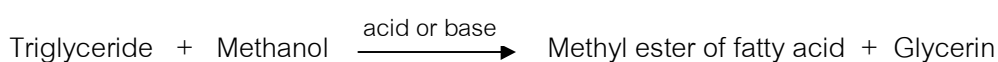
2.1 สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย

ปัจจุบันประเทศไทยมีการนำเข้าและใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ขั้นต้นประมาณร้อยละ 63 โดยเฉพาะน้ำมันดิบที่มีปริมาณการนำเข้ามากถึงร้อยละ 82 ของการนำเข้าพลังงานเชิงพาณิชย์ เพื่อนำมาเข้ากระบวนการกลั่นเป็นน้ำมันสำเร็จรูปชนิดต่างๆ ปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงโดยรวมทั้งประเทศในปี พ.ศ. 2550 เท่ากับ 112.16 ล้านลิตร คิดเป็นความต้องการใช้น้ำมันดีเซลทั้งหมดวันละ 51.52 ล้านลิตร โดยกลุ่มผู้ใช้ส่วนใหญ่อยู่ในภาคการขนส่ง ภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรม อีกทั้งราคาน้ำมันดิบและน้ำมันสำเร็จรูปของโลกมีแนวโน้มปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดผลกระทบต่อประชาชนส่วนใหญ่และประเทศต้องสูญเสียเงินในการซื้อน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศมากขึ้น จากสถานการณ์พลังงานในปัจจุบันรัฐบาลจึงได้ให้ความสำคัญต่อการพัฒนาวิจัยและศึกษาการใช้พลังงานทดแทน สำหรับประเทศที่มีภาคเกษตรกรรมเป็นพื้นฐานอย่างประเทศไทย การพัฒนาพลังงานทดแทน เช่น พลังงานชีวมวล เป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลผลิตทางการเกษตร ช่วยให้เกษตรกรมีรายได้จากพืชพลังงาน และที่สำคัญคือ เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยกระทรวงพลังงานได้ตั้งเป้าในการเพิ่มอัตราการ ใช้พลังงานทดแทนแทนพลังงานเชื้อเพลิงจากสัดส่วนการใช้ร้อยละ 0.5 ของพลังงานทั้งหมดในปี พ.ศ. 2548 เป็นร้อยละ 8 ในปี พ.ศ. 2554 โดยมีสัดส่วนของพลังงานชีวมวลและแก๊สชีวภาพมากเป็นอันดับ 1 รองลงมาคือเชื้อเพลิงชีวภาพ (เอทานอลและไบโอดีเซล) และมีการนำพลังงานจากแสงอาทิตย์ น้ำและลมมาใช้เพิ่มเติมด้วย

ไบโอดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่สำคัญที่รัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมอย่างจริงจังเพื่อลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศ เนื่องจากในแต่ละปีประเทศไทยสูญเสียเงินตราต่างประเทศเพื่อการนำเข้าน้ำมันดิบกว่า 300,000 ล้านบาท ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการปลูกปาล์มน้ำมันเพื่อผลิตน้ำมันปรุงอาหารจึงมีน้ำมันปาล์มดิบในปริมาณมาก ซึ่งน้ำมันชนิดนี้สามารถนำมาผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซลได้ ทำให้ช่วยลดการนำเข้าและใช้น้ำมันดีเซลให้กับประเทศ ตั้งแต่วันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 เป็นต้นไป รัฐบาลจึงกำหนดให้ใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลผสมในน้ำมันดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 2 นโยบายนี้ทำให้มีความต้องการการใช้ไบโอดีเซล (B100) เพิ่มขึ้นประมาณ 1 ล้านลิตรต่อวัน และในปี พ.ศ. 2555 รัฐบาลคาดว่าความต้องการใช้น้ำมันไบโอดีเซลอาจสูงถึง 3.14 ล้านลิตรต่อวัน

2.2 ความรู้เกี่ยวกับไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตได้จากการนำน้ำมันพืช เช่น ปาล์ม มะพร้าว ถั่วเหลือง ทานตะวัน เมล็ดเรพ สบู่ดำหรือไขมันสัตว์มาทำปฏิกิริยาทางเคมีคือ ปฏิกิริยา ทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification reaction) ร่วมกับเมทานอลหรือเอทานอล โดยมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้อุณหภูมิสูง เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของกลีเซอไรด์ให้อยู่ในรูปของเอทิลเอสเทอร์ (Ethyl ester) หรือเมทิลเอสเทอร์ (Methyl ester) ของกรดไขมัน ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

2.2.1 ข้อดีของการใช้น้ำมันไบโอดีเซล (ศูนย์ปฏิบัติการเครื่องจักรกลที่ c3, 2554: ออนไลน์)

- น้ำมันไบโอดีเซลให้ความปลอดภัยในการขนส่งและการสัมผัสมากกว่าน้ำมันปิโตรดีเซล เนื่องจากมีจุดติดไฟสูงถึง 200 องศาเซลเซียส ขณะที่น้ำมันปิโตรดีเซลมีจุดติดไฟที่ 70 องศาเซลเซียส
- ไบโอดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดเดียวที่ได้รับการรับรองจากสำนักงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อมแห่งศุนย์ยานยนต์แห่งชาติ สหรัฐอเมริกา (US-EPA) ว่าในไอเสียนั้นมีค่ามลพิษต่ำ มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์
- การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดมลพิษในอากาศได้ เนื่องจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สมบูรณ์จึงช่วยลดการปล่อยแก๊สที่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) โดยเฉพาะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อแก้ปัญหาโลกร้อน
- ไอเสียจากน้ำมันไบโอดีเซลมีมลพิษต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซลคือ ไม่มีกำมะถันและสารก่อมะเร็งเป็นองค์ประกอบ

2.2.2 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล

1) เมล็ดเรพ

เมล็ัดเรพ (Rape seed) มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ เหมือนเมล็ดงา เป็นพืชล้มลุก ประเภทพืชที่พบอยู่ทั่วไปในทวีปยุโรป มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Brassica napus ปัจจุบัน

เมล็ดเรพเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลมากที่สุดในยุโรปหรือประมาณร้อยละ 80 ประเทศเยอรมันถือได้ว่าเป็นทั้งผู้นำในการนำไบโอดีเซลมาใช้แทนน้ำมันดีเซล และจัดเป็นผู้นำทางด้านเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้วัตถุดิบจากเมล็ดเรพ นอกจากนี้ยังมีประเทศฝรั่งเศสและสเปนที่ใช้เมล็ดเรพเป็นวัตถุดิบเช่นกัน



ภาพที่ 2.2 เมล็ดเรพ (Turbo, 2010: ออนไลน์)

2) ถั่วเหลือง

ถั่วเหลือง (Soybean) เป็นพืชน้ำมันที่นิยมใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตไบโอดีเซลมากที่สุดในประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งมีปริมาณการผลิตถั่วเหลืองสูงถึงกว่า 30 ล้านตันต่อปี นอกจากนี้ยังมีประเทศอิตาลีที่นิยมใช้ถั่วเหลืองในการผลิตไบโอดีเซล



ภาพที่ 2.3 ถั่วเหลืองและน้ำมันถั่วเหลือง (siambioenergy, 2553: ออนไลน์)

3) สนุ่นดำ

สนุ่นดำ (Jatropha) จัดเป็นพืชน้ำมันที่รัฐบาลส่งเสริมให้ปลูกเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลชุมชน เนื่องจากเป็นพืชที่เพาะปลูกได้ง่าย ทนต่อสภาพแห้งแล้งและน้ำท่วม สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ภายใน 1 ปี และมีอายุยืนกว่า 30 ปี น้ำมันที่บีบจากผลสนุ่นดำ

สามารถนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ เช่น เครื่องปั่นไฟ รถอีแต่น รถแทรกเตอร์ หรือ เครื่องสูบน้ำได้ทันทีโดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ แต่ปัญหาด้านคุณภาพบางประการ เช่น ความหนืดที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลถึง 10 เท่า ทำให้ไม่สามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลรอบสูงได้ จำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชัน เพื่อแปลงเป็นไบโอดีเซลก่อนนำไป ผสมกับน้ำมันดีเซลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง



ภาพที่ 2.4 สบู่ดำและน้ำมันสบู่ดำ (กรมวิชาการเกษตร, 2552: ออนไลน์)

4) น้ำมันใช้แล้ว

วัตถุดิบอีกประเภทหนึ่งที่มีการส่งเสริมให้นำไปผลิตไบโอดีเซลคือ น้ำมันใช้แล้ว ซึ่งนอกจากจะเป็นประโยชน์ทางด้านพลังงานแล้ว ยังช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมด้วย โดยในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา ทั่วโลกมีอัตราเฉลี่ยในการบริโภคน้ำมันเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 ต่อปี ส่งผลให้ในปัจจุบันมีการบริโภคน้ำมันสูงกว่า 100 ล้านตันต่อปี ผลที่ตามมาคือ มีน้ำมัน ใช้แล้ว ปริมาณมากทำให้จำเป็นต้องหาวิธีจัดการไม่ว่าจะเป็นการนำมาบำบัดหรือนำกลับมาใช้ใหม่ โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 2.5 น้ำมันใช้แล้ว (อาภาณี เหลืองนฤมิตรชัย, 2549: ออนไลน์)

5) ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน (Palm oil) เป็นพืชที่นิยมนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลของประเทศไทยในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นพืชที่มีศักยภาพในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงสูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่นคือ มีต้นทุนการผลิตต่ำ ผลผลิตต่อพื้นที่สูง ปาล์มน้ำมันเป็นพืชยืนต้นที่ทนต่อผลกระทบจากภัยธรรมชาติ อีกทั้งสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้นานถึง 20 ปี ทำให้ความต้องการน้ำมันปาล์มดิบในประเทศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจำนวนมากในอนาคตอันใกล้



ภาพที่ 2.6 ปาล์มและน้ำมันปาล์ม (ปาล์มน้ำมัน, 2553: ออนไลน์)

2.2.3 สมบัติของไบโอดีเซลและมาตรฐานคุณภาพ

ข้อกำหนดและวิธีทดสอบตามมาตรฐานไบโอดีเซลสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

1) การตรวจสอบสมบัติทั่วไปที่เป็นข้อกำหนดคุณภาพที่ดีของน้ำมัน ได้แก่ ความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ กำมะถัน ปริมาณกากถ่าน จำนวนซีเทน ปริมาณแก้ว ซัลเฟต ปริมาณน้ำ สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด การกัดกร่อนแผ่นทองแดง ค่าความเป็นกรด และ ปริมาณโลหะแอลคาไลน์และ แอลคาไลน์เอิร์ทที่ปนเปื้อน

2) การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ ได้แก่

- ปริมาณเมทิลเอสเทอร์และกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (สัดส่วนของปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ในเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันทั้งหมด) ซึ่งจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ใช้

- ปริมาณเมทานอล มอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมด ซึ่งมีการกำหนดเกณฑ์ให้มีสารเหล่านี้อยู่ในปริมาณน้อย เพราะเป็นการบอกระดับความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำมันพืชและไขมันสัตว์กับเมทานอล และมีกระบวนการแยกกลีเซอรินที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกไปได้เป็นอย่างดี

- ทดสอบการมีเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และค่าไอโอดีน เนื่องจากไบโอดีเซลผลิตจากน้ำมันพืชจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศส่งผลให้เสถียรภาพของไบโอดีเซลลดลง

กรมธุรกิจพลังงาน เมื่อวันที่ 24 สิงหาคม พ.ศ. 2548 กำหนดมาตรฐานและวิธีตรวจสอบสมบัติต่างๆ ของไบโอดีเซลเพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันหรือไบโอดีเซลชนิด B100 แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดคุณสมบัติของไบโอดีเซลและวิธีการตรวจสอบ (กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน 2554)

รายการ	คุณสมบัติ	ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ
1	เมทิลเอสเทอร์ (Methyl ester) ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส (Density at 15 °C) กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ไม่ต่ำกว่า 860 และ ไม่สูงกว่า 900	ASTMD 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Viscosity at 40 °C) เซนติสโตกส์	ไม่ต่ำกว่า 3.5 และ ไม่สูงกว่า 5.0	ASTM D 445

รายการ	คุณสมบัติ	ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ
4	จุดวาบไฟ (Flash point) องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
5	กำมะถัน (Sulphur) ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.0010	ASTM D 2622
6	กากถ่าน (ร้อยละ10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (Carbon residue, on 10% distillation residue) ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.30	ASTM D 4530
7	จำนวนซีเทน (Cetane number) ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่ต่ำกว่า 51	ASTM D 613
8	เถ้าซัลเฟต (Sulfated ash) ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D 874
9	น้ำ (Water) ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.050	ASTM D 2709
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total contaminant) ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.0024	ASTM D 5452
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper strip corrosion)	ไม่สูงกว่าหมายเลข 1	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (Oxidation stability at 110°C) ชั่วโมง	ไม่ต่ำกว่า 6	EN 14112
13	ค่าความเป็นกรด (Acid number) มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม	ไม่สูงกว่า 0.50	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน (Iodine value) กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัม	ไม่สูงกว่า 120	EN 14111

รายการ	คุณสมบัติ	ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 12.0	EN 14103
16	เมทานอล (Methanol) ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14110
17	โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.80	EN 14105
18	ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride) ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105
19	ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ (Free glycerine) ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105
21	กลีเซอรอลทั้งหมด (Total glycerine) ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.25	EN14105
22	โลหะกลุ่มที่ 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ไม่สูงกว่า 5.0	EN 14108 และ EN 14109
23	ฟอสฟอรัส (Phosphorus) ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.0010	ASTM D 4951
24	สารเติมแต่ง (additive) (ถ้ามี)	ตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดี กรมธุรกิจพลังงาน	

2.2.4 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซลในเชิงอุตสาหกรรมอาจเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องก็ได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบกระบวนการผลิต แต่ส่วนใหญ่มักเป็นปฏิกิริยาที่ใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา โดยขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและกระบวนการที่ใช้ ซึ่งขั้นตอนในการผลิตสามารถแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนคือ การเตรียมวัตถุดิบน้ำมันพืช

การเตรียมสารเร่งปฏิกิริยา การทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไบโอดีเซล การนำ เมทานอลกลับคืน การแยกส่วนผลิตภัณฑ์ การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ และการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล แสดงดังภาพที่ 2.7

2.2.4.1 การเตรียมวัตถุดิบน้ำมันพืช

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตจะต้องเตรียมให้เหมาะสมก่อนเข้าทำปฏิกิริยา โดยหากเป็นน้ำมันปาล์มดิบจำเป็นต้องผ่านกระบวนการแยกยางเหนียว และลดกรดให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ส่วนวัตถุดิบจากน้ำมันที่ใช้แล้วจะถูกนำมากรองแล้วจึงนำไปขจัดน้ำออก

2.2.4.2 การเตรียมสารเร่งปฏิกิริยา

เมื่อทำการคำนวณหาปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ทั้งหมดที่ต้องใช้ในการผลิตไบโอดีเซลแล้วจึงทำการผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่คำนวณได้กับเมทานอล (CH_3OH) ซึ่งจะได้สารใหม่ที่เรียกว่า โซเดียมเมทอกไซด์ (NaOCH_3) โดยในการผสมจะต้องระวังไม่ให้น้ำปะปนลงไป จากนั้นทำการป้อนโซเดียมเมทอกไซด์เข้าถังพักเพื่อรอทำปฏิกิริยากับน้ำมันต่อไป

2.2.4.3 การทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไบโอดีเซล

เป็นกระบวนการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยการเติมเมทานอลหรือเอทานอลพร้อมทั้งสารเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้อุณหภูมิสูงได้เป็นเมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ พร้อมทั้งได้กลีเซอรินในสัดส่วนประมาณร้อยละ 10 ซึ่งจะถูกแยกออกจากไบโอดีเซลหลังจากที่ปล่อยให้เกิดการแยกชั้น

2.2.4.4 การนำเมทานอลกลับคืน

เนื่องจากเมทานอลมีจุดวาบไฟอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 9 องศาเซลเซียส จึงเป็นสารที่จุดติดไฟได้ง่าย (Highly flammable) จึงมีการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน และเนื่องจากเมทานอลมีจุดเดือดต่ำคือ 64.7 องศาเซลเซียส จึงระเหยง่ายและสามารถแยกเมทานอลออกจากไบโอดีเซลได้ง่าย การแยกเมทานอลสามารถดำเนินการได้ ระหว่างการทำปฏิกิริยาโดยใช้ความร้อนในกระบวนการระเหยกับเมทานอลที่มากเกินไปจนออกและควบแน่นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ อย่างไรก็ตามต้องระวังไม่ให้น้ำปะปน ในส่วนของเมทานอลที่กลั่นได้ เพื่อให้การนำกลับมาใช้ใหม่นั้นเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

2.2.4.5 การแยกส่วนผลิตภัณฑ์

หลังทำปฏิกิริยาสารเอสเทอร์และกลีเซอรอลจะมีการแยกชั้นตามความถ่วงจำเพาะ และในขณะเดียวกันเมทานอลบางส่วนที่ผสมอยู่ในเอสเทอร์และกลีเซอรอลจะมีผลต่อการละลายของเอสเทอร์ในกลีเซอรอล และการละลายของกลีเซอรอลในเอสเทอร์

2.2.4.6 การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ

ไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันยังมีสิ่งปนเปื้อนหลายอย่าง เช่น แอลกอฮอล์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือ น้ำ กรดไขมันอิสระ และสบู่ สิ่งปนเปื้อนเหล่านี้มีผลต่อคุณภาพไบโอดีเซล กระบวนการที่ทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

- กระบวนการล้างแบบเปียก เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล โดยเฉพาะใช้น้ำล้าง เนื่องจากกลีเซอรอลและแอลกอฮอล์มีความสามารถในการละลายน้ำสูง ทำให้น้ำมีประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนเหล่านี้ได้ อีกทั้งเป็นกระบวนการที่ง่ายและสะดวก แต่ข้อเสียสำหรับกระบวนการนี้คือ เกิดน้ำเสียในกระบวนการซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิต ปัจจุบันกระบวนการล้างแบบเปียกสามารถแบ่งออกเป็น 3

(1) ล้างด้วยน้ำอุ่นที่มีอุณหภูมิระหว่าง 60-80 องศาเซลเซียส

(2) ล้างด้วยกรดแล้วตามด้วยน้ำกลั่น โดยกรดที่นิยมใช้คือ H_3PO_4 , H_2SO_4 และ HCl เพื่อทำให้ไบโอดีเซลเป็นกลางและลดการจับตัวเป็นสบู่ของกรดไขมันอิสระและการเกิดอิมัลชัน แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนชั้นไบโอดีเซลสะอาด กำจัดน้ำที่ตกค้างด้วย Na_2SO_4 (Atadashi และคณะ 2011)

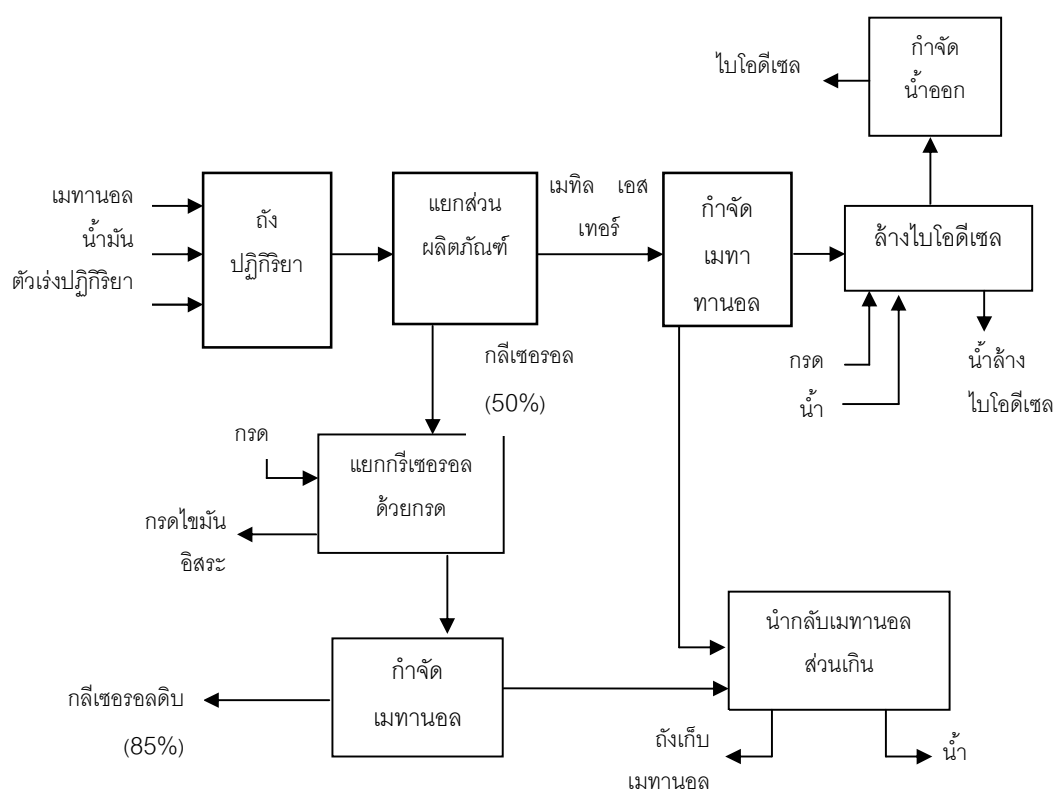
(3) ล้างด้วยสารละลายอินทรีย์คือ petroleum ether กระบวนการนี้จะใช้น้ำล้างตามด้วยเพื่อเป็นการกำจัดสบู่และตัวเร่งปฏิกิริยาที่คงเหลือ หรือจนน้ำล้างมีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 จากนั้นนำไบโอดีเซลไปกำจัดน้ำด้วยโซเดียมซัลเฟต และกำจัด petroleum ether โดยนำไประเหยหรือกลั่น (Atadashi และคณะ 2011)

- กระบวนการล้างแบบแห้ง กระบวนการนี้จะใช้ตัวดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ Activated clay และแมกนีซอล เป็นต้น ซึ่งสามารถดูดซับสารประกอบที่มีขี้ว เช่น กลีเซอรอล เมทานอล กลีเซอไรด์ โลหะ และสบู่ ในระหว่างกระบวนการสามารถลดปริมาณกลีเซอไรด์ และกลีเซอรอลทั้งหมด (total glycerol) ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ข้อดีของ

กระบวนการนี้คือ ผลิตภัณฑ์มีน้ำน้อยหรือไม่มี ทำให้ไม่เกิดน้ำเสียในกระบวนการ ซึ่งเป็นลดระยะเวลา และต้นทุนการผลิต (Dugan, 2007)

2.2.4.7 การทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์

กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซลมักมีความบริสุทธิ์ต่ำ ประมาณร้อยละ 60 เนื่องจากมีน้ำและสบู่ปะปนอยู่จำนวนมาก โดยทั่วไปมักใช้วิธีการแยกด้วยการทำปฏิกิริยาด้วยกรดจะได้กลีเซอรอลที่มีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 80-88



ภาพที่ 2.7 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

2.3 การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

การล้างไบโอดีเซลเป็นการนำไบโอดีเซลที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันไปล้างด้วยน้ำอุ่นเพื่อกำจัดกลีเซอรินและสารปนเปื้อนอื่นๆ ที่สามารถละลายน้ำได้ น้ำเสียที่เกิดจากการผลิตไบโอดีเซลจะมีสีขุ่นและองค์ประกอบส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเกลือของ กรดไขมันซึ่งมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิต นอกจากนี้กระบวนการกำจัดสบู่ให้อยู่ในรูปกรดไขมันด้วยการเติมกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) จะทำให้มีฟอสฟอรัสปนเปื้อนในน้ำซึ่งเป็นจำนวนมาก หากน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลถูกปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

2.3.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพ

กระบวนการทางกายภาพ (Physical treatment process) ส่วนใหญ่มีหน้าที่กำจัดของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ เช่น บ่อตกไขมันและน้ำมัน ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ ไม่สามารถใช้ได้กับน้ำเสียที่มีไขมันและน้ำมันละลายอยู่ เนื่องจากน้ำมันรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกับน้ำเสียจึงจำเป็นต้องให้น้ำมันและน้ำเสียแยกตัวออกจากกันก่อนโดยใช้สารเคมี (กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2545)

2.3.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี

กระบวนการทางเคมี (Chemical treatment process) เป็นการบำบัดที่ต้องการแยกหรือกำจัดสารเคมีหรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัดทางกายภาพหรือชีวภาพได้ยากหรือไม่ได้เลย เช่น โลหะหนัก น้ำเสียที่มีสภาพความเป็นกรด-เบสสูง เป็นต้น โดยทั่วไปการบำบัดน้ำเสียอาจมีขั้นตอนการบำบัดทางเคมีเป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อทำให้น้ำใสสะอาดและปราศจากเชื้อโรค กระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการบำบัดมีหลายประเภท ได้แก่

2.3.2.1 กระบวนการตกตะกอนทางเคมีหรือโคแอกกูเลชัน (Chemical coagulation)

การกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ออกจากน้ำทำได้ง่ายกว่าการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กที่เรียกว่า อนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal particle) ซึ่งมีขนาด 10^{-6} มิลลิเมตร ถึง 10^{-3} มิลลิเมตร ซึ่งไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยตัวเองภายในเวลาที่จำกัดจึงต้องทำให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคจนเป็นก้อนขนาดใหญ่ที่เรียกว่า ฟลอค (Floc) โดยใช้สารเคมีบางอย่างทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ การตกตะกอนทางเคมีประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอน

การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ (Destabilization) เช่น ลดแรงผลักระหว่างอนุภาคโดยทางใดทางหนึ่งโดยใช้สารเคมีที่เรียกว่า สารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) และขั้นตอนการทำอนุภาคคอลลอยด์ต่างๆให้เคลื่อนที่มากกระทบกันหรือสัมผัสกันมากที่สุด (Transport of colloidal particles) (อุดมศักดิ์ เจียรวิชัย 2541)

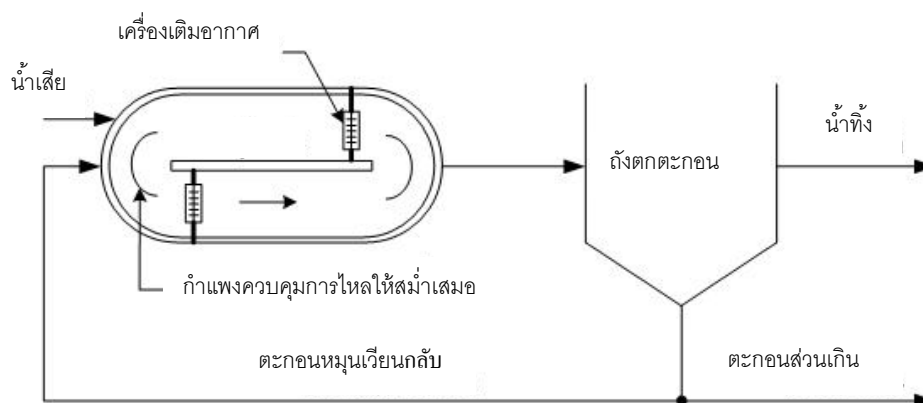
2.3.2.2. การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange)

ใช้ในกรณีที่ไม่ต้องการใช้วิธีสร้างตะกอนแข็งเพื่อกำจัดโลหะหนักต่างๆ อาจใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนแทน โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบรรจุในถังและปล่อยให้ น้ำเสียไหลผ่าน โลหะต่างๆในน้ำเสียจะอยู่ในรูปไอออนที่มีประจุบวกซึ่งจะถูกแลกเปลี่ยนกับโปรตอนของเรซิน ซึ่งสามารถแยกโลหะหนักออกจากน้ำได้ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

2.3.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biological treatment process)

2.3.3.1. ระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge process)

ระบบที่อาศัยหลักการของสิ่งมีชีวิตจำพวกจุลินทรีย์ช่วยในการย่อย ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมวลสารต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสียให้มีความสกปรกน้อยลง หลักการทำงานของระบบจะเป็นวิธีที่เลียนแบบธรรมชาติ ซึ่งระบบนี้ใช้กันมากในประเทศไทย ส่วนประกอบหลักประกอบด้วยถังเติมอากาศที่ใช้เลี้ยงจุลินทรีย์และถังตกตะกอนซึ่งแยกน้ำทิ้งออกจากจุลินทรีย์ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์ 2542) ดังภาพที่ 2.8 โดยน้ำเสียจะถูกส่งเข้าไปยังถังเติมอากาศซึ่งมีตะกอนอยู่เป็นจำนวนมาก ภายในถังจะมีภาวะที่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน จุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำให้อยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลผ่านไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำใส ตะกอนที่แยกออกส่วนหนึ่งจะถูกสูบกลับไปถังเติมอากาศ ตะกอนส่วนเกินจะต้องนำไปทิ้งซึ่งต้องทำอย่างสม่ำเสมอเพื่อรักษาจุลินทรีย์ในระบบให้มีค่าเหมาะสม



ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง (กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน, 2554: ออนไลน์)

2.3.3.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic treatment)

การบำบัดที่อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่ดำรงชีวิตอยู่ได้โดยไม่ต้องการแก๊สออกซิเจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สมีเทนซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ใช้เป็นแก๊สหุงต้ม ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า ระบบบำบัดชนิดนี้มีข้อดีคือ ใช้พลังงานและมีตะกอนส่วนเกินน้อยสามารถใช้ลดความเข้มข้นจากน้ำเสียโรงงานย้อมผ้าได้ แต่เป็นระบบที่เริ่มต้นเดินระบบยากและใช้เวลานาน น้ำที่บำบัดแล้วยังมีค่าความสกปรกที่เกินมาตรฐานไม่สามารถปล่อยออกสู่แหล่งน้ำได้ และอาจมีกลิ่นเหม็นเนื่องจากแก๊สที่เกิดจากการย่อยสลาย เช่น แก๊สไข่เน่า (H_2S) ระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศที่นิยมได้แก่ ระบบบ่อหมัก (Anaerobic pond) ถังเกราะ (Septic tank) ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic filter) UASB (Upflow anaerobic sludge blanket) และถังหมักไร้อากาศ (Anaerobic digester) เป็นต้น

2.3.3.3 ระบบบ่อปรับความเสถียร (Stabilization pond)

บ่อปรับความเสถียรเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยธรรมชาติในการบำบัดสารอินทรีย์ แบ่งตามลักษณะการทำงานได้ 3 รูปแบบ คือ บ่อบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic pond) บ่อบำบัดแบบกึ่งใช้ออกซิเจน (Facultative pond) และบ่อบำบัดแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic pond) หากมีบ่อหลายบ่อต่อเนื่องกัน บ่อสุดท้ายจะทำหน้าที่เป็นบ่อบ่ม (Maturation pond) เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียก่อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยปกติระบบ

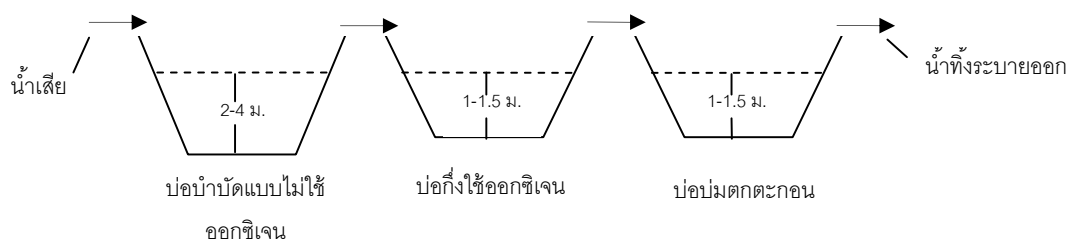
บ่อปรับความเสถียรจะมีการต่อกันแบบอนุกรมอย่างน้อย 3 บ่อ แสดงดังภาพที่ 2.9 และ 2.10 แสดงหลักการทำงานของระบบบ่อปรับความเสถียร

- บ่อบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นระบบที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงโดยไม่ต้องใช้ออกซิเจน บ่อบำบัดชนิดนี้ถูกออกแบบให้มีความสามารถรับสารอินทรีย์ได้สูงมาก จนสาหร่ายและการเติมออกซิเจนที่ผิวหน้าไม่สามารถผลิตและ บ่อนอกซิเจนได้ทัน ทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนในน้ำภายในบ่อ น้ำเสียส่วนที่ผ่านการบำบัดจากบ่อนี้จะระบายไปยังบ่อแบบกึ่งใช้ออกซิเจนเพื่อบำบัดต่อไป

- บ่อบำบัดแบบกึ่งใช้ออกซิเจน บ่อนี้มีลักษณะการทำงานแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนบนของบ่อเป็นแบบใช้ออกซิเจน โดยได้รับจากการถ่ายเทอากาศที่บริเวณผิวน้ำและจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ส่วนล่างของบ่ออยู่ในสภาพไร้ออกซิเจนซึ่งโดยปกติจะรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาก่อน กระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นในบ่อนี้ เรียกว่า การทำความสะอาดตัวเอง โดยสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ประเภทที่ใช้ออกซิเจนเป็นอาหารสำหรับการสร้างเซลล์ใหม่ และใช้เป็นพลังงานโดยใช้ออกซิเจนที่ได้จากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายที่อยู่ในบ่อส่วนบน สำหรับบ่อส่วนล่างจนถึงก้นบ่อ แสงแดดส่องไม่ถึงจะมีปริมาณออกซิเจนต่ำจนเกิดภาวะไร้ออกซิเจน และมีจุลินทรีย์ประเภทไม่ใช้ออกซิเจนทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์และแปรสภาพเป็นแก๊สเช่นเดียวกับบ่อบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน แต่แก๊สที่ลอยขึ้นมาจะถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนที่อยู่ช่วงบนของบ่อทำให้เกิดกลิ่นเหม็นได้

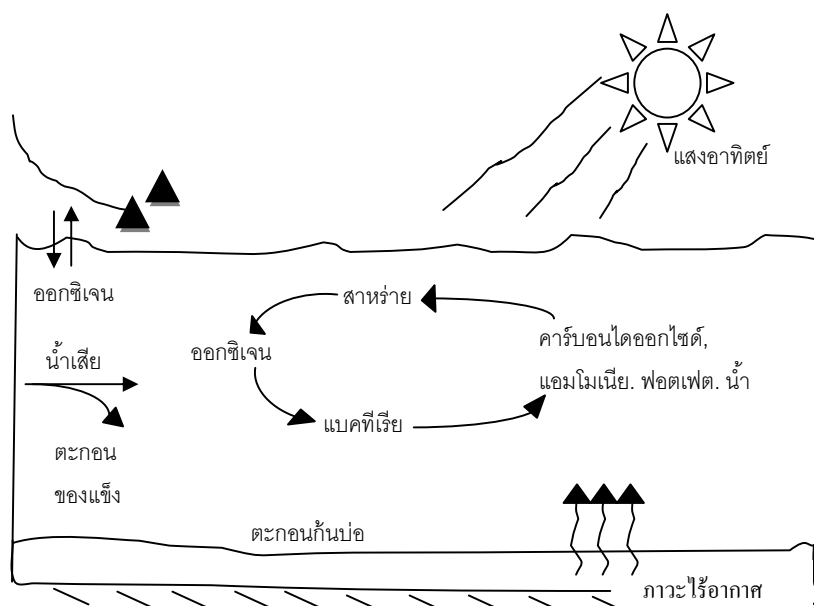
- บ่อบำบัดแบบใช้ออกซิเจน เป็นบ่อที่มีแบคทีเรียและสาหร่ายแขวนลอยอยู่ มีความลึกไม่มากเพื่อให้ออกซิเจนกระจายทั่วทั้งบ่อ อาศัยออกซิเจนจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายและการเติมอากาศที่ผิวหน้า และยังสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ส่วนหนึ่งโดยอาศัยแสงแดดอีกด้วย

- บ่อบ่ม มีสภาพเป็นแบบใช้ออกซิเจนตลอดทั้งบ่อ ซึ่งมีความลึกไม่มากและแสงแดดส่องถึงก้นบ่อ ใช้รองรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วเพื่อพอกน้ำทิ้งให้มีคุณภาพน้ำดีขึ้น และอาศัยแสงแดดทำลายเชื้อโรคหรือจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งก่อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 2.9 ตัวอย่างการวางบ่อของระบบบ่อปรับความเสถียร (Water Treatment in Sewage Treatment, 2011: ออนไลน์)

ระบบบ่อปรับความเสถียรเป็นระบบที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายน้อยในการก่อสร้าง ต้องการพลังงานน้อย และไม่ต้องการการดูแลที่พิถีพิถัน แต่การบำบัดด้วยวิธีนี้มีข้อเสียคือ ต้องการพื้นที่ในการก่อสร้างมาก และในกรณีที่ใช้บ่อน้ำบำบัดแบบใช้ออกซิเจนอาจเกิดกลิ่นเหม็นหากการออกแบบหรือควบคุมไม่ดีพอ นอกจากนี้น้ำทิ้งอาจมีปัญหาสารหายปะปนอยู่จำนวนมากโดยเฉพาะจากบ่อน้ำบำบัดแบบใช้ออกซิเจน

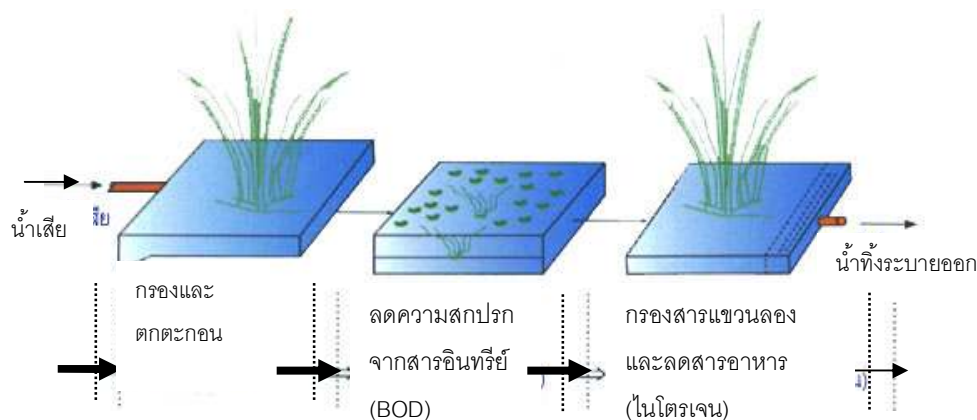


ภาพที่ 2.10 หลักการทำงานของระบบบ่อปรับความเสถียร (Water Treatment in Sewage Treatment, 2011: ออนไลน์)

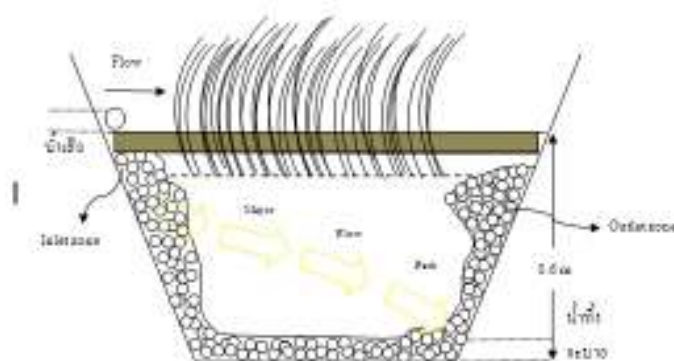
ระบบบำบัดความเสถียรเป็นระบบที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายน้อยในการก่อสร้าง ต้องการพลังงานน้อย และไม่ต้องการการดูแลที่พิถีพิถัน แต่การบำบัดด้วยวิธีนี้มีข้อเสียคือ ต้องการพื้นที่ในการก่อสร้างมาก และในกรณีที่ใช้บำบัดแบบใช้ออกซิเจนอาจเกิดกลิ่นเหม็นหากการออกแบบหรือควบคุมไม่ดีพอ นอกจากนี้น้ำทิ้งอาจมีปัญหามลพิษปนอยู่มากโดยเฉพาะจากบำบัดแบบใช้ออกซิเจน

2.3.3.4 ระบบบึงประดิษฐ์ (Constructed wetland)

ระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยกระบวนการทางธรรมชาติในการใช้ปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว แต่ต้องการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสก่อนระบายออกสู่แหล่งรองรับน้ำทิ้ง นอกจากนี้ระบบบึงประดิษฐ์ยังสามารถใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียในขั้นที่ 2 สำหรับบำบัดน้ำเสียจากชุมชนได้อีกด้วย ข้อดีของระบบนี้คือไม่ซับซ้อนและไม่ต้องใช้เทคโนโลยีในการบำบัดสูง บึงประดิษฐ์มี 2 ประเภท ได้แก่ แบบ Free water surface wetland (FWS) ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับบึงธรรมชาติ และ แบบ Vegetated submerged bed system (VSB) ซึ่งจะมีชั้นดินปนทรายสำหรับปลูกพืชน้ำและชั้นหินรองก้นบ่อเพื่อเป็นตัวกรองน้ำเสีย ดังภาพที่ 2.11 และ 2.12 โดยหลักการทำงานของระบบบึงประดิษฐ์คือเมื่อน้ำเสียไหลเข้ามาในบึงประดิษฐ์ส่วนต้น สารอินทรีย์ส่วนหนึ่งจะตกตะกอนจมตัวลงสู่ก้นบึงและถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ส่วนสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจะถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่กับพืชน้ำหรือชั้นหินและจุลินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ระบบนี้จะได้รับออกซิเจนจากการแทรกซึมของอากาศผ่านผิวน้ำหรือชั้นหินลงมา ออกซิเจนบางส่วนจะได้ออกจากการสังเคราะห์แสงแต่มีปริมาณไม่มากนัก สำหรับสารแขวนลอยจะถูกกรองและจมตัวอยู่ในช่วงต้นๆ ของระบบ การลดปริมาณไนโตรเจนจะเป็นไปตามกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ส่วนการลดปริมาณฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ชั้นดินส่วนพื้นบ่อ และพืชน้ำจะช่วยดูดซับฟอสฟอรัสผ่านทางรากและนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ นอกจากนี้ระบบบึงประดิษฐ์ยังสามารถกำจัดโลหะหนักได้บางส่วนอีกด้วย



ภาพที่ 2.11 ระบบบึงประดิษฐ์แบบ FWS (กรมควบคุมมลพิษ 2555)



ภาพที่ 2.12 ระบบบึงประดิษฐ์แบบ VSB (กรมควบคุมมลพิษ 2555)

2.4 ทฤษฎีทางเคมีไฟฟ้า

เคมีไฟฟ้าเป็นการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานเคมี แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เองและการปล่อยพลังงานไฟฟ้าออกมาจากปฏิกิริยา อีกกระบวนการหนึ่งคือกระบวนการที่ไม่สามารถเกิดขึ้นเองได้จะต้องมีการให้พลังงานไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าและเคมีจะเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทอิเล็กตรอนของสารเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction)

2.4.1 องค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

เซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrochemical cell) ประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือ

2.4.1.1 ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าในระบบ โดยเชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอก ถ้าแบ่งขั้วไฟฟ้าตามวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทำขั้วจะแบ่งขั้วไฟฟ้าได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าโลหะ (Metal electrode) และขั้วไฟฟ้าแบบเยื่อ (Membrane electrode)

นอกจากนี้ถ้าแบ่งขั้วไฟฟ้าตามหน้าที่และการใช้งานสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

- ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) หรือขั้วไฟฟ้าชี้บอก (Indicating electrode) ทำหน้าที่เป็นขั้วทดลองของเซลล์

- ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) หรือขั้วไฟฟ้าวร่วม (Counter electrode) ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนหรือกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน

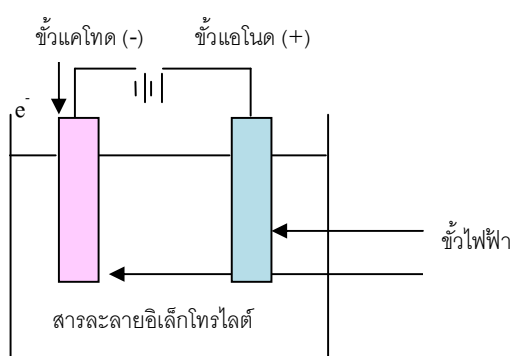
- ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ทำหน้าที่ช่วยให้เซลล์เคมีไฟฟ้าครบวงจร ลักษณะเฉพาะของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงคือ ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ไม่มีปฏิกิริยาตอบสนองต่อสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ ไม่แปรผันตามปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร และไม่แปรผันตามอุณหภูมิ จัดเป็นขั้วไฟฟ้าแบบนอนโพลาริซซ์ในอุดมคติ (Ideal nonpolarization)

การใช้งานทั่วไประบบเซลล์เคมีไฟฟ้าจะต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วคือ ขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าช่วย ซึ่งในระบบของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าใช้งานจะทำหน้าที่เป็นขั้วลบ เรียกว่า ขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าช่วยจะทำหน้าที่เป็นขั้วบวกเรียกว่า ขั้วแอโนด

2.4.1.2 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าโดยผ่านทางไอออนต่างๆที่อยู่ในสารละลาย ไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งกระแสไฟฟ้าผ่านไปยังขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว โดยสมบัติของสารอิเล็กโทรไลต์จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาและกระบวนการ เช่น ความเข้มข้น องค์ประกอบ ค่าความเป็นกรด-เบส และอุณหภูมิ

2.4.1.3 อุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอก เนื่องจากในเซลล์เคมีไฟฟ้าจำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิด

กระแสไฟฟ้าเป็นตัวป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ เพราะกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้เอง โดยอุปกรณ์ไฟฟ้านี้จะต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 จากภายนอกของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์กระบวนการเคมีไฟฟ้าในระบบของเซลล์อิเล็กโทรไลต์

2.4.2 ชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า

1. เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) คือเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น ถ่านไฟฉาย เซลล์แอลคาไลน์ เซลล์ปรอท เซลล์เงิน แบตเตอรี่ เป็นต้น
2. เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) คือเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเคมี เช่น เซลล์แยกน้ำด้วยไฟฟ้า การชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า เป็นต้น

2.4.3 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E^0)

ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเป็นสมบัติเฉพาะตัวของระบบออกซิเดชัน-รีดักชัน ค่า E^0 ได้จากการวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วของเซลล์ โดยการนำครึ่งเซลล์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าที่สนใจกับครึ่งเซลล์มาตรฐานของไฮโดรเจน และขั้วไฟฟ้าต้องจุ่มอยู่ในสารละลายเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ถือเป็นศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์ ลักษณะเฉพาะที่สำคัญของค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานมีดังนี้ (Hunsom 2001)

- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานถือเป็นค่าศักย์มาตรฐานสัมพัทธ์ เพราะเป็นค่าที่ได้เมื่อขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งของเซลล์เป็นขั้วไฮโดรเจน
- ตามสัญญานิยมของเคมีไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าได้จากการเขียนปฏิกิริยาครึ่งเซลล์เป็นแบบรีดักชันเท่านั้น ค่าศักย์ไฟฟ้าจึงอาจถือได้ว่าเป็นค่าศักย์รีดักชันสัมพัทธ์ (Relative reduction potential)
- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเป็นค่าที่ไม่แปรผันตามจำนวนโมลที่ใช้ในการปรับปรุงสมดุลของสมการครึ่งเซลล์
- ค่าศักย์ไฟฟ้าจะแปรผันไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานจะเป็นค่าศักย์รีดักชันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะเป็นค่าบ่งชี้ถึงความแรงของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันคือเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานมีค่าสูงจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดี

2.4.4 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (Electrode potential)

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าหนึ่งๆ เป็นค่าศักย์สัมพัทธ์ซึ่งสามารถนำมาหาค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าได้เมื่อทราบค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์ โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ภาวะมาตรฐานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$E_{\text{cell}}^0 = E_{\text{cathode}}^0 - E_{\text{anode}}^0 \quad (2.1)$$

ถ้าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้ถ้าเป็นบวก แสดงว่าวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้างดงกล่าวเป็นการต่อเซลล์แบบกัลวานิก ในทางกลับกันถ้าค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้เป็นลบ แสดงว่าเป็นการต่อเซลล์แบบอิเล็กโทรไลติก

2.4.5 หลักการอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างขั้วไฟฟ้า เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ การผลักดันให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในวงจรทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าขึ้น งานที่เกิดขึ้นเป็นการลดค่าพลังงานอิสระของกิบบ์ (Gibbs free energy) ที่อยู่ในเซลล์ไฟฟ้า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เป็นแบบผันกลับได้ (Reversible reaction) ดังนั้นค่าพลังงานอิสระของกิบบ์คือ

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{[\text{Re}]^b}{[\text{Ox}]^a} \quad (2.2)$$

เมื่อ	ΔG	คือ ค่าพลังงานอิสระกับกิบป์ (จูลต่อโมล)
	ΔG^0	คือ พลังงานอิสระของกิบป์ของสารที่ภาวะมาตรฐาน (จูลต่อโมล)
	T	คือ อุณหภูมิ (องศาเคลวิน)
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 8.314 (จูลต่อโมลต่อองศาเคลวิน)
	$\frac{[\text{Re}]^b}{[\text{Ox}]^a}$	คือ อัตราส่วนแอกทिवิตีของสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้น

จากความสัมพันธ์ของค่าพลังงานอิสระของกิบป์กับค่าศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับงานที่ได้

$$\Delta G = -nF\Delta E \quad (2.3)$$

$$\Delta G^0 = -nF\Delta E^0 \quad (2.4)$$

เมื่อ	$-nF\Delta E^0$	คือ งานไฟฟ้าที่เกิดที่เซลล์ไฟฟ้า (จูล)
	n	คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในการปฏิกิริยา (กรัมสมมูลต่อโมล)
	F	คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96,485 คูลอมบ์ต่อกรัมสมมูล)
	ΔE	คือ ค่าศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
	ΔE^0	คือ ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (โวลต์)

2.4.6 สมการเนินสต์ (Nernst equation)

จากปฏิกิริยาของ Van't Hoff ในเทอมของการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ เมื่อปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุล เช่น



ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลง (G) กับแอกทिवิตีเริ่มต้นของสารตั้งต้นและแอกทिवิตีสุดท้ายของผลิตภัณฑ์จะเป็น

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b} \quad (2.6)$$

เมื่อ $[C]^c[D]^d$ คือ แอกทิวิตีของผลิตภัณฑ์
 $[A]^a[B]^b$ คือ แอกทิวิตีของสารตั้งต้น

จากค่าสมการ $\Delta G = -nF\Delta E$ แทนในสมการจะได้

$$-nF\Delta E = -nF\Delta E^0 + RT \ln \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b} \quad (2.7)$$

นั่นคือ

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b} \quad (2.8)$$

สมการเนิร์นสต์สามารถใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้หาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ โดยที่ทราบแอกทิวิตีของสารต่างๆ ในปฏิกิริยาทราบอุณหภูมิและค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานจะสังเกตเห็นว่า ถ้าแอกทิวิตีเป็นหนึ่งค่า E เท่ากับ E^0 ซึ่งหมายถึงเป็นศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรด

จากสมการ (2.8) ถ้าแทนค่าคงที่ต่างๆ และอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จะได้สมการใหม่ คือ

$$E = E^0 - \frac{0.0592}{n} \log \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b} \quad (2.9)$$

หากพิจารณาทั้งเซลล์ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย 2 ครึ่งเซลล์ ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะมีค่าเป็น

$$E_{\text{cell}} = E_1 - E_2 = E_{\text{cathode}}^0 - E_{\text{anode}}^0 \quad (2.10)$$

นอกจากนี้เซลล์เคมีไฟฟ้ายังเป็นเหมือนอุปกรณ์ไฟฟ้าคือมีความต้านทานอยู่ โดยจะต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่งเพื่อเอาชนะความต้านทานภายในและจะทำให้เกิดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า ซึ่งศักย์ไฟฟ้านี้เรียกว่า ศักย์ของโอห์ม (Ohmic potential, E_r) ดังนั้น

หากจะคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ให้ถูกต้องจะต้องรวมค่าศักย์ของโอห์มนี้ด้วย ซึ่งจะได้สมการใหม่เป็น

$$E_{\text{cell}} = E_1 - E_2 + E_R = E_{\text{cathode}}^0 - E_{\text{anode}}^0 + E_R \quad (2.11)$$

2.4.7 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)

ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับปริมาณสารที่เปลี่ยนแปลงที่ขั้วไฟฟ้า (เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยมีความสัมพันธ์กับประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และระยะเวลาที่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านซึ่งกฎของฟาราเดย์มี 2 ข้อ คือ

กฎข้อที่ 1 ปริมาณของสาร (m) ที่เกิดที่อิเล็กโทรดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับประจุไฟฟ้า (Q) ที่ผ่านเข้าไปในสารละลาย

กฎข้อที่ 2 ถ้าผ่านปริมาณไฟฟ้าจำนวนเท่าๆ กันลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกัน ปริมาณของสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารเหล่านั้น

จากกฎข้อที่สองของฟาราเดย์สามารถเขียน สมการได้ดังนี้

$$m = \frac{sM_wit}{nF} \quad (2.12)$$

เมื่อ m คือ มวลของสาร (กรัม)

s คือ สัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของชนิดสารเคมี

M_w คือ น้ำหนักอะตอมหรือน้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)

i คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

t คือ เวลาที่ใช้ (วินาที)

n คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา (กรัมสมมูลต่อโมล)

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,485 คูลอมบ์ต่อกรัมสมมูล)

2.4.8 การควบคุมการทำงานของกระบวนเคมีไฟฟ้า

การควบคุมการทำงานของกระบวนเคมีไฟฟ้าเคมีแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-potential method or potentiostatic mode) และการทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-current method or galvanostatic mode) ซึ่งหลักการทำงานแต่ละแบบเป็นดังนี้

2.4.8.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่

พื้นฐานของการทำงานเป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้คงที่ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าในระบบจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อปรับค่าความต่างศักย์ให้เพียงพอกับไอออนบวกในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันบริเวณผิวของขั้วแคโทดทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่ผิวหน้ามีค่าต่ำลงตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ปริมาณของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลดลงส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น

2.4.8.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่

ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงในระบบจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา โดยวิธีการนี้เรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric technique เมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองให้คงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราคงที่



ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงด้วย ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ โดยที่กระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (T) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient)

2.5 การประยุกต์โดยใช้หลักการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสีย

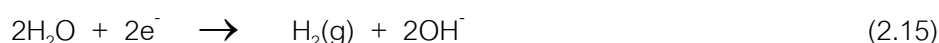
กระบวนการทางเคมีไฟฟ้าได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาใช้บำบัดน้ำเสีย เนื่องจากกระบวนการเคมีไฟฟ้านั้นไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมี

2.5.1 กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodeposition)

กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าจะเหมาะสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักผสมอยู่ การนำโลหะหนักกลับคืนโดยกระบวนการนี้มีความรวดเร็ว แม่นยำ เพราะมีค่าในการเลือกเกิดปฏิกิริยาสูง ข้อได้เปรียบในกระบวนการนี้คือ ไอออนโลหะสามารถนำกลับคืนได้ในรูปของโลหะบริสุทธิ์ หลักการทำงานของกระบวนการมีดังนี้

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยไอออนบวกและไอออนลบ ก่อให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของขั้วไฟฟ้า มีดังนี้

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด

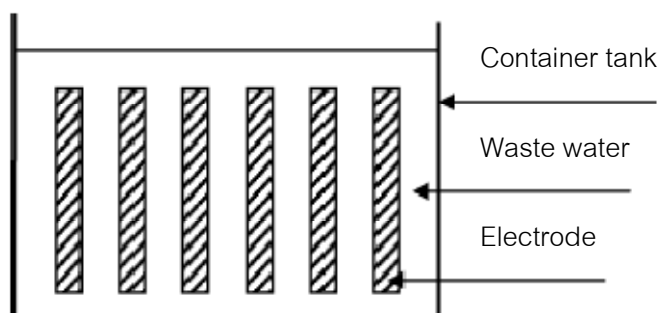


2.5.1.1 ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้

เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าสำหรับการนำโลหะหนักกลับคืนในน้ำเสียมีหลายรูปแบบ เช่น

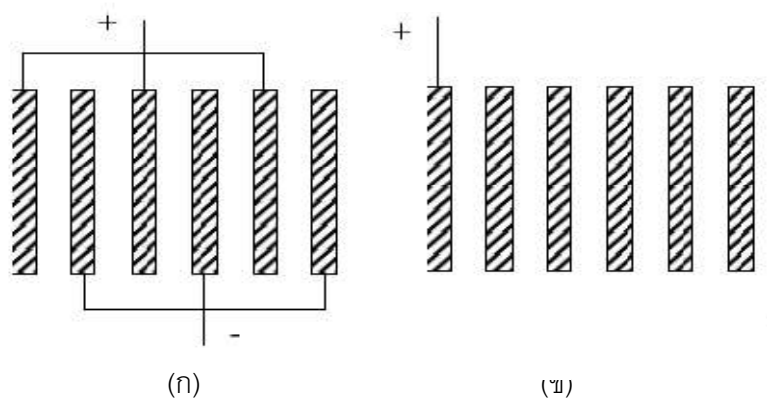
- Tank cell เป็นที่นิยมสำหรับการออกแบบ เนื่องจากเป็นรูปแบบที่สะดวกต่อการขยายหรือลดขนาดเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อนำไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ดังภาพที่

2.14



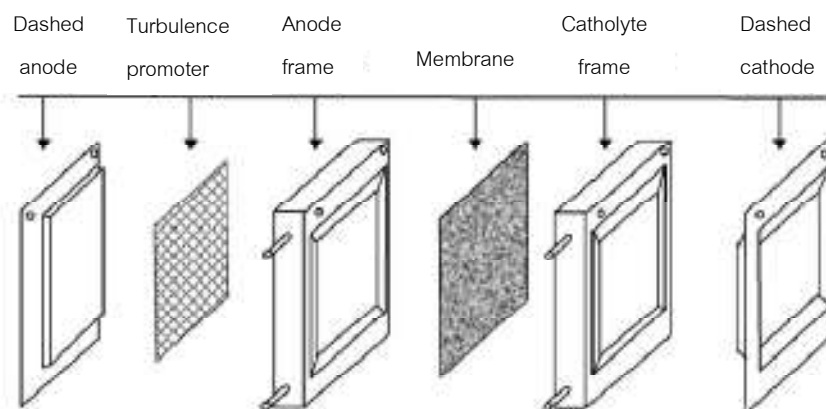
ภาพที่ 2.14 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Tank cell (Chen 2004)

การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบมอนอโพลาร์ (Mono-polar configuration) และแบบไบโพลาร์ (Bi-polar configuration) ดังภาพที่ 2.15



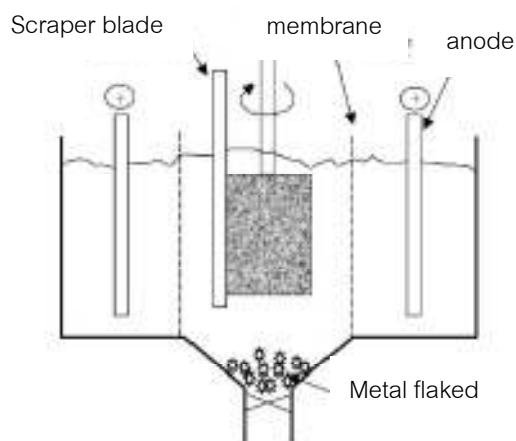
ภาพที่ 2.15 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้า (ก) แบบมอนอโพลาร์ และ (ข) แบบไบโพลาร์ (Chen 2004)

- Filter press เป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยมอีกรูปแบบหนึ่ง ประกอบด้วย ขั้วแอโนด ขั้วแคโทด และเยื่อเลือกผ่าน (ถ้าจำเป็น) โดยขนาดของเครื่องปฏิกรณ์จะขึ้นอยู่กับ ปริมาณของเสียที่ต้องการบำบัด ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Filter press (Chen 2004)

ถ้าระบบต้องการถ่ายเทมวลสารระหว่างผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ากับสารละลาย (Bulk solution) ให้มีค่าเพิ่มขึ้น สามารถทำได้โดยการออกแบบให้ขั้วแคโทดหมุนได้ซึ่งจะทำให้ การกำจัดโลหะหนักมีประสิทธิภาพมากขึ้น เครื่องปฏิกรณ์แสดงดังภาพที่ 2.17



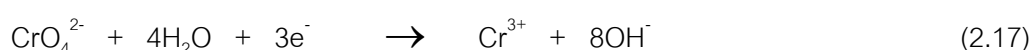
ภาพที่ 2.17 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Rotating cylinder electrode (Chen 2004)

2.5.1.2 วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า (Electrode materials)

- ขั้วแอโนด วัสดุที่จะนำมาใช้เป็นขั้วจะต้องไม่แตกตัวให้โลหะไอออน (M^+) หรือทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ เรียกขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ว่า Insoluble electrode เช่น Ti/RuO_2
- ขั้วแคโทด ในการบำบัดน้ำเสียนิยมใช้แกรไฟต์ หรือคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นเส้นเนื่องจากมีราคาถูก

2.5.2 กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้า (Electroprecipitation)

การกำจัดโลหะหนักบางชนิดด้วยกระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าชนิดไม่มีเยื่อเลือกผ่าน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักบางชนิดยังมีค่าต่ำอยู่ เช่น โครเมียม เนื่องจากโครเมียม (+3) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็นโครเมียม (+6) ที่ขั้วแอโนด จึงไม่สามารถกำจัดโครเมียมออกมาในรูปของโครเมียมไฮดรอกไซด์ ($Cr(OH)_3$) นอกจากนี้ที่ภาวะที่มีสัดส่วนของกรดซัลฟิวริกต่อโครเมียมออกไซด์ (CrO_3) เท่ากับ 1 ต่อ 100 โดยน้ำหนัก สามารถละลายตะกอนโครเมียมออกไซด์ได้ สำหรับการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสีย กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าชนิดมีเยื่อเลือกผ่าน ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วคือ ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดวางคร่อมแผ่นเยื่อเลือกผ่าน โดยเยื่อเลือกผ่านที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมี 2 ชนิด ได้แก่ เยื่อเลือกผ่านไอออนลบ (Anion-exchange membrane) และเยื่อเลือกผ่านไอออนบวก (Cation-exchange membrane) เยื่อเลือกผ่านไอออนลบจะยอมให้ไอออนลบในสารอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านได้ แต่ไอออนบวกจะผ่านไม่ได้ สำหรับเยื่อเลือกผ่านไอออนบวกจะมีลักษณะตรงข้ามคือ ไอออนบวกในสารอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านได้ แต่ไอออนลบจะผ่านไม่ได้ สำหรับน้ำเสียที่ประกอบด้วยโครเมียมหรือโลหะอื่นๆ โลหะหนักจะถูกกำจัดออกมาในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาของกระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้าแสดงดังสมการ (2.17) – (2.23) โดยปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด แสดงดังสมการ (2.17) - (2.21)



ภาวะเป็นกรด



ภาวะเป็นเบส



และจะเกิดการตกตะกอนของไฮดรอกไซด์ของโลหะตามมา



ฝั่งแคโทดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ (H_2O)

ภาวะเป็นกรด



ภาวะเป็นเบส



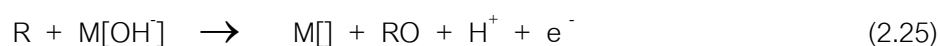
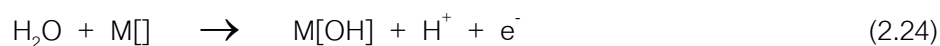
จากปฏิกิริยาข้างต้นพบว่าที่ฝั่งแคโทดจะมีความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีไฮดรอกไซด์ (OH^-) ไหลออกเกิดขึ้นตลอดเวลา และไฮดรอกไซด์ที่ไหลออกจะเกิดปฏิกิริยากับโลหะและตกตะกอนอยู่ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของโลหะที่ฝั่งแคโทดลดลง

2.5.3 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า (Israilides 1997)

กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า (Electro-oxidation) สามารถลดปริมาณของสารอินทรีย์และสารมลพิษในน้ำเสียได้ โดยสารอินทรีย์และสารมลพิษจะถูกทำลายด้วยอนุพันธ์ของ OH^\bullet (Hydroxyl radicals) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง เรียกกระบวนการนี้ว่า Direct anodic process สารอินทรีย์จะถูกออกซิไดส์โดยอนุพันธ์ของ OH^\bullet

ทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงจนกระทั่งกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังปฏิกิริยาที่ (2.24)

– (2.25)



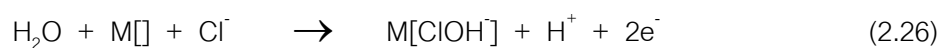
เมื่อ $\text{M}[\]$ คือ พื้นผิวของขั้วแอโนดที่เกิดปฏิกิริยา

$\text{M}[\text{OH}]$ คือ OH^\bullet ที่ดูดซับบนผิวของขั้วแอโนด

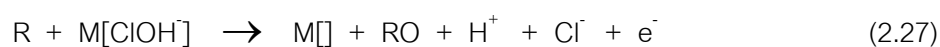
R คือ สารอินทรีย์

RO คือ ผลิตภัณฑ์ของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดส์

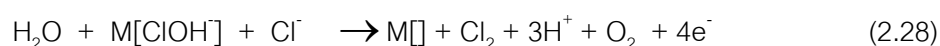
ถ้าในสารละลายมีคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ผสมอยู่ คลอไรด์ไอออนจะทำปฏิกิริยากับโลหะของขั้วไฟฟ้าเกิดเป็น ClOH^\bullet (Chlorohydroxyl radicals) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ ดังปฏิกิริยา (2.26)



เมื่อ $\text{M}[\text{ClOH}]$ คือ ClOH^\bullet ที่ดูดซับบนผิวของขั้วแอโนด สามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ดังปฏิกิริยา (2.27)

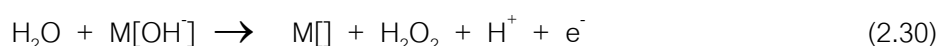
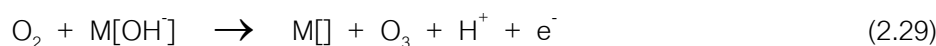


และ ClOH^\bullet สามารถทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดแก๊สคลอรีน (Cl_2) ตามปฏิกิริยา (2.28) ซึ่งช่วยลดปริมาณของเชื้อโรคในน้ำเสียได้



นอกจากนี้อนุพันธ์ของ OH^\bullet จะสลายตัวเป็นโอโซน (O_3) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ได้เช่นกันตามปฏิกิริยา (2.29) และ (2.30)

ประสิทธิภาพในการออกซิไดส์สารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับชนิดของขั้วแอโนดและ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง



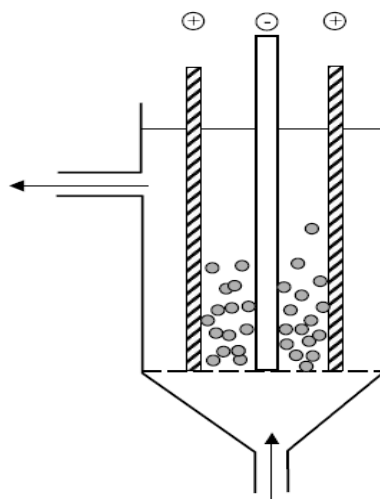
2.5.3.1 ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้

เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าสำหรับการออกซิเดชันสารมลพิษในน้ำเสียจะมีลักษณะคล้ายกับเครื่องปฏิกรณ์สำหรับนำโลหะหนักกลับคืน การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์จะพิจารณาถึงค่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า (Current efficiency) และระยะเวลา (Space time) โดยส่วนใหญ่จะออกแบบเป็น Bi-polar cell ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่น

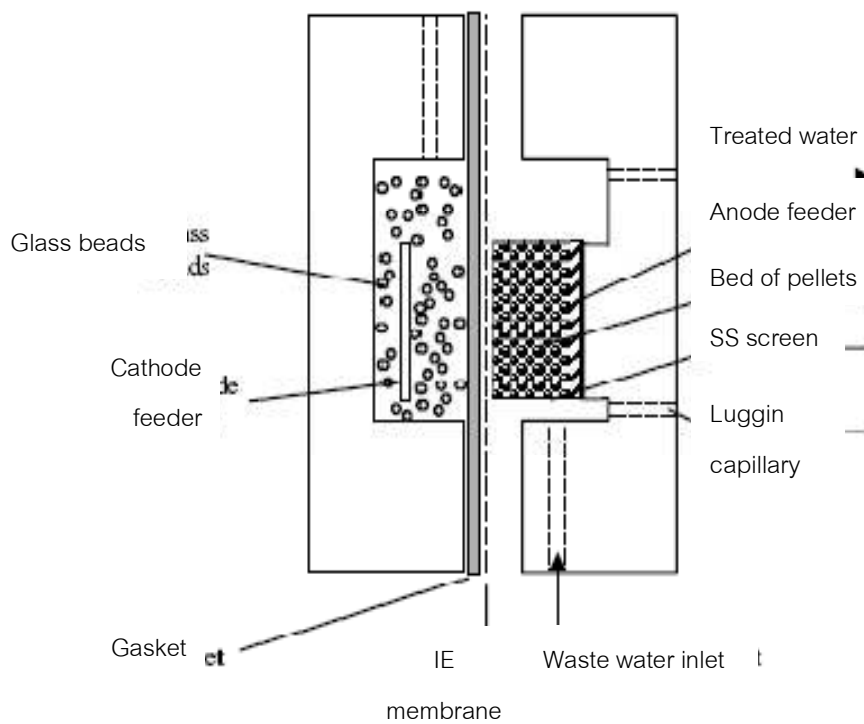
- ขั้วไฟฟ้าทรงกระบอก (Cylindrical electrode) ภาพที่ 2.18 เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วยขั้วแอโนดที่เป็นทรงกระบอก และมีอนุภาคทรงกลมของ Boron-doped diamond (BDD) อยู่ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ซึ่งทำให้เครื่องปฏิกรณ์มีคุณสมบัติเป็นแบบ Bi-polar cell

- เครื่องปฏิกรณ์แบบหอบบรรจุ (Packed bed) ภาพที่ 2.19 มีอนุภาคของเม็ดเบดขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร ถูกบรรจุไว้ที่ฝั่งของขั้วแอโนด

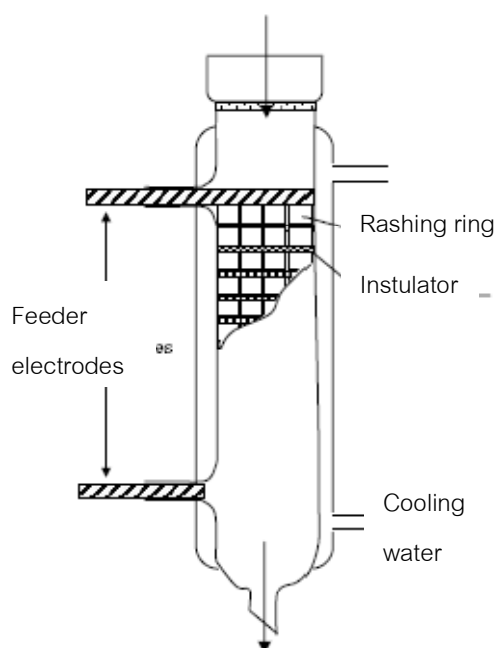
- Bi-polar trickle tower ภาพที่ 2.20 จะมีแผ่นกรองอยู่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อควบคุมการถ่ายโอนมวลสารที่ผิวของขั้วแอโนด หรือบางครั้งใช้ไบโอฟิล์มที่หนาจะทำให้สารตัวอย่างหยุดนิ่งบนผิวของขั้วไฟฟ้า เรียกเครื่องปฏิกรณ์นี้ว่า Bio electro ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพของสารจำพวกอนุพันธ์ไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน เมื่อมีจุลินทรีย์ที่อยู่บนผิวของขั้วแอโนด



ภาพที่ 2.18 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Cylinder electrode (Chen 2004)



ภาพที่ 2.19 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Packed bed (Chen 2004)



ภาพที่ 2.20 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Bi-polar trickle tower (Chen 2004)

2.5.3.2 ผลของขั้วแอโนดต่อการออกซิเดชัน

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบผลของขั้วแอโนดชนิดต่างๆ ต่อการออกซิเดชันสารมลพิษที่ภาวะต่างๆ และตัวแปรที่สำคัญต่อการพิจารณาประสิทธิภาพของขั้วแอโนดจะมี 2 ตัวแปร คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และบางครั้งอาจพิจารณาชนิดของสารมลพิษและความเข้มข้นของสารมลพิษด้วย

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบผลของขั้วแอโนดชนิดต่างๆ ต่อการเกิดออกซิเดชัน (Chen 2004)

ชนิด ขั้วแอโนด	สารมลพิษ	ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m ²)	ประสิทธิภาพ เชิงกระแส	ประสิทธิภาพการ กำจัดสารพิษ	หมายเหตุ
Granular -graphite	Phenol	0.03-0.032	70	50-70	อายุการใช้งาน 5 เดือน
Planar- graphite	Phenol	10-100	24.6-63.5	ร้อยละ 6-17 ของ ซีโอดี	โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น สารละลายอิเล็กโทรไลต์
Pt or Ti/Pt	Phenol	300		ร้อยละ 30 ของ คาร์บอน	พีเอช 12, 1000 มิลลิกรัม ต่อลิตร ในสารละลาย โซเดียมซัลเฟต 0.25 โมล
	Ammonia	8.5	53	ร้อยละ 95	ฟอตเฟตบัฟเฟอร์ปรับ พีเอชเท่ากับ 8.2 ทำให้การ กำจัดสารอินทรีย์ลดลง
	Glucose- 15 organic	100-900	15-20 5	ร้อยละ 30	กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมล
IrO ₂	Organic	ต่ำ	17		
	1,4- Benzoqui none				ขั้วของ IrO ₂ ทำให้วงของ 1,4-Benzoquinone แตก ตัวเท่านั้น
	Chlorinated	0.6	54		
	Phenol	50	1.8		
TiSnO ₂ - Sb ₂ O ₅	Glucose	100-900	< 20	ร้อยละ 30	กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมล
	2-Chloro phenol	80-160	35-40	ร้อยละ 85-90 ของซีโอดี	กรดออกซาลิกทำหน้าที่ เป็นสารตัวกลาง

ชนิด ขั้วแอโนด	สารมลพิษ	ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m ²)	ประสิทธิภาพ เชิงกระแส	ประสิทธิภาพการ กำจัดสารพิษ	หมายเหตุ
Ti/PbO ₂	Phenol	300		ร้อยละ 40 ของ คาร์บอน	พีเอช 12, 1000 มิลลิกรัม ต่อลิตร ในสารละลาย โซเดียมซัลเฟต 0.25 โมล
	Landfill- leachate	50-150		ร้อยละ 30 ของ ซีโอดี และร้อยละ 10 ของ NH ₄ +N	
	Glucose	100-900	30-40	ร้อยละ 100	กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมล
	2-Chloro phenol	80-160	35-40	ร้อยละ 80-95 ของซีโอดี	อยู่ในรูป Pb ²⁺ ความ เข้มข้นเริ่มต้นซีโอดี 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 25 องศาเซลเซียส
Ebonex ^R	Trichloro- ethylene	2.5-4.3 V	< 32	ร้อยละ 10-70	เสถียรในของเหลวที่ เกิดปฏิกิริยาของ Ti ₄ O ₇ เป็น TiO ₂
	Landfill- leachate				เหมือนกับ PbO ₂

2.5.4 กระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า หรือ Electrocoagulation: EC เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สะดวกและมีประสิทธิภาพสูง ในการลดสารมลพิษในน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการ EC สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของไขมัน น้ำมัน สีย้อม สารแขวนลอย สารอินทรีย์และโลหะหนัก เป็นต้น โดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกับการตกตะกอนด้วยสารเคมี คือ การทำให้อนุภาคของคอลลอยด์หรือสารมลพิษในน้ำเสียที่มีอนุภาคเล็กๆมารวมตัวกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นจนหนัก

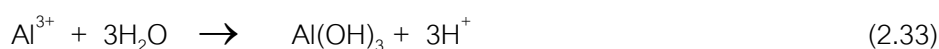
พอที่จะตกตะกอนลงมาโดยอาศัยสารสร้างตะกอน สารสร้างตะกอนนั้นนิยมใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต หรือสารส้ม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) หรือเฟอริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) แต่สำหรับกระบวนการของ EC นั้นจะใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดที่กัดกร่อนได้ (Sacrificial electrode) เช่น เหล็กหรืออะลูมิเนียมในการสร้างสารตกตะกอน โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้า โลหะที่เป็นขั้วแอโนดจะมีการสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นโลหะไอออนละลายอยู่ในน้ำเสียดังปฏิกิริยา (2.31) และ (2.34) โลหะไอออนเหล่านี้จะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Poly-nuclear metal hydroxyl complexes ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารสร้างตะกอนในกรณีที่ใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนด อะลูมิเนียมจะแตกตัวให้ Al^{3+} ไอออนในสารละลาย และ Al^{3+} จะรวมตัวกับ OH^- หรือ H_2O ขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบสของระบบ และตกตะกอนออกมาในรูปของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ดังปฏิกิริยา (2.32) และ (2.33)



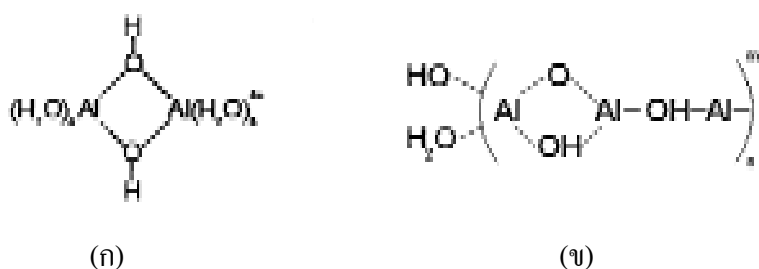
ภาวะสารละลายที่เป็นเบส



ภาวะสารละลายที่เป็นกรด



นอกจากนี้ Al^{3+} ไอออนในสารละลายรวมตัวกันกับ Polyhydroxides กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Poly-nuclear hydroxyl aluminum(III) complexes ซึ่งอาจจะเป็น Monomeric และ Polymeric แต่สุดท้ายสารประกอบเชิงซ้อนของ Al^{3+} ไอออนจะตกตะกอนในรูปของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ สำหรับตัวอย่างของ Polymeric ได้แก่ $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4-}$ $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$ $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$ และ $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ ซึ่งโครงสร้างของ Dimeric และ Polymeric aluminum(III) hydroxo complexes แสดงดังภาพที่ 2.23 (Mollah 2001)



ภาพที่ 2.21 โครงสร้างของ Poly-nuclear hydroxyl aluminum (III) complexes (ก) Dimeric Al^{3+} hydroxo complex และ (ข) Polymeric Al^{3+} hydroxo complex

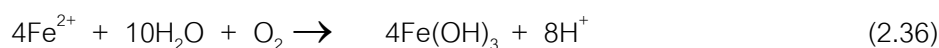
ในกรณีที่ใช้เหล็กเป็นขั้วแอโนด เหล็กจะแตกตัวให้ Fe^{2+} ในสารละลาย และตกตะกอนออกมาในรูปของ $(\text{Fe}(\text{OH})_n)_m$ เมื่อ $n = 2$ หรือ 3 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังสมการที่ (2.35) และ (2.36) (Laure 2003)



ภาวะสารละลายที่เป็นเบส



ภาวะสารละลายที่เป็นกรด



Fe^{3+} ในสารละลายสามารถรวมตัวกับ Polyhydroxides กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Poly-nuclear hydroxyl iron(III) complexes ซึ่งอาจเป็น Monomeric และ Ferric hydroxo complexes ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบส แต่สุดท้ายสารประกอบเชิงซ้อนของ Fe^{3+} จะตกตะกอนในรูปของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ สำหรับตัวอย่างของ Monomeric และ Ferric hydroxo complexes ได้แก่ $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{OH}^{2+}$ $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})^{2+}$ เป็นต้น (Murugunathan 2004)

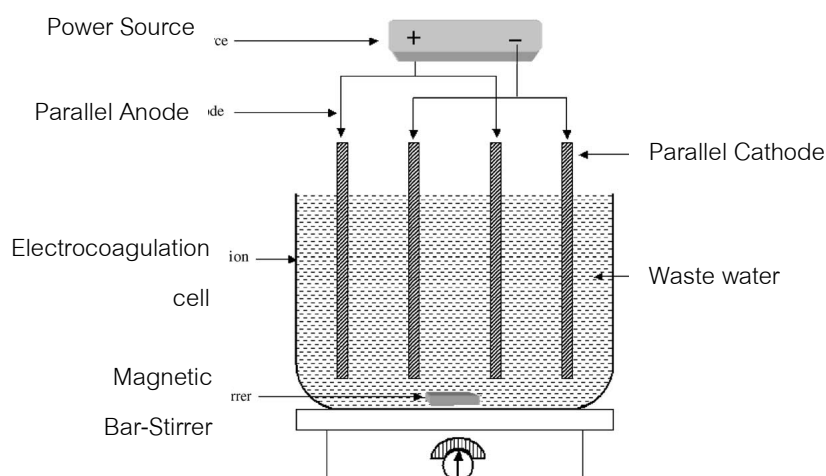
2.5.4.1 การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าของกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า (Mollah 2004)

การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์นั้นมี 2 แบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง เพื่อทำให้เกิดฟองแก๊สที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเป็นตัวพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้น แต่ถ้าระบบต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีการตกตะกอนควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวนอนโดยให้ขั้วแอโนดอยู่ด้านล่าง การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ง่ายที่สุดคือ ใช้ขั้วไฟฟ้าเพียง 1 คู่ โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนดและอีกขั้วหนึ่งเป็นแคโทด ซึ่งการวางแบบนี้ไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก ทำให้ต้องมีการจัดเรียงตัวของแผ่นขั้วไฟฟ้าแบบต่างๆขึ้น ในกรณีที่ต้องใช้ขั้วไฟฟ้ามากกว่า 1 คู่ สามารถเลือกวิธีต่อทางไฟฟ้าได้ 2 แบบ คือ

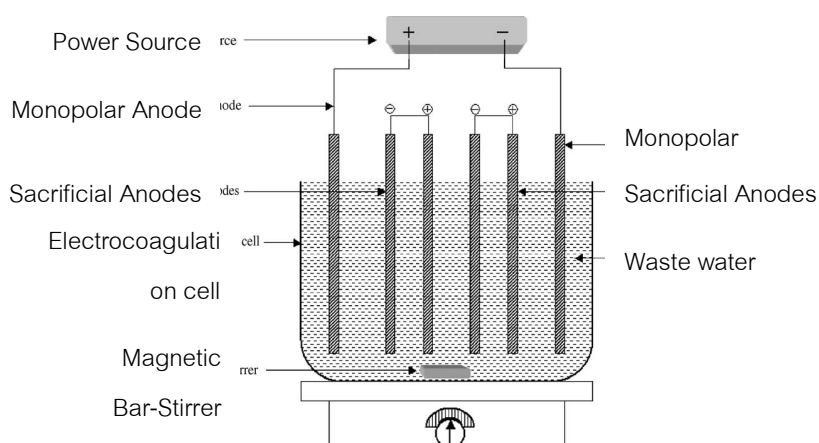
1) มอนอโพลาร์ (Monopolar electrode) มีจุดเชื่อมต่อของขั้วไฟฟ้าแต่ละแผ่นทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด ซึ่งวางสลับกันขั้วละแผ่นโดยที่ผิวหน้าทั้งสองด้านของขั้วไฟฟ้าแผ่นเดียวกันจะมีขั้วเดียวกัน ในทางไฟฟ้านั้นจะมีการจัดเรียงเซลล์ได้ 2 แบบ คือ

- แบบขนาน (Parallel connections) กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งให้แต่ละเซลล์ ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในของเซลล์นั้นๆ โดยที่ค่าความต่างศักย์ของระบบจะเท่ากัน ดังภาพที่ 2.24

- แบบอนุกรม (Series connections) มีการจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าคล้ายเซลล์เดี่ยวหลายๆ เซลล์มาต่อกัน โดยมีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้างดภาพที่ 2.25



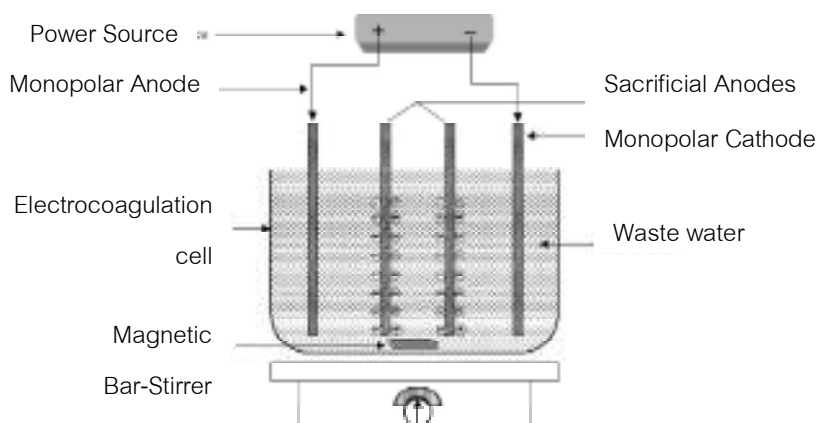
ภาพที่ 2.22 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน (Mollah 2004)



ภาพที่ 2.23 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Mollah 2004)

2) ไบโพลาร์ (Bipolar electrodes) มีจุดเชื่อมต่อของขั้วไฟฟ้าเพียง 2 จุดเท่านั้น เฉพาะขั้วไฟฟ้าที่อยู่ปลายนอกสุดดังภาพที่ 2.26 โดยแต่ละแผ่นของขั้วไฟฟ้ามีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบ ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดและอีกด้านหนึ่งเป็นขั้วบวกซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ซึ่งต่อแบบอนุกรม แต่จะมี

กระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากันนั่นคือ จะมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะที่ใช้งาน

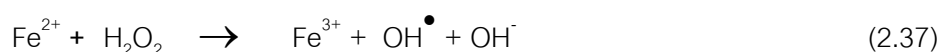


ภาพที่ 2.24 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (Mollah 2004)

2.5.5 กระบวนการเฟนตันและกระบวนการอเล็กโตรเฟนตัน

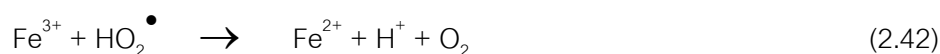
2.5.5.1 กระบวนการเฟนตัน (Fenton Process)

กระบวนการเฟนตันเป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีสองชนิดคือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเกลือของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่มีลักษณะเฉพาะสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลของสารเคมีที่เป็นพิษได้ โดยปฏิกิริยาระหว่าง H_2O_2 กับ Fe^{2+} เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคอล (Hydroxyl radical, OH^\bullet) ดังสมการที่ (2.37) ที่ไม่เสถียรและไวต่อการเกิดปฏิกิริยามาก และมีศักยภาพในการออกซิไดส์ทางเคมีสูง



นอกจากปฏิกิริยาดังกล่าวยังมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้นอีก แสดงได้ดังสมการข้างล่าง

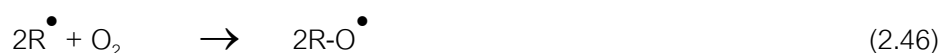




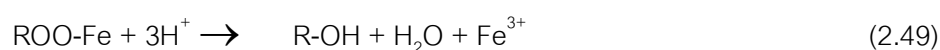
เมื่อระบบมีการผลิต OH^\bullet สารดังกล่าวจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ส่งผลให้ความเป็นพิษลดลง โดยกลไกในการเข้าทำปฏิกิริยาของ OH^\bullet และสารอินทรีย์หรือ สารมลพิษในน้ำเสียแสดงโดยสมการ (2.44)



อนุมูลอิสระของสารอินทรีย์ (R^\bullet) ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน ที่เกิดขึ้นในระบบอย่างรวดเร็ว ดังสมการ (2.45) – (2.46)



R-OO^\bullet และ 2R-O^\bullet เป็นสารที่ไม่เสถียรสามารถทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนและโปรตอนในระบบดังสมการ (2.47) – (2.51)





เมื่อสารอินทรีย์ถูกออกซิไดส์ด้วย OH^\bullet จะกลายได้อนุพันธ์ของแอลกอฮอล์ที่มีขนาดเล็ก (R-OH และ R-OOH) ซึ่งสามารถเกิดออกซิเดชันต่อเนื่องจนกลายเป็นน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในที่สุด (มารุต ไบราณานนท์ 2549) อย่างไรก็ตามพบว่าการสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลของกระบวนการเฟนตันจะมีประสิทธิภาพสูงภายใต้ภาวะที่เป็นกรด ในช่วงค่าความเป็นกรด-เบส 2-3 ปฏิกิริยาจะเกิดได้น้อยและช้าในภาวะที่เป็นด่าง

สำหรับอัตราเร็วของปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันจะเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น แต่หากอุณหภูมิมากกว่า 40-50 องศาเซลเซียส จะทำให้ประสิทธิภาพของ H_2O_2 ในการแตกตัวสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิจะส่งผลต่อการเร่งให้ H_2O_2 แตกตัวเป็น O_2 และ H_2O ดังนั้นกระบวนการเฟนตันสำหรับบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปจึงเกิดที่อุณหภูมิ 20-40 องศาเซลเซียส หากมีการนำระบบนี้ไปใช้บำบัดน้ำเสียในปริมาณมากๆ จำเป็นต้องควบคุมปริมาณ H_2O_2 ที่ใช้ในปฏิกิริยา เพราะอาจจะทำให้เกิดความร้อนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการปริมาณของ H_2O_2 เกิน 10-20 กรัมต่อลิตรในระบบ ตารางที่ 2.3 แสดงค่าศักยภาพในการออกซิไดส์ของสารออกซิไดซ์ พบว่าไฮดรอกซิล แรดิคอลลมีศักยภาพในการออกซิไดส์สูงเป็นอันดับสองรองจากฟลูออรีน (F_2) ซึ่งสูงกว่าโอโซนและสารประกอบคลอรีนที่ใช้เป็นสารออกซิแดนท์ทั่วไป ทำให้อนุมูลอิสระของไฮดรอกซิลแรดิคอลลสามารถกำจัดความเป็นพิษของสารปนเปื้อนได้หลากหลายชนิด

ตารางที่ 2.3 ศักย์ในการออกซิไดส์ของสารออกซิไดส์ที่นิยมใช้กับงานบำบัดน้ำเสีย (Bishop และคณะ 1975)

ชนิด	โวลต์
ฟลูออรีน	3.0
ไฮดรอกซิลแรดิคอล	2.8
โอโซน	2.1
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	1.8
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	1.7
กรดไฮโปคลอรัส	1.5
คลอรีนไดออกไซด์	1.5
คลอรีน	1.4
ออกซิเจน	1.2

2.5.5.2 กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (Electro-Fenton process)

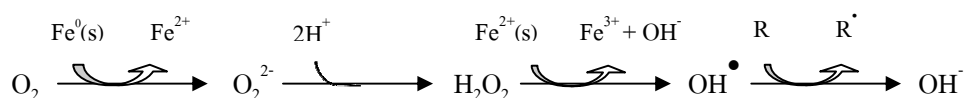
กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากกระบวนการนี้มีข้อดีคือ ใช้พื้นที่น้อยในการบำบัด ไม่เกิดสารเคมีตกค้างในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดสารปนเปื้อน และดำเนินการาง่าย กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันเป็นกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrocoagulation) และกระบวนการเฟนตัน (Fenton process) โดยกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า เป็นกระบวนการสร้างสารก่อการจับตัว (Coagulant) ด้วยกระแสไฟฟ้า ส่วนกระบวนการเฟนตันจะสร้างอนุมูลอิสระของ OH^\bullet จากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันแบ่งตามลักษณะของการเติมเฟนตันรีเอเจนต์ได้ดังนี้ (มารุต ปรากฏานนท์ 2549)

(ก) การเติมเฟอร์รัสไอออนในรูปของสารเคมี และผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ขั้วแคโทด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่ไม่ละลายในภาวะที่มีการออกซิเดชัน-รีดักชัน (Non-soluble electrode) เช่น แสตนเลส คาร์บอน แกรไฟต์

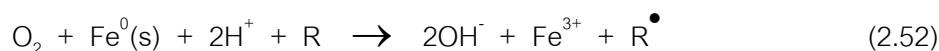
(ข) การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในรูปของสารเคมี และผลิตเฟอร์รัสไอออน จากปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าที่ขั้วแอโนด โดยใช้ไฟฟ้าที่ละลายได้ เช่น เหล็ก

(ค) การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในรูปของสารเคมี และผลิตเฟอร์รัสไอออน จากปฏิกิริยารีดักชันของเพอริกไอออน หรือตะกอนของเพอริกไฮดรอกไซด์

(ง) การผลิตเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า โดยใช้ขั้วแคโทดเป็นขั้วผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นี้เป็นผลผลิตที่ได้มาจากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนที่ขั้วแคโทด โดยปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนสามารถเกิดตามวิถี 2-อิเล็กตรอน (2-electron pathway) ดังสมการที่ (2.52)



หรือ



การผลิตเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า โดยใช้ขั้วแคโทดเป็นขั้วผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และใช้ขั้วแอโนดเป็นขั้วผลิตเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน แสดงดังสมการ (2.53)-(2.54)



นอกจากนี้ที่ขั้วแคโทดของกระบวนการเคมีไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง คือ เกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำได้ผลิตภัณฑ์เป็น H_2 และ OH^- ดังปฏิกิริยาที่

(2.55) - (2.56) โดย OH^- ที่เกิดขึ้นสามารถรวมตัวกับ Fe^{2+} กลายเป็นสารก่อจับก้อนในรูปของไฮดรอกไซด์ของมอนอเมอร์ ได้แก่ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ หรือ ไฮดรอกไซด์พอลิเมอร์เชิงซ้อนของไฮดรอกไซด์ (Polymeric hydroxyl complexes ได้แก่ $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})^{2+}$ $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2^+$ $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})(\text{OH})_2^{4+}$ และ $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})_4^{4+}$ (Chen, 2004) โดยไฮดรอกไซด์พอลิเมอร์เชิงซ้อนของไฮดรอกไซด์เหล่านี้จะทำให้เกิดการรวมตัวของสารมลพิษที่อยู่ในน้ำเสียเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และแขวนลอยในน้ำทำให้สามารถแยกสารมลพิษออกจากน้ำเสียได้อีกชั้นหนึ่ง



2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jaruwat และคณะ (2010) ศึกษาการจัดการน้ำเสียจากไบโอดีเซลด้วยกระบวนการร่วมกันระหว่างการนำกลับทางเคมีและกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ในขั้นตอนแรกเป็นการนำกลับไบโอดีเซลโดยใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) จากการศึกษาพบว่าสามารถนำกลับไบโอดีเซลได้ร้อยละ 6-7 โดยปริมาตร ที่ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 2-6 ภายหลังจากกระบวนการนำกลับสามารถกำจัดค่าบีโอดี ค่าซีโอดี และปริมาณน้ำมันและไขมันได้ร้อยละ 13-14 40-74 และ 87-98 ตามลำดับ ในขั้นตอนที่สองจะเป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าพบว่าภาวะที่เหมาะสมคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.28 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 0.061 โมลต่อลิตร ภาวะดังกล่าวสามารถกำจัดค่าบีโอดีและค่าซีโอดีได้ร้อยละ 95 และ 100 ตามลำดับ โดยการปริมาณน้ำมันและไขมันจะเร็วกว่าการกำจัดค่าบีโอดีและค่าซีโอดีเท่ากับ 8-16 และ 2-7 เท่า ตามลำดับ

Kumjadpai และคณะ (2010) ศึกษาถึงการจัดการน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการร่วมสองกระบวนการโดยการนำกลับทางเคมีและการตกตะกอนร่วมกระบวนการแรกจะเป็นการนำกลับไบโอดีเซลด้วยกระบวนการนำกลับทางเคมีโดยใช้กรดสามชนิด ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก โดยตัวแปรที่ศึกษาคือค่าความเป็นกรด-เบสที่ 1.0-8.0 พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับทางเคมีด้วยกรดซัลฟิวริกที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 1-2.5

และที่เวลา 7 นาที สามารถนำกลับไบโอดีเซลได้ประมาณ 15-30 มิลลิลิตรต่อลิตร ซึ่งสมบัติของไบโอดีเซลที่นำกลับได้พบว่าเป็นไปตามมาตรฐาน การบำบัดขั้นที่สองเป็นการนำชั้นน้ำจากการแยกชั้นของชั้นการนำกลับทางเคมีมาตกตะกอนร่วมด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟต $[Al_2(SO_4)_3]$ ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4.5-10 และพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2.5-7.0 พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนร่วมโดยอะลูมิเนียมซัลเฟต $[Al_2(SO_4)_3]$ ที่ปริมาตร 2 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัดค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และค่าน้ำมัน-ไขมัน ได้ถึงร้อยละ 98.3 97.7 และ 99.2 ตามลำดับ ส่วนพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ปริมาตร 1 กรัมต่อลิตร จะกำจัดค่าซีไอดี บีไอดี และปริมาณน้ำมัน-ไขมัน ได้ร้อยละ 98.2 96.5 และ 98.6 ตามลำดับ

Akyol และคณะ (2012) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสีด้วยกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า ตัวแปรที่ศึกษาคือ ชนิดของขั้วไฟฟ้า ได้แก่ อะลูมิเนียม และเหล็ก ค่าความกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสียในช่วง 2 ถึง 10 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 ถึง 80 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และระยะเวลาการบำบัด 0 ถึง 50 นาที จากการศึกษาพบว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 6.95 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 35 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ให้ค่าร้อยละการกำจัดค่า COD และ TOD เท่ากับ 94 และ 89 ตามลำดับ เมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ในขณะที่ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าได้ค่าร้อยละการลดลงของค่าร้อยละการกำจัดค่า COD และ TOD เท่ากับ 93 และ 88 ตามลำดับที่ภาวะเดียวกัน ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดคือ อะลูมิเนียม นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าจะมีตะกอนเกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการบำบัดในปริมาณที่มากกว่าอะลูมิเนียม กล่าวคือ ปริมาณตะกอนที่เกิดจากเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 9.63 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และอะลูมิเนียมเท่ากับ 7.73 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนเพิ่มขึ้น ดังนั้นขั้วอะลูมิเนียมจึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นขั้วไฟฟ้าเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพิษในน้ำเสียสูงกว่าและมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าเหล็ก

Khansorthong และ Hunsom (2009) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ โดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า โดยใช้ขั้วเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า จำนวน 6 ขั้ว จัดเรียงตัวแบบมอนอโพลาร์แบบขนาน ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ชนิดของสารเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าความเริ่มต้นของน้ำเสีย และอัตราการไหลวนของน้ำเสียภายในเครื่องปฏิกรณ์ จากการศึกษาพบว่าสารเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนไม่มีผลต่อการกำจัดสารพิษในน้ำเสีย และจากภาวะที่เหมาะสมในการทดลองสามารถกำจัดซีไอดีและค่าซีไอดีได้ร้อยละ 97 และ 77

ตามลำดับ สำหรับการบำบัดในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่าน้ำเสียอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 21.5 ชั่วโมง ระบบจะเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่งสามารถกำจัดซีไอดีและค่าซีไอดีได้ร้อยละ 91 และ 77 ตามลำดับ

Guo และคณะ (2010) ศึกษาการบำบัดน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบโดยใช้กระบวนการร่วมกันของกระบวนการไล้ด้วยอากาศ (Air stripping) กระบวนการเฟ้นต้น ระบบเอสปีอาร์ (Sequencing batch reactor) หรือระบบบำบัดทางชีวภาพ และกระบวนการรวมตะกอน เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย ค่าที่ทำการศึกษารวมประกอบด้วย ค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และค่าแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไล้ด้วยอากาศคือ ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 11 เวลาในการเติมอากาศ 18 ชั่วโมง ซึ่งสามารถกำจัดค่าแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) ได้ร้อยละ 96.6 ส่วนภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟ้นต้นคือ ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 3 ความเข้มข้นของ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ เท่ากับ 20 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร กำจัดค่าซีไอดีได้ร้อยละ 60.8 ส่วนผลของการย่อยสลายทางชีวภาพ พบว่าอัตราส่วนระหว่างค่าบีไอดีต่อซีไอดีเพิ่มขึ้นจากเดิมเท่ากับ 0.18 เป็น 0.38 แสดงว่ามีการย่อยสลายทางชีวภาพเกิดขึ้น ส่วนในระบบเอสปีอาร์ภาวะที่เหมาะสมคือ เวลาในการเติมอากาศ 20 ชั่วโมง กำจัดค่าบีไอดีและซีไอดีได้ร้อยละ 82.8 และ 83.1 ตามลำดับ และสุดท้ายสำหรับกระบวนการรวมตะกอนพบว่าสารที่ช่วยทำให้เกิดการตกตะกอน คือ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ที่ความเข้มข้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 สามารถลดค่าซีไอดีได้ 280 มิลลิกรัมต่อลิตร

มารุต ไปราณานนท์ (2549) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟ้นต้น พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมันในช่วง 150-450 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยภาวะที่เหมาะสมในระบบแบตซ์คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลวน 6 นาทีต่อลิตร และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร โดยที่ภาวะดังกล่าวสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าซีไอดี และค่าบีไอดี ที่เวลา 45 นาที ได้ร้อยละ 93.9 84.89 และ 88.9 ตามลำดับ เมื่อทำการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟ้นต้นในระบบต่อเนื่อง พบว่าที่อัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที การป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร แบบเป็นจังหวะ ที่อัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที จะสามารถลด

ปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าซีไอดี และบีไอดี ที่เวลา 60 นาที ได้ร้อยละ 92.5 79.6 และ 69.8 ตามลำดับ

Wang และคณะ (2009) ศึกษาการกำจัดค่าซีไอดีจากน้ำเสียสีข้มด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยใช้ถ่านกัมมันต์ไฟเบอร์ (Activated carbon fiber) เป็นขั้วแคโทด เต็มเฟอร์สไอออน (Fe^{2+}) ในรูปของสารเคมีจากภายนอก และทำการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ขั้วแคโทด จากการศึกษาพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการทดลองคืออัตราการป้อนออกซิเจนเท่ากับ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3.2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตร ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และความเข้มข้นของเฟอร์สไอออน (Fe^{2+}) เท่ากับ 2 มิลลิโมล โดยที่ภาวะดังกล่าวสามารถลดค่าซีไอดีได้ร้อยละ 75.2 ที่เวลา 240 นาที

Rosales และคณะ (2009) ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคอิเล็กโทรเฟนตันสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีข้มสังเคราะห์ ได้แก่ Lissamine B Methyl orange Reactive black 5 และ Fuchsin acid โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์และต่อเนื่อง จากการศึกษาพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการทดลองคือ ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ค่าความเข้มข้นของเฟอร์สไอออน (Fe^{2+}) เท่ากับ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลาที่เก็บน้ำ (Residence time) เท่ากับ 21 ชั่วโมง ซึ่งสามารถกำจัด Lissamine B และ Methyl orange ได้ร้อยละ 80 และสามารถกำจัด Reactive black5 ได้เพียงร้อยละ 60 ในระยะเวลาที่เก็บน้ำเท่ากัน

Yavuz และคณะ (2006) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตแอลกอฮอล์ด้วยกระบวนการร่วมกันระหว่างการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน โดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต ($NaSO_4$) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-เบส และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จากการศึกษาพบว่าภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน คือความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต ($NaSO_4$) ซึ่งใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์เท่ากับ 0.3 โมล ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่า 60 มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตร ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เท่ากับ 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดค่าซีไอดีและค่า TOC (Total Organic Carbon) ได้ร้อยละ 92.6 และ 88.7 ตามลำดับ และพบว่ากระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวไม่มีประสิทธิภาพมากพอที่จะกำจัดสารพิษที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้ ดังนั้น

จึงต้องทำการทดลองร่วมกับกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรเฟนตันจึงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารพิษในน้ำเสียดังกล่าวได้

Zhao และคณะ (2012) ศึกษาการบำบัดน้ำเสีย plugboard ด้วยกระบวนการร่วมกันระหว่างกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรเฟนตัน จากการศึกษาพบว่าในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวให้ค่าร้อยละการลดลงของซีโอดีเท่ากับ 30 แต่เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปในระบบ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียเพิ่มขึ้น เนื่องจากในระบบมีการทำปฏิกิริยากันระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออนเกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคอล ส่งผลให้ค่าซีโอดีในน้ำเสียลดลง โดยที่ความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 3 เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าระบบ พบว่าให้การลดลงของซีโอดีสูงเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 76 ในเวลาเพียง 5 นาที ดังนั้นการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวไม่สามารถกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียได้ดีพอ เนื่องจากองค์ประกอบหลักในน้ำเสียเป็นสารประกอบพวงวงแหวนหรือมีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรเฟนตันจัดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการสลายสารประกอบเหล่านี้ได้

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ โดยในการทดลองมีรายละเอียด ดังนี้

3.1 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในงานวิจัย

น้ำตัวอย่างที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) โดยเป็นน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างไบโอดีเซล ซึ่งมีลักษณะสีขาวขุ่นคล้ายนํ้านม ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างไบโอดีเซล

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส: SevenEasy pH METTLER TOLEDO; GmbH 8603
2. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง: Mettler Toledo; AB204-S
3. เครื่องกวนแม่เหล็ก: Aris Magnetic Stirrer; ME-20
4. เครื่องอังไอน้ำ: Memmert; WNB22
5. เครื่องดูดสูญญากาศ: EYELA; ASPIRATOR A-35

6. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ 20±1 องศาเซลเซียส: CONTHERM; 1300C
7. ตู้ดูดความชื้น (Dessicator): COAX GROUP
8. ตู้อบ (Oven): Memmert; D-91126
9. หลอดย่อย (Digestion vessels) ขนาด 20x150 มิลลิลิตร: PYREX
10. ขวด BOD ขนาด 250-330 มิลลิลิตร: WHEATON
11. กระดาษกรอง GF/C เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร: Whatman
12. กระดาษกรองเบอร์ 1 เส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร: Whatman
13. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง: GW Instek; GPR-6060D
14. เครื่องปั๊มอากาศ: Atman; At-A9500
15. Rotameter: Dwyer; RMA-26-SSV
16. ขั้วไฟฟ้า ได้แก่ แกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม และไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์
17. เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ: DURAN, PYREX

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. Gas Chromatography-Mass Spectrometry ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ

3.4 สารเคมี

3.4.1 การวิเคราะห์ซีไอดี

1. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$, Analytical grade; QReC)
2. กรดซัลฟิวริก (Conc. H_2SO_4 , Analytical grade; QReC)
3. ไอร์ออน(II)แอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$, UNIVAR)
4. สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroin Indicator, Mallinckrodt Chemicala)
5. ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4 , UNIVAR)
6. โพแทสเซียมไฮโดรเจนอะทาเลต (KHP, UNIVAR)

3.4.2 การวิเคราะห์บีไอดี

1. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4 , UNILAB)
2. ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4 , UNILAB)

3. ไตโซเดียมฟอสเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{PO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, CARLO ERBA)
4. แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl): CARLO ERBA)
5. แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, UNILAB)
6. แคลเซียมคลอไรด์ปราศจากน้ำ (Anhydrous CaCl_2 , Fisher Scientific)
7. เฟอริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, UNILAB)
8. แมงกานีสซัลเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Fisher Scientific)
9. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH , UNIVAR)
10. โซเดียมไอโอไดด์ (NaI , UNILAB)
11. โซเดียมเอไซด์ (NaN_3 , CARLO ERBA)
12. โซเดียมไธโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, UNIVAR)
13. กรดซัลฟิวริก (Conc. H_2SO_4 , Analytical grade; QReC)

3.4.3 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน-ไขมัน

1. เฮกเซน (n-Hexane, Analytical grade; QReC)
2. โซเดียมซัลเฟต ปราศจากน้ำ (Anhydrous Na_2SO_4 , UNILAB)

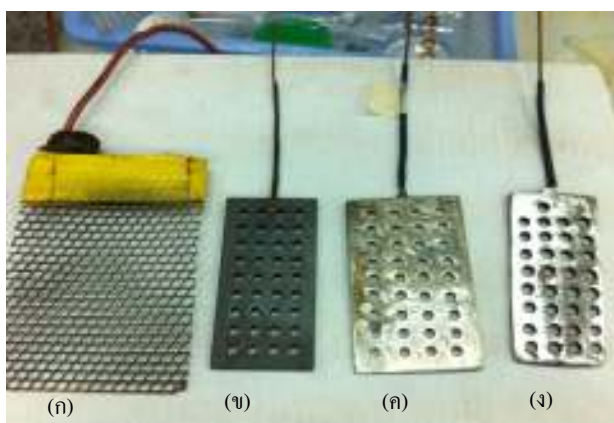
3.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.5.1 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่และขั้วไฟฟ้า

เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตเตอรี่แสดงดังภาพที่ 3.2 เป็นเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร สำหรับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน ขั้วแคโทดทำจากแกรไฟต์ (Graphite) เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) หรือไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ (Ti/RuO_2) มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 0.129 0.129 และ 1.65 ตารางเมตร ตามลำดับ ขั้วแอโนดทำจากเหล็ก พื้นที่ผิวเท่ากับ 0.123 ตารางเมตร แสดงดังภาพที่ 3.3 โดยที่ด้านล่างของขั้วแคโทดจะมีการป้องกันอากาศเข้าไปโดยเครื่องปั๊มอากาศ แสดงดังภาพที่ 3.4 และภาพที่ 3.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงต่อเข้ากับขั้วแคโทดและแอโนด



ภาพที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ที่ใช้ในระบบการอิเล็กโทรพอสิตัน



ภาพที่ 3.3 (ก) ไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ (ข) แกรไฟต์ (ค) เหล็กกล้าไร้สนิม และ (ง) เหล็ก



ภาพที่ 3.4 เครื่องบ่มอากาศ ยี่ห้อ Atman รุ่น At-A9500



ภาพที่ 3.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ยี่ห้อ GW Instek รุ่น GPR-6060D

3.5.2 การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้น (Pretreatment)

การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นเพื่อแยกน้ำมันไบโอดีเซลและกรดไขมันอิสระที่ตกค้างในน้ำเสียด้วยกรดซัลฟิวริกโดยการปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เท่ากับ 2 ด้วยกรดซัลฟิวริก และนำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที จะสังเกตเห็นน้ำตัวอย่างแยกเป็น 2 ส่วน เมื่อแยกส่วนบนออกแล้วนำส่วนล่างไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส ปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าบีโอดี และค่า ซีโอดี

3.5.3 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบแบตช์ โดยใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นแล้วปริมาตร 2 ลิตร ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่

3.5.3.1 ผลของการเติมและไม่เติมอากาศ ศึกษาผลของระบบบำบัดที่มีการเติมและไม่เติมอากาศ โดยใช้แอมไพต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาร้อยละการลดลงของค่าซีโอดี บีโอดี และน้ำมัน-ไขมัน

3.5.3.2 ผลของเวลา ศึกษาผลของเวลาต่อร้อยละการลดลงของค่าซีโอดี บีโอดี และน้ำมัน-ไขมัน ในช่วง 0-240 นาที โดยใช้แอมไพต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78

แอมแปร์ต่อตารางเมตร จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน

3.5.3.3 ผลของขั้วแคโทด ศึกษาผลของขั้วแคโทดต่อร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน ขั้วแคโทดที่ทำการศึกษา ได้แก่ แกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม และไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ โดยใช้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ในเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.5.3.2) จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน

3.5.3.4 ผลของอัตราการไหลของอากาศ ศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศในช่วย 1.0-2.5 ลิตรต่อนาที ต่อร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน ที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ภายในเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.5.3.2) และใช้ขั้วแคโทดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.5.3.3) จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน

3.5.3.5 ผลของค่าความเป็นกรด-เบส ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-เบสในช่วง 2-7 ต่อร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน ภายในเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.5.3.2) โดยใช้ขั้วแคโทดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.5.3.3) อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.5.3.4) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน

3.5.3.6 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 78-233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ต่อร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน ภายในเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.5.3.2) โดยใช้ขั้วแคโทดที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ (3.5.3.3) อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.5.3.4) ความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (3.5.3.5) จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน

3.6 การบำบัดซ้ำ

นำน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันแล้วมาทำการบำบัดซ้ำทั้งหมด 9 ครั้ง โดยทดลองในภาวะที่เหมาะสม จากนั้นนำน้ำเสียที่ได้ไปวิเคราะห์ร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และปริมาณน้ำมัน-ไขมัน

3.7 การวิเคราะห์ผล

นำตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมทรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry)

บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันจะเริ่มจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส ค่าซีไอดี ค่าบีไอดี ปริมาณน้ำมันและไขมัน และปริมาณของแข็งในน้ำเสีย จากนั้นศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อการลดลงของสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ผลของการเติมอากาศและไม่เติมอากาศ ชนิดของขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ ความเป็นกรด-เบส และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังศึกษาการบำบัดน้ำเสียซ้ำเพื่อให้ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีสมบัติที่ดีขึ้น และศึกษาจลนพลศาสตร์ของการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน

4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเป็นน้ำที่ใช้ล้างไบโอดีเซลเพื่อกำจัดกลีเซอรอลและสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ ที่สามารถละลายน้ำได้ โดยน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนนี้จะมีสีขาวขุ่นคล้ายน้ำมัน (ภาพที่ 4.1 (ก)) เมื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงมาก โดยมีค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 9-11 ค่าซีไอดีอยู่ในช่วง 116,800-118,400 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าบีไอดีอยู่ในช่วง 2,810-3,750 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าน้ำมัน-ไขมันอยู่ในช่วง 71,720-76,860 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยค่าความเป็นกรด-เบสสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 1-2 เท่า ค่าซีไอดีสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 292-296 เท่า บีไอดีสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 47-63 เท่า และปริมาณน้ำมัน-ไขมันสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 14,344-15,372 เท่า นอกจากนี้ค่าของแข็งละลายได้ (TDS) และค่าของแข็งแขวนลอย (TSS) ยังมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งประมาณ 2 เท่า และ 1-2 เท่า ตามลำดับ เมื่อทำการศึกษาองค์ประกอบที่มีอยู่ในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี (ภาพที่ 4.2 (ก)) พบว่าน้ำเสียประกอบด้วยกลีเซอรอลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล และกรดไขมันซึ่ง

เป็นส่วนประกอบในน้ำมันใช้แล้วที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต โดยกรดไขมันที่พบมีทั้งกรดไขมันอิ่มตัว ได้แก่ กรดปาล์มติก และกรดลอริก และกรดไขมันไม่อิ่มตัว ได้แก่ กรดโอเลอิก



(ก)



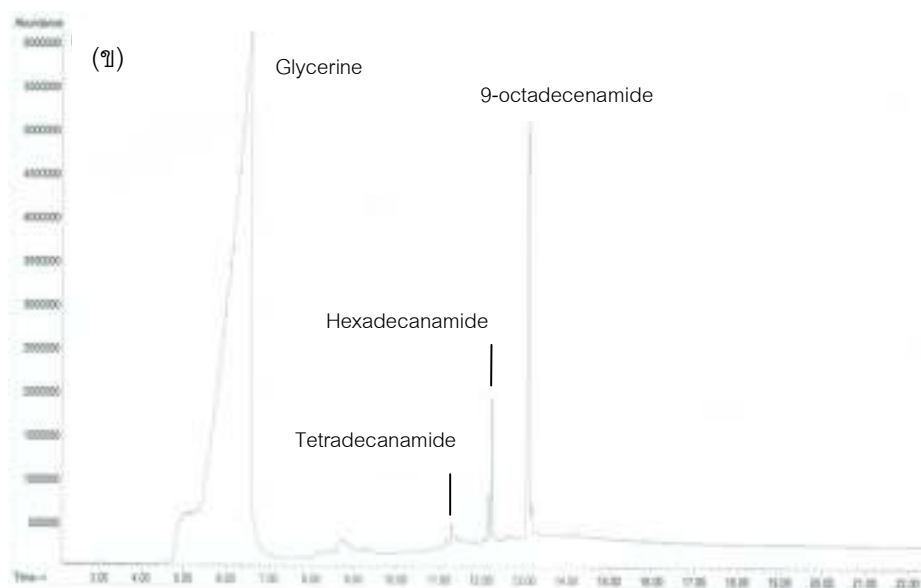
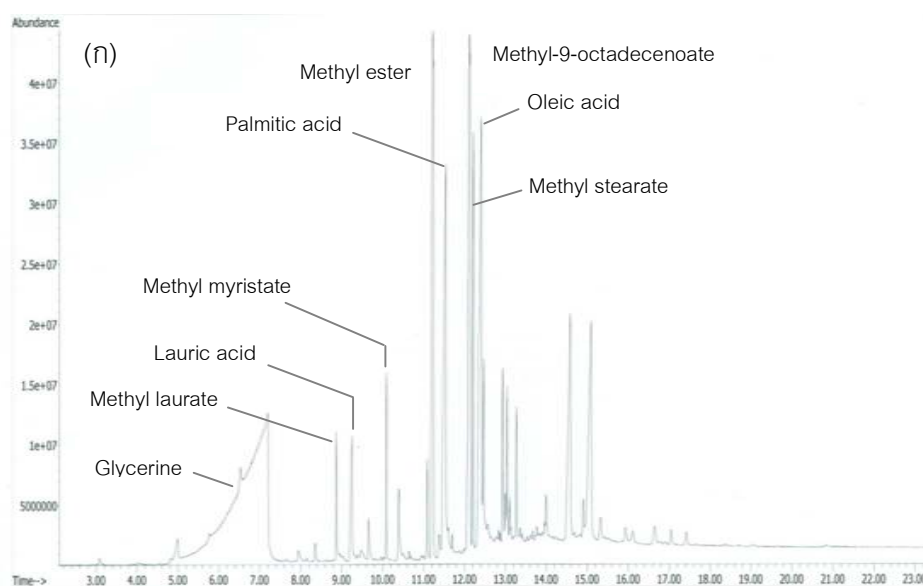
(ข)

ภาพที่ 4.1 (ก) ลักษณะน้ำเสียก่อนทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบส (ข) ลักษณะน้ำเสียหลังจากปรับค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ด้วยกรดซัลฟิวริก

ตารางที่ 4.1 สมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง	น้ำเสียก่อนบำบัด	น้ำเสียหลังการบำบัดเบื้องต้น
ค่าความเป็นกรด-เบส	5.5-9.0	9.5-10.7	2.0-2.4
ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 400	116,800-118,400	57,600-59,520
ค่าบีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 60	2,810-3,750	2,110-2,760
ค่าน้ำมัน-ไขมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 15	71,720-76,860	36,450-65,000
ของแข็งละลายได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	< 3,000	5,340-5,400	4,530-4,560
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	< 150	3,480-3,600	116-170

¹การบำบัดน้ำเสียขั้นต้น โดยการเติมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ปรับค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 (Jaruwat และคณะ 2010)



ภาพที่ 4.2 โครมาโตแกรมของแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี ของ (ก) น้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล และ (ข) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น

เมื่อนำน้ำเสียมาปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เท่ากับ 2 ด้วยกรดซัลฟิวริก และนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที 2 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 30 นาที (Jaruwat และคณะ 2010) จะ

สังเกตเห็นน้ำตัวอย่างแยกเป็น 2 ชั้น (ภาพที่ 4.1(ข)) โดยชั้นบนมีลักษณะเป็นน้ำมันสีน้ำตาล ส่วนชั้นล่างมีลักษณะเป็นสารละลายขุ่นโปร่งแสง เมื่อแยกชั้นบนออกและนำชั้นล่างไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมี ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส ค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และปริมาณน้ำมัน-ไขมัน พบว่าปริมาณสารมลพิษในน้ำเสียลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และปริมาณน้ำมัน-ไขมันมีค่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 49.7-50.7 24.9-26.4 และ 15.4-49.2 ตามลำดับ เนื่องจากการเติมกรดซัลฟิวริกลงไป น้ำเสียจะทำให้โครงสร้างเกลือของกรดไขมันอิสระหรือสบู่เกิดการรวมตัวกันกลายเป็นหยดน้ำมัน แสดงดังสมการ (4.1) เมื่อหยดน้ำมันมีปริมาณมากและอยู่ติดกันจะกลายเป็นชั้นน้ำมันและแยกตัวลอยอยู่ที่ผิวหน้าของชั้นน้ำ เมื่อนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี (ภาพที่ 4.2 (ข)) พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นยังคงมีองค์ประกอบหลักเป็นกลีเซอรอล ส่วนกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวนั้นไม่พบ แต่เกิดเป็นสารประกอบอินทรีย์พวกเอไมด์ ได้แก่ Hexadecanamide 9-octadecanamide และ Tetradecanamide



4.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในระบบแบตช์ โดยผลิตเฟอรัสไอออน (Fe^{2+}) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ขึ้นเองจากปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า โดยทำการเติมอากาศเข้าไปบริเวณด้านล่างของขั้วแคโทดเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนตามวิถี 2-อิเล็กตรอน (2-electron pathway) บนพื้นผิวของขั้วแคโทดได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ดังสมการที่ (4.2) ส่วนที่ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กได้ผลิตภัณฑ์เป็นเฟอรัสไอออน (Fe^{2+}) ดังสมการที่ (4.3) เฟนตันรีเอเจนต์ที่เกิดขึ้นในระบบคือ เฟอรัสไอออน (Fe^{2+}) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จะทำปฏิกิริยากันได้เป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH^\bullet) ดังสมการที่ (4.4)

ขั้วแคโทด



ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยาเฟนตัน



โดย OH^\bullet ที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารมลพิษในน้ำเสียส่งผลให้ความเป็นพิษของน้ำเสียลดลง โดยกลไกในการเข้าทำปฏิกิริยาของ OH^\bullet กับสารมลพิษในน้ำเสีย แสดงดังสมการที่ (4.5)



อนุมูลอิสระของสารอินทรีย์ (R^\bullet) ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนในระบบ (สมการ 2.45-2.46) และทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ Fe^{2+} และ H^+ ตามสมการ (2.47-2.51) จนได้อนุพันธ์ของแอลกอฮอล์ขนาดเล็ก (R-OH และ R-OOH) ที่มีความเป็นพิษลดลง ซึ่งอนุพันธ์ของสารเหล่านี้สามารถถูกออกซิเดชันต่อเนื่องได้เป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวจึงมีสมบัติที่ดีขึ้น

4.2.1 ผลของตัวแปรในการบำบัด

4.2.1.1 ผลของการเติมอากาศและไม่เติมอากาศ

ภาพที่ 4.3 แสดงผลของการเติมอากาศและไม่เติมอากาศต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล น้ำเสียที่ใช้มีค่าซีโอดี บีโอดี และน้ำมัน-ไขมัน เท่ากับ 80,080 970 และ 11,045 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ความเป็นกรด-เบสน้ำเสีย เท่ากับ 2 ใช้แอมไพร์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยการเติมอากาศเพียงอย่างเดียวกับการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน พบว่าการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันทั้งระบบที่มีการเติมอากาศและไม่มีการเติมอากาศมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารมลพิษในน้ำเสียได้สูงกว่าการเติมอากาศเพียงอย่างเดียว โดยการลดลงของซีโอดีเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 37.8

เป็นร้อยละ 52.3 ค่าบีโอดีเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 52.1 เป็นร้อยละ 61.1 และค่าน้ำมัน-ไขมันเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 43.9 เป็นร้อยละ 69.5 เนื่องจากการบำบัดด้วยกระบวนการอ็อกซิไดซ์ไดร็อกซิไดรเพนตันจะมีการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยสารที่มีศักยภาพในการออกซิไดส์สูงคือ OH^\bullet ส่งผลให้มีการลดลงของสารมลพิษมากขึ้น ในขณะที่การบำบัดแบบการเติมอากาศเพียงอย่างเดียวการลดลงของสารมลพิษจะเกิดจากจุลินทรีย์ในน้ำเสียใช้แก๊สออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์จนสุดท้ายได้ผลผลิตเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ และเมื่อพิจารณาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอ็อกซิไดซ์ไดรเพนตันในระบบที่มีการเติมอากาศและ ไม่มีการเติมอากาศ พบว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอ็อกซิไดซ์ไดรเพนตันในระบบที่มีการเติมอากาศจะให้ค่าการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียมากกว่าระบบที่ไม่มีการเติมอากาศ โดยจะทำให้ร้อยละการลดลงของค่าบีโอดีเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 44.0 เพิ่มเป็นร้อยละ 52.3 ร้อยละการลดลงของค่าบีโอดีเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 54.1 เป็นร้อยละ 61.1 และการลดลงของน้ำมัน-ไขมันเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 59.6 เป็นร้อยละ 69.5 เนื่องจากในระบบที่มีการเติมอากาศจะทำให้มีอัตราการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยพบว่ามีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 247 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ระบบที่ไม่มีการเติมอากาศมีเพียง 133 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ในระบบบำบัดที่มีการเติมอากาศมีการผลิต OH^\bullet ที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการลดลงของค่าบีโอดี บีโอดี และน้ำมัน-ไขมัน จะศึกษาปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 โดยอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยา ดังสมการ (4.6)

$$\text{Rate} = -\frac{d[A]}{dt} = k_1[A] \quad (4.6)$$

k_1 คือ ค่าของการเกิดปฏิกิริยาอันดับ 1 หน่วยเป็น t^{-1}

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 4.6 จากความเข้มข้นเริ่มต้น $[A]_0$ ที่เวลาเริ่มต้น $t = 0$ ไปถึงความเข้มข้น $[A]_t$ ที่เวลา t ใดๆ ได้เป็น

$$\ln \frac{[A]_t}{[A]_0} = -k_1 t \quad (4.7)$$

[A] คือ ความเข้มข้นของสารพิษ

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \frac{[A]_t}{[A]_0}$ และเวลา จะได้กราฟที่มีความชันเท่ากับ $-k_1$ (แสดงในภาคผนวก จ)

สำหรับปฏิกิริยาอันดับ 2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเขียนได้ ดังนี้

$$\text{Rate} = -\frac{d[A]}{dt} = k_2 [A]^2 \quad (4.8)$$

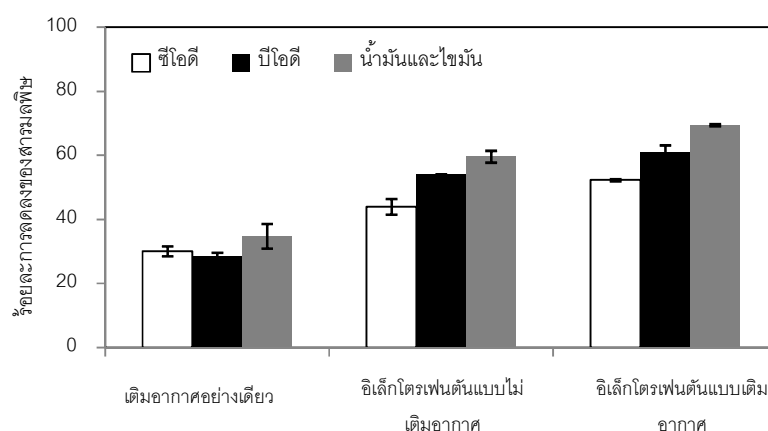
$$\int_{[A]_0}^{[A]_t} \frac{1}{[A]^2} d[A] = \int_0^t k_2 dt \quad (4.9)$$

$$\frac{1}{[A]_t} - \frac{1}{[A]_0} = k_2 t \quad (4.10)$$

$[A]_t$ คือ ความเข้มข้นของสารมลพิษ ที่เวลา t ใดๆ

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{1}{[A]_t} - \frac{1}{[A]_0}$ และเวลา จะมีความชันเท่ากับ k_2 (แสดงในภาคผนวก จ)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่า $\ln([A]_t/[A]_0)$ กับเวลาของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และ $(1/[A]_t - 1/[A]_0)$ กับเวลาของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง โดยเมื่อพิจารณาค่า R^2 ของซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน พบว่าปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมกว่าปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (แสดงดังตารางที่ 4.2-4.3) ดังนั้นปฏิกิริยาการกำจัดซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมันเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 และเมื่อพิจารณาความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา พบว่าปฏิกิริยาการกำจัดบีไอดี และในระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็คโตรเฟนตันแบบเดิมอากาศ พบว่า เกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด เนื่องจากมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน เท่ากับ 7×10^{-8} , 6×10^{-6} และ 9×10^{-7} ลิตรต่อโมล-นาที่ ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ผลของการเติมอากาศและไม่เติมอากาศต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เมื่อใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และอัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่ออนาที เวลา 180 นาที

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตัน

พารามิเตอร์	เดิมอากาศอย่างเดียว		อิเล็กโตรเฟนตันแบบไม่เติมอากาศ		อิเล็กโตรเฟนตันแบบเติมอากาศ	
	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²
ค่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์	0.001	0.914	0.002	0.989	0.005	0.978
ค่าไนโตรเจนไดออกไซด์	0.000	0.990	0.003	0.986	0.004	0.965
ค่าโอโซน-โอโซนพรีเคอร์ซอร์	0.001	0.850	0.005	0.965	0.008	0.963

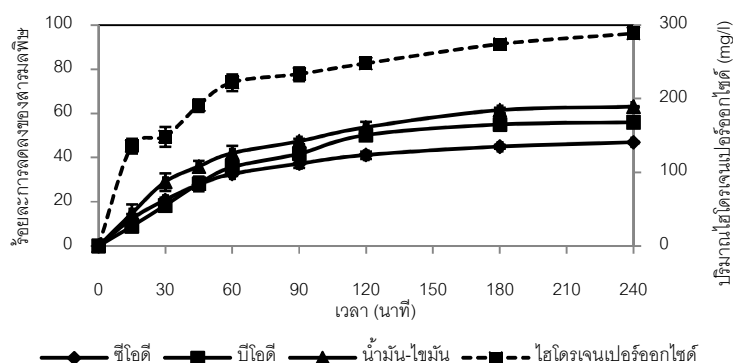
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่อัตราการผลิตปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็คโตรเฟนตัน

พารามิเตอร์	เติมอากาศอย่างเดียว		อิเล็คโตรเฟนตันแบบไม่เติมอากาศ		อิเล็คโตรเฟนตันแบบเติมอากาศ	
	k (L•mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L•mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L•mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
ค่าซีไอดี	2x10 ⁻⁸	0.923	4x10 ⁻⁸	0.994	7x10 ⁻⁸	0.988
ค่าบีไอดี	1x10 ⁻⁶	0.994	4x10 ⁻⁶	0.991	6x10 ⁻⁶	0.983
ค่าน้ำมัน-ไขมัน	2x10 ⁻⁷	0.889	6x10 ⁻⁷	0.986	9x10 ⁻⁷	0.970

4.2.1.2 ผลของเวลา

ภาพที่ 4.4 แสดงผลของเวลาต่อการลดลงของสารมลพิษ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการอิเล็คโตรเฟนตันในช่วง 0-240 นาที เมื่อใช้น้ำเสียที่มีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด พบว่าเวลาเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสีย กล่าวคือร้อยละการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป โดยร้อยละการลดลงของซีไอดีและบีไอดีจะเพิ่มขึ้นช้าๆ จนถึงนาทีที่ 180 และมีแนวโน้มเริ่มคงที่ที่ร้อยละ 45.0 และ 55.0 สำหรับร้อยละการลดลงของน้ำมัน-ไขมันมีแนวโน้มคงที่ที่ร้อยละ 61.4 ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันคือ มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการบำบัดสูงกว่า 180 นาที โดยมีค่าเท่ากับ 274 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นในการทดลองครั้งต่อไปจึงทำการทดลองในช่วง 0-180 นาที และจากการศึกษาปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน พบว่าความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า R² ใกล้เคียง 1 (แสดงดังตารางที่ 4.4-4.5) ดังนั้นปฏิกิริยาการกำจัดซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมันเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 โดยเมื่อพิจารณาความเร็วในการ

เกิดปฏิกิริยา พบว่าปฏิกิริยาการกำจัดบีโอดีเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด เนื่องจากมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับ 5×10^{-6} ลิตรต่อโมล-นาที่ ในขณะที่ปฏิกิริยาการกำจัดซีโอดี และ น้ำมัน-ไขมันมีค่าเท่ากับ 7×10^{-8} และ 8×10^{-7} ลิตรต่อโมล-นาที่ ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.5



ภาพที่ 4.4 ผลของเวลาต่อการลดลงของสารมลพิษและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่เวลา 0-180 นาที เมื่อใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และอัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	k (min ⁻¹)	R ²
ค่าซีโอดี	0.004	0.949
ค่าบีโอดี	0.004	0.972
ค่าน้ำมัน-ไขมัน	0.007	0.948

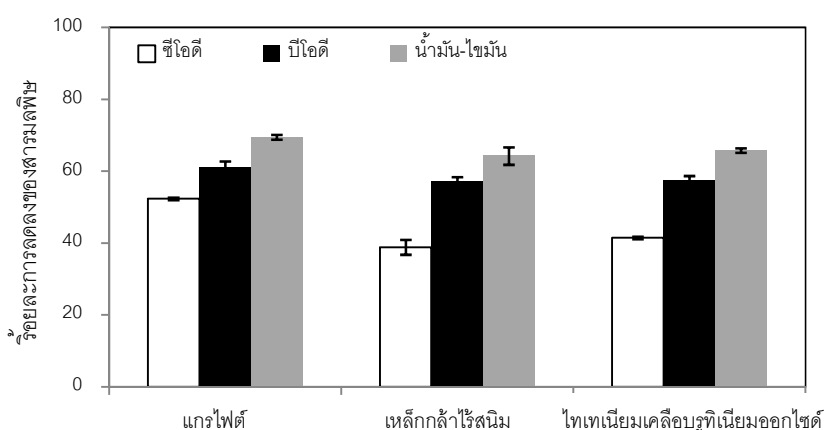
ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่อัตราการผลิตปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
ค่าซีไอดี	7×10 ⁻⁸	0.968
ค่าบีไอดี	5×10 ⁻⁶	0.988
ค่าน้ำมัน-ไขมัน	8×10 ⁻⁷	0.968

4.2.1.3 ผลของขั้วแคโทด

ภาพที่ 4.5 แสดงผลการเปรียบเทียบชนิดขั้วแคโทดต่อร้อยละการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ขั้วแคโทดที่ใช้คือ แกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม และไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ น้ำเสียที่ใช้มีค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และค่าน้ำมัน-ไขมันเริ่มต้นอยู่เท่ากับ 84,000 928 และ 10,196 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และเวลา 180 นาที พบว่าเมื่อใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด จะให้ร้อยละการลดลงของสารมลพิษสูงสุด โดยร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน เท่ากับ 52.3 61.1 และ 69.5 ตามลำดับ เนื่องจากแกรไฟต์เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวเหมาะสำหรับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนตามวิถี 2-อิเล็กตรอนที่ผิวของขั้วแกรไฟต์ (Droguet และคณะ 2000) ทำให้มีการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้สารมลพิษในน้ำเสียมีค่าลดลง และจากการหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบบำบัดที่ใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด พบว่ามีค่าเท่ากับ 227 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิม และไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์เป็นขั้วแคโทด พบว่ามีค่าเท่ากับ 129 และ 183 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sudoh และคณะ 1985 กล่าวไว้ว่าแกรไฟต์จัดเป็นวัสดุที่ดีที่สุดในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า ในขณะที่วัสดุอื่นๆ เช่น ทองแดง

เหล็กกล้าไร้สนิม ตะกั่ว และนิกเกิล เมื่อนำมาใช้เป็นขั้วแคโทดในกระบวนการเคมีไฟฟ้าจะทำให้เกิดการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และจากการศึกษาปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน พบว่าความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 (แสดงดังตารางที่ 4.6-4.7) ดังนั้นปฏิกิริยาการกำจัดซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมันเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 และเมื่อพิจารณาความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา พบว่าปฏิกิริยาการกำจัดบีไอดีเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด เนื่องจากมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับ 5×10^{-6} ลิตรต่อโมล-นาที่ ในขณะที่ปฏิกิริยาการกำจัดซีไอดี และน้ำมัน-ไขมันมีค่าเท่ากับ 7×10^{-8} และ 8×10^{-7} ลิตรต่อโมล-นาที่ ตามลำดับ ในระบบบำบัดที่ใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด แสดงดังตารางที่ 4.7



ภาพที่ 4.5 ผลของชนิดของขั้วแคโทดต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และอัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที่ เวลา 180 นาที

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	แกรไฟต์		เหล็กกล้าไร้สนิม		ไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์	
	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²
ค่าซีไอดี	0.004	0.949	0.0022	0.9197	0.0059	0.9594
ค่าบีไอดี	0.004	0.972	0.0033	0.9761	0.0067	0.9808
ค่าน้ำมัน-ไขมัน	0.007	0.948	0.0047	0.9716	0.0094	0.9614

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

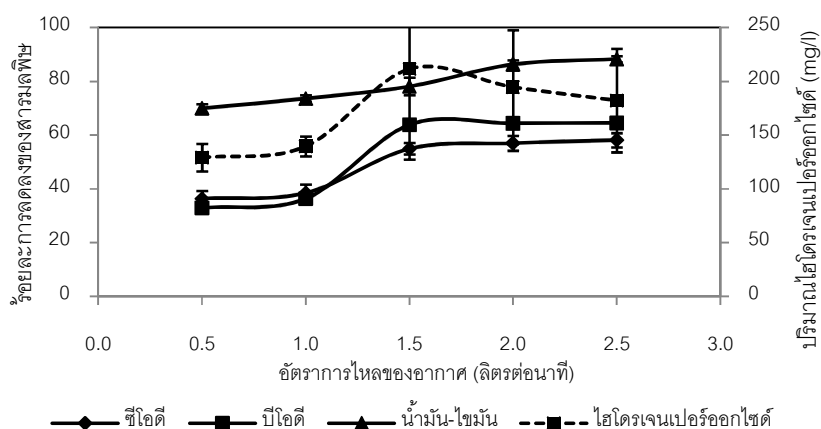
พารามิเตอร์	แกรไฟต์		เหล็กกล้าไร้สนิม		ไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์	
	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
ค่าซีไอดี	7x10 ⁻⁸	0.9968	3x10 ⁻⁸	0.9318	9x10 ⁻⁸	0.9790
ค่าบีไอดี	5x10 ⁻⁶	0.988	4x10 ⁻⁶	0.9909	7x10 ⁻⁶	0.9893
ค่าน้ำมัน-ไขมัน	8x10 ⁻⁷	0.968	6x10 ⁻⁷	0.9977	1x10 ⁻⁶	0.9868

4.2.1.4 ผลของอัตราการไหลของอากาศ

ภาพที่ 4.6 แสดงผลของอัตราการไหลของอากาศต่อการลดลงของสารมลพิษ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ในช่วง 0.5-2.5 ลิตรต่อนาที น้ำเสียที่ใช้มีค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมันเท่ากับ 80,408

1,150 และ 11,705 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที พบว่าอัตราการไหลของอากาศมีผลต่อร้อยละการลดลงของค่าซีโอดี บีโอดี และน้ำมัน-ไขมัน โดยการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศในช่วง 0.5-1.5 ลิตรต่อนาที ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 129 เพิ่มขึ้นเป็น 211 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ร้อยละการลดลงของน้ำมัน-ไขมันมีค่าสูงขึ้น จากร้อยละ 69.9 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 88.2 ในขณะที่ร้อยละการลดลงของซีโอดีและบีโอดี จะมีค่าสูงขึ้นจากร้อยละ 36.4 เป็นร้อยละ 54.9 และจากร้อยละ 32.9 เป็นร้อยละ 63.8 ทั้งนี้เนื่องจากในภาวะที่ระบบมีปริมาณแก๊สออกซิเจนละลายอยู่มาก อัตราการถ่ายโอนมวลของแก๊สออกซิเจนในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระบบมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศในช่วง 1.5-2.5 ลิตรต่อนาที พบว่ามีปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ลดลงจาก 211 เป็น 182 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงไม่ส่งผลต่อร้อยละการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียมากนัก โดยร้อยละการลดลงของซีโอดีเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 54.9 เป็นร้อยละ 58.1 ส่วนร้อยละการลดลงของบีโอดีเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 63.8 เป็นร้อยละ 64.5 และค่าน้ำมัน-ไขมันจากร้อยละ 78.1 ไปร้อยละ 88.2 เนื่องจากเมื่อระบบมีปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไป ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องดังสมการที่ 4.8 ทำให้ในระบบมีความเข้มข้น OH^\bullet ลดลง ร้อยละการลดลงของสารมลพิษจึงไม่เปลี่ยนแปลง และจากการศึกษาปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของการลดลงของค่าซีโอดี บีโอดี และน้ำมัน-ไขมัน พบว่าความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 (แสดงดังตารางที่ 4.8-4.9) ดังนั้นปฏิกิริยาการกำจัดซีโอดี บีโอดี และน้ำมัน-ไขมันเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 และเมื่อพิจารณาความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา พบว่าปฏิกิริยาการกำจัดบีโอดี และที่อัตราการไหลของอากาศ 2.5 ลิตรต่อนาที เกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด เนื่องจากมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับ 6×10^{-6} ลิตรต่อโมล-นาที ในขณะที่ปฏิกิริยาการกำจัดซีโอดี และน้ำมัน-ไขมันมีค่าเท่ากับ 5×10^{-8} และ 7×10^{-7} ลิตรต่อโมล-นาที ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.9





ภาพที่ 4.6 ผลของที่อัตราการไหลของอากาศต่อร้อยละการลดลงของสารมลพิษและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำเสียจากระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่อัตราการไหลของอากาศ 0.5-2.0 ลิตรต่อนาที เมื่อใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียเท่ากับ 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และเวลา 180 นาที

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	0.5 ลิตรต่อนาที		1.0 ลิตรต่อนาที		1.5 ลิตรต่อนาที		2.0 ลิตรต่อนาที		2.5 ลิตรต่อนาที	
	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²
ค่าซีไอดี	0.0014	0.9953	0.0018	0.8871	0.0037	0.9765	0.0029	0.8508	0.0026	0.9471
ค่าบีไอดี	0.001	0.992	0.0012	0.9224	0.0055	0.9849	0.0055	0.8751	0.0045	0.9535
ค่าน้ำมัน- ไขมัน	0.0057	0.945	0.0057	0.9872	0.0057	0.954	0.0112	0.9808	0.0167	0.9782

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

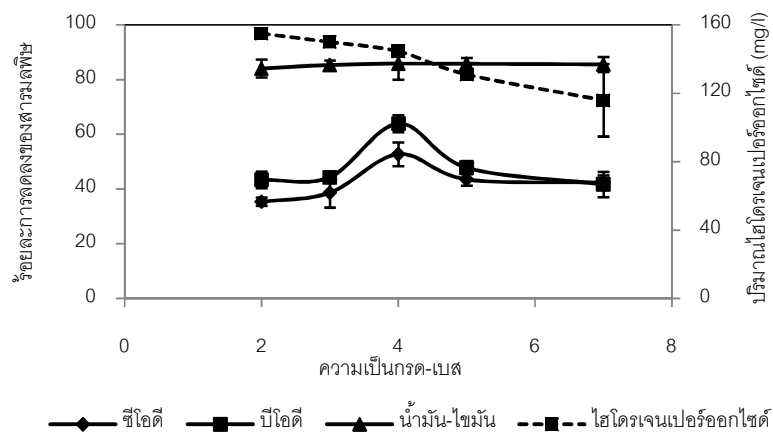
พารามิเตอร์	0.5 ลิตรต่อนาที		1.0 ลิตรต่อนาที		1.5 ลิตรต่อนาที		2.0 ลิตรต่อนาที		2.5 ลิตรต่อนาที	
	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
ค่าซีไอดี	2x10 ⁻⁸	0.996	2x10 ⁻⁸	0.8993	5x10 ⁻⁸	0.9768	4x10 ⁻⁸	0.9125	4x10 ⁻⁸	0.9654
ค่าบีไอดี	1x10 ⁻⁶	0.9882	1x10 ⁻⁶	0.9302	6x10 ⁻⁶	0.9803	6x10 ⁻⁶	0.9471	6x10 ⁻⁶	0.9811
ค่าน้ำมัน- ไขมัน	7x10 ⁻⁷	0.964	8x10 ⁻⁷	0.9693	7x10 ⁻⁷	0.964	2x10 ⁻⁶	0.9696	2x10 ⁻⁶	0.9993

4.2.1.5 ผลของค่าความเป็นกรด-เบส

ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพในการบำบัด เนื่องจากกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันเกิดขึ้นได้ดีในภาวะที่มีความเป็นกรด-เบสต่ำ หรือในภาวะกรด ดังนั้นหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียเริ่มต้นต่อร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน โดยน้ำเสียที่ใช้มีค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมันมีค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 85,360 993 และ 10,780 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ภาพที่ 4.7 แสดงผลของความเป็นกรด-เบส และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในช่วงความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2-7 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด เวลา 180 นาที พบว่าค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียมีผลต่อการลดลงของค่าซีไอดี และบีไอดีในน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือการลดลงของซีไอดี และบีไอดีจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากร้อยละ 35.4 ไปร้อยละ 52.8 และจากร้อยละ 43.4 ไปร้อยละ 63.9 เมื่อเพิ่มความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียจาก 2 ไป 4 ทั้งนี้เนื่องจากภาวะที่สารละลายมีความเป็นกรด-เบสต่ำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำ

ปฏิกิริยากับเพอร์ซไฮดรอกซิล OH^\bullet จึงถูกผลิตออกมา แต่เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรดเบสจาก 4 ไป 7 พบว่าค่าซีไอดีลดลงจากร้อยละ 52.8 ไปเป็นร้อยละ 42.4 และค่าบีไอดีลดลงจากร้อยละ 63.9 ไปเป็นร้อยละ 41.7 เนื่องมาจากในภาวะที่สารละลายเป็นเบสจะเกิดการตกตะกอนของเฟอริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) ส่งผลให้ระบบมีปริมาณ OH^\bullet ลดลง และความเข้มข้นของเพอร์ซไฮดรอกซิล (Fe^{2+}) ในระบบมีค่าลดลงด้วย อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มข้นของกรด-เบสในช่วงที่ศึกษาไม่ส่งผลต่อร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมัน-ไขมันอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเพิ่มความเข้มข้นของกรด-เบสจาก 2 ถึง 7 จะให้ร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมัน-ไขมันเท่ากับ 84.1 ไปร้อยละ 85.9 เมื่อพิจารณาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบ พบว่าในภาวะที่สารละลายมีค่าความเป็นกรด-เบสต่ำ มีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงสุดเท่ากับ 155 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าลดลงเมื่อภาวะของสารละลายมีค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้น เนื่องจากบริเวณผิวของขั้วแคโทดมีการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำเสียโดยอาศัยโปรตอนในสารละลายที่เป็นกรด และจากการศึกษาปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน พบว่าความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 (แสดงดังตารางที่ 4.10-4.11) ดังนั้นปฏิกิริยาการกำจัดซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมันเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 และเมื่อพิจารณาความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา พบว่าปฏิกิริยาการกำจัดบีไอดี และที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด เนื่องจากมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับ 6×10^{-6} ลิตรต่อโมล-นาที่ ในขณะที่ปฏิกิริยาการกำจัดซีไอดี และน้ำมัน-ไขมันมีค่าเท่ากับ 6×10^{-8} และ 7×10^{-7} ลิตรต่อโมล-นาที่ ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.11



ภาพที่ 4.7 ผลของความเป็นกรด-เบสต่อร้อยละการลดลงของสารมลพิษและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ความเป็นกรด-เบสในช่วง 2-7 อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เมื่อใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด และเวลา 180 นาที

ตารางที่ 4.10 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	pH 2		pH 3		pH 4		pH 5		pH 7	
	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²
ค่าชีไอดี	0.0015	0.9921	0.0019	0.5646	0.0037	0.7747	0.0024	0.8137	0.003	0.7315
ค่าบีไอดี	0.004	0.8331	0.0029	0.9309	0.0061	0.6596	0.0041	0.8858	0.0035	0.9645
ค่าน้ำมัน-ไขมัน	0.0095	0.9911	0.0233	0.6285	0.0117	0.7376	0.017	0.931	0.0154	0.9515

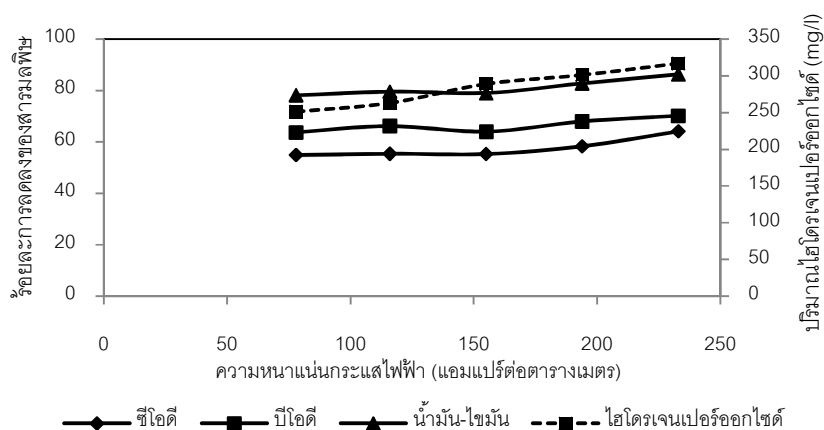
ตารางที่ 4.11 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	pH 2		pH 3		pH 4		pH 5		pH 7	
	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
ค่าซีโอดี	2x10 ⁻⁸	0.9933	2x10 ⁻⁸	0.577	6x10 ⁻⁸	0.7939	4x10 ⁻⁸	0.8312	4x10 ⁻⁸	0.7534
ค่าบีโอดี	4x10 ⁻⁶	0.8600	3x10 ⁻⁶	0.9442	6x10 ⁻⁶	0.7087	5x10 ⁻⁶	0.905	4x10 ⁻⁶	0.9689
ค่าน้ำมัน- ไขมัน	1x10 ⁻⁶	0.9848	6x10 ⁻⁶	0.7843	8x10 ⁻⁶	0.9707	5x10 ⁻⁶	0.9676	5x10 ⁻⁶	0.9786

4.2.1.6 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ภาพที่ 4.8 แสดงผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อการลดลงของสารมลพิษ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในช่วง 78-233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด เวลา 180 นาที น้ำเสียที่ใช้มีค่าซีโอดี บีโอดี และปริมาณน้ำมัน-ไขมันเริ่มต้นเท่ากับ 76,496 1,172 และ 11,687 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ศึกษาจะทำให้ร้อยละการลดลงของค่าซีโอดี บีโอดี และน้ำมัน-ไขมันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 78 116 155 194 และ 233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ให้ค่าร้อยละการลดลงของซีโอดีเท่ากับ 54.9 55.4 55.3 58.3 และ 64.1 ตามลำดับ ร้อยละการลดลงของค่าบีโอดีเท่ากับ 63.8 66.2 64.0 68.0 และ 70.2 ตามลำดับ และร้อยละการลดลงของค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมันเท่ากับ 78.1 79.5 79.0 82.7 และ 86.2 ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าจาก 78 เป็น 233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ทำให้มีการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 251 เพิ่มเป็น 317 มิลลิกรัมต่อลิตร และเฟอรัสไอออนในระบบก็สูงขึ้นเช่นกัน ตามกฎของฟาราเดย์ ส่งผลให้ร้อยละการลดลงของสารมลพิษเพิ่มขึ้นด้วย และจากการศึกษาปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และปฏิกิริยา

อันดับที่ 2 ของการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน พบว่าความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 (แสดงดังตารางที่ 4.12-4.13) ดังนั้นปฏิกิริยาการกำจัดซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมันเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 โดยเมื่อพิจารณาความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา และเมื่อพิจารณาความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา พบว่าปฏิกิริยาการกำจัด บีไอดี และที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด เนื่องจากมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับ 1×10^{-5} ลิตรต่อโมล-นาที่ ในขณะที่ปฏิกิริยาการกำจัดซีไอดี และน้ำมัน-ไขมันมีค่าเท่ากับ 1×10^{-5} และ 2×10^{-6} ลิตรต่อโมล-นาที่ แสดงดังตารางที่ 4.13



ภาพที่ 4.8 ผลของความหนาแน่นต่อการลดลงของสารมลพิษและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในช่วง 78-233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด และเวลา 180 นาที

ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า (Instantaneous current efficiency, ICE) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.9) (Rajkumar และคณะ 2005)

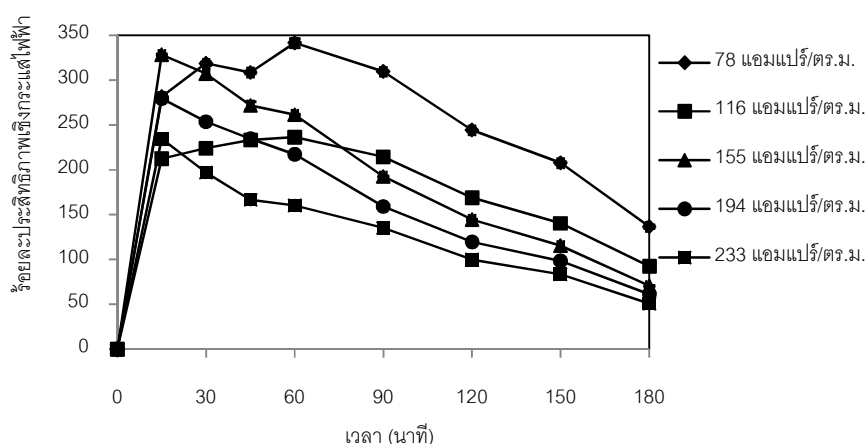
$$ICE(\%) = \frac{([\text{COD}]_t - [\text{COD}]_{t+\Delta t})FL}{8It} \times 100 \quad (4.9)$$

เมื่อ $[\text{COD}]_t$ คือ ค่าซีไอดีทั้งหมดที่เวลา t (gO_2/l)

$[\text{COD}]_{t+\Delta t}$ คือ ค่าซีไอดีทั้งหมดที่เวลา $t + \Delta t$ (gO_2/l)

- F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ (26.8Ah)
 I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า (A)
 L คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)
 V คือ โวลต์ (V)
 t คือ เวลา (h)

พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าจะมีค่าลดลง (ภาพที่ 4.9) เนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกกำจัดออกไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์มีค่าลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นประสิทธิภาพเชิงกระแสจะลดลง เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเร็วขึ้นด้วยการกระตุ้นของกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น และเมื่อให้กระแสไฟฟ้าที่มากเกินไปจนเกินค่าขีดของการเกิดปฏิกิริยา กระแสไฟฟ้าส่วนเกินนี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้นในระบบ (Bard และ Faulker 2001) ค่าร้อยละประสิทธิภาพเชิงกระแสมีค่าเกิน 100 เนื่องจากขั้วไฟฟ้าเกิดการกัดกร่อน ส่งผลให้มีปริมาณของเพอร์สไดออกไซด์ในระบบเพิ่มขึ้น อัตราการผลิตไฮดรอกซิลเรดิคอลลิงเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้ร้อยละประสิทธิภาพเชิงกระแสมีค่าเกิน 100 โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่เวลา 60 นาที ให้ค่าสูงสุดในการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความหนาแน่นอื่นๆ โดยให้ค่าร้อยละประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 341.5



ภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า กับเวลา ที่ความหนาแน่นกระแสต่างๆ

ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร		116 แอมแปร์ต่อตารางเมตร		155 แอมแปร์ต่อตารางเมตร		194 แอมแปร์ต่อตารางเมตร		233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร	
	k	R ²	k	R ²	k	R ²	k	R ²	k	R ²
	(min ⁻¹)		(min ⁻¹)		(min ⁻¹)		(min ⁻¹)		(min ⁻¹)	
ค่าซีโอดี	0.004	0.985	0.004	0.991	0.006	0.998	0.007	0.999	0.007	0.994
ค่าบีโอดี	0.006	0.983	0.007	0.983	0.007	0.985	0.008	0.993	0.010	0.987
ค่าน้ำมัน-ไขมัน	0.005	0.954	0.008	0.980	0.009	0.961	0.011	0.990	0.016	0.928

ตารางที่ 4.13 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร		116 แอมแปร์ต่อตารางเมตร		155 แอมแปร์ต่อตารางเมตร		194 แอมแปร์ต่อตารางเมตร		233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร	
	k	R ²	k	R ²	k	R ²	k	R ²	k	R ²
	(L·mol ⁻¹ ·min ⁻¹)		(L·mol ⁻¹ ·min ⁻¹)		(L·mol ⁻¹ ·min ⁻¹)		(L·mol ⁻¹ ·min ⁻¹)		(L·mol ⁻¹ ·min ⁻¹)	
ค่าซีโอดี	5×10 ⁻⁸	0.9761	5×10 ⁻⁸	0.9824	9×10 ⁻⁸	0.979	1×10 ⁻⁷	0.9776	1×10 ⁻⁷	0.963
ค่าบีโอดี	6×10 ⁻⁶	0.9803	7×10 ⁻⁶	0.9725	7×10 ⁻⁶	0.9893	9×10 ⁻⁶	0.9893	1×10 ⁻⁵	0.9975
ค่าน้ำมัน-ไขมัน	7×10 ⁻⁷	0.964	9×10 ⁻⁷	0.9926	1×10 ⁻⁶	0.9868	1×10 ⁻⁶	0.9644	2×10 ⁻⁶	0.9781

ตารางที่ 4.14 สมบัติของน้ำเสียหลังการบำบัดขั้นต้นและเมื่อผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน เปรียบเทียบกับสมบัติต่างๆ ของน้ำเสียก่อนการบำบัด

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง	น้ำเสียก่อนบำบัด	น้ำเสียหลังการบำบัดขั้นต้น ^ก	น้ำเสียหลังบำบัดด้วยอิเล็กโทรเฟนตัน ^ข
ค่าความเป็นกรด-เบส	5.5-9.0	9.5-10.70	2.00-2.40	6.15-6.17
ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 400	116,800-118,400	57,600-59,520	33,040-36,160
ค่าบีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 60	2,810-3,750	2,110-2,760	1,195-1,270
ปริมาณน้ำมัน-ไขมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 15	71,720-76,860	36,450-65,000	9,985-11,080
ของแข็งละลายได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	< 3,000	5,340-5,400	4,530-4,560	1,485-1,510
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	< 150	3,480-3,600	116-170	98-105

^ก การบำบัดน้ำเสียขั้นต้นโดยเติมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ปรับให้มีความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 (Jaruwat และคณะ 2010)

^ข การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 แกร์ไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และอัตราการป้อนอากาศเท่ากับ 1.5 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที

สมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน โดยใช้แกร์ไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และอัตราการเติมอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที แสดงดังตารางที่ 4.14 พบว่าสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้นค่อนข้างมาก แต่ยังคงมีค่าซีไอดี บีไอดี และปริมาณน้ำมัน-ไขมันที่เกินมาตรฐาน โดยค่าซีไอดีคงเหลือในน้ำเสียเท่ากับ 48,840 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเกินมาตรฐาน 120 เท่า บีไอดีคงเหลือ 1,270 มิลลิกรัม

ต่อลิตร เกินมาตรฐาน 21 เท่า และน้ำมัน-ไขมันคงเหลือ 11,080 มิลลิกรัมต่อลิตร เกินมาตรฐาน 739 เท่า ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 6.15 ส่วนค่าของแข็งละลายได้และค่าของแข็งแขวนลอยพบว่ามีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยมีค่าเท่ากับ 1,510 และ 105 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วยังมีลักษณะใส ไม่มีสีจึงไม่เป็นที่น่ารังเกียจ แสดงดังภาพที่ 4.10



น้ำเสียก่อนบำบัด

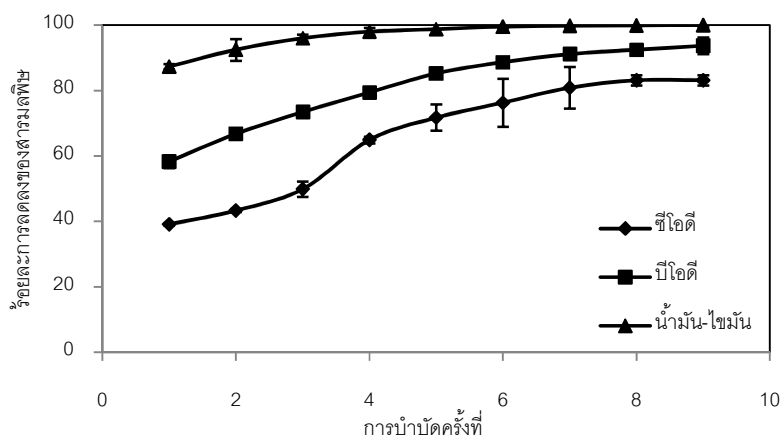


น้ำเสียหลังบำบัด

ภาพที่ 4.10 ลักษณะของน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

4.3 ศึกษาการบำบัดซ้ำโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

จากผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ยังคงมีสมบัติไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม แสดงดังตาราง 4.13 ทำให้ไม่สามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ได้ จึงต้องนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมาแล้วมาทำการบำบัดซ้ำ น้ำเสียที่ใช้มีค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมันเริ่มต้นเท่ากับ 58,560 2,435 และ 50,725 ตามลำดับ โดยภาวะที่ทดลองคือ ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 4 แกร์ไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และอัตราการป้อนอากาศเท่ากับ 1.5 ลิตรต่อนาที เวลา 180 นาที



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าร้อยละการลดลงของซีโอดี ปีโอดี และปริมาณน้ำมัน-ไขมันกับเวลา ที่การบำบัดครั้งต่างๆ โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และอัตราการป้อนอากาศเท่ากับ 1.5 ลิตรต่อนาที เวลา 180 นาที

ภาพที่ 4.11 แสดงค่าร้อยละการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดครั้งต่างๆ พบว่าร้อยละการลดลงของค่าซีโอดี ปีโอดี และน้ำมัน-ไขมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนในการบำบัด โดยร้อยละการลดลงของค่าซีโอดี ปีโอดี และน้ำมัน-ไขมันจะเพิ่มขึ้นช้าๆ จนถึงการบำบัดครั้งที่ 8 และ จะมีแนวโน้มคงที่ที่ร้อยละ 77 87 และ 99 ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มจำนวนการบำบัดจะทำให้ค่า ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารมลพิษมีค่าลดลง กล่าวคือ ค่าซีโอดี ปีโอดี และปริมาณน้ำมัน-ไขมันมีค่า ลดลงเช่นกัน โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดซ้ำครั้งที่ 9 พบว่าค่าน้ำมัน-ไขมันผ่านเกณฑ์มาตรฐาน คือ 13.5 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่สำหรับค่าซีโอดี และปีโอดียังคงมีค่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง โดยมีค่า คงเหลือเท่ากับ 9,867 153 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งซีโอดีเกินมาตรฐาน 25 เท่า และปีโอดี 3 เท่า

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการอเล็กโตรเฟนตัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. เมื่อนำน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาบำบัดเบื้องต้นด้วยการปรับค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ด้วยกรดซัลฟิวริก พบว่าสามารถลดค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน ได้ร้อยละ 50.7 26.4 และ 49.2 ตามลำดับ
2. การเติมและไม่เติมอากาศ ระยะเวลาในการบำบัด ชนิดของขั้วไฟฟ้า อัตราการไหลของอากาศมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ในขณะที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ในช่วงที่ศึกษามีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเล็กน้อย กล่าวคือ
 - ระบบที่มีการเติมอากาศให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียได้ดีกว่าระบบที่ไม่มีการเติมอากาศ โดยระบบที่มีการเติมอากาศมีค่าร้อยละการลดลงของซีไอดีเท่ากับ 52.3 บีไอดีเท่ากับ 61.1 และน้ำมัน-ไขมันเท่ากับ 69.5
 - ระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น ร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่เวลา 180 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอเล็กโตรเฟนตัน โดยให้ค่าร้อยละการลดลงของซีไอดีเท่ากับ 45.0 บีไอดีเท่ากับ 55.0 และน้ำมัน-ไขมันเท่ากับ 61.4
 - แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นขั้วแคโทดเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม และไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ ซึ่งให้ค่าร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีเท่ากับ 52.3 บีไอดีเท่ากับ 61.1 และน้ำมัน-ไขมัน 69.5
 - เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศมากขึ้น ร้อยละการลดลงของซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมันจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1.5 ลิตรต่อวินาที เป็นค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง โดยได้ค่าร้อยละการลดลงเท่ากับ 58.1 64.5 และ 88.2 ตามลำดับ
 - กระบวนการอเล็กโตรเฟนตันเกิดขึ้นได้ดีในภาวะที่เป็นกรด ดังนั้นค่าร้อยละการลดลง

ของค่า ซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดเบสต่ำ โดยที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 4 เป็นค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง โดยให้ร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีเท่ากับ 52.8 บีไอดีเท่ากับ 63.9 และน้ำมัน-ไขมันเท่ากับ 85.9

- เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าร้อยละการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย โดยที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง โดยให้ร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีเท่ากับ 54.9 บีไอดีเท่ากับ 63.8 และน้ำมัน-ไขมันเท่ากับ 78.1

3. อัตราการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมันจะดำเนินตามปฏิกิริยาอันดับ 2
4. การนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมาบำบัดซ้ำด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันจะทำให้ น้ำมีสมบัติที่ดีขึ้น โดยค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมันลดลงจาก 50,725 เหลือ 13.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อน้ำเสียผ่านการบำบัดครั้งที่ 9 ส่วนค่าซีไอดีและบีไอดีลดลง แต่ค่าเหล่านี้ยังสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากองค์ประกอบหลักในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลคือเมทานอลและกลีเซอรอล จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของ การบำบัดเบื้องต้นเพื่อแยกหรือกำจัดเมทานอลและกลีเซอรอลโดยตรง
2. เนื่องจากน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีค่าความเข้มข้นของสารมลพิษที่สูงมาก ในการบำบัดน้ำเสียควรจะมีการดำเนินการทดลองร่วมกับกระบวนการบำบัดอื่น เช่น กระบวนการตกตะกอน กระบวนการบำบัดทางกายภาพ หรือการกรองผ่านเมมเบรน เป็นต้น
3. ในระบบบำบัดน้ำเสียควรเพิ่มจำนวนขั้วแคโทดที่ใช้ในการทดลอง เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณสารมลพิษสูงมาก

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กระทรวงพลังงาน. วัตถุดิบที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.siambioenergy.com> [2 พฤษภาคม 2555]
- การผลิตกระแสไฟฟ้า. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: http://www.trueplookpanya.com/knowledge_detail.php?mul_content_id=423 [4 พฤษภาคม 2555]
- การผลิตไบโอดีเซล. [ออนไลน์]. 2545. แหล่งที่มา: <http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th/process.php> [4 พฤษภาคม 2555]
- ปาล์มและน้ำมันปาล์ม. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: <http://www.ปาล์มน้ำมัน.com> [2 พฤษภาคม 2555]
- มันสิน ตันทุลเวศม์. 2532. วิศวกรรมการประปา. เล่ม 1 กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เมล็ดเรพ. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: <http://www.stock2morrow.com/showthread.php?t=15679&page=1> [2 พฤษภาคม 2555]
- มารุต ปรุภานนท์. การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนทอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม 3, 2539.
- ศังกรม คงเจาะ. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกหนังในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: <http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th>. [9 พฤษภาคม 2555]

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พลังงานทดแทนไบโอดีเซล [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: <http://www.ipst.ac.th/chemistry/leader.html> [9 พฤษภาคม 2555]

ส่วนประกอบและหลักการทำงานของระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://bio-naroo.blogspot.com> [2 พฤษภาคม 2555]

อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย. ไบโอดีเซล (Biodiesel). [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: <http://www.vacharkarn.com/varticle/409/1> [4 พฤษภาคม 2555]

ภาษาอังกฤษ

Atadashi, I.M., Aroua, M.K., and Aziz, A.A. Biodiesel separation and purification: A review. Renewable Energy 36 (2011) : 437-443.

Bard A.J., and Faulkner L.R. Electrochemical Methods: Fundamental and Application 2nd edition (n.p.). Journal of Electroanalytical Chemical and Interfacial Electrochemistry 125 (2006) : 255-256.

Chen G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology 38 (2004) : 11-41.

Dugan, J. A day wash approach to biodiesel purification. [online]. 2007. Available from: <http://biodieselmagazine.com/articles/a-dry-wash-approachtobiodiesel.purification/> [2011, November 01]

Guo J.S., Abbas A.A., Chen Y.P., Liu Z.P., Fang F and Chen. P, Treatment of landfill leachate using a combined stripping, Fenton, SBR and coagulation process. Journal of Hazardous Material 178 (2010) : 699-705.

Hunsom M. Recovery of copper, chromium and nikel from electroplating effluent by electrochemical technique. A Dissertation of doctor of Philosophy in Chemical Technology, Department of chemical technology, Faculty of Science, Chulalongkorn university, 2001.

- Israilides C.J., Vlyssides A.G., Mourafeti V.N., and Karvouni G. Olive oil wastewater treatment with the use of an electrolysis system. Bioresource Technology 61 (1997) : 163-170.
- Jaruwat P., Kongjao S and Hunsom M. Management of biodiesel wastewater by the combined processes of chemical recovery and electrochemical treatment. Energy Conversion and Management 51 (2010) : 531-537.
- Kumjadpai S., Ngamlerdpokin K., Chatanon P., Lertsathitphongs P., and Hunsom M. Management of Fatty Acid Methyl Ester (FAME) wastewater by a combined two stage chemical recovery and coagulation process. Journal of Chemical Engineering 9999 (2010) : 1-8.
- Khansorthong S., and Hunsom M. Remediation of wastewater from pulp and paper mill industry by the electrochemical technique. Chemical Engineering Journal 151 (2009) : 228-234.
- Qiang Z., Chang J.H., and Huang C.P. Electrochemical generation of hydrogen peroxide from dissolved oxygen in acidic solutions. Water Research 36 (2002) : 85–94.
- Rajkumar D., Kim J.G., and Palanivelu K. Indirect electrochemical oxidation of phenol in the presence of chloride for wastewater treatment. Chem Eng Technol (2005) : 98-105.
- Sridhar R., Sivakumar V., Immanuel V.P., and Maran J.P. Treatment of pulp and paper industry bleaching effluent by electrocoagulant process. Journal of Hazardous Materials 186 (2011) : 1495-1502.
- Sudoh M., Kitaguchi H., and Koide K. Electrochemical production of hydrogen peroxide by reduction of oxygen, J. Chem. Eng. Jpn. 18 (1985) : 409-414.
- The Treatment Wastewater. [online]. Available from: www.thewatertreatments.com [2012, May 07]
- Wang C.T., Hu J.L., Chou W.L., and Kuo Y.M. Removal of color from real dyeing wastewater by Electro-Fenton technology using a three-dimensional graphite cathode. Journal of Hazardous Materials 152 (2008) : 601-606.

- Wang L. and Balasubramanian N. Electrochemical regeneration of granular activated carbon saturated with organic compounds. Content Engineering Journal 155 (2009) : 763-768.
- Yavuz Y. EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater. Separation and Purification Technology 53 (2006) : 135-140.
- Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R., and David L. Electrocoagulation (EC)-science and applications. Journal of Hazardous Materials B84 (2001) : 29–41.
- Zhou M., YU Q., Lei L., and Barton G. Electro-Fenton method for the removal of methyl red in an efficient electrochemical system. Separation and Purification Technology 57 (2007) : 380-387.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ความหมายของค่าพารามิเตอร์ในน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์ 2543)

ค่าพารามิเตอร์ (Parameter)

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าสิ่งเจือปนในน้ำเสียมีหลายชนิด ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมและสะดวกในการวิเคราะห์สิ่งเจือปนดังกล่าว จึงได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญและมักจะกำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งที่ควรทราบ

1.1 ค่าพีเอช (pH) หรือ (Positive potential of the hydrogen ions) เป็นค่าที่แสดงถึงภาวะความเป็นกรดและเบส ซึ่งสิ่งที่ชี้บ่งบอกความเป็นกรดคือ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน $[H^+]$ และสิ่งที่ชี้บ่งบอกความเป็นเบสคือ ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน $[OH^-]$ เนื่องจากพีเอชสเกลอยู่ในช่วง 0 ถึง 14 โดยสามารถแบ่งภาวะความเป็นกรด เบส และกลางได้ดังนี้ กล่าวคือ เมื่อพีเอชมีค่าเท่ากับ 7 แสดงว่าสารละลายมีสภาพเป็นกลาง ถ้าค่าพีเอชมีค่าน้อยกว่า 7 แสดงว่าสารละลายเป็นกรด หรือค่าพีเอชมีค่ามากกว่า 7 แสดงว่าสารละลายเป็นเบส โดยค่าทั่วไปค่า pH ของสารละลายในสภาพปกติจะมีค่าอยู่ในช่วง 6-8 ซึ่งจะไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ค่าพีเอชมีสมการดังนี้

$$pH = -\log[H^+] \quad \text{หรือ} \quad pH = \log \frac{1}{[H^+]}$$

1.2 ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) เป็นการวัดความสามารถของน้ำที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน คุณสมบัตินี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ชนิดของไอออนในน้ำและอุณหภูมิ ค่าการนำไฟฟ้านั้นไม่ได้เป็นค่าเฉพาะไอออนตัวใดตัวหนึ่ง แต่เป็นค่ารวมของไอออนทั้งหมดในน้ำ หากค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหมายความว่า มีสารที่แตกตัวในน้ำเพิ่มขึ้น และหากค่าการนำไฟฟ้าลดลงแสดงว่ามีสารที่แตกตัวในน้ำได้ลดลง

1.3 บีโอดี (BOD) หรือ (Biochemical Oxygen Demand) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ (Decomposable) ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ผลพลอยได้จากการออกซิเดชันนี้ทำให้แบคทีเรียได้รับพลังงานไปใช้ในการเจริญเติบโตเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ หรือแอมโมเนีย ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร ค่าบีโอดีหาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO: Dissolved Oxygen) ที่ถูกใช้ไปโดย

จุลชีพ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ณ ปัจจุบัน เรียกว่า DO_0 และในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในเวลา 5 นาที ภายใต้อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เรียกว่า DO_5

1.4 ซีโอดี (COD) หรือ (Chemical Oxygen Demand) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำทางเคมีให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยอาศัยหลักที่ว่า สารอินทรีย์เกือบทั้งหมดสามารถถูกออกซิไดซ์โดยตัวเติมออกซิเจนอย่างแรกภายใต้ภาวะที่เป็นกรด ดังสมการ



จัดเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงให้เห็นว่าน้ำนั้นมีความสกปรกที่เกิดจากสารอินทรีย์ อยู่ในระดับมาก-น้อยเพียงใด

1.5 น้ำมันและไขมัน คือ สารส่วนใหญ่ที่ได้มาจากพืชและสัตว์ที่ใช้ในการประกอบอาหารและจากอุตสาหกรรมต่างๆอีกด้วย เช่น โรงฟอกหนัง โรงฆ่าสัตว์ บางส่วนได้มาจากน้ำมันและไขมันที่ใช้หล่อลื่นเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม โดยสารเหล่านี้ส่วนใหญ่ลอยน้ำได้ซึ่งขัดขวางการแพร่ของออกซิเจนลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้แหล่งรับน้ำเสียเกิดสภาพที่ไม่น่าดูและน้ำเน่าเสียได้ง่าย

1.6 ของแข็งทั้งหมด (Total Solid, TS) ของแข็ง หมายถึง สารหรือสิ่งเจือปนที่เหลืออยู่หลังจากผ่านการนำน้ำออกแล้ว ไม่รวมถึงสารที่ไม่ระเหยไปกับน้ำ สิ่งที่เหลืออยู่หรือตะกอนมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งอาจจะละลายน้ำหรือไม่ละลายก็ได้ สามารถแบ่งของแข็งออกเป็นชนิดต่างๆ ดังนี้

1.6.1 ของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solids, TDS) คือ ของแข็งที่ละลายน้ำได้ ได้แก่ เกลืออนินทรีย์ต่างๆ หรืออินทรีย์สาร

1.6.2 ของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ หรือของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Undissolved Solids หรือ Total Suspended Solids, TSS) แบ่งเป็น

- Suspended Solids คือของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ตะกอนมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา

- Stable Solids คือของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ ตะกอนมีขนาดใหญ่และมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำ เมื่อตั้งทิ้งไว้สามารถตกลงมาจนที่ก้นภาชนะได้

1.6.3 ของแข็งระเหย (Volatile Solids) คือของแข็งที่ระเหยได้เมื่อนำไปเผาในอากาศ ที่อุณหภูมิสูง 550-600 องศาเซลเซียส

1.6.4 ของแข็งคงตัว (Fixed Solids) คือของแข็งหรือซีเมนต์ที่เหลือจากการเผาของแข็ง ที่อุณหภูมิสูง 550-600 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ข
มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH)	5.5-9.0	pH meter
2. ค่า TDS (Total Dissolved Solid)	-ไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร -น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็มเกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือลงสู่ทะเล ค่า TDS ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่า TDS ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมหรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มิลลิกรัมต่อลิตร	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส	เครื่องวัดอุณหภูมิวัดขณะเก็บตัวอย่าง

5.ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H ₂ S)	ไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร	ไทเทรต
7. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของ แหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 15 มิลลิกรัมต่อลิตร	สกัดด้วยตัวทำละลายแล้วแยกหา น้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
8. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
9. ฟอรัมาดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Iodometric method

12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas Chromatography
13. ค่าบีโอดีวันที่ 5 อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (Biochemical Oxygen Demand: BOD)	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	Azide modification ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน
14.ค่าที่เคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl)	ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร	Kjeldahl
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร	Potassium Dichromate Digestioj

16. โลหะหนัก (Heavy metal)		
- สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma: ICP
-โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร	
-โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร	
-ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	
-แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร	
-แบเรียม (Br)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	
-ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร	
-นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	
-แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	
-อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร	
-ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร	
-เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร	

ภาคผนวก ค
การหาสมบัติของน้ำเสีย

1. pH

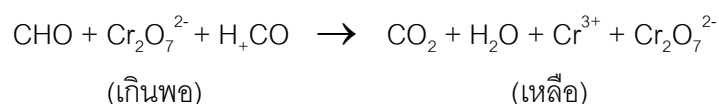
วิเคราะห์โดยตรงด้วยเครื่อง SevenEasy pH METTLER TOLEDO; GmbH 8603

หมายเหตุ: รายละเอียดการใช้เครื่อง pH meter ศึกษาได้จากคู่มือเฉพาะเครื่องนั้นๆ

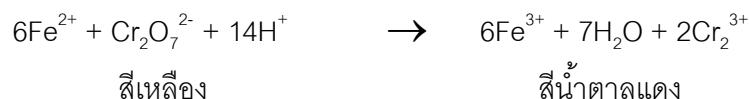
2. การวิเคราะห์หาซีไอดีด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Closed reflux, Titrimetric method)

การวิเคราะห์ค่าซีไอดีมี 2 วิธี คือ วิธีฟลักซ์แบบปิดและวิธีฟลักซ์แบบเปิด แต่ในการทดลองจะใช้วิธีฟลักซ์แบบปิด โดยมีหลักการดังนี้ ภายใต้ภาวะการรีฟลักซ์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่มีอุณหภูมิสูง สารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดซ์โดยสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตที่ทราบความเข้มข้นและมีปริมาณเกินพอที่ทราบจำนวน หลังจากรีฟลักซ์แล้วทำการวัดปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลือ โดยนำไปไทเทรตกับเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate, FAS) และใช้เฟอโรอิน (Ferrouin) เป็นอินดิเคเตอร์ทำให้ทราบปริมาณของโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการออกซิไดซ์ โดยเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ดังนี้

เมื่อฟลักซ์ด้วย $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$



หาปริมาณ $Cr_2O_7^{2-}$ ที่เหลือโดยการไทเทรตด้วย FAS ที่มีเฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์



$Cr_2O_7^{2-}$ ที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับ Fe^{2+} (FAS) ได้โครมิก (Cr^{3+}) จนหมด แล้ว Fe^{2+} จึงทำปฏิกิริยากับเฟอโรอินได้สารประกอบสีน้ำตาลแดงซึ่งแสดงจุดยุติของการไทเทรต

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หลอดย่อย (Digestion vessels) เป็นหลอดแก้วบอโรซิลิเกตขนาด 20×150 มิลลิเมตร มีฝาสลักเกลียวซึ่งทำด้วยพีทีเอฟอี
2. บล็อกหรือที่ใส่หลอดแก้วแบบต้นทำด้วยอะลูมิเนียม โดยความลึกของช่องใส่หลอดประมาณ 45-50 มิลลิเมตร
3. ตู้อบ (Oven) สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ 150±2 องศาเซลเซียส
4. บิวเรต
5. ขวดรูปกรวยขนาด 125 มิลลิเมตร

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อย (Standard potassium digestion solution) 0.1 นอร์มัล
 - นำ $K_2Cr_2O_7$ อบที่ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักมา 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิตร และเติมปรอทซัลเฟต 33.3 กรัม ทิ้งให้ละลายและปล่อยให้เย็นจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1 ลิตร
2. กรดซัลฟิวริกที่เติมซิลเวอร์ซัลเฟต
 - ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) 22 กรัม เติมลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นซึ่งมีน้ำหนัก 4.1 กิโลกรัม (2.5 ลิตร) ทิ้งไว้ 1-2 วัน ซิลเวอร์ซัลเฟตจึงจะละลาย
3. สารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) แอมโมเนียซัลเฟตไทเทรนต์ (Ferrous Ammonium sulfate titrant) เข้มข้นโดยประมาณ 0.05 นอร์มัล
 - ละลายไอร์ออน(II)แอมโมเนียซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) ชนิด AR. Grade ประมาณ 19.6 กรัมในน้ำกลั่น เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิตร ทำให้เย็นและเจือจางเป็น 1 ลิตร
 - สารละลายนี้ต้องนำมาหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอน (Standardization) ก่อนใช้ทุกครั้งด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต ทำได้ดังนี้ คือ นำ $K_2Cr_2O_7$ ปริมาตร 5 มิลลิตร มาเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิตรแล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 มิลลิตร ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำมาไทเทรตกับ

สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตโดยใช้ เฟอร์โรอินจำนวน 2-3 หยด เป็น
อินดิเคเตอร์ จุดยุติจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง

4. สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์

5. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต

- ชั่ง KHP 425 กรัม ที่บดแห้งและอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส
ละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร สารละลายนี้จะมีค่าซีไอดี
500 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. ล้างหลอดแก้วและฝาปิดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 20 ทุกครั้ง
ก่อนใช้งาน

2. เลือกขนาดของหลอดแก้วสำหรับต้มซีไอดีที่เหมาะสม

3. ถ้าตัวอย่างน้ำมีค่าซีไอดีต่ำให้เลือกใช้หลอดแก้วขนาด 25×150 มิลลิเมตร
(ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร) และถ้าค่าซีไอดีสูงสามารถใช้หลอดแก้วขนาด 16×100
มิลลิเมตร (ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 2.5 มิลลิลิตร)

4. การเลือกปริมาตรน้ำตัวอย่าง ถ้าเป็นน้ำสะอาด น้ำธรรมชาติ หรือน้ำที่มีค่าซีไอดี
ต่ำ (<40 มิลลิกรัมต่อลิตร) ควรใช้น้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร โดยใช้หลอดแก้วขนาด 25×150
มิลลิเมตร แต่ถ้าค่าซีไอดีสูงกว่านั้นให้ใช้หลอด 20×150 มิลลิเมตร โดยเลือกใช้น้ำตัวอย่าง
มากที่สุด 5 มิลลิลิตร หรือใช้น้อยกว่าแล้วเติมน้ำกลั่นให้เป็น 5 มิลลิลิตร และถ้าตัวอย่างมี
ค่าซีไอดีสูงมากต้องเจือจางน้ำตัวอย่างก่อนใช้ การเลือกขนาดน้ำตัวอย่างที่จะใช้วิเคราะห์ให้
เหมาะสมอาจดูได้จากตารางที่ ค.1

5. ใส่น้ำตัวอย่างลงในหลอดแก้วขนาดเหมาะสม แล้วเติมน้ำย่าย่อยสลายหรือ
โพแทสเซียมไดโครเมตตามด้วยกรดซัลฟิวริกอย่างช้าๆ ในปริมาณที่แสดงอยู่ในตารางที่ ค.1
ปิดฝาให้แน่นและเขย่าให้ผสมกัน สำหรับแบลนด์ (Blank) ใช้น้ำกลั่นแล้วทำเหมือนน้ำ
ตัวอย่างทุกอย่าง

6. วางหลอดแก้วในบลิ๊อคแล้วใส่ตู้อบ และตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 150 ± 2 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

7. เมื่อครบ 2 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ และทิ้งไว้ให้เย็น

8. เทสารละลายออกจากหลอดแก้วลงในขวดรูปกรวย ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในหลอดแก้วให้หมดแล้วเทรวมลงในขวดรูปกรวย

9. จากนั้นเติมเฟอโรซีนอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด ลงในสารตัวอย่าง แล้วไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน FAS สีของสารละลายจะค่อยๆ เปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีเขียวอมเหลือง สีฟ้า และสีน้ำตาลแดง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดยุติ จดปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไทเทรต

ตารางที่ ค.1 ปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์หาค่าซีโอดี*

ช่วงซีโอดี	ขนาดตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	อัตราเจือจาง
<200	5	1:1
200-400	4	1:1
400-800	2	1:1
800-1600	1	1:1
1600-3200	5	1:10
2700-5300	3	1:10
4000-8000	4	1:20
8000-16000	2	1:20
13000-26500	3	1:50
20000-40000	2	1:50
40000-80000	2	1:100
80000-160000	1	1:100

*เมื่อใช้ FAS ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล และ $K_2Cr_2O_7$ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

ตารางที่ ค.2 ขนาดของหลอดแก้ว ปริมาณน้ำตัวอย่างและสารเคมีที่เหมาะสม

ขนาดหลอดแก้ว (มิลลิเมตร)	น้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	สารละลาย ไดโครเมตร (มิลลิลิตร)	สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิลิตร)	ปริมาตรทั้งหมด (มิลลิลิตร)
16×100	2.5	1.5	3.5	7.5
20×150	5.0	3.0	7.0	15.0
25×150	10.0	6.0	14.0	30.0

การคำนวณ

$$\text{ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A-B) \times N \times 8000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}} \times 10^6$$

เมื่อ A = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตกับแบลงค์ (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตกับน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของ FAS (นอร์มัล)

V = ปริมาตรน้ำเสียตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

3. การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids)

ปริมาณสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากระเหยน้ำออกจากตัวอย่างหมดแล้วและนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นลงในโถทำแห้ง (Desiccator) แล้วชั่งน้ำหนัก น้ำหนักส่วนที่เพิ่มคือน้ำหนักของของแข็งมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถ้วยระเหย (evaporation dishes) ทำด้วยกระเบื้องทองคำขาว หรือแก้วทนไฟ
2. เตาเผา (muffle furnace) ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 550 ± 50 องศาเซลเซียส
3. ตู้อบ ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103-105 องศาเซลเซียส
4. โถทำแห้ง (desiccator)

5. เครื่องชั่งละเอียด (analytical balance) สามารถชั่งได้ถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง

การทดลอง

1. นำถ้วยระเหยไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่องทิ้งให้เย็นในโถทำแห้งแล้วชั่งหาน้ำหนัก

2. เลือกใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ให้ค่าของแข็งประมาณ 10-20 มิลลิกรัม (โดยปกติใช้ 50-100 มิลลิลิตร) เขย้าน้ำให้เข้ากันดีแล้วตวงปริมาตรน้ำที่แน่นอนด้วยกระบอกตวงใสในถ้วยระเหย ในกรณีที่ใช้ปริมาตรน้ำน้อยกว่า 50 มิลลิลิตร ควรใช้ปิเปตจะได้ค่าที่แน่นอนมากขึ้น

3. นำไปตั้งบนเครื่องอังไอน้ำจนแห้ง แล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง

4. นำถ้วยระเหยใสในโถทำแห้งเพื่อปล่อยให้เย็นลงและนำมาชั่งหาน้ำหนัก

5. ควรทำซ้ำโดยนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้งและชั่งน้ำหนัก ทำจนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่หรือน้ำหนักที่ลดลงน้อยกว่า 4% ของการชั่งครั้งแรกหรือประมาณ 0.5 มิลลิกรัม

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A-B) \times 1000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

เมื่อ $A =$ น้ำหนักของของแข็งและถ้วยระเหย (มิลลิกรัม)

$B =$ น้ำหนักของถ้วยระเหย (มิลลิกรัม)

4. การวิเคราะห์หาของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

ส่วนของของแข็งที่เหลือค้างอยู่บนกระดาษกรองใยแก้วหลังจากการกรองน้ำตัวอย่างที่ทราบปริมาณแน่นอน แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ทำให้เย็นในโถทำแห้งแล้วชั่งน้ำหนักที่เพิ่มคือ น้ำหนักของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดต่อปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถ้วยระเหย (evaporation dishes) ทำด้วยกระเบื้องทองคำขาว หรือแก้วทนไฟ
2. เตาเผา (muffle furnace) ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 550 ± 50 องศาเซลเซียส
3. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103-105 องศาเซลเซียส
4. โถทำแห้ง (desiccator)
5. เครื่องชั่งละเอียด (analytical balance) สามารถชั่งได้ถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
6. กระจกกรอง GF/C (glass fiber filter) เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร
7. เครื่องกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)
8. เครื่องดูดสูญญากาศ (suction pump) พร้อมขวดดูดสูญญากาศขนาด 500-1000 มิลลิลิตร

การทดลอง

1. นำกระจกกรองไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง ชั่งน้ำหนัก
2. วางกระจกกรองลงในกรวยบุชเนอร์ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องดูดสูญญากาศ
3. ตวงปริมาตรน้ำตัวอย่างประมาณ 50-100 มิลลิลิตร (ควรให้มีค่าของแข็งที่ติดบนกระจกกรองไม่เกิน 200 มิลลิกรัม หรือต่ำกว่า 1 มิลลิกรัม) เทลงในกรวยบุชเนอร์และเปิดเครื่องดูดสูญญากาศ จนน้ำแห้ง ล้างด้วยน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร เปิดเครื่องทิ้งไว้ 3 นาที
4. นำกระจกกรองไปอบแห้งที่ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A-B) \times 1000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

เมื่อ $A =$ น้ำหนักของกระจกกรองและสารแขวนลอย (มิลลิกรัม)

$B =$ น้ำหนักของกระจกกรอง (มิลลิกรัม)

5. การวิเคราะห์หาของแข็งละลายน้ำ

ส่วนของตัวอย่างน้ำที่กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วแล้วนำไปใส่ถ้วยระเหยที่ทราบน้ำหนักแน่นอน และนำไประเหยด้วยไอน้ำจนแห้ง แล้วจึงนำไปอบที่ 103-105 องศาเซลเซียส น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคือน้ำหนักของของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด หรืออาจหาได้จากการนำค่าของของแข็งแขวนลอยหักออก จากของแข็งทั้งหมด (TS-TSS = TDS)

เครื่องมือและอุปกรณ์

เหมือน 3.1 และ 4.1

การทดลอง

1. นำตัวอย่างน้ำมากรองเอาสารแขวนลอยออกทั้งหมดก่อน โดยกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วและเครื่องกรองสุญญากาศ หรืออาจใช้น้ำส่วนที่ได้จากการกรองหาสารแขวนลอยทั้งหมดก็ได้

2. ตวงตัวอย่างน้ำที่ได้จากการกรองมา 50-100 มิลลิลิตร ใส่ถ้วยระเหยนำไปอบแห้งที่ 103-105 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้งซึ่งหาน้ำหนัก (กรณีที่มีของแข็งละลายน้ำได้น้อยมาก ให้ใช้น้ำตัวอย่าง 250 มิลลิลิตร)

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A-B) \times 1000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

เมื่อ $A =$ น้ำหนักของถ้วยระเหยและของของแข็งที่แห้ง (มิลลิกรัม)

$B =$ น้ำหนักของถ้วยระเหย (มิลลิกรัม)

หรืออาจคำนวณจาก

$$\text{ของแข็งละลายน้ำ (TDS)} = \text{ของแข็งทั้งหมด (TS)} - \text{ของแข็งแขวนลอย (TSS)}$$

6. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยการสกัดด้วยกรวยแยก

เครื่องมือและอุปกรณ์

- กรวยแยกมีจุกปิด ขนาด 500 มิลลิลิตร
- ขวดก้นกลมขนาด 125 มิลลิกรัม
- เครื่องอั่งน้ำ
- กระจกทรงเบอร์ 40
- เครื่องชั่งละเอียด

สารเคมี

- เฮกเซน (n-hexan)
- โซเดียมซัลเฟตปราศจากน้ำในรูปผลึก (sodium sulfate anhydrous)

การทดลอง

1. เติมน้ำตัวอย่างลงในกรวยแยก ล้างภาชนะที่ใส่ตัวอย่างน้ำด้วยเฮกเซน 30 มิลลิลิตร แล้วเทใส่กรวยแยก ปิดฝาและเขย่าอย่างแรง 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้สารผสมแยกชั้น นั้นเฮกเซนจะอยู่บน ตัวอย่างน้ำจะอยู่ด้านล่าง

2. ถ่ายชั้นตัวอย่างน้ำไว้ในปิ๊กเกอร์ที่สะอาดเพื่อนำมาสกัดซ้ำอีกครั้งหนึ่ง ถ่ายชั้นเฮกเซนซึ่งมีไขมันและน้ำมันละลายอยู่หลังการสกัดเก็บไว้ในพลาสติกหรือขวดก้นกลมซึ่งทำให้แห้งและมีน้ำหนักที่ชั่งได้ชั่งไว้แล้ว สมมติมีน้ำหนัก A กรัม

3. นำตัวอย่างน้ำที่เก็บจากข้อ 2 กลับมาสกัดอีกครั้งด้วยเฮกเซน 15-20 มิลลิกรัม สกัดด้วยวิธีเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้น ทำหลายๆครั้งจนน้ำมันและไขมันถูกสกัดออกจากตัวอย่างน้ำทั้งหมด

4. นำพลาสติกที่มีเฮกเซนไขมันและน้ำมันที่ได้จากการสกัดมาระเหยเฮกเซนออกบนเครื่องอั่งไอน้ำจนแห้งปราศจากความชื้น แล้วนำมาทำให้เย็นในโถทำแห้งประมาณ 30 นาที แล้วชั่ง สมมติมีน้ำหนักที่ชั่งได้เป็น B กรัม

การคำนวณ

$$\text{ไขมันและน้ำมัน} = \frac{(B - A) \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

หมายเหตุ

กรณีที่ชั้นของตัวทำละลายมีน้ำปนอยู่ให้ใส่โซเดียมซัลเฟตประมาณ 1 กรัม ไปบนกระดาษกรองแล้วค่อยๆ กรอง เทตัวทำละลายดังกล่าวลงบนกระดาษกรองเพื่อให้มีลชั้นแตกออกและโซเดียมซัลเฟตจับกับน้ำ

7. การวิเคราะห์ห่าบีโอดี

การวิเคราะห์ห่าบีโอดี วิธีการวิเคราะห์มี 2 วิธี คือ วิธีแบบโดยตรงและวิธีแบบโดยเจือจาง แต่ในการทดลองจะใช้วิธีแบบโดยเจือจาง ซึ่งวิธีแบบเจือจางแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ

วิธีแบบเจือจางใช้สำหรับสารตัวอย่างที่มีความสกปรก เช่น มีค่าบีโอดีเกิน 7 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนที่ใช้ไปในการย่อยสลายสารอินทรีย์จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับจำนวนสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำนั้น เมื่อตัวอย่างน้ำนั้นมีสารอินทรีย์จำนวนมากจึงต้องเจือจางตัวอย่างเพื่อให้มีออกซิเจนเพียงพอที่แบคทีเรียจะใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งวิธีเจือจางจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ ไม่ต้องเติมหัวเชื้อและต้องเติมหัวเชื้อ ในการทดลองเลือกแบบไม่ต้องเติมหัวเชื้อ

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ตู้ควบคุมอุณหภูมิได้ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียส และต้องไม่มีแสงเข้า
2. ขวดบีโอดีพร้อมจุก ขนาดมาตรฐาน 300 มิลลิลิตร
3. เครื่องเติมอากาศ
4. อุปกรณ์และเครื่องแก้วต่างๆ เช่น กระบอกตวง บิวเรต เป็นต้น
5. น้ำกลั่นต้องมีคุณภาพสูง ควรมีทองแดงน้อยกว่า 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร ปราศจากคลอรีน คลอรามีน สารอินทรีย์ กรด-เบส ต้องเป็นกลาง

สารเคมี

1. สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเป็นกรด-เบส 7.2 โดยสารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 8.5 กรัม ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) 21.75 กรัม แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) 17.2 กรัม และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต เฮปตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{PO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 33.4 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร แล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

2. สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ทำการละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 22.5 กรัม ในน้ำกลั่นและเจือจางเป็น 1 ลิตร

3. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ละลายแคลเซียมคลอไรด์ปราศจากน้ำ (Anhydrous CaCl_2) จำนวน 27.5 กรัม ในน้ำกลั่นและเจือจางเป็น 1 ลิตร

4. สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 0.25 กรัม ในน้ำกลั่นและเจือจางเป็น 1 ลิตร

5. สารละลายแมงกานีสซัลเฟต ละลายแมงกานีสซัลเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 364 กรัม หรือแมงกานีสซัลเฟตเตตระไฮเดรต ($\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 480 กรัม หรือแมงกานีสซัลเฟตไดไฮเดรต ($\text{MnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 400 กรัม ในน้ำกลั่นกรองและเจือจางเป็น 1 ลิตร

6. สารละลายแอลคาไลน์-ไฮโดรอกไซด์-เอไซด์ ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 500 กรัม และโซเดียมไอโอไดด์ (NaI) 135 กรัม ในน้ำกลั่นและเจือจางให้ได้ 950 มิลลิลิตร จากนั้นรอกจนเย็น ค่อยๆเติมสารละลายโซเดียมเอไซด์ (NaN_3) ที่ละลายในน้ำ 40 มิลลิลิตร อย่างช้าๆ ทำให้มีฤทธิ์เป็นกรดและเจือจางจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

7. สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล ละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 24.82 กรัมในน้ำต้มที่เย็นแล้ว เติมคลอโรฟอร์ม 5 มิลลิลิตรหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม เพื่อเก็บไว้ใช้นานๆปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร เมื่อใช้งานเจือจางเป็น 0.025 นอร์มัล

8. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น

การทดลอง (วิธีวิเคราะห์แบบเจือจางที่ไม่ต้องเติมหัวเชื้อ Seed)

1. การเตรียมน้ำเจือจาง โดยน้ำกลั่นมาแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส และพ่นอากาศก่อนทำการเจือจางอย่างน้อย 1 ชั่วโมง แล้วเติมสารเคมีข้อ 2-5 อย่างละ 1 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1 ลิตร

2. การเลือกปริมาณตัวอย่างที่จะใช้ ถ้าไม่ทราบค่าบีโอดีโดยประมาณของน้ำตัวอย่าง ต้องหาซีโอดีก่อน พร้อมกับพิจารณาลักษณะของน้ำตัวอย่างและแหล่งเก็บตัวอย่างน้ำรวมด้วยเพื่อกะประมาณค่าซีโอดี เช่น น้ำตัวอย่างที่มีของแข็งละลายมากควรจะมีค่าบีโอดีประมาณ 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการเลือกปริมาณตัวอย่างนิยมเลือกให้มีปริมาณออกซิเจนเหลืออยู่อย่างน้อย 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และควรจะมีการใช้ออกซิเจนอย่างน้อย 2

มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทราบค่าบีโอดีโดยประมาณควรที่จะเลือกปริมาณตัวอย่างที่คาดว่าจะให้ค่าบีโอดีอยู่ในช่วงที่กำหนด แล้วจึงเลือกปริมาณตัวอย่างที่ใช้ให้สูงและต่ำกว่าที่อยู่ติดกันตามตารางที่ ค.3 ประมาณค่าบีโอดีไว้ประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเลือกใช้ปริมาณตัวอย่าง 10 มิลลิตรเลือกสูงขึ้นไปเป็น 5 มิลลิตร และต่ำลงเป็น 20 มิลลิตร

3. บีโอดีตัวอย่างตามจำนวนที่เลือกไว้ลงในขวดบีโอดีขนาด 300 มิลลิตร อย่างละ 2 ขวด

4. ทำการเติมน้ำสำหรับใช้เจือจางจนเต็มขวดบีโอดี แต่ต้องระวังพยายามอย่าให้เกิดฟองอากาศ โดยปิดฝาให้แน่น

5. นำขวดบีโอดีขวดหนึ่งของแต่ละปริมาณที่เลือกมาหาค่าออกซิเจนละลายที่เริ่มต้น สมมุติเป็น DO_0 ส่วนอีกขวดนำไปบ่มที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน

6. เมื่อครบ 5 วัน นำขวดบีโอดีที่บ่มไว้มาหาค่าออกซิเจนละลายที่เหลืออยู่เรียกว่า DO_5

การวิเคราะห์ค่าบีโอดี

1. เก็บน้ำตัวอย่างลงในขวดบีโอดีให้เต็มขวดพร้อมปิดจุก
2. เติมสารละลายแมงกานีสซัลเฟต 1 มิลลิตร และสารละลายแอลกอฮอล์-ไฮไดรด์-ไฮไซต์ 1 มิลลิตร โดยใช้ปิเปตวัดปริมาตรและจุ่มลงใต้ผิวน้ำตัวอย่าง ปิดจุกอย่างระมัดระวัง ไม่ให้เกิดฟองอากาศ เขย่าโดยคว่ำขึ้น-ลงแรงๆ หลายๆ ครั้ง จากนั้นปล่อยให้เกิดการตกตะกอนและเขย่าซ้ำอีกครั้ง
3. เมื่อตกตะกอนได้ส่วนใสมากกว่า 100 มิลลิตร เปิดจุกและเติมกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 2 มิลลิตร
4. ปิดจุกและทำการเขย่าขึ้น-ลง จนเห็นไอโอดีนกระจายทั่ว (I_2 มีสีเหลืองแกมน้ำตาล) และตะกอนละลายหมด
5. บีโอดีใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิตร จำนวน 203 มิลลิตร นำไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.025 นอร์มัล เมื่อสารละลายได้สีเหลืองฟางให้เติมน้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ 1-2 มิลลิตร และไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินจางหายไป

การคำนวณ

$$DO_{\text{(ส่วนในล้านส่วน)}} = (\text{ปริมาตรของ } 0.025 \text{ นอร์มัลของโซเดียมไธโอซัลเฟต} \times 0.2/200) \times 1000$$

*ข้อสังเกต

การนำสารละลายจากข้อที่ 4 มาไทเทรตจำนวน 203 มิลลิลิตร แต่ในการคำนวณคิดปริมาณเพียง 200 มิลลิลิตร เนื่องจากคิดเทียบจากเมื่อใช้น้ำ 300 มิลลิลิตร เติมสารเคมีจากข้อ 1 ลงไป 4 มิลลิลิตร น้ำตัวอย่างเหลือในขวดเพียง 296 มิลลิลิตร

น้ำตัวอย่าง 296 มิลลิลิตรเมื่อเทียบกับสารละลาย 300 มิลลิลิตร ดังนั้นต้องการสารละลาย 200 มิลลิลิตร จะต้องใช้สารละลายในขวด = $(300 \times 200) / 296 = 203$ มิลลิลิตร

$$BOD \text{ (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร)} = (DO_0 - DO_5) \times \text{อัตราส่วนเจือจาง}$$

เมื่อ DO_0 = ค่าออกซิเจนละลายที่ไทเทรตได้ในวันแรก

DO_5 = ค่าออกซิเจนละลายที่ไทเทรตได้ในวันที่ 5

$$\text{อัตราส่วนเจือจาง} = \frac{\text{ปริมาตรน้ำเต็มขวดบีโอดี (300 มิลลิลิตร)}}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

ตารางที่ ค.3 การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วงบีโอดี

ปริมาณตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ช่วงบีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อัตราเจือจาง
0.02	30,000-105,000	15,000
0.05	12,000-42,000	6,000
0.10	6,000-21,000	3,000
0.20	3,000-10,500	1,500
0.50	1,200-4,200	600
1.00	600-2,100	300
2.00	300-1,050	150

5.00	120-420	60
10.0	60-210	30
20.0	30-105	15
50.0	12-42	6
100	6-21	3
300	0-7	1

หมายเหตุ ถ้าปริมาณตัวอย่างที่ใช้น้อยกว่า 1.0 มิลลิลิตร ควรเจือจางตัวอย่างก่อนปิเปตใส่ขวดปิเอต์

ภาคผนวก ง
การคำนวณหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

วิธีการเตรียมสารละลาย

1. ชั่ง KI 10 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น
2. ชั่งแอมโมเนียมโมลิบเดต 9 กรัม ละลายด้วยสารละลาย 6N ของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 6 N ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น
3. สารละลายกรดซัลฟิวริก 1 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 3 มิลลิลิตร
4. ชั่งแป้งมัน 2.0 กรัม ละลายด้วยน้ำอุ่น และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

วิธีการคำนวณหา Normality of $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

1. ชั่ง KI จำนวน 2.0 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. ปิเปตสารละลาย $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0.025 โมล ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร
3. ปิเปตกรดซัลฟิวริก 5.0 มิลลิลิตร
4. นำสารละลายที่ได้ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำมาปรับปริมาตรให้ได้ 300 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น
5. นำสารละลายที่ปรับปริมาตรแล้วมาไทเทรตด้วย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ จนสารละลายเป็นสีฟางข้าว จากนั้นเติมน้ำแป้งประมาณ 1 มิลลิลิตร ไทเทรตต่อจนได้สารละลายใสไม่มีสี บันทึกปริมาณ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ในการไทเทรต

การหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1. ปิเปตน้ำ DM ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และใช้น้ำตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร
2. ปิเปตสารละลาย KI (เตรียมโดยชั่ง KI จำนวน 10 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น) ปริมาตร 15 มิลลิลิตร และกรดซัลฟิวริก 10 มิลลิลิตร
3. หยดสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต จำนวน 3 หยด
4. ไทเทรตสารละลายด้วย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ จนเป็นสีฟางข้าว แล้วเติมน้ำแป้ง 1 มิลลิลิตร ไทเทรตต่อจนสารละลายใสไม่มีสี และบันทึกปริมาณ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ในการไทเทรต เพื่อคำนวณหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สูตรคำนวณ

$$\text{ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{[(A-B) \times N \times 17 \times 1000]}{\text{ปริมาตรสารตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

เมื่อ A คือ ปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง

B คือ ปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ในการไทเทรตแบลนด์

N คือ ความเข้มข้นของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (N)

ภาคผนวก จ

จลนพลศาสตร์ของการลดลงของค่าซีไอดี บีไอดี และน้ำมัน-ไขมัน

การคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะคำนวณตามปฏิกิริยาอันดับ 1 สำหรับอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยา

$$\text{Rate} = -\frac{d[A]}{dt} = k_1[A] \quad (จ.1)$$

k_1 คือ ค่าของการเกิดปฏิกิริยาอันดับ 1 หน่วยเป็น t^{-1}

อินทิเกรตสมการที่ 4.8 จากความเข้มข้นเริ่มต้น $[A]_0$ ที่เวลาเริ่มต้น $t = 0$ ไปถึงความเข้มข้น $[A]_t$ ที่เวลา t ใดๆ

$$\int_{[A]_0}^{[A]_t} \frac{1}{[A]} d[A] = -k_1 \int_0^t dt \quad (จ.2)$$

$$\ln[A]_t - \ln[A]_0 = -k_1 t \quad (จ.3)$$

$$\ln \frac{[A]_t}{[A]_0} = -k_1 t \quad (จ.4)$$

$[A]$ คือ ความเข้มข้นของสารพิษ

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \frac{[A]_t}{[A]_0}$ และเวลา จะได้กราฟที่มีความชันเท่ากับ $-k_1$

สำหรับปฏิกิริยาอันดับ 2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเขียนได้ ดังนี้

$$\text{Rate} = -\frac{d[A]}{dt} = k_2[A]^2 \quad (จ.5)$$

$$\int_{[A]_0}^{[A]_t} \frac{1}{[A]^2} d[A] = \int_0^t k_2 dt \quad (จ.6)$$

$$\frac{1}{[A]_t} - \frac{1}{[A]_0} = k_2 t \quad (จ.7)$$

$[A]$ คือ ความเข้มข้นของสารมลพิษ ที่เวลา t ใดๆ

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{1}{[A]_t} - \frac{1}{[A]_0}$ และเวลา จะมีความชันเท่ากับ k_2

1. ผลของการเติมอากาศและไม่เติมอากาศ

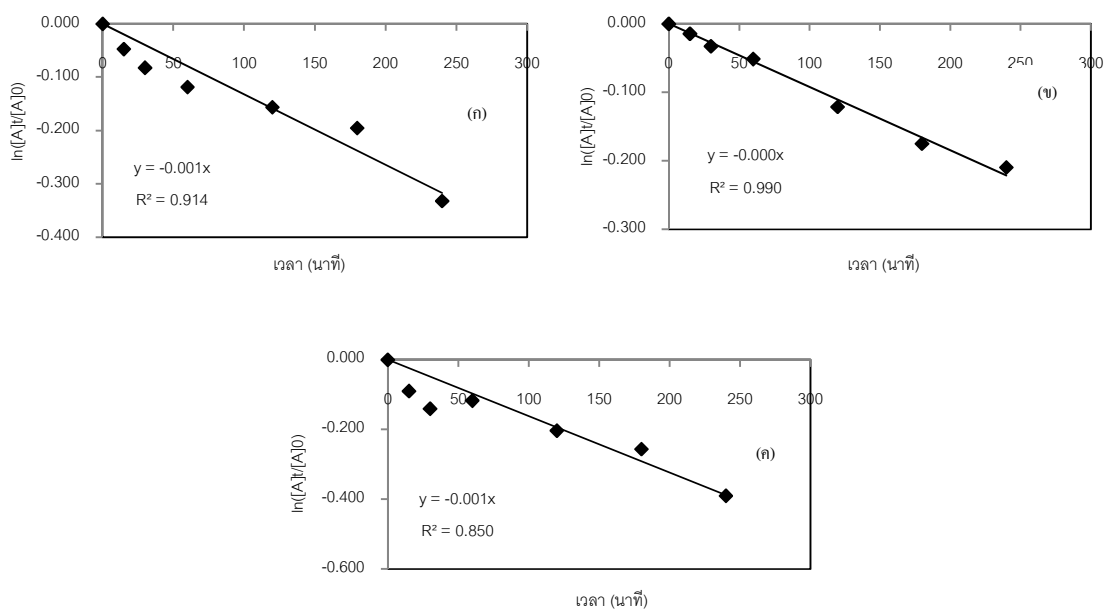
ตารางที่ จ.1 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	เติมอากาศอย่างเดียว		อิเล็กโทรเฟนตันแบบไม่เติมอากาศ		อิเล็กโทรเฟนตันแบบเติมอากาศ	
	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²
ค่าซีไอดี	0.001	0.914	0.002	0.989	0.005	0.978
ค่าบีไอดี	0.000	0.990	0.003	0.986	0.004	0.965
ค่าน้ำมัน-ไขมัน	0.001	0.850	0.005	0.965	0.008	0.963

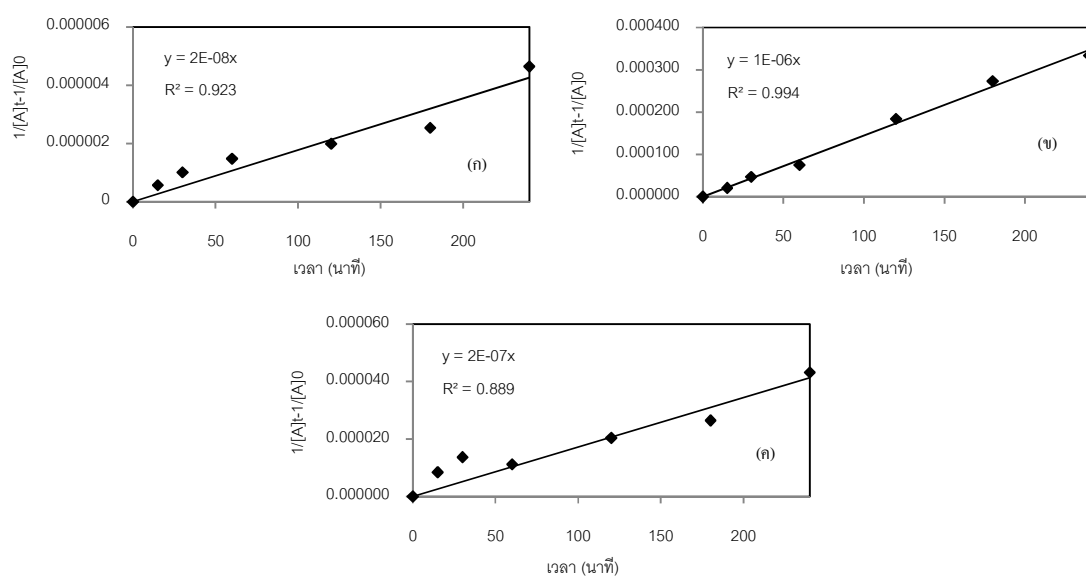
ตารางที่ จ.2 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	เติมอากาศอย่างเดียว		อิเล็กโทรเฟนตันแบบไม่เติมอากาศ		อิเล็กโทรเฟนตันแบบเติมอากาศ	
	k (L•mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L•mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L•mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
ค่าซีไอดี	2x10 ⁻⁸	0.923	4x10 ⁻⁸	0.994	7x10 ⁻⁸	0.988
ค่าบีไอดี	1x10 ⁻⁶	0.994	4x10 ⁻⁶	0.991	6x10 ⁻⁶	0.983
ค่าน้ำมัน-ไขมัน	2x10 ⁻⁷	0.889	6x10 ⁻⁷	0.986	9x10 ⁻⁷	0.970

- เต็มอากาศเพียงอย่างเดียว

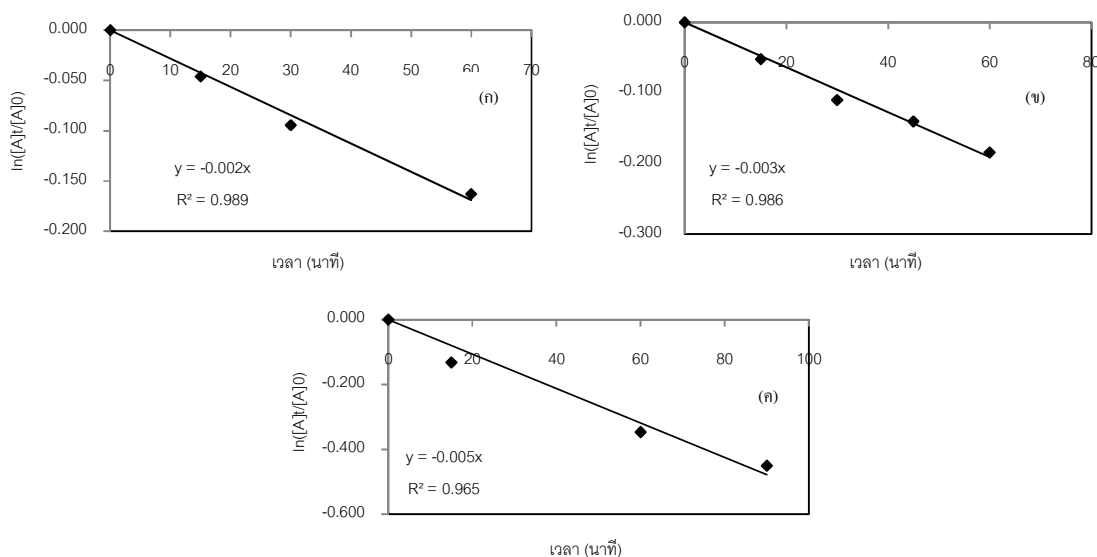


ภาพที่ จ.1 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 เวลา 480 นาที

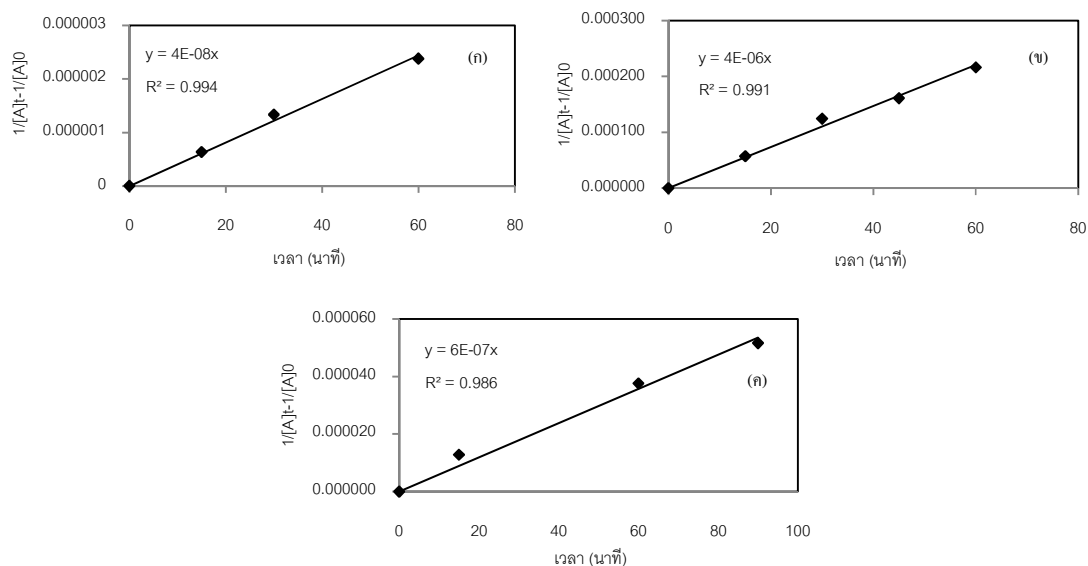


ภาพที่ จ.2 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 เวลา 480 นาที

- ระบบบำบัดด้วยอิเล็กโทรเฟนตันที่ไม่เติมอากาศ

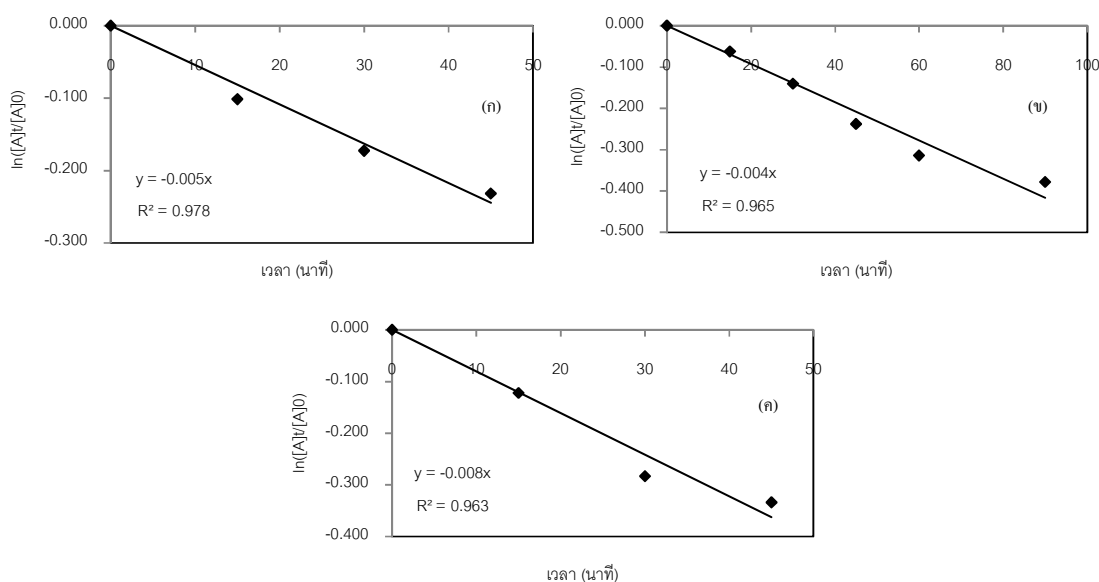


ภาพที่ ๓.3 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

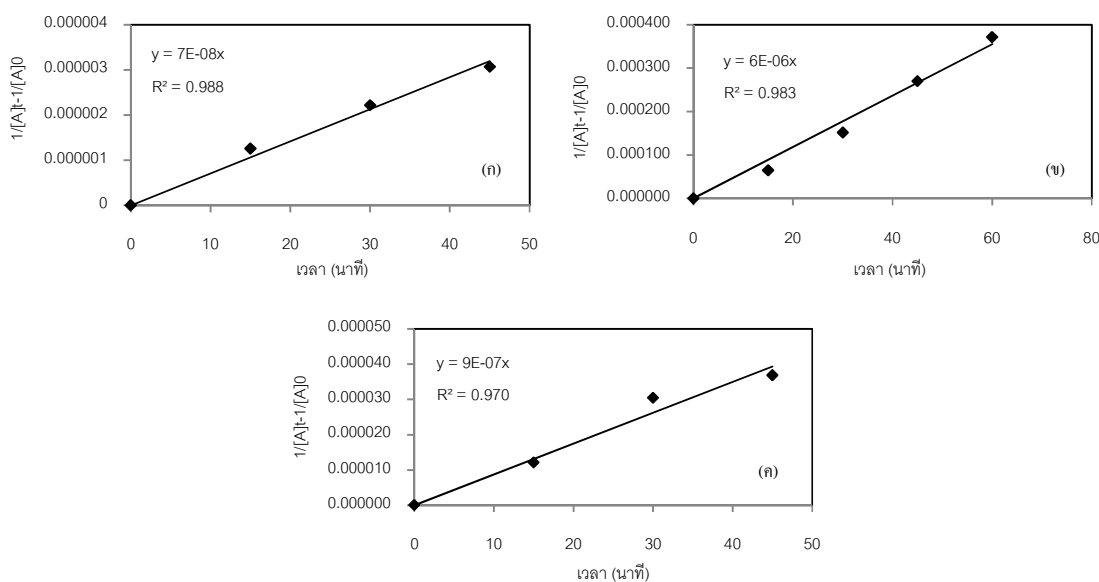


ภาพที่ ๓.4 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

- ระบบบำบัดด้วยอิเล็กโทรเฟนตันที่มีเติมอากาศ



ภาพที่ ๑.๕ ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที



ภาพที่ ๑.๖ ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

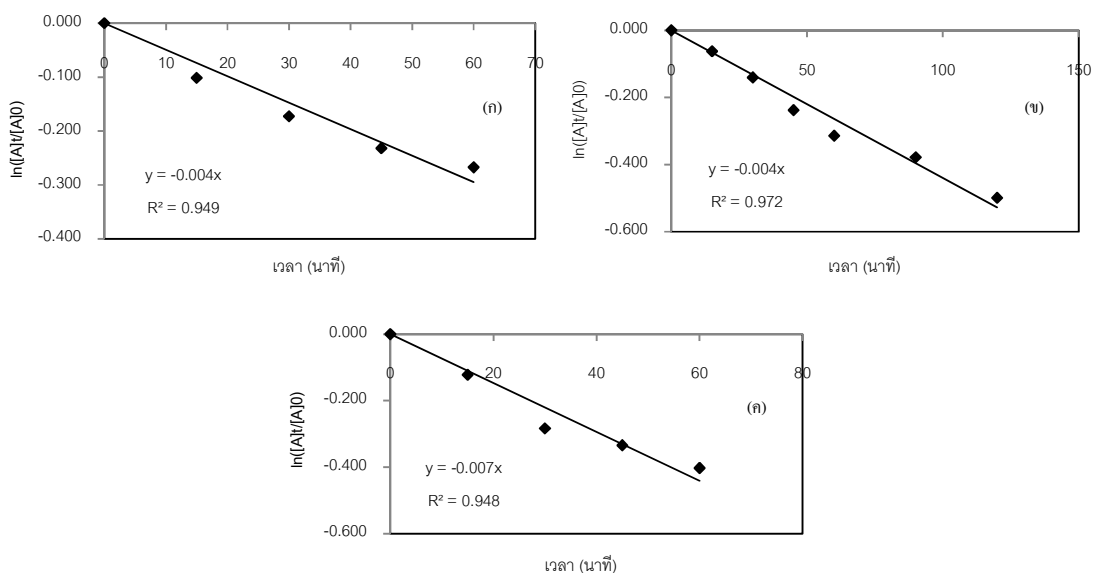
2. ผลของเวลา

ตารางที่ ๑.3 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

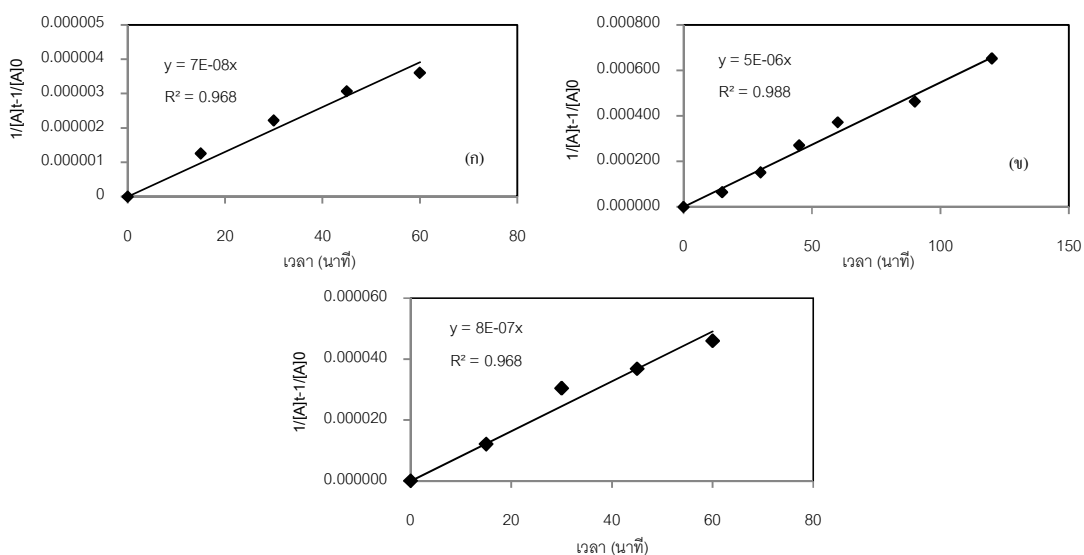
พารามิเตอร์	k (min ⁻¹)	R ²
ค่าซีโอดี	0.004	0.949
ค่าบีโอดี	0.004	0.972
ค่าน้ำมัน-ไขมัน	0.007	0.948

ตารางที่ ๑.4 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	k (L•mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
ค่าซีโอดี	7×10 ⁻⁸	0.968
ค่าบีโอดี	5×10 ⁻⁶	0.988
ค่าน้ำมัน-ไขมัน	8×10 ⁻⁷	0.968



ภาพที่ ๑.๗ ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความดันกรวด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 240 นาที



ภาพที่ ๑.๘ ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความดันกรวด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 240 นาที

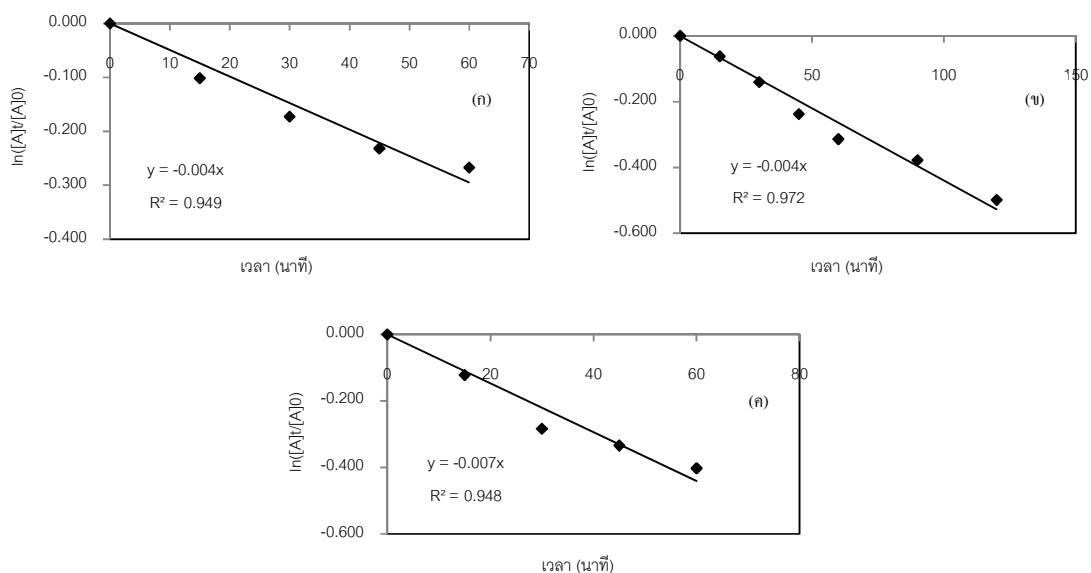
ตารางที่ ๑.5 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	แกรไฟต์		เหล็กกล้าไร้สนิม		ไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียม ออกไซด์	
	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²
ค่าซีโอดี	0.004	0.949	0.0022	0.9197	0.0059	0.9594
ค่าบีโอดี	0.004	0.972	0.0033	0.9761	0.0067	0.9808
ค่าน้ำมัน-ไขมัน	0.007	0.948	0.0047	0.9716	0.0094	0.9614

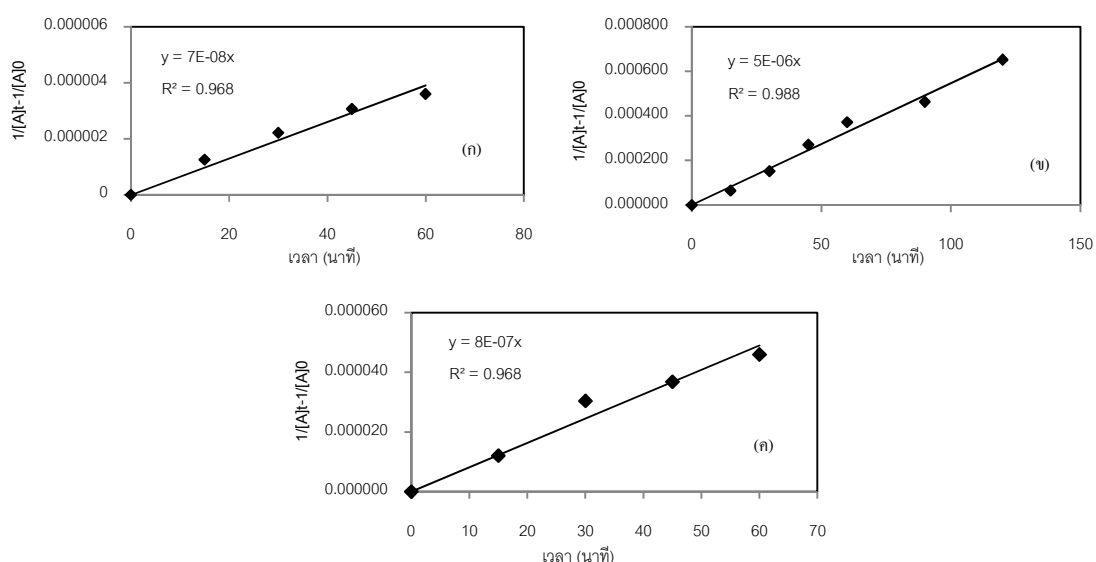
ตารางที่ ๑.6 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	แกรไฟต์		เหล็กกล้าไร้สนิม		ไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียม ออกไซด์	
	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
ค่าซีโอดี	7x10 ⁻⁸	0.968	3x10 ⁻⁸	0.9318	9x10 ⁻⁸	0.9790
ค่าบีโอดี	5x10 ⁻⁶	0.988	4x10 ⁻⁶	0.9909	7x10 ⁻⁶	0.9893
ค่าน้ำมัน-ไขมัน	8x10 ⁻⁷	0.968	6x10 ⁻⁷	0.9977	1x10 ⁻⁶	0.9868

- แกรไฟต์

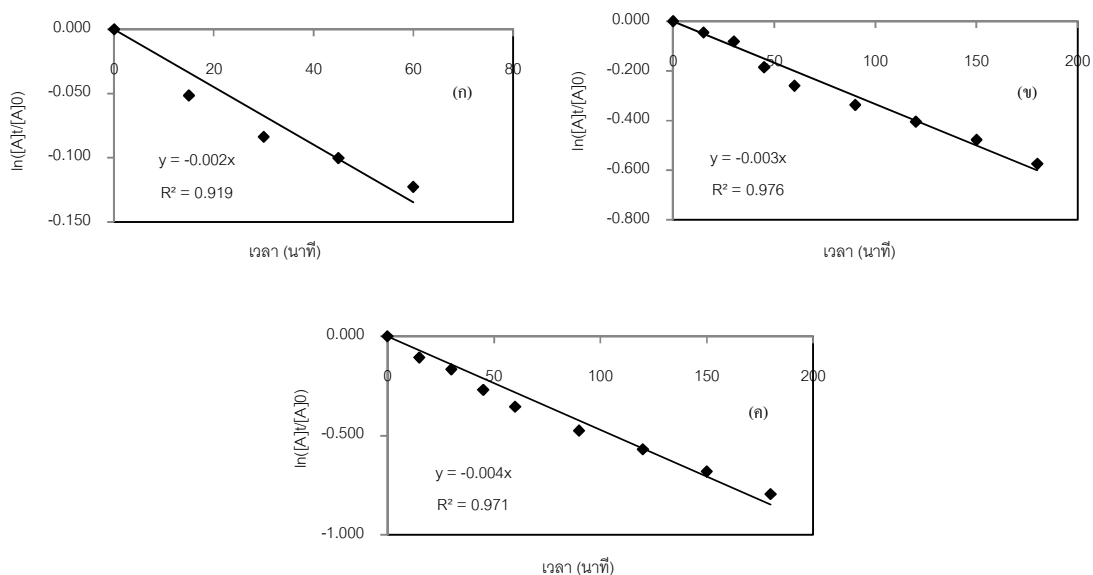


ภาพที่ ๑.๙ ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความดันกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

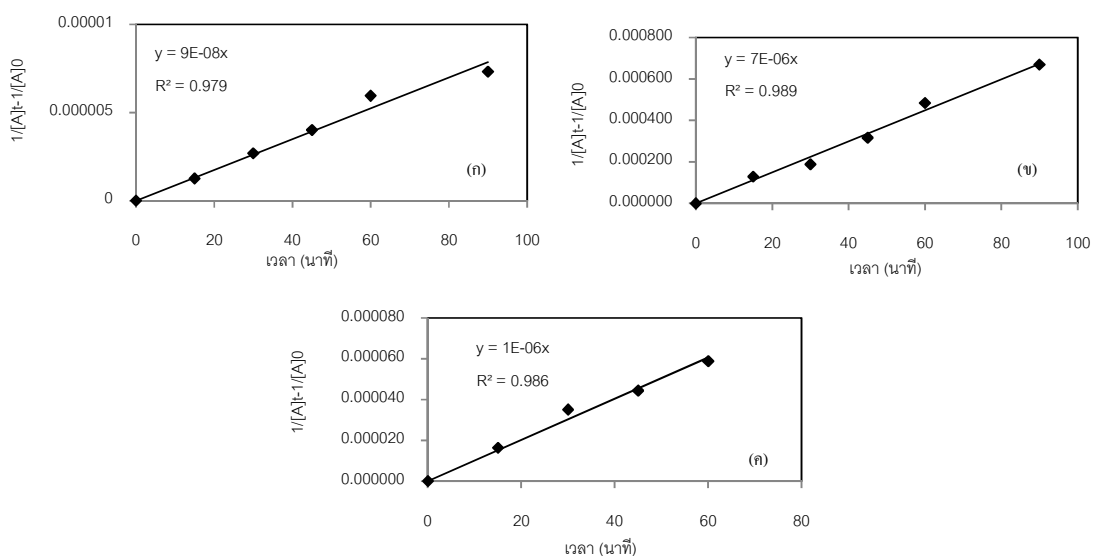


ภาพที่ ๑.๑๐ ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความดันกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

- เหล็กกล้าไร้สนิม

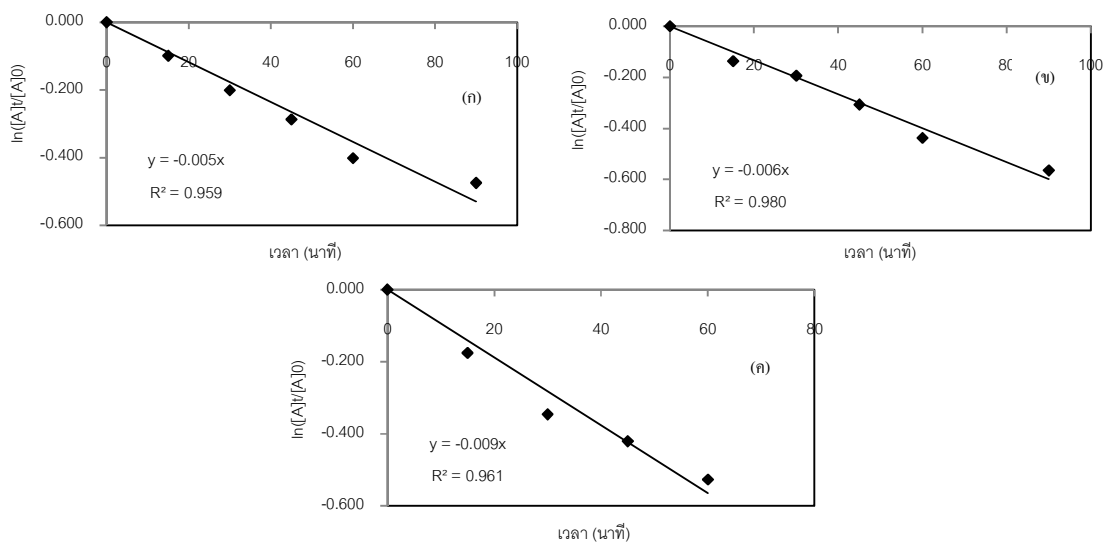


ภาพที่ จ.11 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อวินาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

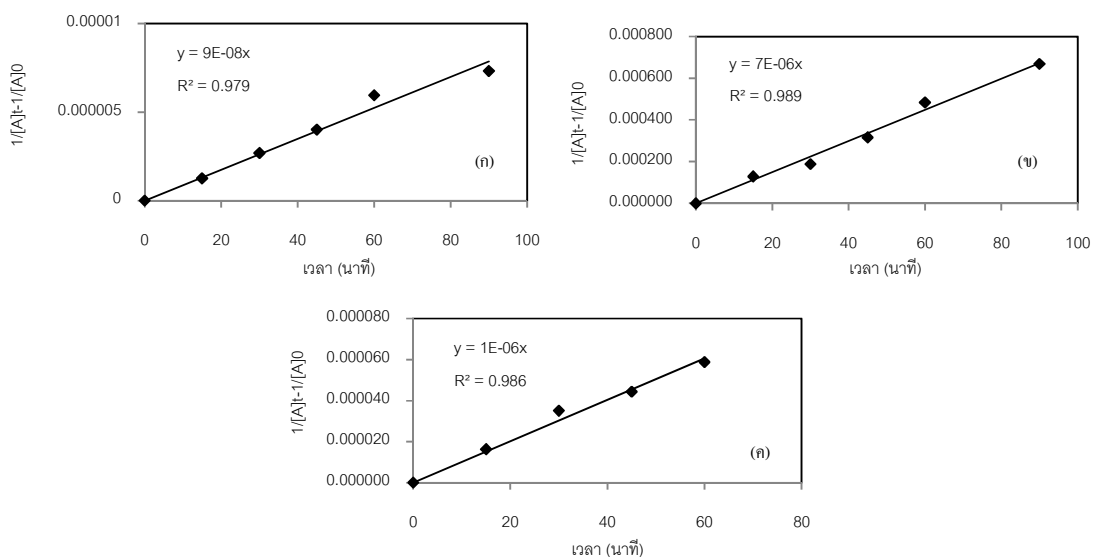


ภาพที่ จ.12 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อวินาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

- ไทเทเนียมเคลือบรูปที่นิยมออกไซด์



ภาพที่ จ.13 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้ไทเทเนียมเคลือบรูปที่นิยมออกไซด์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที



ภาพที่ จ.14 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้ไทเทเนียมเคลือบรูปที่นิยมออกไซด์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

5. ผลของอัตราการไหลของอากาศ

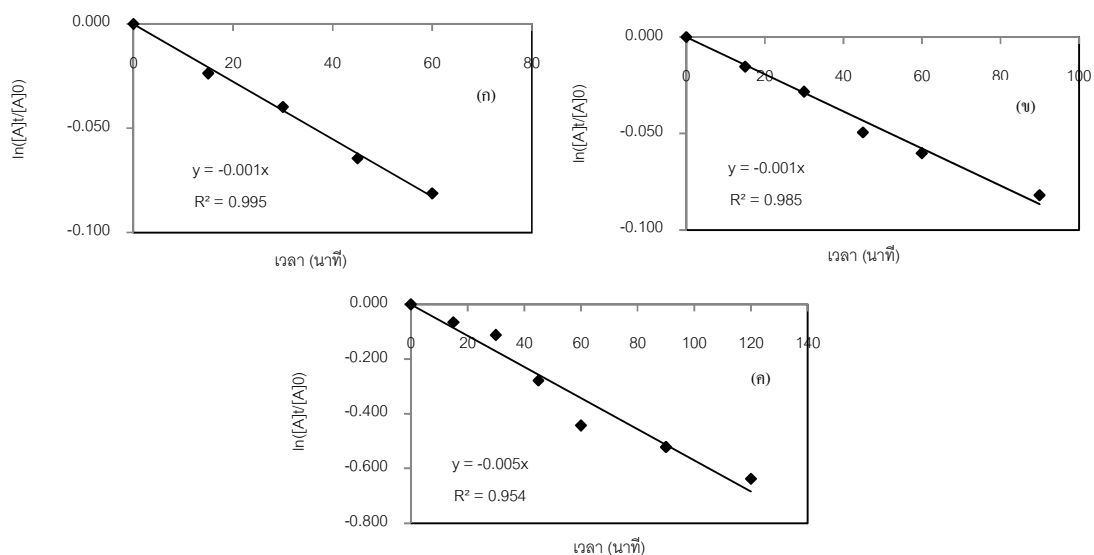
ตารางที่ ๑.7 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	0.5 ลิตรต่อนาที		1.0 ลิตรต่อนาที		1.5 ลิตรต่อนาที		2.0 ลิตรต่อนาที		2.5 ลิตรต่อนาที	
	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²
ค่าซีไอดี	0.0014	0.9953	0.0018	0.8871	0.0037	0.9765	0.0029	0.8508	0.0026	0.9471
ค่าบีไอดี	0.001	0.992	0.0012	0.9224	0.0055	0.9849	0.0055	0.8751	0.0045	0.9535
ค่าน้ำมัน- ไขมัน	0.0057	0.945	0.0057	0.9872	0.0057	0.954	0.0112	0.9808	0.0167	0.9782

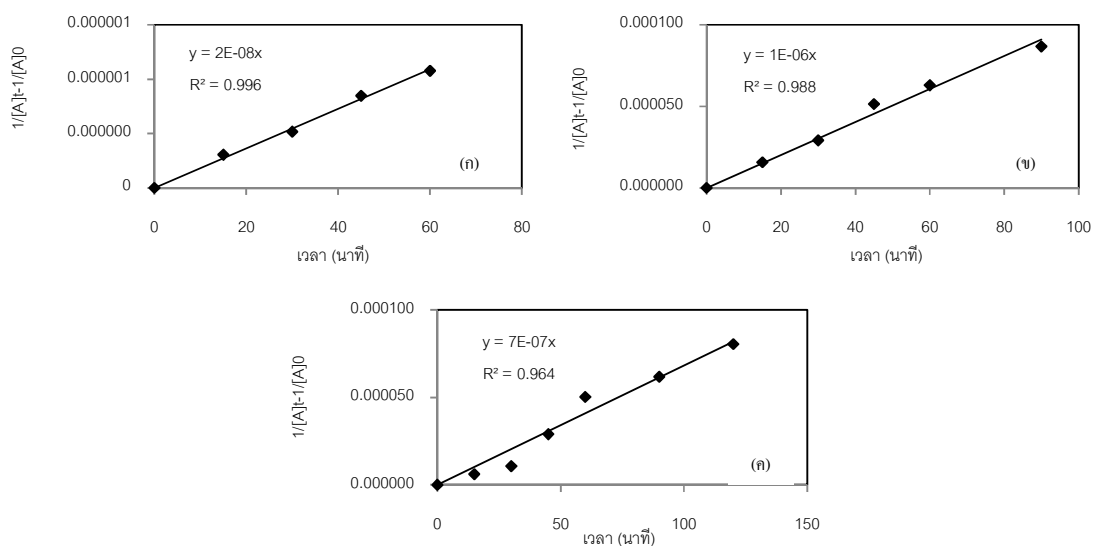
ตารางที่ ๑.8 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	0.5 ลิตรต่อนาที		1.0 ลิตรต่อนาที		1.5 ลิตรต่อนาที		2.0 ลิตรต่อนาที		2.5 ลิตรต่อนาที	
	K (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
ค่าซีไอดี	2x10 ⁻⁸	0.996	2x10 ⁻⁸	0.8993	5x10 ⁻⁸	0.9768	4x10 ⁻⁸	0.9125	4x10 ⁻⁸	0.9654
ค่าบีไอดี	1x10 ⁻⁶	0.9882	1x10 ⁻⁶	0.9302	6x10 ⁻⁶	0.9803	6x10 ⁻⁶	0.9471	6x10 ⁻⁶	0.9811
ค่าน้ำมัน- ไขมัน	7x10 ⁻⁷	0.964	8x10 ⁻⁷	0.9693	7x10 ⁻⁷	0.964	2x10 ⁻⁶	0.9696	2x10 ⁻⁶	0.9993

- อัตราการไหลของอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที

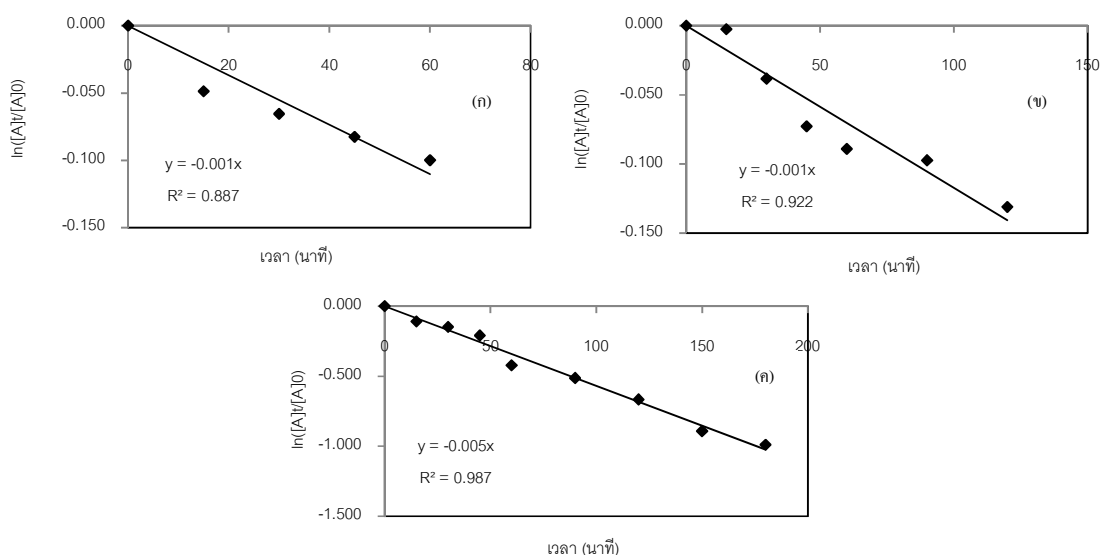


ภาพที่ จ.15 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที ความดันเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

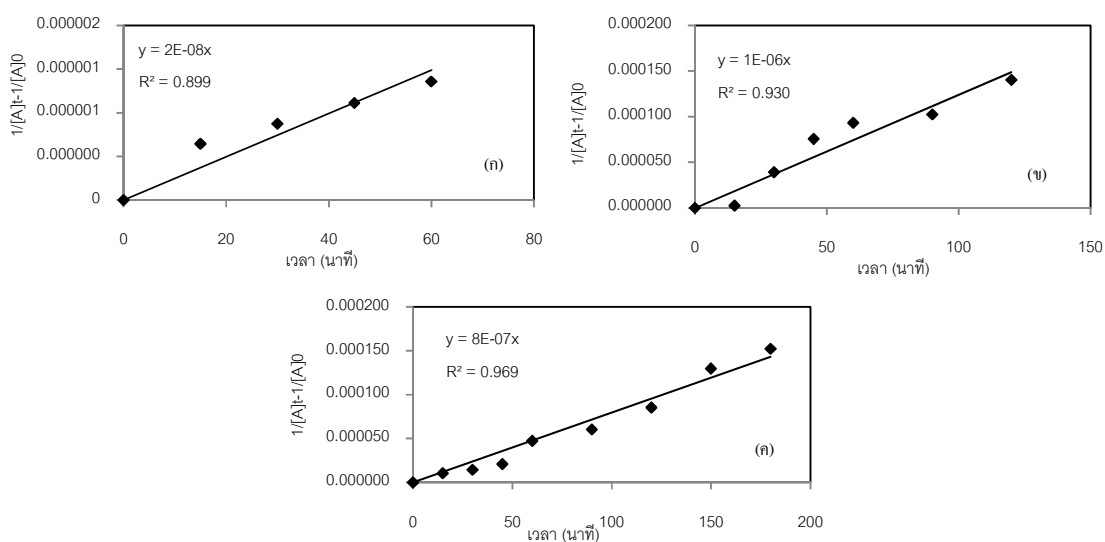


ภาพที่ จ.16 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที ความดันเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

- อัตราการไหลของอากาศ 1.0 ลิตรต่อนาที

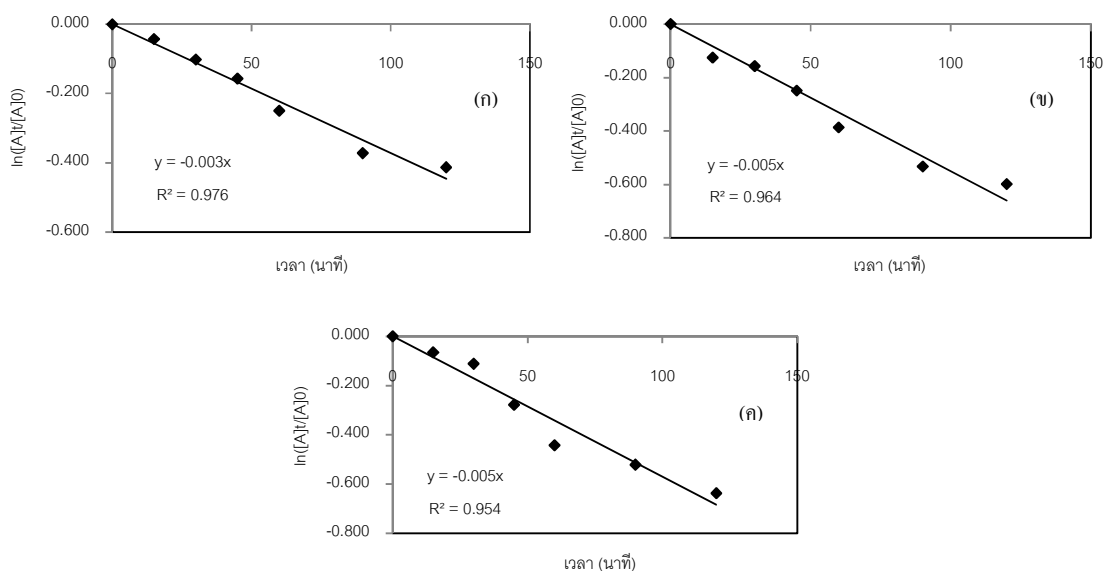


ภาพที่ ๑.17 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.0 ลิตรต่อนาที ความดันกรวด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

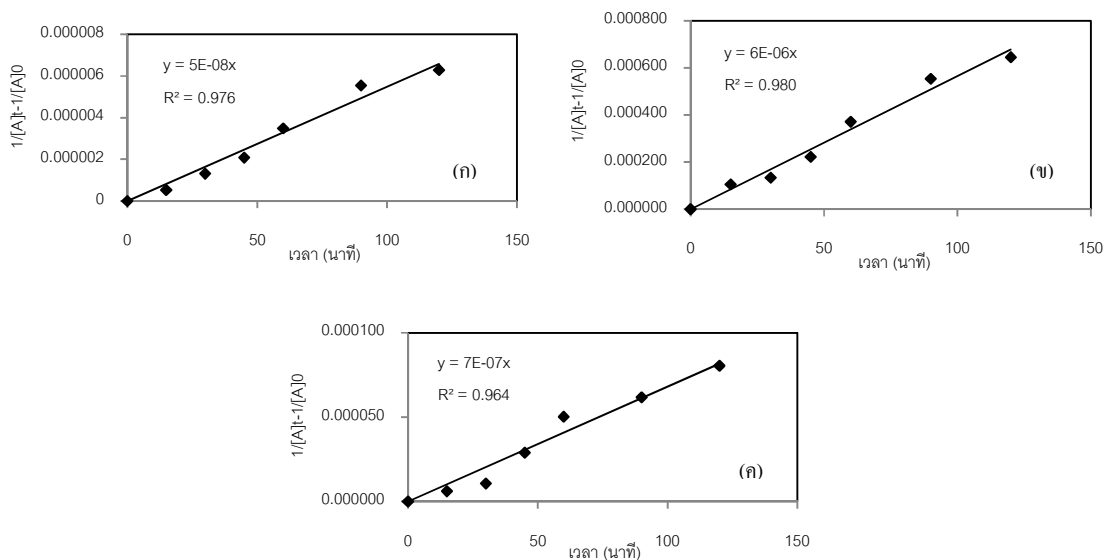


ภาพที่ ๑.18 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.0 ลิตรต่อนาที ความดันกรวด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

- อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที

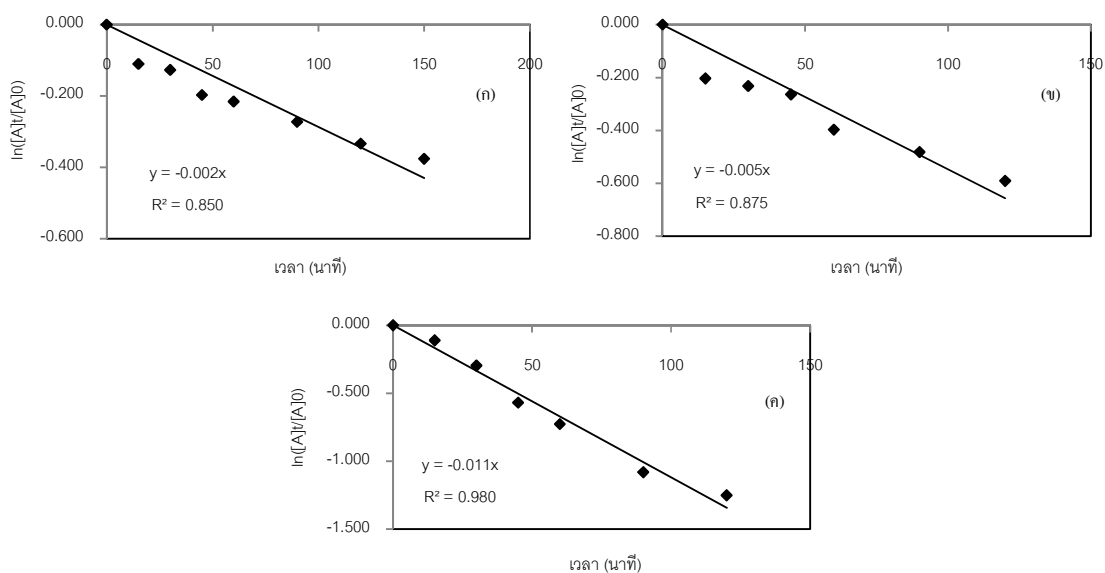


ภาพที่ ๑.19 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

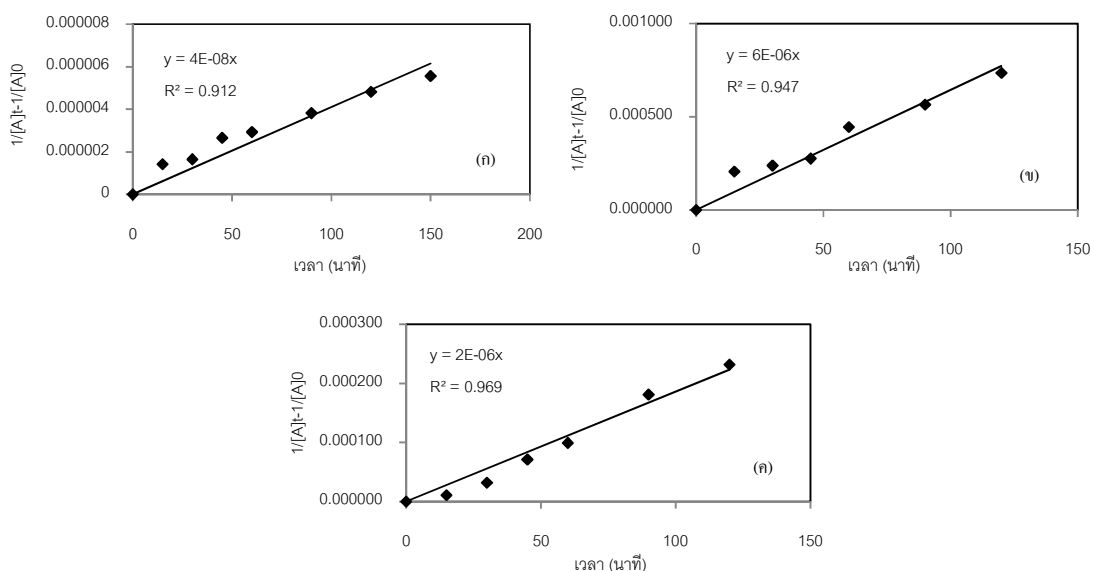


ภาพที่ ๑.20 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

- อัตราการไหลของอากาศ 2.0 ลิตรต่อนาที

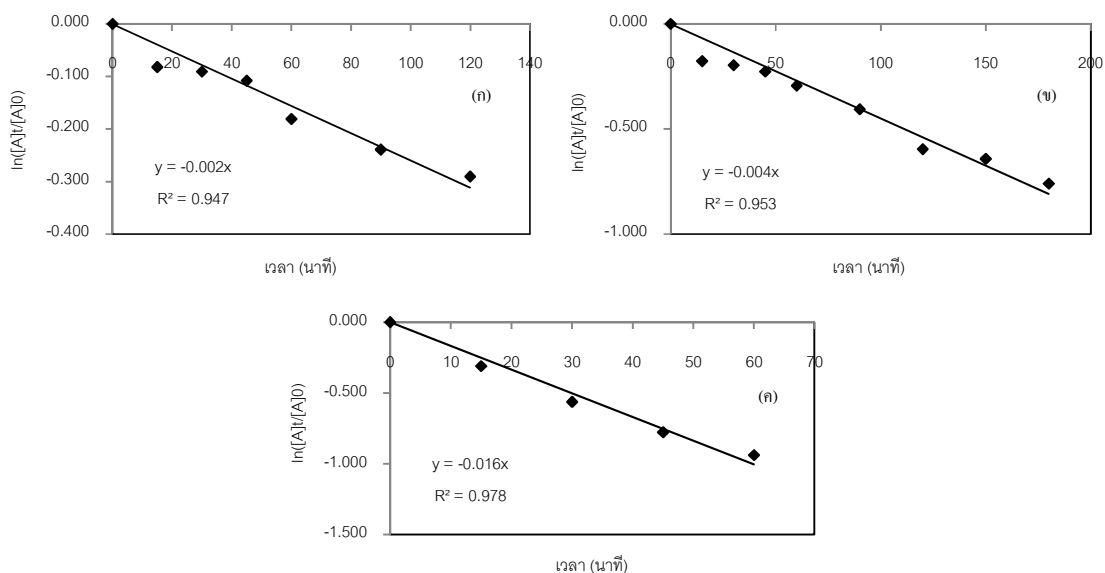


ภาพที่ ๑.21 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 2.0 ลิตรต่อนาที ความดันกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

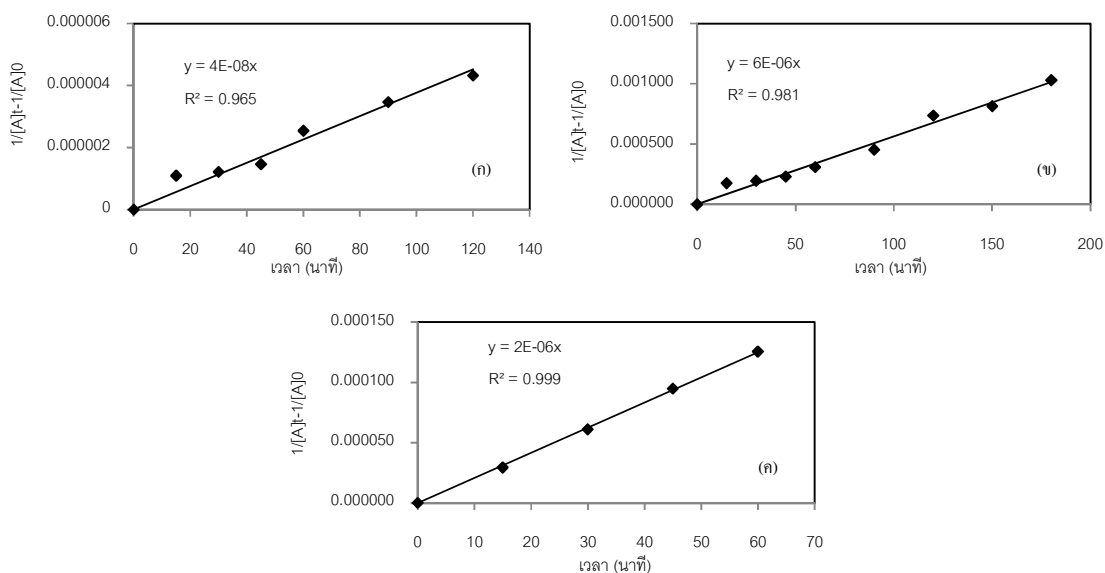


ภาพที่ ๑.22 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 2.0 ลิตรต่อนาที ความดันกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

- อัตราการไหลของอากาศ 2.5 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ จ.23 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 2.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที



ภาพที่ จ.24 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 2.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

6. ผลของความเป็นกรด-เบส

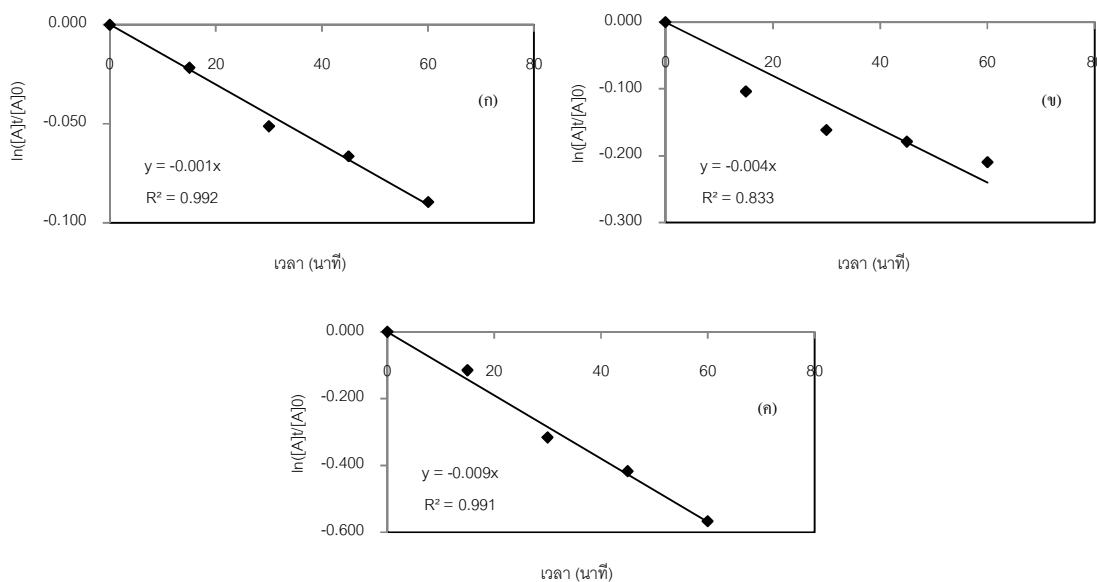
ตารางที่ จ.9 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	pH 2		pH 3		pH 4		pH 5		pH 7	
	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²
ค่าซีไอดี	0.0015	0.9921	0.0019	0.5646	0.0037	0.7747	0.0024	0.8137	0.003	0.7315
ค่าบีไอดี	0.004	0.8331	0.0029	0.9309	0.0061	0.6596	0.0041	0.8858	0.0035	0.9645
ค่าน้ำมัน- ไขมัน	0.0095	0.9911	0.0233	0.6285	0.0117	0.7376	0.017	0.931	0.0154	0.9515

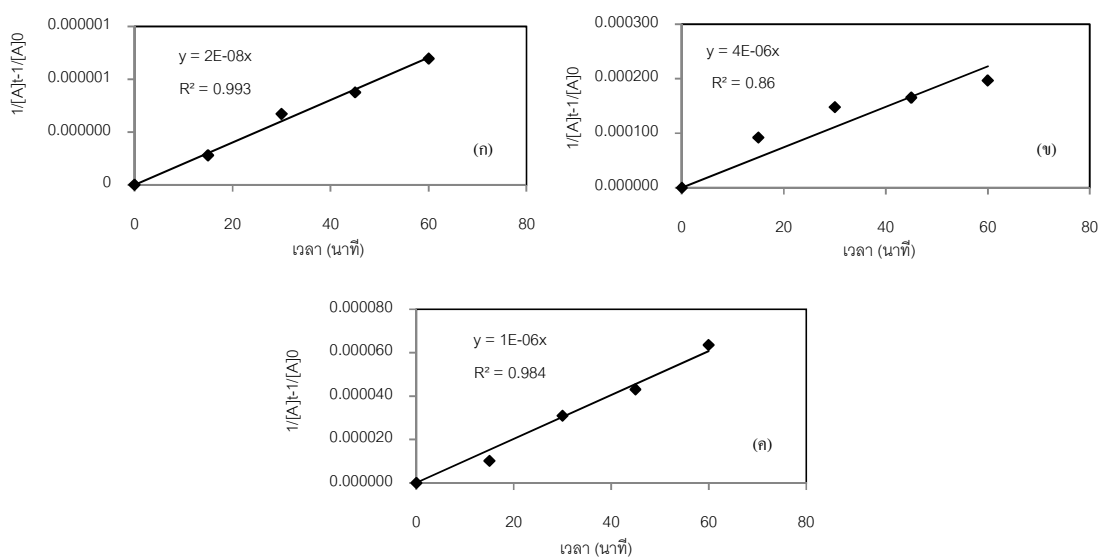
ตารางที่ จ.10 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	pH 2		pH 3		pH 4		pH 5		pH 7	
	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
ค่าซีไอดี	2×10 ⁻⁸	0.9933	2×10 ⁻⁸	0.577	6×10 ⁻⁸	0.7939	4×10 ⁻⁸	0.8312	4×10 ⁻⁸	0.7534
ค่าบีไอดี	4×10 ⁻⁶	0.8600	3×10 ⁻⁶	0.9442	6×10 ⁻⁶	0.7087	5×10 ⁻⁶	0.905	4×10 ⁻⁶	0.9689
ค่าน้ำมัน- ไขมัน	1×10 ⁻⁶	0.9848	6×10 ⁻⁶	0.7843	8×10 ⁻⁶	0.9707	5×10 ⁻⁶	0.9676	5×10 ⁻⁶	0.9786

- pH 2

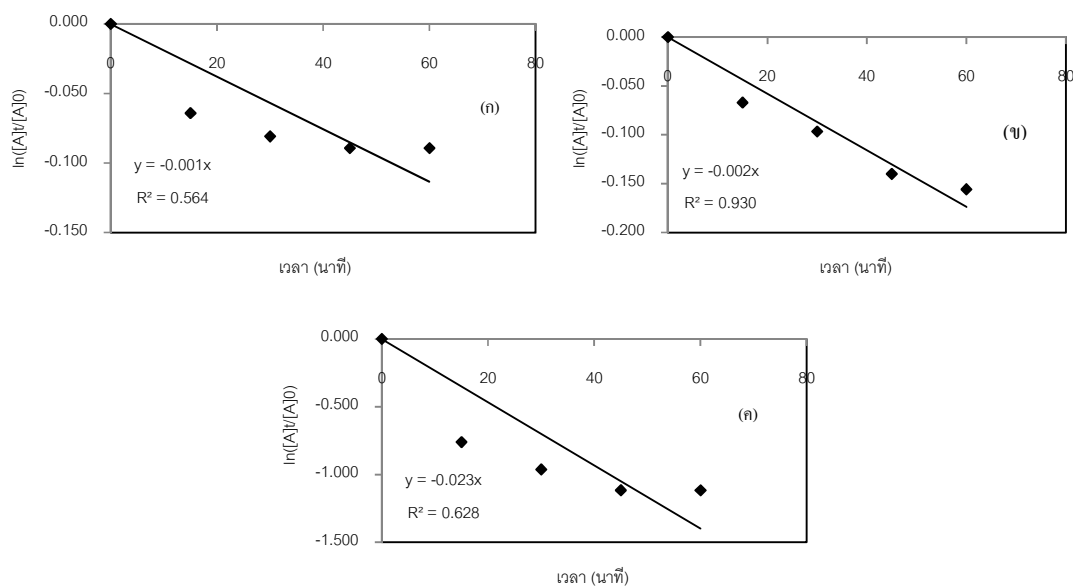


ภาพที่ ๑.25 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความดันกรวด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

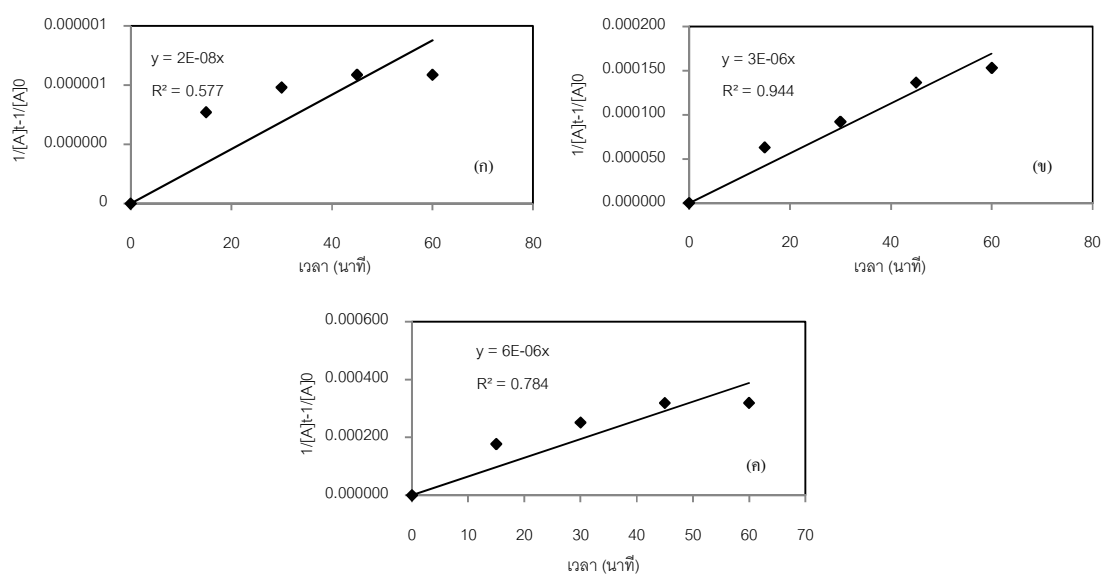


ภาพที่ ๑.26 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความดันกรวด-เบสเท่ากับ 2 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

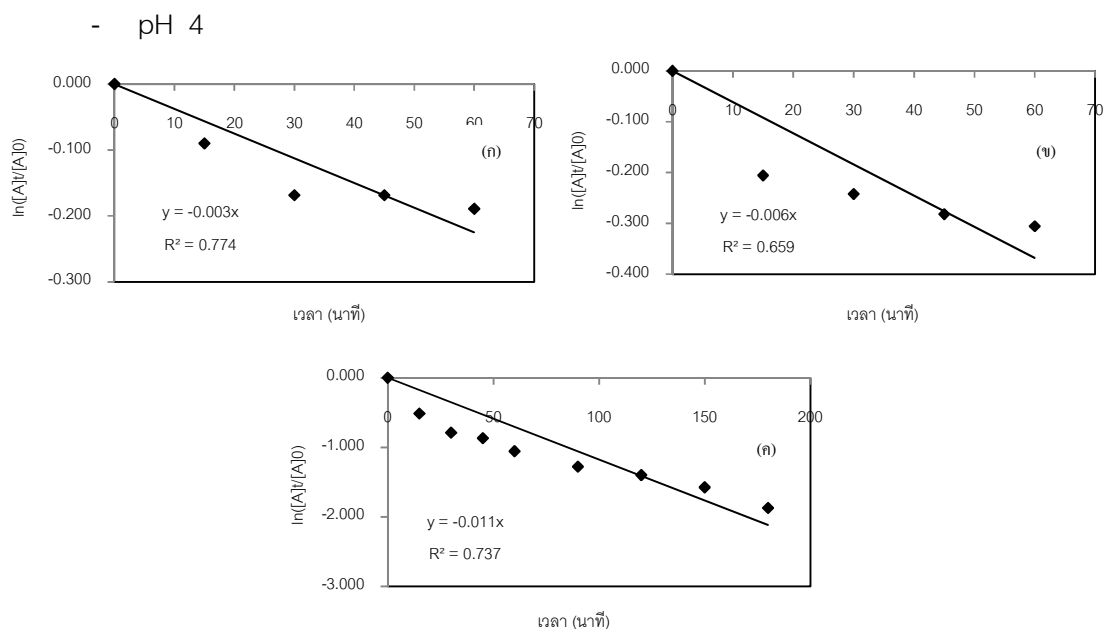
- pH 3



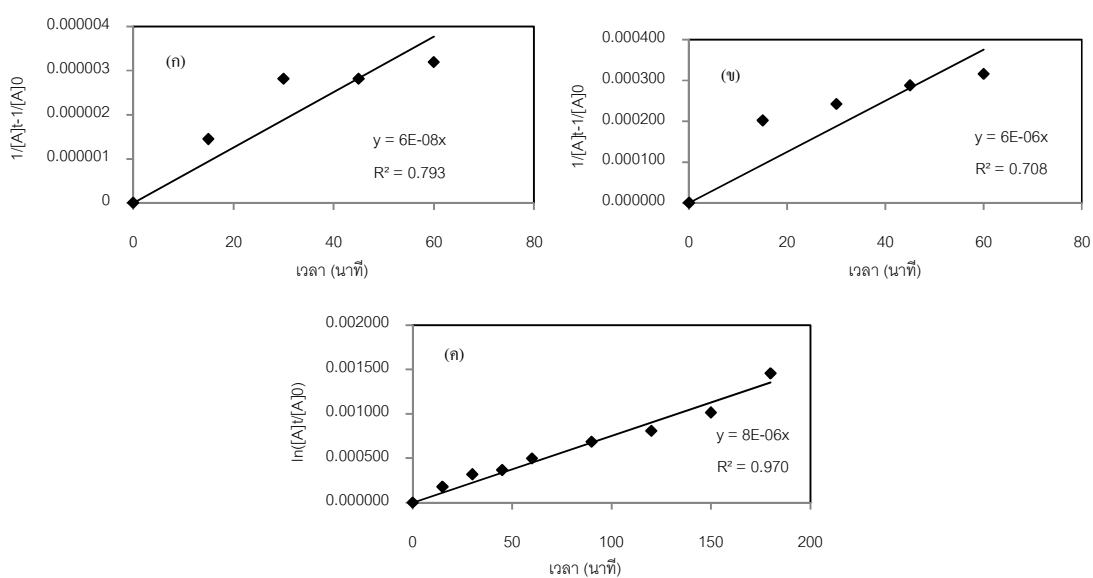
ภาพที่ จ.27 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที



ภาพที่ จ.28 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

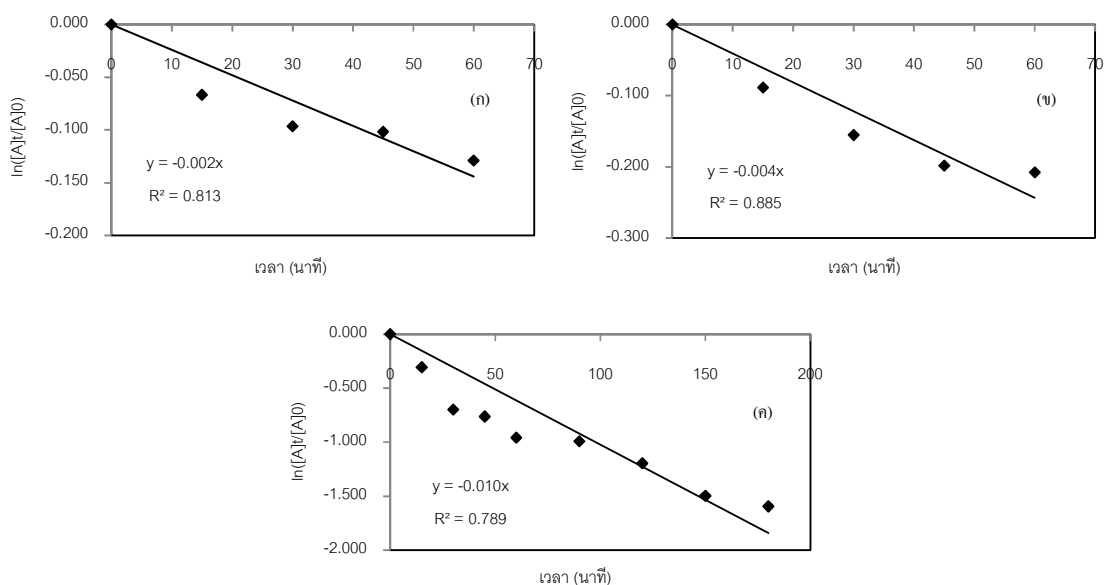


ภาพที่ จ.29 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

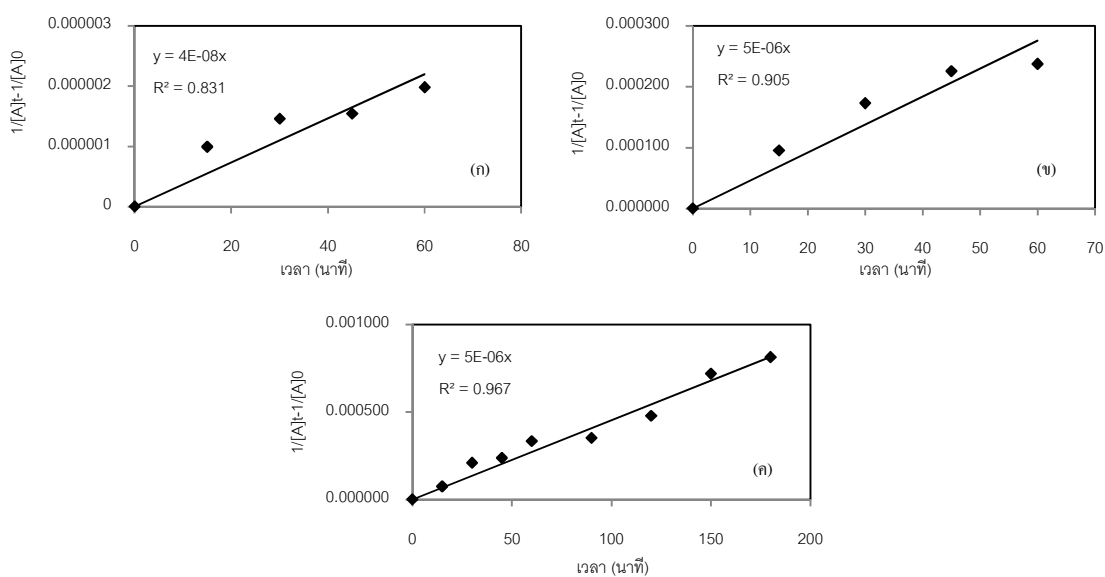


ภาพที่ จ.30 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

- pH 5

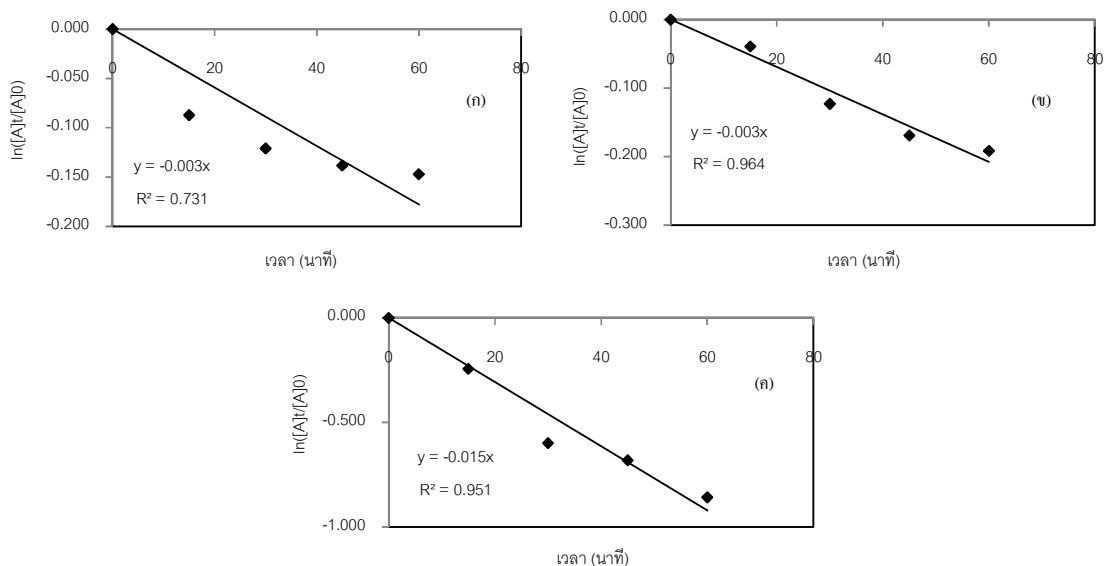


ภาพที่ ๓.๓๑ ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความดันกรวด-เบสเท่ากับ 5 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

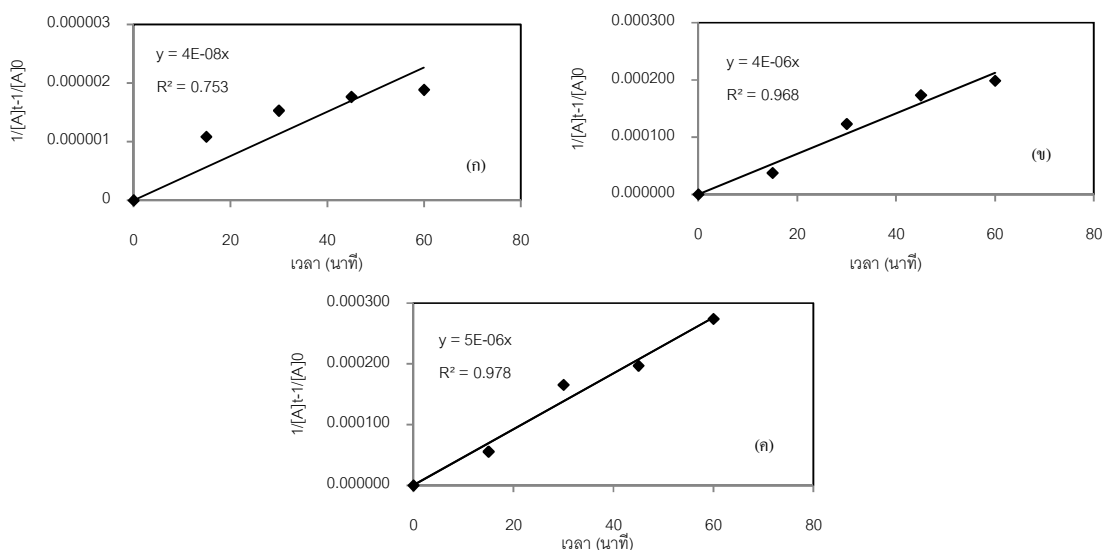


ภาพที่ ๓.๓๒ ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความดันกรวด-เบสเท่ากับ 5 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

- pH 7



ภาพที่ จ.33 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที



ภาพที่ จ.34 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

7. ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

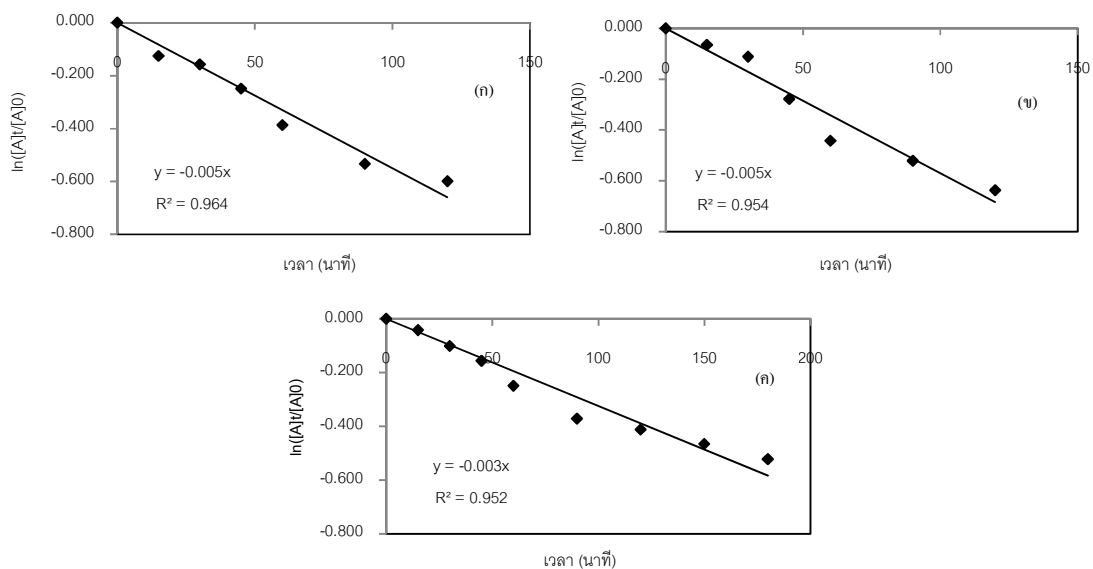
ตารางที่ จ.11 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร		116 แอมแปร์ต่อตารางเมตร		155 แอมแปร์ต่อตารางเมตร		194 แอมแปร์ต่อตารางเมตร		233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร	
	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²	k (min ⁻¹)	R ²
ค่าซีไอดี	0.0032	0.9522	0.0038	0.9894	0.0059	0.9594	0.0063	0.9548	0.0064	0.9345
ค่าบีไอดี	0.0055	0.9649	0.0062	0.9392	0.0067	0.9808	0.0077	0.9604	0.010	0.9877
ค่าน้ำมัน- ไขมัน	0.0057	0.954	0.0071	0.9724	0.0094	0.9614	0.009	0.9038	0.0167	0.9264

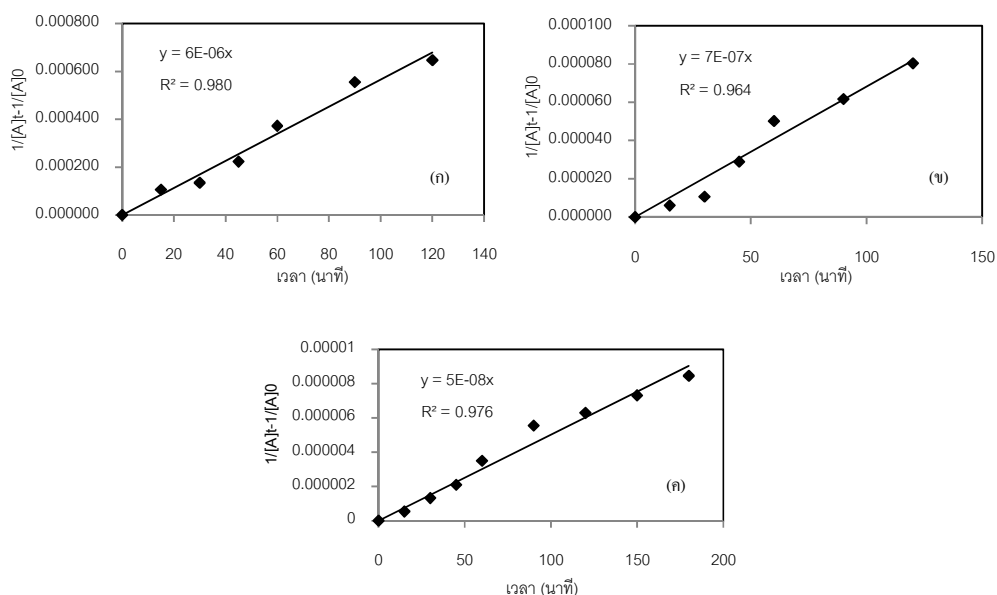
ตารางที่ จ.12 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

พารามิเตอร์	78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร		116 แอมแปร์ต่อตารางเมตร		155 แอมแปร์ต่อตารางเมตร		194 แอมแปร์ต่อตารางเมตร		233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร	
	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	K (L·mol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
ค่าซีไอดี	5×10 ⁻⁸	0.9761	5×10 ⁻⁸	0.9824	9×10 ⁻⁸	0.979	1×10 ⁻⁷	0.9776	1×10 ⁻⁷	0.963
ค่าบีไอดี	6×10 ⁻⁶	0.9803	7×10 ⁻⁶	0.9725	7×10 ⁻⁶	0.9893	9×10 ⁻⁶	0.9893	1×10 ⁻⁵	0.9975
ค่าน้ำมัน- ไขมัน	7×10 ⁻⁷	0.964	9×10 ⁻⁷	0.9926	1×10 ⁻⁶	0.9868	1×10 ⁻⁶	0.9644	2×10 ⁻⁶	0.9781

- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

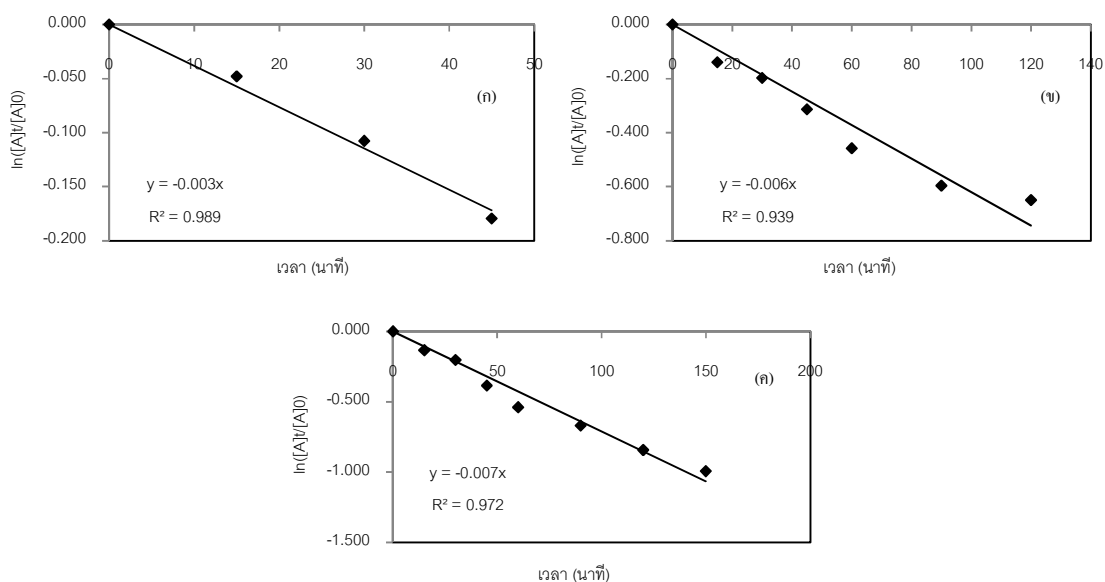


ภาพที่ จ.35 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความดันกรด-เบสเท่ากับ 4 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

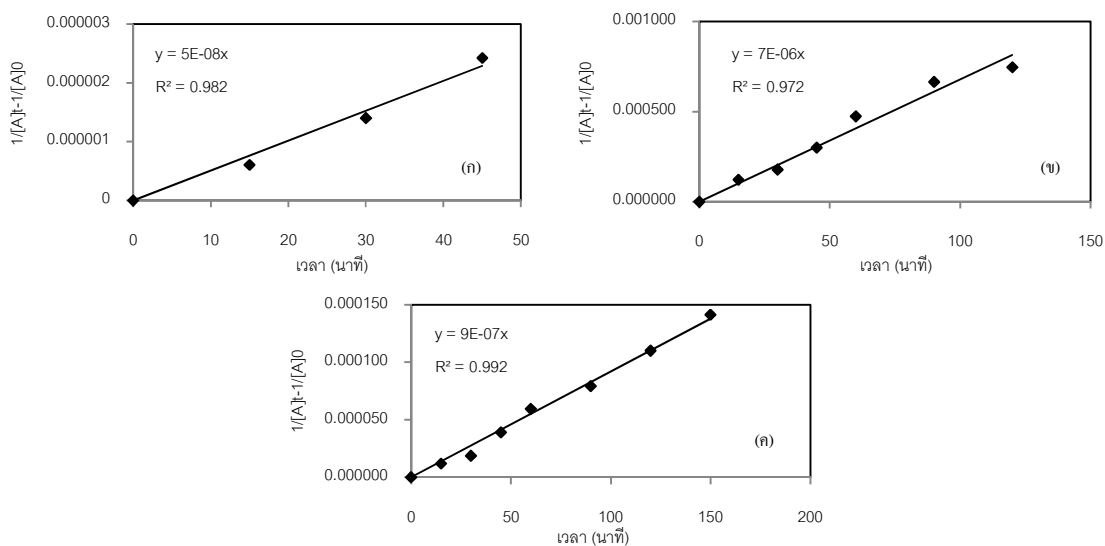


ภาพที่ จ.36 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 78 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 116 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

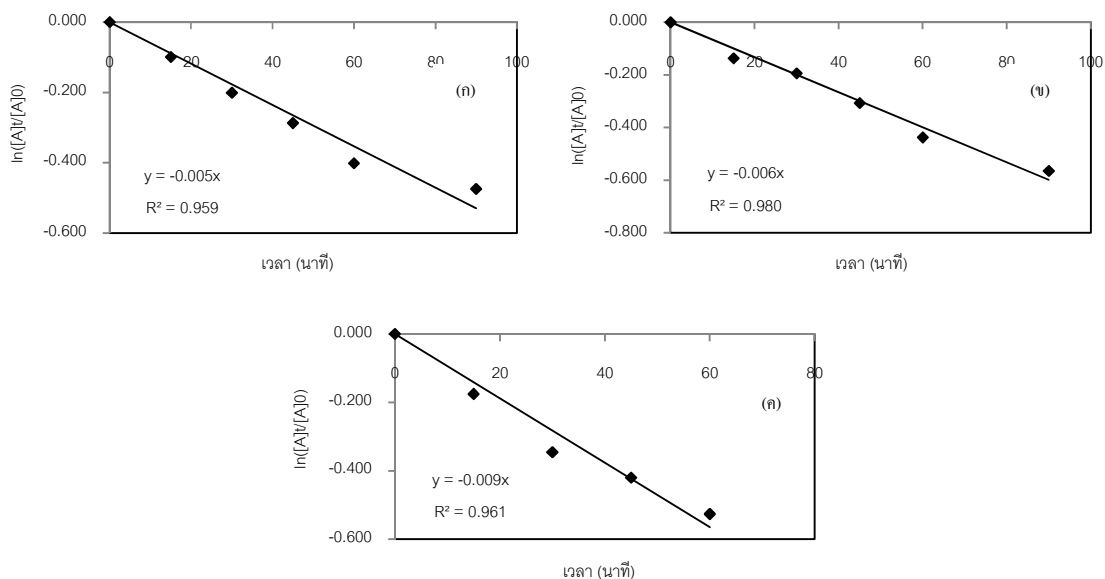


ภาพที่ จ.37 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความดันกรด-เบสเท่ากับ 4 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 116 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

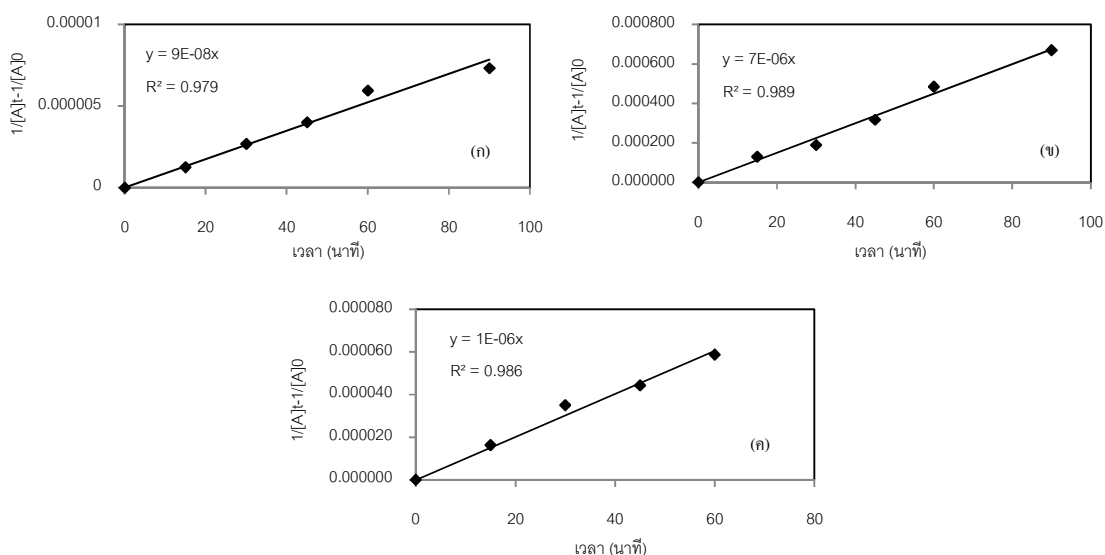


ภาพที่ จ.38 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 116 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 155 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

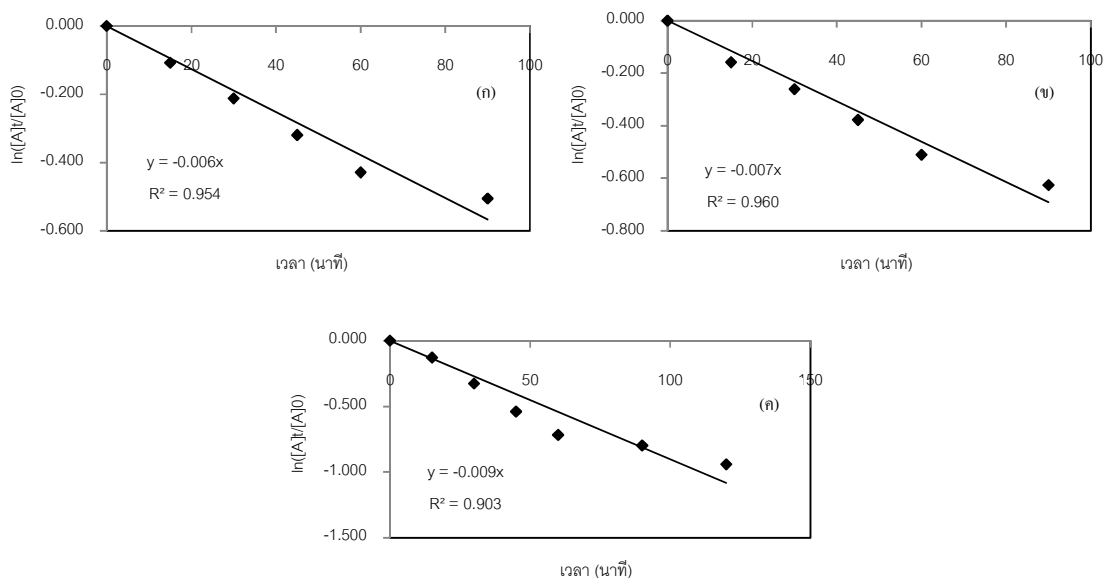


ภาพที่ ๓.39 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 155 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

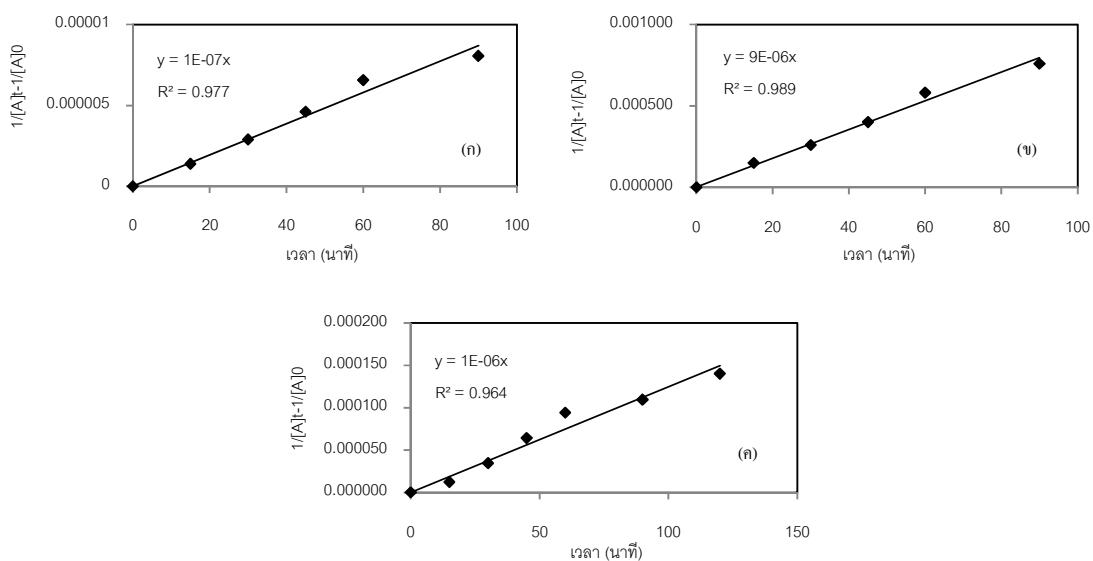


ภาพที่ ๓.40 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 155 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 194 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

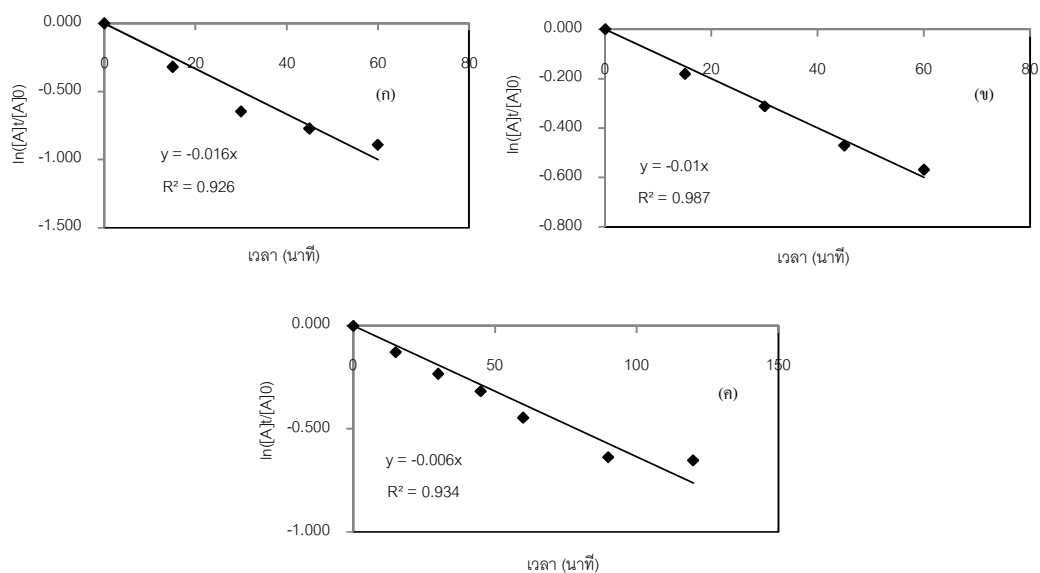


ภาพที่ ๔.๔๑ ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 194 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

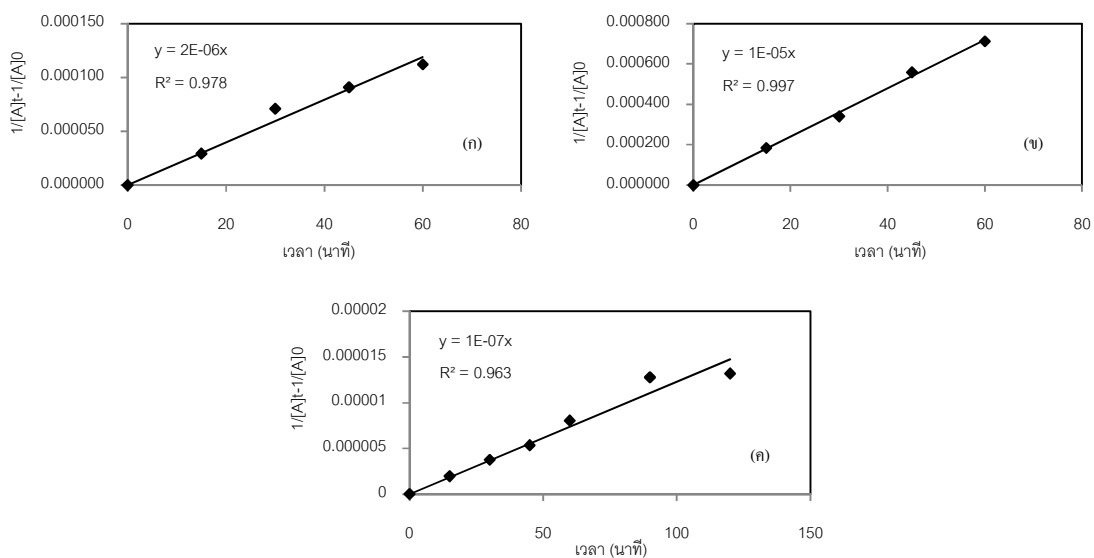


ภาพที่ ๔.๔๒ ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 194 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร



ภาพที่ ๑.๔๓ ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความดันกรวด-เบสเท่ากับ 4 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที



ภาพที่ ๑.๔๔ ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ค่าปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาที ความดันกรวด-เบสเท่ากับ 4 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 233 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 180 นาที

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณัฐินี แก้ววิเชียร เกิดเมื่อวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ.2529 ที่จังหวัดพิจิตร สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2552