

การจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการนำกลับทางเคมีและ
กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า

นางสาวภัทรลักษณ์ จารุวัตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MANAGEMENT OF BIODIESEL WASTEWATER BY THE COMBINED PROCESSES OF
CHEMICAL RECOVERY AND ELECTROCHEMICAL PROCESS

Miss Pattaraluk Jaruwat

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

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

ภัทรลักษณ์ จารุวัตร : การจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการร่วมระหว่าง การนำกลับทางเคมีและกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า. (MANAGEMENT OF BIODIESEL WASTEWATER BY THE COMBINED PROCESSES OF CHEMICAL RECOVERY AND ELECTROCHEMICAL PROCESS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.มะลิ หุ่นสม, 94 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้กระบวนการร่วมระหว่าง การนำกลับทางเคมีและกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า โดยการจัดการน้ำเสียแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การนำกลับไบโอดีเซลโดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้นและการบำบัดโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้ขั้ว Ti/RuO₂ เป็นขั้วไฟฟ้า จากการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับไบโอดีเซลด้วยกรดซัลฟิวริกคือที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 โดยสามารถนำกลับไบโอดีเซลได้ร้อยละ 7 โดยปริมาตร นอกจากนี้ภายหลังจากกระบวนการนำกลับพบว่าสามารถลดค่าบีโอดี ค่าซีโอดี และไขมันได้มากกว่าร้อยละ 13-24 40-74 และ 87-98 ตามลำดับ สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าพบว่าภาวะที่เหมาะสม คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.28 มิลลิแอมแปร์ ต่อตารางเมตร ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 2 และความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 0.061 โมลต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งภาวะดังกล่าวสามารถกำจัดค่าซีโอดีและไขมันได้สำเร็จ และสามารถกำจัดค่าบีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 94.5 ตามลำดับ โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นของสารมลพิษผ่านมาตรฐาน สำหรับกรณีของกระบวนการบำบัดในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่องพบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมคืออัตราการไหลเท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อนาที แต่น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดยังมีค่าบีโอดี ค่าซีโอดี และไขมันสูงกว่ามาตรฐาน 84 500 และ 9.33 เท่า ตามลำดับ

สาขาวิชา..... วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิติ.....
ปีการศึกษา..... 2551..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5087178920 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : BIODIESEL WASTEWATER / CHEMICAL RECOVERY /
ELECTROCHEMICAL TECHNIQUE

PATTARALUK JARUWAT: MANAGEMENT OF BIODIESEL WASTEWATER
BY THE COMBINED PROCESSES OF CHEMICAL RECOVERY AND
ELECTROCHEMICAL PROCESS. ADVISOR: ASST. PROF. MALI HUNSOM,
Ph.D., 94 pp.

This work was carried out to manage wastewater from biodiesel production plant by using 2-step process including biodiesel recovery by H_2SO_4 and electrochemical treatment using Ti/RuO₂ electrode. The results indicated that approximate 7% of biodiesel was recovered from biodiesel wastewater at pH 2 in the presence of H_2SO_4 . After the recovery process, greater than 13-24%, 40-74% and 87-98% of BOD, COD and oil were respectively removed. Consequently, remained wastewater was treated by electrochemical process. The results indicated that the optimum conditions was found at the current density of 4.28 mA/cm², initial pH of 2 and concentration of NaCl of 0.061 M. The concentration of all investigated pollutants were in the acceptable values of the government standard. In case of continuous process, the optimal condition was obtained at the flow rate 2 ml/min, but the concentrations of BOD, COD and oil were still higher than the acceptable values of around 84, 500 and 9.33 times, respectively.

Field of Study : Environmental Science Student's Signature :

Academic Year : 2008 Advisor's Signature :

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ และช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โหมยิตานนท์ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กานดา ว่องไวลิขิต ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำปรึกษาอย่างดียิ่ง

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมีเทคนิค ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ขอขอบพระคุณ บริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลมาใช้ในการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องทุกคน ที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย.....	4
2.2 ความรู้เกี่ยวกับไบโอดีเซล.....	5
2.3 มาตรฐานไบโอดีเซล.....	6
2.3.1 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์.....	6
2.3.2 ความหนาแน่น.....	6
2.3.3 ความหนืด.....	6
2.3.4 จุดวาบไฟ.....	6
2.3.5 กำมะถัน.....	7
2.3.6 คากถ่าน.....	7
2.3.7 เถ้าซัลเฟต.....	7
2.3.8 น้ำ.....	7
2.3.9 สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด.....	7
2.3.10 ค่าของกรด.....	7
2.3.11 กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์.....	8

2.3.12 ค่าไอโอดีน.....	8
2.3.13 เมทานอล.....	8
2.3.14 ก्लीเซอรินอิสระ.....	8
2.3.15 ก्लीเซอรินทั้งหมด.....	8
2.4 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	10
2.4.1 การเตรียมวัตถุดิบน้ำมันพืช.....	10
2.4.2 การเตรียมสารเร่งปฏิกิริยา.....	11
2.4.3 การทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไบโอดีเซล.....	12
2.4.4 การนำเมทานอลกลับคืน.....	12
2.4.5 การแยกส่วนผลิตภัณฑ์.....	12
2.4.6 การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ.....	12
2.4.7 การทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์.....	12
2.5 การจัดการน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	13
2.5.1 กระบวนการทางชีวภาพ.....	13
2.5.1.1 กระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน.....	13
2.5.1.2 กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	15
2.5.2 กระบวนการทางเคมี.....	15
2.5.2.1 กระบวนการตกตะกอนทางเคมีหรือการจับก้อน.....	15
2.6 พื้นฐานของเคมีไฟฟ้า.....	16
2.6.1 องค์ประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	17
2.6.1.1 ขั้วไฟฟ้า.....	17
2.6.1.2 สารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	17
2.6.1.3 แหล่งเหนี่ยวนำพลังงานภายนอก.....	17
2.6.2 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า.....	18
2.6.3 ศักย์ขั้วไฟฟ้า.....	19
2.6.4 หลักการอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า.....	19
2.6.5 สมการเนิร์นสต์.....	20
2.6.6 กฎของฟาราเดย์.....	22
2.6.7 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	23
2.6.7.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	23

2.6.7.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่.....	23
2.6.8 ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า.....	24
2.6.8.1 การถ่ายโอนมวลสาร.....	24
2.6.8.2 ขนาดของขั้วไฟฟ้า.....	25
2.7 การประยุกต์ใช้หลักการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสีย.....	26
2.7.1 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า.....	26
2.7.1.1 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแบบทางตรง.....	26
2.7.1.2 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแบบทางอ้อม.....	26
2.7.2 กระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า.....	28
2.7.3 กระบวนการลอยตัวด้วยกระแสไฟฟ้า.....	29
2.7.4 กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	29
2.7.5 กระบวนการแยกกรองด้วยกระแสไฟฟ้า.....	30
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 แผนงานการวิจัยและการดำเนินการ.....	33
3.1.1 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการวิจัย.....	33
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	33
3.3 สารเคมี.....	34
3.3.1 การวิเคราะห์ซีไอดี.....	34
3.3.2 การวิเคราะห์บีไอดี.....	34
3.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด.....	34
3.3.4 การวิเคราะห์ไขมันและน้ำมัน.....	35
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	35
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	39
4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	39
4.2 การนำกลับไบโอดีเซล.....	40
4.3 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า.....	45
4.3.1 การศึกษาความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารมลพิษในน้ำเสีย.....	45

4.3.2 การบำบัดในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบกะ.....	46
4.3.2.1 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า.....	46
4.3.2.2 ผลของชนิดและความเข้มข้นของสารเติมแต่ง.....	49
4.3.3 การบำบัดน้ำในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง.....	56
4.4 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น.....	59
4.5 ต้นทุนในการดำเนินงาน.....	60
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	63
รายการอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก ความหมายของค่าพารามิเตอร์ในน้ำเสีย.....	69
ภาคผนวก ข มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	71
ภาคผนวก ค การหาสมบัติของน้ำเสีย.....	75
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณ.....	88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	94

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติมาตรฐาน ไบโอดีเซลของยุโรป สหรัฐอเมริกา และไทย.....	9
2.2	ศักยภาพของตัวออกซิไดซ์ตามสารตั้งต้น.....	27
4.1	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	40
4.2	เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบโอดีเซลที่นำกลับมาได้กับ ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ใช้แล้ว และกลีเซอรอลดิบ ตามมาตรฐานของ ASTM.....	43
4.3	เปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆในการจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล.....	59
4.4	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการนำกลับทางเคมีและกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า.....	60
4.5	ต้นทุนในการดำเนินงานจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล.....	62
ค.1	ปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์หาซีไอดี.....	78
ค.2	ขนาดของหลอดแก้ว ปริมาณตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม.....	78
ค.3	การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วงบีไอดี.....	81
ค.4	การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่าง.....	84
ง.1	ผลการวิเคราะห์ T-test ค่าซีไอดีของสารเติมแต่งสองชนิด.....	91
ง.2	ผลการวิเคราะห์ T-test ค่าบีไอดีของสารเติมแต่งสองชนิด.....	92
ง.3	ผลการวิเคราะห์ T-test ค่าไขมันของสารเติมแต่งสองชนิด.....	92

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	11
2.2	ระบบบำบัดแบบโปรยกรอง.....	14
2.3	ระบบบำบัดแบบประดิษฐ์.....	14
2.4	ระบบบำบัดแบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน.....	15
2.5	ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์กระบวนการเคมีไฟฟ้า.....	18
2.6	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	23
2.7	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่.....	24
2.8	การถ่ายโอนมวลสารในสารละลาย.....	25
3.1	ลักษณะการต่อเครื่อง Potentiostat/Galvanostat	36
3.2	เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบกะ.....	36
3.3	เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง.....	37
4.1	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษและความเป็นกรด-เบส และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ โดยปริมาตรของน้ำมันส่วนบนและความเป็นกรด-เบสของสารละลาย	41
4.2	(ก) ลักษณะของน้ำตัวอย่างก่อนทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบส และ (ข) ลักษณะของน้ำตัวอย่างภายหลังจากปรับค่าความเป็นกรด-เบส	41
4.3	IR สเปกตรัมของน้ำมันส่วนบนที่นำกลับมาได้.....	42
4.4	¹ H-NMR สเปกตรัมของน้ำมันส่วนบนที่นำกลับมาได้.....	43
4.5	(ก) โพลาริเซชันของน้ำกลั่นที่ความเป็นกรด-เบสแตกต่างกัน และ (ข) โพลาริเซชันของน้ำตัวอย่างที่ความเป็นกรด-เบส 1 2 3 และ 5	46
4.6	ร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และ ไชมันท์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ และประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ.....	48

ภาพที่		หน้า
4.7	ร้อยละการลดลงของค่าซีโอดี ค่าบีโอดี และไขมันของน้ำเสียในระบบที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในภาวะที่มีการป้อนและไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้า..	50
4.8	ร้อยละการลดลงของค่าซีโอดี ค่าบีโอดี และไขมันของน้ำเสียในระบบที่มีโซเดียมคลอไรด์ในภาวะที่มีการป้อนและไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้า.....	51
4.9	ร้อยละการลดลงของ ค่าซีโอดี ค่าบีโอดี และไขมันกับเวลาที่ความเข้มข้นต่างๆของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ.....	53
4.10	ร้อยละการลดลงของค่าซีโอดี ค่าบีโอดี และไขมันกับเวลาที่ความเข้มข้นต่างๆของโซเดียมคลอไรด์ และประสิทธิภาพเชิงกระแสที่เวลาต่างๆ.....	55
4.11	ร้อยละการลดลงของค่าซีโอดี ค่าบีโอดี และไขมันของน้ำเสียในระบบที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.097 โมลต่อชั่วโมง และโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.061 โมลต่อลิตร ที่เวลาต่างๆ.....	56
4.12	ร้อยละการลดลงของค่าซีโอดี ค่าบีโอดี และไขมันกับเวลาที่อัตราการไหลค่าต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง.....	57
4.13	สีของน้ำตัวอย่างก่อนและหลังการบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า.....	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

เนื่องจากวิกฤตการณ์ด้านพลังงานในปัจจุบันส่งผลให้พลังงานทดแทนได้เข้ามามีบทบาทแทนที่พลังงานเชื้อเพลิง โดยพลังงานทดแทนที่กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบัน ได้แก่ ไบโอดีเซล พลังงานลม และพลังงานน้ำ เป็นต้น

ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทดแทนที่ได้รับการยอมรับและได้รับการสนับสนุนจากรัฐบาลเพื่อใช้ผลิตเป็นพลังงานทดแทนน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตจากทรัพยากรหมุนเวียน ได้แก่ น้ำมันพืช และน้ำมันสัตว์ เช่น ปาล์ม มะพร้าว ถั่วเหลือง ทานตะวัน เมล็ดเรพ สบู่ดำ หรือ น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำมาทำปฏิกิริยาทางเคมีร่วมกับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือเอทานอล เกิดเป็นสารประกอบเอสเทอร์ ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งสารประกอบเอสเทอร์ที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล เรียกว่า ไบโอดีเซล (B100) การผลิตไบโอดีเซล ประกอบด้วย 7 ขั้นตอนหลัก คือ การเตรียมวัสดุและน้ำมันพืช การเตรียมสารเร่งปฏิกิริยา การทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไบโอดีเซล การนำเมทานอลกลับคืน การแยกส่วนผลิตภัณฑ์ การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ และการทำกลีเซอรินให้บริสุทธิ์ ซึ่งในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซล เป็นการนำไบโอดีเซลที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ไปล้างน้ำเพื่อกำจัดกลีเซอรินและสารปนเปื้อนอื่นๆที่สามารถละลายน้ำได้ โดยในการผลิตไบโอดีเซล 100 ลิตร จะก่อให้เกิดน้ำเสีย 20 ลิตร (Suehara และคณะ, 2005) ในปัจจุบันประเทศไทยมีกำลังการผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 1.19 ล้านลิตรต่อวัน ส่งผลให้เกิดปริมาณน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล 238,000 ลิตรต่อวัน (อริญ หันพงศ์กิตติคุณ, 2551) โดยน้ำเสียที่เกิดจากการผลิตไบโอดีเซลจะมีสีขุ่น มีค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 11 และองค์ประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเกลือของกรดไขมัน (เกลือโซเดียมหรือโพแทสเซียม) ซึ่งมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลโดยจะเกิดปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่เหลือจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันได้ผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของสบู่

องค์ประกอบหลักของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นประกอบด้วยไขมัน คาร์บอน และของแข็งในปริมาณสูง นอกจากนี้ยังประกอบด้วยไนโตรเจนในปริมาณต่ำ ทำให้ไม่สามารถย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลถูกปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำย่อมก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีหลายวิธี เช่น กระบวนการบำบัดทางเคมี กระบวนการบำบัดโดยใช้จุลินทรีย์ แต่วิธีดังกล่าวยังมีข้อบกพร่องอยู่ เช่น เกิดกากตะกอนเป็นจำนวนมาก ใช้เวลาในการบำบัดนาน ใช้พื้นที่จำนวนมากในการบำบัด เป็นต้น (Kato และคณะ, 2005) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้สนใจศึกษาการจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า เนื่องจากกระบวนการเคมีไฟฟ้ามีข้อดีคือ ไม่เกิดกากตะกอน ใช้พื้นที่น้อยในการบำบัด ไม่มีสารเคมีตกค้างในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ดำเนินการง่าย มีประสิทธิภาพสูง และใช้เวลาในการบำบัดสั้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อนำกลับไบโอดีเซลที่ตกค้างในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทางเคมี
2. เพื่อบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)
2. พารามิเตอร์ที่ศึกษาคุณภาพน้ำ ได้แก่ ความเป็นกรด-เบส (pH) ไขมัน (Oil) ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) และค่าปริมาณไนโตรเจน (Total Kjeldahl Nitrogen)

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล
2. ศึกษาผลของความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลต่ออัตราการเกิดไบโอดีเซล และอัตราการลดลงของสารมลพิษ
3. ศึกษาช่วงกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมของการเกิดออกซิเดชันของสารมลพิษในน้ำเสียด้วยเครื่อง Potentiostat/Galvanostat
4. ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำล้างจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบกะ (Batch reactor) โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ

- 4.1 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
- 4.2 ชนิดและความเข้มข้นของสารเติมแต่ง
5. ศึกษาการบำบัดน้ำล้างจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง (Continuous reactor)
6. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับไบโอดีเซลที่ตกค้างในน้ำเสียของการผลิตไบโอดีเซล
2. ได้ระบบและภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำล้างจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาและขยายขนาดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้จริงในอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎีและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่ได้มาจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ผ่านปฏิกิริยาทางเคมี เรียกว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะใช้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ผสมกับเอทานอล เมื่อทำปฏิกิริยากันจะเกิดเป็นสารประกอบเอสเทอร์ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลและไดกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม โดยไบโอดีเซลจัดเป็นพลังงานทางเลือกที่สามารถนำมาใช้แทนน้ำมันดีเซลได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีสมบัติที่คล้ายกัน จึงช่วยให้อัตราการใช้น้ำมันดีเซลลดลงรวมถึงลดมลภาวะทางอากาศจากการใช้น้ำมันดีเซลให้ลดน้อยลงอีกด้วย อย่างไรก็ตามขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลในกระบวนการผลิตได้ก่อให้เกิดน้ำเสียเป็นจำนวนมาก จึงทำให้มีการคิดค้นวิธีการในการบำบัดน้ำล้างไบโอดีเซลให้มีสมบัติดีขึ้นและสามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

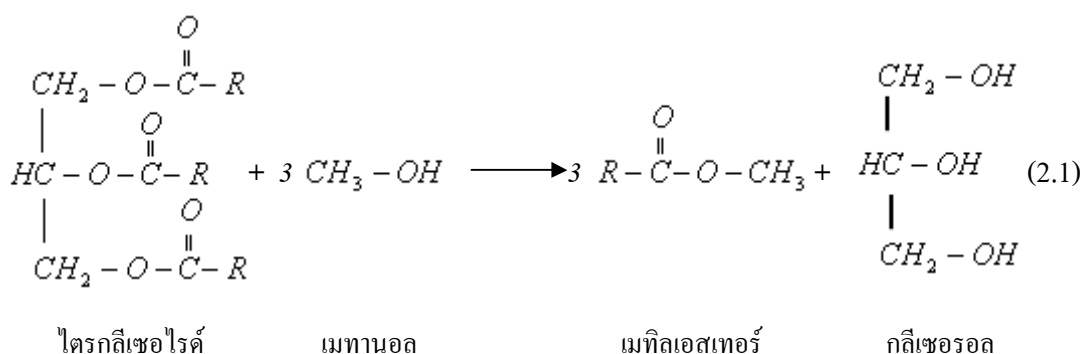
2.1 สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย

ปัจจุบันประเทศไทยประสบปัญหาวิกฤตด้านพลังงานเช่นเดียวกับหลายๆ ประเทศที่พึ่งพาการนำเข้าพลังงานเนื่องจากราคาน้ำมันปิโตรเลียมที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่เดียวกันก็ประสบปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากการใช้พลังงานจากปิโตรเลียมส่งผลกระทบต่อให้เกิดภาวะโลกร้อน และปัญหาสิ่งแวดล้อมอื่นๆตามมา โดยการใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทดแทนเป็นแนวทางหนึ่งที่จะสร้างความมั่นคงด้านพลังงานให้กับประเทศ เนื่องจากช่วยลดการนำเข้าพลังงาน รักษาปริมาณพืชผลทางการเกษตรให้เกิดสมดุล และลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้ในเวลาเดียวกัน โดยประเทศไทยมีการใช้จ่ายด้านพลังงานสูงขึ้นทุกปี ในปี พ.ศ.2547 ประเทศไทยนำเข้าน้ำมันดิบถึงวันละ 870,000 บาร์เรล มูลค่า 487,000 ล้านบาท ในช่วงแรกของปี พ.ศ.2548 ถึงแม้ว่ามีการนำเข้าน้ำมันลดลงก็ตาม แต่ด้วยราคาน้ำมันที่สูงขึ้นเป็นลำดับทำให้มูลค่าการนำเข้าสูงขึ้นส่งผลกระทบต่อดุลการค้าของประเทศอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบมูลค่าการนำเข้าพลังงานและการส่งออกสินค้าเกษตรกรรมในปี พ.ศ.2547 พบว่ารายได้กว่าร้อยละ 60 ของสินค้าเกษตรกรรมที่ส่งออกถูกใช้ไปในการนำเข้าพลังงานของประเทศ โดยที่การนำเข้าพลังงานในรูปของน้ำมันดิบ น้ำมันสำเร็จรูปและถ่านหินมีมูลค่าถึง 540,436 ล้านบาท ในขณะที่การส่งออกสินค้าเกษตรกรรมมีมูลค่า 882,955 ล้านบาท (กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2550)

พลังงานของประเทศที่ใช้ในปัจจุบันมาจากปิโตรเลียมร้อยละ 49 ส่วนใหญ่ใช้ในการคมนาคมและขนส่ง เมื่อแยกการใช้พลังงานตามสาขาเศรษฐกิจพบว่ามีการใช้พลังงานสูงสุดในสาขาคมนาคมและขนส่งคิดเป็นร้อยละ 37 รองลงมาได้แก่ สาขาอุตสาหกรรมร้อยละ 36 สาขาธุรกิจและครัวเรือนร้อยละ 21 และสาขาเกษตรกรรมร้อยละ 6 ตามลำดับ และเนื่องจากการใช้พลังงานของประเทศส่วนใหญ่มาจากปิโตรเลียม ประเทศไทยมีพลังงานจากแหล่งฟอสซิลในจำนวนจำกัดไม่เพียงพอกับความต้องการจึงจำเป็นต้องนำเข้าเป็นส่วนใหญ่ ทำให้สูญเสียเงินตราต่างประเทศ ขาดความสามารถในการแข่งขันกับต่างประเทศ และจะเป็นปัญหาด้านความมั่นคงในการจัดหาพลังงานในอนาคต นอกจากนี้แล้วการใช้พลังงานจากฟอสซิลยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ประเทศไทยโดยกระทรวงพลังงานจึงได้จัดทำยุทธศาสตร์พลังงานทดแทนขึ้นในปี พ.ศ.2547 เพื่อเป็นการสร้างความมั่นคงด้านพลังงานและเพิ่มขีดความสามารถทางการแข่งขันของประเทศ โดยคณะรัฐมนตรีได้ให้ความเห็นชอบในยุทธศาสตร์พลังงานทดแทนที่กำหนดเป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนของไทยเป็นร้อยละ 8 ของการใช้พลังงานทั้งหมด หรือ 6,540 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ภายในปี พ.ศ.2554 โดยไบโอดีเซลได้ถูกจัดเป็นส่วนหนึ่งของเป้าหมายพลังงานทดแทนด้วย ซึ่งกระทรวงพลังงานได้จัดทำแผนปฏิบัติการพัฒนาและส่งเสริมไบโอดีเซลเป็น 2 ระดับคือ ไบโอดีเซลระดับชุมชน และไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ โดยในระหว่างปี พ.ศ.2548-2549 เป็นการส่งเสริมไบโอดีเซลระดับชุมชนไปพร้อมๆ กับการกำหนดมาตรฐานไบโอดีเซลของประเทศ โดยส่งเสริมให้มีการใช้ไบโอดีเซลผสมในน้ำมันดีเซลร้อยละ 5 (B5) ส่วนไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ กำหนดให้เริ่มทำการผลิตตั้งแต่ปี พ.ศ.2550 และมีเป้าหมายการใช้ไบโอดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 10 (B10) ทั่วประเทศ โดยคาดว่าจะมีความต้องการไบโอดีเซล 8.5 ล้านลิตรต่อวันในปี พ.ศ.2555

2.2 ความรู้เกี่ยวกับไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นสารเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำมันพืช น้ำมันสัตว์หรือน้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ที่ผ่านการใช้งานแล้วกับเมทานอลหรือเอทานอล ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ดังแสดงในสมการที่ 2.1 (สภาผู้แทนราษฎร, คณะกรรมการพลังงาน, 2545) โดยปฏิกิริยาทางเคมีชนิดทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์และเมทานอลจะทำให้ได้สารเมทิลเอสเทอร์ซึ่งก็คือไบโอดีเซล และได้กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม



2.3 มาตรฐานไบโอดีเซล

การควบคุมคุณภาพของไบโอดีเซลนับเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเพิ่มความมั่นใจของการใช้ไบโอดีเซลเพื่อจะไม่ส่งผลกระทบต่อเครื่องยนต์และสิ่งแวดล้อม โดยมีการประกาศมาตรฐานไบโอดีเซลขึ้น โดยกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน ดังแสดงในตารางที่ 1

2.3.1 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ปริมาณเมทิลเอสเทอร์แสดงถึงความสำเร็จของไบโอดีเซลและการเกิดปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลที่สมบูรณ์ มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 96.5 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณเอสเทอร์น้อยกว่าที่กำหนด นั่นคือชี้บ่งถึงการมีมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ หรือไตรกลีเซอไรด์อยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณที่สูงกว่ากำหนด ส่งผลให้ความหนืดของไบโอดีเซลมีค่าสูง ซึ่งอาจทำให้เกิดกับการอุดตันในหัวฉีดหรือกระบอกสูบของเครื่องยนต์

2.3.2 ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบหัวฉีดจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ค่าความหนาแน่นเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง เมื่อค่าความหนาแน่นมีค่ามากจะให้พลังงานความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณเดียวกัน ความหนาแน่นของไบโอดีเซลจากวัตถุดิบน้ำมันพืชแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ปริมาณเมทานอลที่ตกค้างในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำอีกด้วย

2.3.3 ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความหนืดเกี่ยวข้องกับการไหล การฉีดเป็นฝอยของหัวฉีดในห้องเผาไหม้ การฉีดเป็นฝอยขนาดเล็กจะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ ความหนืดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบ โดยความหนืดยังเป็นดัชนีแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกทางหนึ่ง

2.3.4 จุดวาบไฟ จุดวาบไฟเป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดเมื่อเปลวไฟผ่านเหนือไอของน้ำมันแล้วทำให้น้ำมันติดไฟ มาตรฐานกำหนดให้มีค่าจุดวาบไฟมากกว่า 120 องศาเซลเซียส ปริมาณเมทานอลที่หลงเหลือในไบโอดีเซลทำให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานได้ โดยจุดวาบไฟมีผลต่อการขนส่ง

เคลื่อนย้ายและการจัดเก็บ ซึ่งปริมาณเมทานอลที่ยังคงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณมากกว่าร้อยละ 0.2 จะส่งผลให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส

2.3.5 กำมะถัน ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ เนื่องจากน้ำมันพืชดิบที่ใช้ในการผลิตมักมีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำกว่า 15 ส่วนในล้านส่วน องค์ประกอบกำมะถันในน้ำมันเมื่อถูกเผาไหม้จะเปลี่ยนเป็นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งถูกปล่อยออกมาพร้อมไอเสียจากเครื่องยนต์และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.3.6 กากถ่าน ปริมาณกากถ่านมีความสัมพันธ์กับปริมาณกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ สบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ยังหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล หากมีปริมาณกากถ่านสูงกว่าข้อกำหนด ชี้ออกถึงการตกค้างของสารต่างๆที่กล่าวข้างต้นหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล นอกจากนี้ยังแสดงถึงแนวโน้มของปริมาณกากถ่านที่เหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ โดยกากถ่านมีผลต่อการอุดตันในหัวฉีดหรือที่ลูกสูบทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง และยังทำให้เครื่องยนต์สกปรกต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องบ่อยครั้ง

2.3.7 เถ้าซัลเฟต เกิดจากการเผาไหม้ของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการตกค้างของสบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณเถ้าซัลเฟตมีผลต่อการอุดตันในเครื่องยนต์

2.3.8 น้ำ ปริมาณน้ำในน้ำมันทำให้การเผาไหม้ไม่ดี นอกจากนี้ในไบโอดีเซลยังเป็นที่สาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกระหว่างน้ำกับเอสเทอร์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์และเป็นตัวเร่งให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเก็บน้ำมันที่เป็นเหตุทำให้หัวฉีดอุดตัน

2.3.9 สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด โดยสารปนเปื้อนในน้ำมันส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสบู่ของกรดไขมันอิสระและตัวเร่งปฏิกิริยาเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารที่ไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสบู่ ได้แก่ ไขมันที่ไม่อยู่ในรูปของกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ กรดไขมันที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นแอลกอฮอล์ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน แอลกอฮอล์อย่างแข็ง ไครโทพีน แอลกอฮอล์ สารประกอบแคโรทีน วิตามิน และอื่นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของวัตถุดิบน้ำมันพืชเริ่มต้น โดยทั่วไปสิ่งปนเปื้อนทั้งหมดจะถูกกำจัดออกจากไบโอดีเซลในขั้นตอนของการล้างน้ำซึ่งถ้าหากมีสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลจะพบว่าผลเสียต่อเครื่องยนต์หลายด้าน เช่น เสถียรภาพของไบโอดีเซลระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากองค์ประกอบของสารที่ไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาของสบู่เปลี่ยนสภาพกลายเป็นสารที่มีผลในการลดความเสถียรของไบโอดีเซล

2.3.10 ค่าของกรด แสดงความเป็นกรดในน้ำมันไบโอดีเซลซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบน้ำมันพืชและปริมาณกรดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลซึ่งมีผลต่อการ

กักคร่อนในเครื่องยนต์ ทำให้อายุการใช้งานของปั๊มและไส้กรองน้ำมันลดลง นอกจากนี้ยังแสดงถึงการเสื่อมสภาพของน้ำมันอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกจากปริมาณน้ำที่ปนอยู่ในน้ำมัน และผลของภาวะในการจัดเก็บ

2.3.11 กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ แสดงถึงพันธะคู่หรือความไม่อิ่มตัวของไบโอดีเซล ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดพอลิเมอร์ในเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการอุดตันและการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง ปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เลือกมาใช้เป็นวัตถุดิบ

2.3.12 ค่าไอโอดีน แสดงถึงพันธะคู่ในน้ำมันซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ค่าไอโอดีนต่ำแสดงถึงการมีสัดส่วนกรดไขมันอิ่มตัวในโครงสร้างไบโอดีเซลสูง ทำให้ไม่มีแนวโน้มในการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังมีความสัมพันธ์กับจุดขุ่น ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มเกิดไขหรือจับตัวเป็นก้อนแข็ง ไบโอดีเซลที่มีค่าไอโอดีนต่ำจะมีจุดขุ่นสูง ซึ่งมีผลต่อการใช้งานสภาพอากาศเย็น ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบมีค่าไอโอดีน 50-55 กรัมธุรกิจพลังงานกำหนดให้ค่าไอโอดีนไม่สูงกว่า 120 กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัม

2.3.13 เมทานอล เมทานอลเป็นสารตั้งต้นที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกให้หมดก่อนนำไบโอดีเซลออกจำหน่ายจึงต้องมีเมทานอลต่ำในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล จุดวาบไฟขั้นต่ำของไบโอดีเซลคือ 130 องศาเซลเซียส เมทานอลมีค่าจุดวาบไฟต่ำ ถ้ายังมีเมทานอลปะปนอยู่ในไบโอดีเซลจะส่งผลทำให้ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟต่ำลงด้วยซึ่งมีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษา การขนส่งและการนำมาใช้ในเครื่องยนต์ เมทานอลมีค่าความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 5 จะมีผลกระทบต่อค่าซีเทน และความหล่อลื่นของน้ำมัน

2.3.14 กลีเซอรินอิสระ ปริมาณกลีเซอรินที่ยังเหลืออยู่ในไบโอดีเซลเนื่องมาจากการแยกกลีเซอรินไม่สมบูรณ์ทำให้มีปัญหาการแยกชั้นของกลีเซอรินในการจัดเก็บไบโอดีเซล รวมถึงการสะสมที่บริเวณด้านล่างของถังน้ำมัน โดยพบว่ากลีเซอรินมีผลต่อการอุดตันที่หัวฉีดและระบบลำเลียงน้ำมัน

2.3.15 กลีเซอรินทั้งหมด กลีเซอรินทั้งหมดคือปริมาณของกลีเซอรินอิสระและปริมาณกลีเซอรินในโมเลกุลมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ที่เจือปนในองค์ประกอบไบโอดีเซลซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันไม่สมบูรณ์ มีผลก่อให้เกิดการอุดตันที่บริเวณหัวฉีดและไส้กรองและปัญหาการใช้งานในสภาพอากาศอากาศเย็น

ตารางที่ 2.1 สมบัติมาตรฐานไบโอดีเซลของยุโรป สหรัฐอเมริกา และไทย (กรมธุรกิจพลังงาน, มาตรฐานยุโรป และมาตรฐาน ASTM, 2550)

คุณสมบัติ	ยุโรป	สหรัฐอเมริกา	ไทย
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	860-900	-	860-900
ค่าความหนืด (เซนติสโตกส์)	3.5-5	1.9-6	3.5-5
ค่าแคลเซียม แมกนีเซียม (มิลลิกรัมต่อ กิโลกรัม)	ไม่เกิน 5		
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	120	93	120
กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่เกิน 10	ไม่เกิน 15	ไม่เกิน 10
กากถ่าน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่เกิน 0.03	ไม่เกิน 0.05	ไม่เกิน 0.03
ซีเทน	51	47	51
เถ้าซัลเฟต (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่เกิน 0.02		
น้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่เกิน 0.05		
สิ่งปนเปื้อน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่เกิน 0.0024	-	ไม่เกิน 0.0024
การกัดกร่อนทองแดง	1	3	1
เสถียรภาพออกซิเดชัน (ชั่วโมง)	6	3	6
ค่าของกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)	ไม่เกิน 0.5	3	ไม่เกิน 0.5
เมทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่เกิน 0.2		
มอนอกลิเซอริน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่เกิน 0.8	-	ไม่เกิน 0.8
ไดกลีเซอริน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่เกิน 0.2	-	ไม่เกิน 0.2
ไตรกลีเซอริน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่เกิน 0.02	-	ไม่เกิน 0.02
กลีเซอรินรวม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.25	0.24	0.25
ไอโอดีน (กรัมไอโอดีนต่อหนึ่งร้อยกรัม)	ไม่เกิน 120	-	ไม่เกิน 120
ฟอสฟอรัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่เกิน 0.001		
เมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	96.5	-	96.5

2.4 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซลในเชิงอุตสาหกรรมอาจเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องก็ได้ ขึ้นกับการออกแบบกระบวนการผลิต แต่ส่วนใหญ่มักเป็นปฏิกิริยาที่ใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีความคุ้มทางเศรษฐศาสตร์สูง โดยเป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้ภาวะในการผลิตและความดันต่ำและใช้เวลาสั้นกว่าการใช้กรดเป็นสารเร่งปฏิกิริยา (พิสมัย และลลิตา, 2549)

อย่างไรก็ตามในการผลิตต้องคำนึงถึงการทำให้ปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์เพื่อให้ได้ร้อยละสูงสุด และเกิดการสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่

- อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา
- อัตราส่วนระหว่างน้ำมันและแอลกอฮอล์
- ชนิดและความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา
- การผสมสารตั้งต้น
- ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้น

โดยขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและกระบวนการที่ใช้ ซึ่งขั้นตอนในการผลิตสามารถแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 2.1 กล่าวคือ

1. การเตรียมวัตถุดิบน้ำมันพืช
2. การเตรียมสารเร่งปฏิกิริยา
3. การทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไบโอดีเซล
4. การนำเมทานอลกลับคืน
5. การแยกส่วนผลิตภัณฑ์
6. การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ
7. การทำกลีเซอรินให้บริสุทธิ์

2.4.1 การเตรียมวัตถุดิบน้ำมันพืช

ก่อนทำการป้อนน้ำมันพืชเข้าสู่ระบบการผลิตต้องทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด และปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันพืชด้วยวิธีการไทเทรตเพื่อให้ทราบถึงปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่ต้องใช้ในการทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไบโอดีเซล น้ำมันพืชทั้งน้ำมันใหม่หรือน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วจะมีค่าความเป็นกรดในปริมาณที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดก่อนทำปฏิกิริยาจะทำให้การผลิตไบโอดีเซลได้ผลผลิตสูงและเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ จากนั้นจึงป้อนน้ำมันเข้า

2.4.3 การทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไบโอดีเซล

ทุกครั้งที่ทำการผลิตจะต้องให้สารตั้งต้นมีเวลาเพียงพอที่จะผสมกันและทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ โดยการเก็บตัวอย่างจากถังปฏิกรณ์และตรวจเช็คการเกิดปฏิกิริยาเป็นระยะๆ เพื่อให้มั่นใจว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และได้ไบโอดีเซลที่มีคุณภาพสม่ำเสมอและได้มาตรฐาน

2.4.4 การนำเมทานอลกลับคืน

โดยทั่วไปปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลมักใช้เมทานอลในปริมาณที่มากเกินไป เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ ดังนั้นหลังการทำปฏิกิริยาจะมีเอทานอลเหลืออยู่ซึ่งควรนำมาหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ โดยอาจทำการกลั่นเมทานอลกลับคืนจากส่วนก่อนการแยกส่วนผลิตภัณฑ์หรือหลังการแยกส่วนเป็นไบโอดีเซลและกลีเซอรอลแล้ว ซึ่งต้องระวังไม่ให้มีน้ำปะปนในส่วนของเมทานอลที่กลั่นได้ เพื่อให้การหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่เกิดประสิทธิภาพอย่างสูงสุด

2.4.5 การแยกส่วนผลิตภัณฑ์

หลังจากการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันแล้วจะเกิดผลผลิต 2 ชนิด คือ สารเอสเทอร์และกลีเซอรอล ซึ่งสาร 2 ชนิดนี้มีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน โดยสารเอสเทอร์และกลีเซอรอล มีความหนาแน่นประมาณ 880 และ 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ทำให้ผลผลิตทั้งสองชนิดนี้สามารถแยกชั้นได้ดี โดยมีสารเอสเทอร์หรือไบโอดีเซลอยู่ชั้นบนและกลีเซอรอลอยู่ชั้นล่าง ซึ่งในการผลิตไบโอดีเซลนั้นสามารถทำการแยกส่วนผลิตภัณฑ์ได้โดยปล่อยกลีเซอรอลให้แยกออกจากส่วนล่างของถังไปยังถังเก็บ ในการแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลอาจเลือกใช้เครื่องเหวี่ยงแยกแทนการปล่อยให้แยกชั้น โดยไบโอดีเซลจากชั้นบนจะไหลออกไปและถูกส่งไปยังถังล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำต่อไป

2.4.6 การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ

เมื่อไบโอดีเซลถูกส่งมายังถังล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำจะทำการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำอุ่นเพื่อล้างสารเร่งปฏิกิริยาที่เหลือจากปฏิกิริยาและล้างสบู่ที่ออกมา เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีสารปนเปื้อนเหลืออยู่ หลังจากล้างน้ำแล้วไบโอดีเซลยังคงมีน้ำเหลืออยู่เล็กน้อย ซึ่งสามารถกำจัดน้ำออกได้โดยผ่านเครื่องระเหยน้ำและผ่านการกรองอีกครั้งแล้วจึงส่งไบโอดีเซลเข้าถังเพื่อรอจำหน่าย

2.4.7 การทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์

กลีเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซลจะมีน้ำผสมอยู่ด้วยดังนั้นจากชั้นของกลีเซอรอลที่แยกออกมาจึงเรียกว่ากลีเซอรินซึ่งหมายถึงกลีเซอรอลผสมอยู่กับน้ำ อย่างไรก็ตามกลีเซอรอลดิบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซลมักมีความบริสุทธิ์ต่ำประมาณร้อยละ 60

นอกจากมีน้ำปะปนอยู่จำนวนมากแล้วยังมีสารเร่งปฏิกิริยาที่เหลือจากการใช้ในปฏิกิริยา และมีสบู่ที่เกิดจากปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันปะปนอยู่ด้วย จึงต้องทำการแยกออกเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับกลีเซอรอลดิบ โดยทั่วไปมักใช้วิธีแยกออกด้วยการทำปฏิกิริยาคัวยกรด ซึ่งในปฏิกิริยานั้นสบู่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดไขมันและเกลือ เมื่อตั้งทิ้งไว้กรดไขมันจะแยกชั้นออกจากกลีเซอรอลทำให้ได้กลีเซอรอลที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปกลีเซอรอลที่ได้จะมีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 80-88 และจะถูกส่งเข้าถังเก็บต่อไป

2.5 การจัดการน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

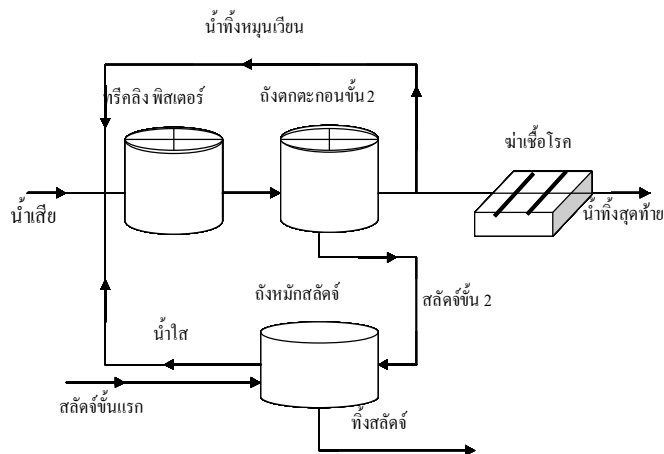
น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลส่วนใหญ่ประกอบด้วยไขมัน สบู่ และสารอินทรีย์ในรูปของสารแขวนลอย นอกจากนี้ยังประกอบด้วยไนโตรเจนในปริมาณต่ำ ทำให้ไม่สามารถย่อยสลายได้ง่ายตามธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อน้ำเสียถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติย่อมส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันจึงมีการพัฒนาวิธีการในการจัดการน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักๆคือ

2.5.1 กระบวนการทางชีวภาพ โดยกระบวนการทางชีวภาพที่มีการพัฒนามาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่พบส่วนใหญ่ได้แก่

2.5.1.1 กระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน

1) ระบบโปรยกรอง

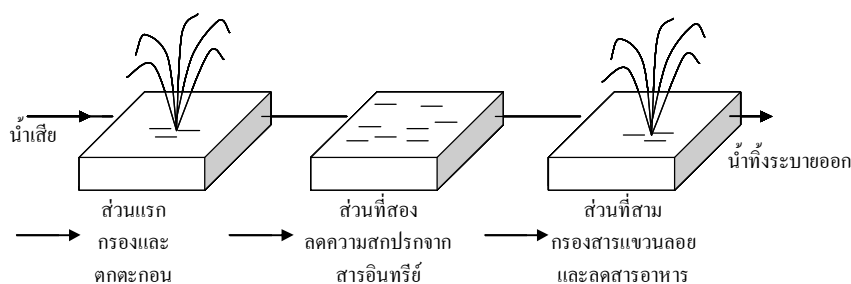
ระบบโปรยกรอง ประกอบด้วยถังที่บรรจุตัวกลางที่มีไบโอฟิล์มเคลือบอยู่ และพร้อมที่จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ปนเปื้อนในน้ำเสีย ในการบำบัดจะเริ่มจากการปล่อยน้ำเสียจากด้านบนของถังผ่านตัวกลางลงสู่ด้านล่าง ซึ่งในขณะที่น้ำเสียผ่านตัวกลางจะเกิดการย่อยสลายโดยสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะแพร่เข้าไปในชั้นน้ำไปยังชั้นไบโอฟิล์มที่มีออกซิเจนหรือชั้นฟิล์มที่ไม่มีออกซิเจน และจะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นสารตัวกลางรวมทั้งเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำร่วมกับการแลกเปลี่ยนแก๊สออกซิเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สอื่นๆ นอกจากนี้ที่ก้นถังจะมีน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว รวมทั้งเมือกชีวภาพที่หลุดออกมาบางส่วน ซึ่งจะนำไปกำจัดตะกอนต่อไป



ภาพที่ 2.2 ระบบบำบัดแบบโปรยกรอง (www.health.hcu.ac.th)

2) ระบบบึงประดิษฐ์

ระบบบึงประดิษฐ์ (Construction wetland) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยกระบวนการทางธรรมชาติโดยการใช้พืชที่มีประสิทธิภาพในการเจริญได้ดีในที่ที่มีน้ำเสียน้อย โดยพืชจะนำเอาสารปนเปื้อนในน้ำเสียบางชนิดมาใช้เป็นสารอาหาร รวมทั้งเพิ่มออกซิเจนในน้ำเสีย โดยพืชจะดูดออกซิเจนจากอากาศและปล่อยไปสู่น้ำเสียและปล่อยสู่ดินโดยผ่านทางรากพืช ซึ่งช่วยให้จุลินทรีย์บริเวณรากพืชและในน้ำเสียทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยระบบนี้เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีราคาถูกไม่ซับซ้อน ไม่ต้องใช้เทคโนโลยีในการบำบัดสูง ประหยัดพลังงานและดูแลรักษาง่าย นอกจากนี้วิธีนี้ยังไม่ผลิตกากตะกอนในปริมาณสูงอีกด้วย

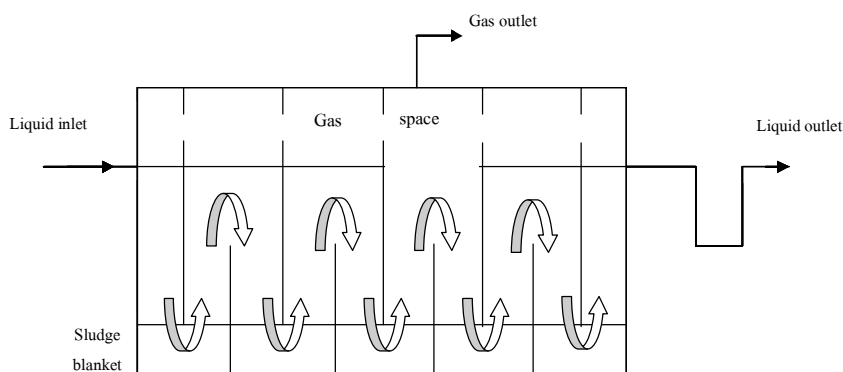


ภาพที่ 2.3 ระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ (www.sri.cmu.ac.th)

2.5.1.2 กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน

1) ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน

ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน (Anaerobic baffled reactor) มีลักษณะเป็นถังหรือบ่อดินที่มีแผ่นกั้นขวางหลายแผ่นติดตั้งไว้ โดยการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบจะเป็นในลักษณะไหลขึ้นลงสลับกันผ่านเข้าที่ละห้องทำให้ชีวมวลถูกกักไว้ในแต่ละห้องเป็นอย่างดี ซึ่งความเร็วในการไหลขึ้นลงประมาณ 0.2-0.4 เมตรต่อชั่วโมง อีกทั้งยังมีความหนาแน่นของชีวมวลในห้องช่วงต้นของบ่อ และจะลดความหนาแน่นลงในช่วงท้ายบ่อทำให้สามารถแยกชีวมวลออกจากน้ำที่จะผ่านออกจากบ่อได้ง่าย โดยหากมีชีวมวลหลุดออกจากห้องช่วงต้นก็ยังมีห้องถัดไปเพื่อกักชีวมวลได้อีก นอกจากนี้คุณสมบัติอีกประการของระบบนี้คือ ถังหมักมีลักษณะการไหลของน้ำที่สวนทางกับชีวมวล ทำให้จุลินทรีย์และน้ำเสียมมีโอกาสสัมผัสกันได้เป็นอย่างดี โดยไม่ต้องการเครื่องกลหรือพลังงานใดๆในการทำให้เกิดการกวนผสม แต่ระบบนี้มีข้อเสียคือ มีขนาดใหญ่ทำให้ต้องใช้พื้นที่ทำงานเป็นจำนวนมาก



ภาพที่ 2.4 ระบบบำบัดแบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน (www.fao.org)

2.5.2 กระบวนการทางเคมี

2.5.2.1 กระบวนการตกตะกอนทางเคมีหรือการจับก้อน

ในการกำจัดอนุภาคของสารมลพิษขนาดใหญ่ออกจากน้ำสามารถทำได้ง่ายกว่าอนุภาคขนาดเล็กที่เรียกว่า อนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งอนุภาคคอลลอยด์มีขนาด 10^{-6} มิลลิเมตร ถึง 10^{-3} มิลลิเมตร และไม่สามารถตกตะกอนด้วยตัวเองได้ภายในเวลาที่จำกัด จึงต้องทำให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคจนเป็นก้อนขนาดใหญ่เรียกว่าฟล็อก (Floc) โดยใช้สารเคมีบางอย่างทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ เพื่อทำการแยกอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำ ซึ่งกระบวนการ

ทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์โดยใช้สารเคมี เรียกว่า กระบวนการจับก้อน (Coagulation process) และสารเคมีที่ใช้เติม เรียกว่า สารก่อการจับก้อน (Coagulant) และเมื่ออนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพเคลื่อนที่มาสัมผัสและรวมตัวกันเป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการก่อการจับกลุ่ม (Flocculation process) โดยฟล็อกที่เกิดขึ้นจะสามารถทำให้ตกตะกอนได้ง่ายซึ่งการที่อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆรวมตัวกันเป็นฟล็อกประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ เช่น ลดแรงผลักระหว่างอนุภาคโดยทางใดทางหนึ่งเป็นต้น และการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ เคลื่อนที่มากระทบกันหรือสัมผัสกันมากที่สุด (อุคมศักดิ์ เจริญวิชัย, 2541)

- สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการการจับก้อน

สารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการตกตะกอนในปัจจุบันมีหลายประเภท เช่น กลุ่มที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ เช่น พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) เป็นสารตัวใหม่ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อสะดวกในการใช้งานมีอำนาจในการสร้างตะกอนและรวมตัวตะกอนสูง ตกตะกอนเร็วกว่าสารส้ม ใช้เวลาในการกวนน้อย และละลายน้ำได้ดีแต่ราคาค่อนข้างสูง โดยการใช้ปูนขาวเพื่อให้เกิดผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งวิธีนี้สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เพื่อลดค่าซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอยได้ด้วย ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียเพื่อลดค่าซีโอดีควรมีการศึกษาเปรียบเทียบการเลือกใช้สารเคมีเพื่อลดต้นทุนและก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (สวีณา เกตุสุวรรณ, 2543)

- ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอน (มันลิน ตันฑุลเวศม์, 2542)

ในกระบวนการตกตะกอนจะดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการดังนี้

- ชนิดของคอลลอยด์ในน้ำ
- ชนิดของสารที่ใช้ในการตกตะกอน
- ความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมในการตกตะกอน
- ปริมาณของสารที่ช่วยให้ตกตะกอน
- เวลาและความแรงของการผสม

2.6 พื้นฐานของเคมีไฟฟ้า (Bard, 2001 และ ศังกรม, 2549)

กระบวนการเคมีไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารอิเล็กโทรไลต์และผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงทางเคมีนี้เกิดขึ้นได้จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า

ภายนอกโดยกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านขั้วไฟฟ้าซึ่งขั้วไฟฟ้าจะทำหน้าที่เป็นตัวนำในการรับหรือส่ง อิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ของไอออนในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์

2.6.1 องค์ประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้า ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่

2.6.1.1 ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าในระบบโดย เชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอก ถ้าแบ่งขั้วไฟฟ้าตามวัสดุที่ใช้ ในการทำขั้วจะแบ่งขั้วไฟฟ้าเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- ขั้วไฟฟ้าโลหะ (Metal electrodes)
- ขั้วไฟฟ้าแบบเยื่อ (Membrane electrode)

นอกจากนี้ถ้าแบ่งขั้วไฟฟ้าตามหน้าที่และการใช้งานสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

- ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) ทำหน้าที่เป็นขั้วทดลองของเซลล์
- ขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode) ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนหรือ กระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน
- ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ทำหน้าที่ช่วยให้ทราบวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้า สำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานหรือขั้วไฟฟ้าร่วม และมักนิยมใช้ในระบบที่มีการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้าเท่านั้น โดยลักษณะเฉพาะของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงคือให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ไม่มีปฏิกิริยาตอบสนองต่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ไม่แปรตามการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรและไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ

ในการใช้งานทั่วไประบบเซลล์เคมีไฟฟ้าจะต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วคือ ขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าร่วมซึ่งในระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าใช้งานจะทำหน้าที่เป็น ขั้วลบเรียกว่าขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าร่วมจะทำหน้าที่เป็นขั้วบวกเรียกว่าขั้วแอโนด

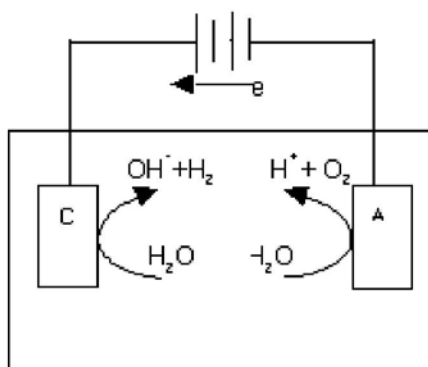
2.6.1.2 สารละลายอิเล็กโทรไลต์

ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าโดยผ่านทางไอออนต่างๆที่อยู่ในสารละลาย ไอออน เหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งกระแสไฟฟ้าผ่านไปยังขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ในกระบวนการ เคมีไฟฟ้า โดยสมบัติของสารอิเล็กโทรไลต์จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาและกระบวนการ เช่น ความเข้มข้น องค์ประกอบ ค่าความเป็นกรด-เบส และอุณหภูมิ

2.6.1.3 แหล่งเหนี่ยวนำพลังงานภายนอก

ในเซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrochemical cell) จำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า เป็นตัวป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ เพราะกระบวนการเคมีไฟฟ้าไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้

เอง ซึ่งแตกต่างกับเซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) ที่ระบบสามารถเกิดปฏิกิริยาให้กระแสไฟฟ้าได้ โดยการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกและจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในอิเล็กโทรไลต์เซลล์ ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์กระบวนการเคมีไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าภายนอกจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าผลักดันให้อิเล็กตรอนในสายไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด ส่วนโมเลกุลหรือไอออนของสารออกซิไดซ์ในสารละลายจะถ่ายโอนเข้าสู่ผิวหน้าของขั้วโดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอิเล็กตรอน



สำหรับปฏิกิริยรีดักชัน โมเลกุลหรือไอออนของสารรีดิวซ์ในสารละลายจะถูกออกซิไดซ์ซึ่งจะให้ อิเล็กตรอนออกสู่ระบบ



2.6.2 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E°)

ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเป็นสมบัติทางกายภาพและเป็นสมบัติเฉพาะตัวของระบบออกซิเดชัน - รีดักชัน ค่า E° ได้จากการวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วของเซลล์ ซึ่งเกิดจากครึ่งเซลล์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้างดกลางกับครึ่งเซลล์มาตรฐานของไฮโดรเจน และสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีแอกทิวิตี (Activity) เป็นหนึ่ง ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ถือเป็นศักย์ของขั้วไฟฟ้า

เพราะศักย์ไฟฟ้าไฮโดรเจนเป็นศูนย์โวลต์ โดยศักย์ขั้วไฟฟ้านี้คือศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า โดยลักษณะเฉพาะที่สำคัญของค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน มีดังนี้ (Hunsom, 2001)

- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานถือเป็นค่าศักย์มาตรฐานสัมพัทธ์ เพราะเป็นค่าที่ได้เมื่อขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งของเซลล์ต้องเป็นขั้วไฮโดรเจนเสมอ
- ตามสัจนิยมของเคมีไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าต้องได้จากการเขียนปฏิกิริยาครึ่งเซลล์เป็นแบบรีดักชันเท่านั้น ค่าศักย์ไฟฟ้าจึงอาจถือได้ว่าเป็นค่าศักย์รีดักชันสัมพัทธ์ (Relative reduction potential)
- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเป็นค่าที่ไม่แปรผันตามจำนวนโมลที่ใช้ในการปรับสมดุลของสมการครึ่งเซลล์
- ค่าศักย์ไฟฟ้าจะผันแปรไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานจะเป็นค่าศักย์รีดักชันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะเป็นค่าบ่งชี้ถึงความแรงของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันคือเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานมีค่าสูงกว่าจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่า

2.6.3 ศักย์ขั้วไฟฟ้า

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าหนึ่งๆ เป็นค่าศักย์สัมพัทธ์ซึ่งจะนำมาหาศักย์ของขั้วไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อรู้ค่าศักย์ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงหรือเมื่อศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเป็นศูนย์

การกำหนดหน้าที่ของขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนไว้อย่างชัดเจนนั้น เพื่อให้สามารถอธิบายถึงผลของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ ในความหมายเดียวกันโดยสัจนิยมของการกำหนดเครื่องหมายศักย์ขั้วไฟฟ้าตาม IUPAC กำหนดไว้ว่า “ในวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนกับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ ผลลัพธ์ศักย์ของวงจรถือเป็นค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น” โดยเครื่องหมายของค่าศักย์ที่ได้ ถ้าเป็นบวกแสดงว่าวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้างกล่าวเป็นการต่อเซลล์แบบกัลวานิก การดำเนินไปของปฏิกิริยารีดักชันเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยมีขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ทำหน้าที่เป็นแคโทด แต่ในทางกลับกันถ้าผลลัพธ์ของวงจรเป็นลบแสดงว่าเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนแทน และขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ทำหน้าที่เป็นแอโนด

2.6.4 หลักการอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างขั้วไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ โดยการผลักดันให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในวงจรจะทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าขึ้น ซึ่งงานที่เกิดขึ้นเป็นการลดค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy) ที่อยู่ในเซลล์ไฟฟ้า

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เป็นแบบผันกลับได้ (Reversible reaction) ดังนั้นจึงมีค่าพลังงานอิสระของกิบส์คือ

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{[\text{Re}]^b}{[\text{Ox}]^a} \quad (2.4)$$

เมื่อ ΔG ค่าพลังงานอิสระของกิบส์หน่วย (จุดต่อโมล)
 ΔG° พลังงานอิสระของกิบส์ของสารที่ภาวะมาตรฐาน (จุดต่อโมล)
 T อุณหภูมิ (องศาเคลวิน)
 R ค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 8.314 (จุดต่อ โมล)
 $\frac{[\text{Re}]^b}{[\text{Ox}]^a}$ อัตราส่วนแอททิวิตีของสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้น

และจากความสัมพันธ์ของค่าพลังงานอิสระของกิบส์กับค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับงานที่ได้

$$\Delta G = -nF \Delta E \quad (2.5)$$

$$\Delta G^\circ = -nF \Delta E^\circ \quad (2.6)$$

เมื่อ $-nF \Delta E$ งานไฟฟ้าที่เกิดที่เซลล์ไฟฟ้า (จูล)
 n จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในการปฏิกิริยา (กรัมสมมูลต่อโมล)
 F ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,485 คูลอมบ์ต่อกรัมสมมูล)
 ΔE ค่าศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
 ΔE° ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (โวลต์)

2.6.5 สมการเนินสต์ (Nernst equation)

จากสมการปฏิกิริยาของ Van't Hoff ในเทอมของการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ เมื่อปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุล เช่น ปฏิกิริยา



ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลง (ΔG) กับแอททิวิตีเริ่มต้นของสารตั้งต้นและแอททิวิตีสุดท้ายของผลิตภัณฑ์จะเป็น

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (2.8)$$

เมื่อ $[C]^c [D]^d$ แยกทวิติของผลิตภัณฑ์

$[A]^a [B]^b$ คือแยกทวิติของสารตั้งต้น

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

$$-nF \Delta E = -nF \Delta E^\circ + RT \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (2.9)$$

นั่นคือ

$$E = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (2.10)$$

สมการเนินสต์สามารถใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้หาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์โดยที่ทราบแยกทวิติของสารต่าง ๆ ในปฏิกิริยาทราบอุณหภูมิและค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานจะสังเกตเห็นว่า ถ้าแยกทวิติเป็นหนึ่งค่า E เท่ากับ E° ซึ่งหมายถึงเป็นศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรด์

จากสมการ (2.10) ถ้าแทนค่าคงที่ต่าง ๆ และอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จะได้สมการใหม่เป็น

$$E = E^\circ - \frac{0.0592}{n} \log \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (2.11)$$

หากพิจารณาทั้งเซลล์ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย 2 ครึ่งเซลล์ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะมีค่าเป็น

$$E_{\text{cell}} = E_1 - E_2 = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} \quad (2.12)$$

นอกจากนี้แล้วเซลล์เคมีไฟฟ้ายังเป็นเหมือนอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ คือมีความต้านทานอยู่ โดยจะต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่งเพื่อเอาชนะความต้านทานภายในและจะทำให้เกิดการไหลผ่าน

ของกระแสไฟฟ้าซึ่งศักย์ไฟฟ้านี้เรียกว่า ศักย์ของโอห์ม (Ohmic potential, E_R) ดังนั้นหากจะคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ให้ถูกต้องจะต้องรวมค่าศักย์ของโอห์มนี้ด้วย ซึ่งจะได้สมการใหม่เป็น

$$E_{\text{cell}} = E_1 - E_2 + E_R = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} + E_R \quad (2.13)$$

2.6.6 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 สมการ ได้ดังนี้

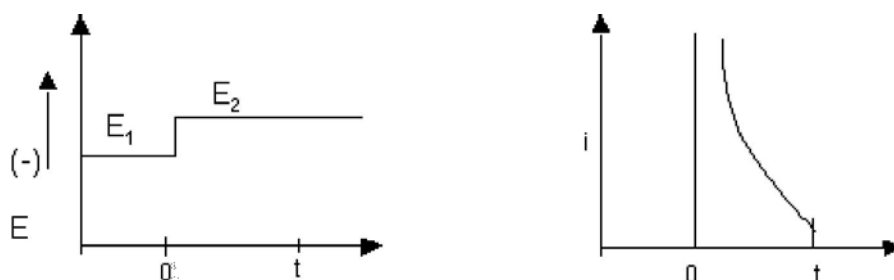
$$m = \frac{sM_w it}{nF} \quad (2.14)$$

เมื่อ	m	มวลของสาร (กรัม)
	s	สัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของชนิดสารเคมี
	M_w	น้ำหนักอะตอมหรือน้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)
	i	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
	t	เวลาที่ใช้ (วินาที)
	n	จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในการปฏิกิริยา (กรัมสมมูลต่อโมล)
	F	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,485 คูลอมป์ต่อกรัมสมมูล)

2.6.7 การควบคุมการทำงานของระบบการไฟฟ้าเคมี

สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled – potential method or potentiation mode) และการทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled – current method or galvanostatic mode) ซึ่งหลักการทำงานแต่ละแบบเป็นดังนี้

2.6.7.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ พื้นฐานของการทำงานเป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้คงที่ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าในระบบจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อปรับค่าความต่างศักย์ให้เพียงพอกับไอออนบวกในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันบริเวณผิวของขั้วแคโทด ซึ่งจะทำความเข้มข้นของไอออนที่ผิวหน้ามีค่าต่ำลงผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่แสดงในภาพ 2.6 (ก) ตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ปริมาณของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลดลงส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลงดังแสดงในภาพ 2.6 (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น



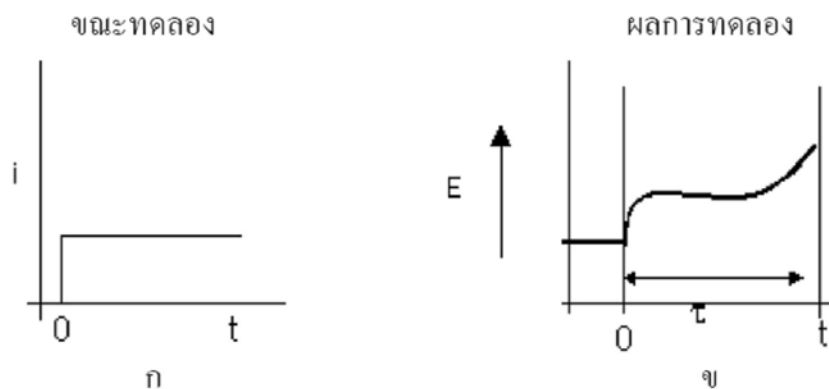
รูปที่ 2.6 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (ข)

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่เมื่อ E₁ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยาและ E₂ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อระบบถูกควบคุมด้วยการแพร่

2.6.7.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงในระบบจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา โดยวิธีการนี้เรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric technique เมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองให้คงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ (M⁺) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราคงที่



ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดอกซ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงด้วย ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยที่กระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (T) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

2.6.8 ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า (Bard และ Faulkner, 2001)

พิจารณาสมการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า (สมการที่ 2.2) การเกิดปฏิกิริยาประกอบด้วยขั้นตอนที่เปลี่ยนตัวออกซิไดซ์ที่ละลายอยู่ในสารละลายให้กลายเป็นตัวรีดอกซ์ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาประกอบด้วยกระบวนการต่างๆ ดังนี้

2.6.8.1 การถ่ายโอนมวลสาร ซึ่งจะเป็นการถ่ายโอนตัวออกซิไดซ์ในสารละลายสู่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า การถ่ายโอนมวลสารในสารละลายประกอบด้วย 3 กลไกด้วยกันคือไมเกรชัน (Migration) การแพร่ (Diffusion) และการพา (Convection) ซึ่งสามารถอธิบายแต่ละกระบวนการดังนี้ (ภาพที่ 2.8)

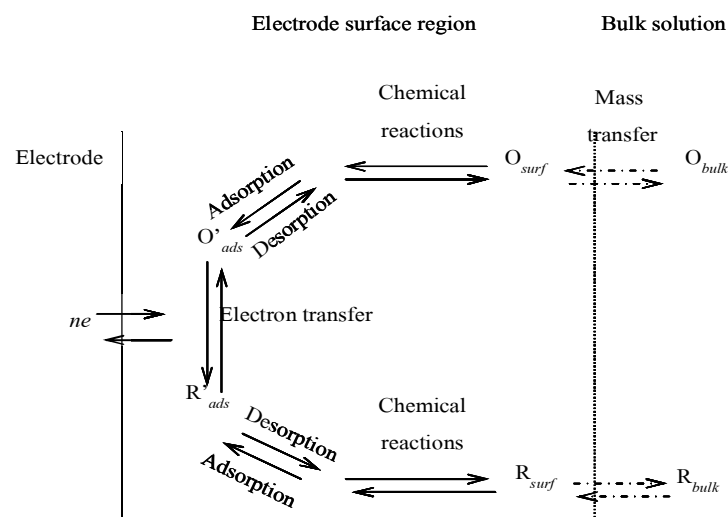
- **ไมเกรชัน** เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสารละลายนั้น โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด และไอออนลบจะเคลื่อนที่เข้าหาแอโนด ความเร็วของการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาหรือออกจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้าอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความต่างศักย์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้น ซึ่งมีผลให้การไหลของกระแส

ไฟฟ้าในวงจรนั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปด้วย นอกจากนี้ถ้ามีไอออนที่ประจุเท่ากันจำนวนมากอยู่รวมกันจะเกิดการแย่งการเคลื่อนที่แบบไมเกรชันทำให้มีการสูญเสียกระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งไปในการเคลื่อนที่ของไอออนที่ไม่ต้องการในการเกิดปฏิกิริยา

- การแพร่ เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่ความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณความเข้มข้นต่ำกว่าจะไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นในสารละลาย โดยอัตราเร็วในการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น

- การพา เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลเข้าหาหรือออกจากขั้วไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือความหนาแน่นของสารละลาย ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในหลายรูปแบบเช่น การถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า การเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาอื่นๆที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า และปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า

2.6.8.2 ขนาดของขั้วไฟฟ้า หากขั้วไฟฟ้าที่ใช้มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับสารละลายในเซลล์ และจะส่งผลทำให้สารละลายในเซลล์เกิดปฏิกิริยาได้น้อยลง และความเข้มข้นของสารในบัลค์ (Bulk solution) ก็จะไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้จะส่งผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ช่วยปรับปริมาณประจุที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงศักย์ของขั้วไฟฟ้าต่ำลงอีกด้วย



ภาพที่ 2.8 การถ่ายโอนมวลสารในสารละลาย (Bard และ Faulkner, 2001)

2.7 การประยุกต์ใช้หลักการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสีย (Israilides และคณะ, 1997 และ Chen, 2004)

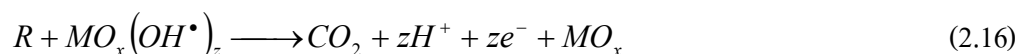
กระบวนการเคมีไฟฟ้าได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากกระบวนการเคมีไฟฟ้ามีข้อดี คือ ไม่เกิดกากตะกอน ใช้พื้นที่น้อยในการบำบัด ไม่มีสารเคมีตกค้างในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ดำเนินการง่าย มีประสิทธิภาพสูง และใช้เวลาในการบำบัดสั้น

2.7.1 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrooxidation) สามารถลดปริมาณของสารอินทรีย์และสารมลพิษในน้ำเสียได้ โดยสารอินทรีย์และสารมลพิษจะถูกทำลายด้วยอนุพันธ์ของ OH^\bullet (Hydroxyl radicals) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง (Strong oxidizing agent) ทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงจนกระทั่งกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

2.7.1.1 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแบบทางตรง (Direct Electrooxidation)

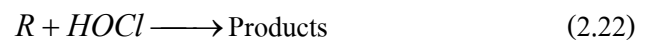
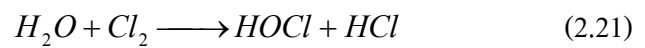
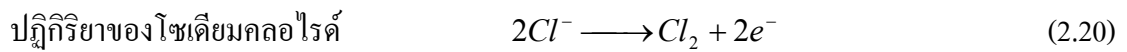
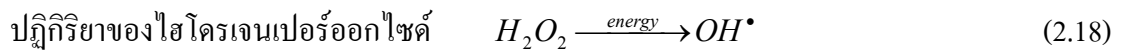
ซึ่งเกิดปฏิกิริยาดังนี้



เมื่อ $\text{MO}_x (\text{OH}^\bullet)_z$ คือ OH^\bullet ที่ดูดซับบนผิวของขั้วแอโนด R คือสารอินทรีย์ และ RO คือผลิตภัณฑ์ของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ โดยที่ OH^\bullet ในสมการข้างต้นจะมีประสิทธิภาพในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ดีกว่า MO_{x+1}

2.7.1.2 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแบบทางอ้อม (Indirect Electrooxidation)

โดยมีการเติมสารเติมแต่งลงในน้ำเสีย เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นต้น ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีคุณสมบัติในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ที่รุนแรงกว่าโซเดียมคลอไรด์ (Chen, 2004) แต่มีการสลายตัวอย่างรวดเร็วในสารละลายและมีราคาแพงกว่าโซเดียมคลอไรด์ โดยปฏิกิริยาการออกซิเดชันสารอินทรีย์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และโซเดียมคลอไรด์ แสดงดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เกิดขึ้นคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ ตามลำดับ

นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ชนิดของสารเติมแต่ง ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสีย ชนิดของขั้วไฟฟ้า และระดับการเจือจาง

ตารางที่ 2.2 สักยภาพของตัวออกซิไดซ์ตามสารตั้งต้น (Chen, 2004)

สารออกซิเดนต์	ศักย์ไฟฟ้าการเกิด
H ₂ O/ OH [•] (hydroxyl radical)	2.80
O ₂ /O ₃ (ozone)	2.07
SO ₄ ²⁻ /S ₂ O ₈ ²⁻ (peroxodisulfate)	2.01
MnO ₂ /MnO ₄ ⁻ (permanganate ion)	1.77
H ₂ O/H ₂ O ₂ (hydrogen peroxide)	1.77
Cl ⁻ /ClO ₂ ⁻ (chlorite ion)	1.57
Ag ⁺ /Ag ²⁺ (silver(II) ion)	1.50
Cl ⁻ /Cl ₂ (chlorine)	1.36
Cr ³⁺ /Cr ₂ O ₇ ²⁻ (dichromate)	1.23
H ₂ O/O ₂ (oxygen)	1.23

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบศักยภาพของตัวออกซิไดซ์ตามสารตั้งต้นจะเห็นว่าอนุพันธ์ของ OH^\bullet จะมีศักยภาพสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวออกซิไดซ์อื่นๆ และสามารถเตรียมได้โดยใช้น้ำเป็นสารตั้งต้น

2.7.2 กระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า

กระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrocoagulation) เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการลดสารมลพิษในน้ำเสีย โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของไขมัน น้ำมัน ลีเยียม สารแขวนลอย สารอินทรีย์ และโลหะหนัก เป็นต้น โดยอาศัยหลักการการทำให้อนุภาคของคอลลอยด์หรือสารมลพิษในน้ำเสียที่มีอนุภาคเล็กๆมารวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่พอที่จะตกตะกอนลงมาได้ โดยกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าจะนิยมใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดที่สามารถถูกกัดกร่อนได้ เช่น เหล็ก หรือ อะลูมิเนียมในการสร้างสารตกตะกอน โดยผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้าซึ่งโลหะที่เป็นขั้วแอโนดจะมีการสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นโลหะไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำเสียดังปฏิกิริยา (2.23) และ (2.26) โดยโลหะไอออนเหล่านี้จะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสมบัติเป็นสารสร้างตะกอน

ในกรณีของอะลูมิเนียมเมื่อใช้เป็นขั้วแอโนด อะลูมิเนียมจะแตกตัวให้ Al^{3+} ดังแสดงในปฏิกิริยา (2.23) และ Al^{3+} ไอออนจะรวมตัวกับ OH^- หรือ H_2O ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบสของระบบ และตกตะกอนออกมาในรูปของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ดังปฏิกิริยา (2.24) และ (2.25) (Chen, 2004)



ภาวะสารละลายที่เป็นเบส



ภาวะสารละลายที่เป็นกรด



สำหรับกรณีที่ใช้เหล็กเป็นขั้วแอโนดจะแตกตัวให้ Fe^{2+} ในสารละลาย (2.26) และตกตะกอนออกมาในรูปของ $(Fe(OH)_n)$ เมื่อ $n = 2$ หรือ 3 ซึ่งขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบสของสารละลาย โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ (2.26) และ (2.27) (Chen, 2004)



ภาวะสารละลายที่เป็นเบส



ภาวะสารละลายที่เป็นกรด



2.7.3 กระบวนการลอยตัวด้วยกระแสไฟฟ้า

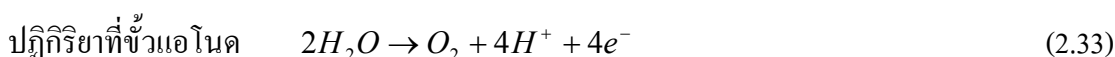
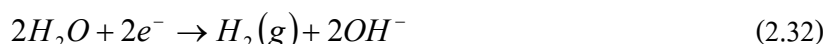
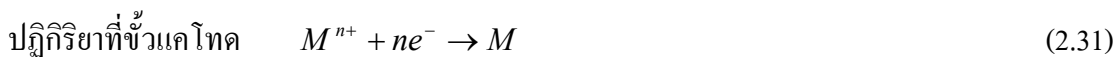
กระบวนการลอยตัวด้วยกระแสไฟฟ้า (Electroflotation) เป็นกระบวนการที่ทำให้สารอินทรีย์ลอยขึ้นไปอยู่บนผิวน้ำ โดยมีแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเป็นตัวพา ดังแสดงในสมการ (2.29) และ (2.30) โดยประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับขนาดของฟองแก๊สที่เกิดขึ้น



2.7.4 กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า

กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodeposition) เหมาะสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักผสมอยู่ โดยการแยกโลหะด้วยกระบวนการนี้มีความรวดเร็วและแม่นยำ เนื่องจากมีค่าในการเลือกเกิดปฏิกิริยาสูง และมีข้อได้เปรียบคือไอออนโลหะสามารถแยกได้ในรูปของโลหะบริสุทธิ์ได้ โดยเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์

ที่ประกอบด้วยไอออนบวก และไอออนลบก่อให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้ามีดังนี้



โดยวัสดุที่นำมาใช้เป็นขั้วแอโนดจะต้องไม่แตกตัวให้โลหะไอออน (M^+) และทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้แก่ระบบ โดยส่วนใหญ่จะนิยมใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำมาจากโลหะออกไซด์เคลือบบนผิวของไทเทเนียม เช่น Ti/RuO_2 สำหรับขั้วแคโทดจะนิยมใช้แกรไฟต์หรือคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นเส้น เนื่องจากมีราคาถูก

2.7.5 กระบวนการแยกกรองด้วยกระแสไฟฟ้า

กระบวนการแยกกรองด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodialysis) เป็นกระบวนการแยกองค์ประกอบที่มีไอออนออกจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้เยื่อบางชนิดแลกเปลี่ยนประจุหรือเยื่อบางที่ไม่มีรูพรุนต่ออนุกรมระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด โดยมีความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเป็นแรงขับเคลื่อนร่วมกับการเลือกผ่านของเยื่อบาง ซึ่งเยื่อบางที่ใช้ในกระบวนการมีทั้งชนิดเซรามิก พอลิเมอร์ และวัสดุผสมระหว่าง พอลิเมอร์/พอลิเมอร์ หรือ เซรามิกซ์/พอลิเมอร์ โดยเยื่อบางแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันขึ้นอยู่กับนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งเยื่อบางที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือเยื่อเซรามิก เนื่องจากสามารถทนต่อการกัดกร่อนของตัวทำละลายหรือสารเคมีที่เป็นกรด-เบส ทนต่ออุณหภูมิสูง และทนต่อตัวกลางที่ไม่ชอบน้ำ อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อเสียคือกระบวนการผลิตค่อนข้างยุ่งยาก ต้องควบคุมความสม่ำเสมอของขนาดรูและความพรุน

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กัณฑ์มาศ สุทธิเรืองวงศ์ (2539) ศึกษาการกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำกากส่าด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยระบบการทดลองใช้เซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่ทำด้วยพลาสติกอะคริลิกปริมาตร 3 ลิตร และใช้อิเล็กโทรด 3 ชนิด ทำการทดลองแบบกะและใช้ไฟฟ้ากระแสตรง จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีและสารอินทรีย์ ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้า พื้นที่ผิวอิเล็กโทรด และ

ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด โดยระบบที่ใช้ไทเทเนียมเคลือบแพลทินัมสีเป็นแคโทดและเหล็กเป็นแอโนดมีความเหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำกากส่า

ปัญภัทร เจริญสาคร (2549) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยวิธีทางเคมีและทางชีวภาพ โดยตัวแปรที่ศึกษาสำหรับการบำบัดทางเคมีคือค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสีย ชนิดและปริมาณสารจับก้อนและสารช่วยก่อการจับก้อน พบว่าภาวะที่เหมาะสมคือการปรับความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 4 ร่วมกับการใช้พอลิเมอร์ประจุบวก 1.25 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดไขมันได้สูงถึงร้อยละ 98 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี ค่าบีไอดี กลีเซอรอล และเมทานอล เท่ากับร้อยละ 38-41 29-41 16-23 และ 25-33 ตามลำดับ ส่วนการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนซึ่งปรับเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด คือที่ซีไอดีเริ่มต้นเท่ากับ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการบำบัดซีไอดีได้ตามมาตรฐานเป็นเวลา 4 วัน โดยประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดี ซีไอดีกรอง และเมทานอลร้อยละ 93 96 และ 99 ตามลำดับ ส่วนการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจน พบว่าภาวะที่เหมาะสมควรมีค่าซีไอดีเริ่มต้นน้อยกว่า 5,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งใช้เวลาในการกำจัดค่าซีไอดีได้ตามมาตรฐานเป็นเวลา 13 วัน โดยประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดี ซีไอดีกรอง และเมทานอลร้อยละ 98 99 และ 98 ตามลำดับ

Kato และคณะ (2005) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยใช้จุลินทรีย์ที่มีสมบัติในการย่อยสลายไขมันมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของไขมันในปริมาณสูง เพื่อลดค่าความเข้มข้นให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม จากผลการศึกษาพบว่าสามารถลดค่าความเข้มข้นของไขมันจาก 120,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือเพียง 10-30 มิลลิกรัมต่อลิตร

Ken-ichiro และคณะ (2005) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่มีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เชื้อยีสต์ *Rhodotorula mucilaginosa* ซึ่งมีสมบัติในการย่อยสลายไขมัน โดยได้ทำการศึกษาน้ำเสีย 3 ชนิด คือ น้ำเสียสังเคราะห์ น้ำเสียที่ทำการเจือจาง และน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่ยังไม่ผ่านการบำบัด จากการศึกษาพบว่าแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสมแก่จุลินทรีย์คือยูเรีย โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นในช่วง 0.23-0.92 จะทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายไขมันสูงกว่าร้อยละ 97 นอกจากนี้ยังพบว่าองค์ประกอบของของแข็งมีความสัมพันธ์กับอัตราการเจริญของจุลินทรีย์ เมื่อน้ำเสียมีของแข็งเป็นองค์ประกอบสูง อัตราการเจริญของจุลินทรีย์จะต่ำลง และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการย่อยสลายไขมันระหว่างน้ำเสียที่เจือจางกับน้ำเสียที่ไม่ได้เจือจางพบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายไขมันของน้ำเสียเจือจางมีค่ามากกว่าร้อยละ 98

Zhang และคณะ (2005) ศึกษากระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแบบทางอ้อมของ 4-Amino-Dimethyl-Aniline Hydrochloride ที่เกิดจากการผลิต Vanillin โดยใช้ Ti/Ru-Ti-Sn เป็น

ขั้วแอโนด จากการศึกษาพบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 30 มิลลิแอมป์ ต่อตารางเซนติเมตร และประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดี และค่าทีโอซีมีค่าเท่ากับร้อยละ 74.3 และ 40.06 ตามลำดับ

Piya-areetham และคณะ (2006) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุราหรือน้ำกากส่า โดย เครื่องปฏิกรณ์แบบพัลส์ที่ขั้วไฟฟ้ามีรูพรุนและน้ำซึมผ่านได้ จากการศึกษาพบว่าขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ ไทเทเนียม ภาวะที่เหมาะสมคือความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 1 อัตราการเจือจางเท่ากับ 10 เท่า ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 9 แอมป์ อัตราการไหล 0.9 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ซึ่ง จะช่วยทำให้สีและค่าซีโอดีจะลดลง นอกจากนี้พบว่าสารเติมแต่ง ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จะให้ผลการลดสีและค่าซีโอดีสูงกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยเมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 1.5 โมลต่อลิตร จะช่วยให้ประสิทธิภาพการลดสีและค่าซีโอดีเพิ่มขึ้น รวมถึงค่าของแข็ง ทั้งหมดและของแข็งแขวนลอยในน้ำกากส่าลดลงด้วย

Cabeza และคณะ (2007) ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้น เริ่มต้นของคลอไรด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารเติมแต่ง ในการกำจัดแอมโมเนียมที่ปนเปื้อนในน้ำ ชะขะ โดยพบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นของคลอไรด์สูงๆ มีผลทำให้ ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมมีค่าสูง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนงานการวิจัยและการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาการจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า โดยในการทดลองจะมีรายละเอียด ดังนี้

3.1.1 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการวิจัย

น้ำตัวอย่างที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) โดยเป็นน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างไบโอดีเซล ซึ่งมีลักษณะสีขาวขุ่นคล้ายน้ำสบู่ โดยพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติน้ำเสีย คือ ความเป็นกรด-เบส ค่าซีไอดี ค่าบีไอดี ไซมัน และค่าปริมาณไนโตรเจน

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส ยี่ห้อ Horiba รุ่น F-22
2. ขั้วไฟฟ้า ได้แก่ ไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ (Ti/RuO₂)
3. เครื่องกวนแม่เหล็ก
4. เครื่องชั่งละเอียด ยี่ห้อ Sartorius
5. ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ Termaks รุ่น series TS 8000
6. กระดาษกรองเบอร์ 41 ยี่ห้อ Whatman เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 110 มิลลิเมตร
7. หลอดย่อยมีฝาพลาสติกเกลียว (Digestion vessels) ขนาด 20x150 มิลลิเมตร
8. ขวด BOD ขนาด 250-330 มิลลิลิตร พร้อมจุกปิด
9. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียส
10. ชุดกลั่น (Distillation apparatus)
11. ขวดเคลดดาห์ลขนาด 750 มิลลิลิตร
12. เครื่องอังไอน้ำ
13. เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ

3.3 สารเคมี

3.3.1 การวิเคราะห์ซีไอดี

1. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) (Merck, AR grade)
2. กรดซัลฟิวริก (Conc. H_2SO_4) (Fisher, 98%)
3. ซิลเวอร์ซัลเฟต ($AgSO_4$) (POCh. S.A., AR grade)
4. ไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) (Unilab, AR grade)
5. สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroun Indicator) (Labchem, AR grade)
6. โพแทสเซียมไฮโดรเจนอะทาเลต (KHP) (Merck, AR grade)

3.3.2 การวิเคราะห์บีไอดี

1. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) (Univer, AR grade)
2. ไดโปรแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) (Univer, AR grade)
3. ไดโซเดียมฟอสเฟตเฮปตะไฮเดรต ($Na_2PO_4 \cdot 7H_2O$) (Univer, AR grade)
4. แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) (Univer, AR grade)
5. แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) (Univer, AR grade)
6. แคลเซียมคลอไรด์ปราศจากน้ำ (Anhydrous $CaCl_2$) (Univer, AR grade)
7. เฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) (Univer, AR grade)
8. แมกนีเซียมซัลเฟตโมโนไฮเดรต ($MgSO_4 \cdot H_2O$) (Univer, AR grade)
9. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) (Univer, AR grade)
10. โซเดียมไอโอดด์ (NaI) (Labchem, AR grade)
11. โซเดียมไนไตรด์ (NaN_3) (Labchem, AR grade)
12. โซเดียมไซโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) (Univer, AR grade)

3.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

1. โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) (Univer, AR grade)
2. โปรอทอกไซด์ (HgO) (Univer, AR grade)
3. เมธิลเรด (Panreac, AR grade)
4. เอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) (Fisher, 95%)
5. เมธิลีนบลู (Panreac, AR grade)
6. กรดบอริก (H_3BO_3) (Univer, AR grade)

7. สารละลายฟีนอล์ฟทาลินอินดิเคเตอร์

3.3.4 การวิเคราะห์ไขมันและน้ำมัน

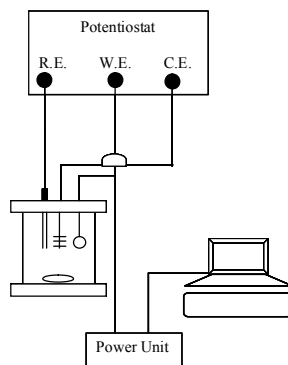
1. เฮกเซน (n-Hexane) (Fisher, AR grade)
2. โซเดียมซัลเฟต ปราศจากน้ำ (Anhydrous Na_2SO_4) (Labchem, AR grade)

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.4.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ สี อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส ปริมาณไขมัน ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี และค่าปริมาณไนโตรเจน

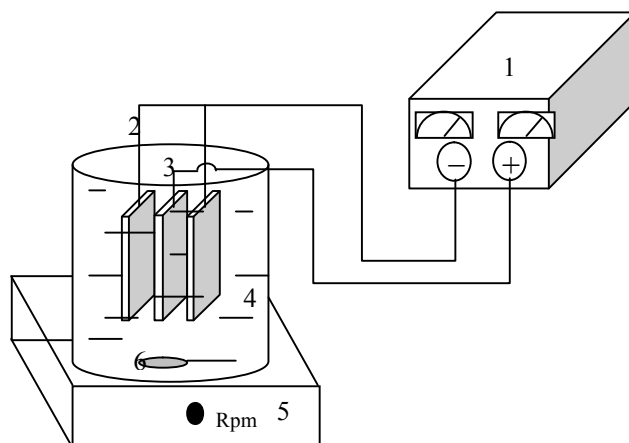
3.4.2 ศึกษาความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่มีผลต่ออัตราการเกิดไบโอดีเซลและอัตราการลดลงของสารมลพิษ โดยนำน้ำตัวอย่างมาปรับค่าความเป็นกรด-เบส เริ่มต้นเท่ากับ 2 4 6 8 และ 9 ตามลำดับ และนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำมาตั้งทิ้งไว้เป็นเวลาครึ่งชั่วโมง จะสังเกตเห็นน้ำตัวอย่างแยกเป็น 2 ชั้น นำส่วนบนมาวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) และวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีตามมาตรฐานของ ASTM เช่น ค่าความหนืด จุดวาบไฟ ค่าความร้อน ค่าความหนาแน่น และค่าร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ เป็นต้น สำหรับของเหลวส่วนล่างจะวิเคราะห์ปริมาณไขมัน ค่าบีโอดี และค่าซีโอดี

3.4.3 ศึกษาช่วงกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมของการเกิดออกซิเดชันของสารมลพิษในน้ำเสีย ด้วยเครื่อง Potentiostat/Gavanostat โดยใช้แท่งแพลตินัมเป็นทั้งขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter Electrode, C.E.) และขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working Electrode, W.E.) และใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ซึ่งในการศึกษาจะใช้อัตราการตรวจวัด (Scan rate) ที่ 0.5 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยนำน้ำตัวอย่างปรับค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 1 3 และ 5 ตามลำดับ ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นและนำไปศึกษาโดยใช้เครื่อง Potentiostat/Gavanostat



ภาพที่ 3.1 ลักษณะการต่อเครื่อง Potentiostat/Galvanostat

3.4.4 ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบกะ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ



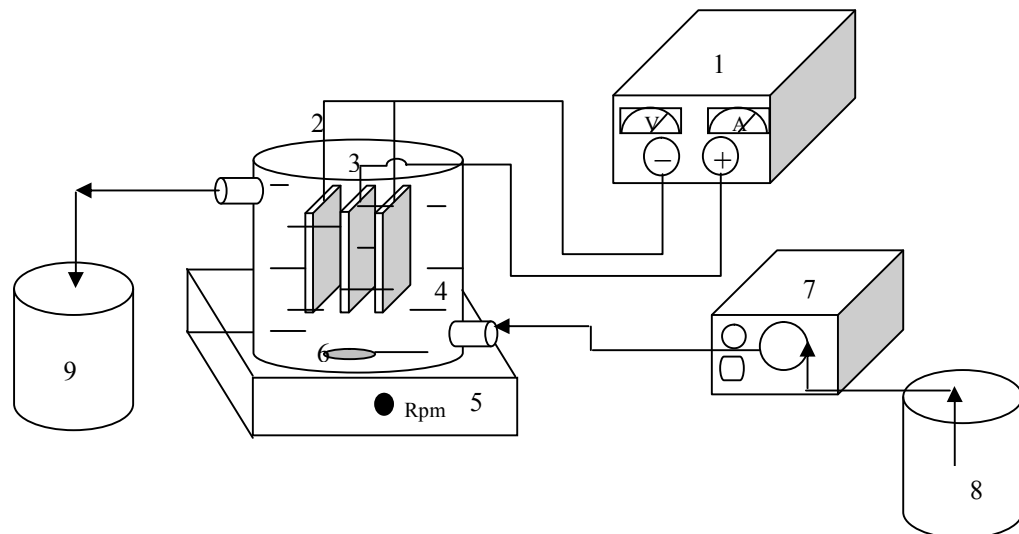
ภาพที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบกะ (1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (2) ขั้วแคโทด (3) ขั้วแอโนด (4) เครื่องปฏิกรณ์ (5) เครื่องกวนสาร (6) แท่งแม่เหล็กกวนสาร

- เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง รุ่น ZS 3205-2X
- ขั้วแคโทด ทำจากไทเทเนียมเคลือบด้วยรูทีเนียมออกไซด์
- ขั้วแอโนด ทำจากไทเทเนียมเคลือบด้วยรูทีเนียมออกไซด์ มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 816 ตารางเมตร

3.4.4.1 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยนำน้ำตัวอย่างที่ทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสม ผ่านกระแสไฟฟ้าในช่วง 1.84-5.51 มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และนำตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดที่กระแสไฟฟ้าต่างๆ มาวิเคราะห์ปริมาณไขมัน ค่าบีโอดี และค่าซีโอดี โดยทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 0-8 ชั่วโมง

3.4.5.2 ชนิดและความเข้มข้นของสารเติมแต่ง โดยชนิดของสารเติมแต่งที่ศึกษาคือ โซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0.015-0.092 โมลต่อลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.274-1.646 โมลต่อชั่วโมง และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้เมื่อไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ โดยจะเก็บตัวอย่างที่เวลา 0-8 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณไขมัน ค่าบีโอดี และค่าซีโอดี

3.4.5 ศึกษาความเหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพ 3.3 โดยนำภาวะที่ดีที่สุดของการบำบัดด้วยเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบกะมาทำการศึกษาต่อ โดยทำการศึกษาอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่ค่าต่างๆ คือ 2-6 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 3.3 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง (1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (2) ขั้วแคโทด (3) ขั้วแอโนด (4) เครื่องปฏิกรณ์ (5) เครื่องกวนสาร (6) แท่งแม่เหล็กกวนสาร (7) เครื่องปั้มน้ำ (8) ถังจ่ายน้ำ (9) ถังเก็บน้ำ

- เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้า รุ่น ZS 3205-2X
- ขั้วแคโทดทำจากไทเทเนียมเคลือบด้วยรูทีเนียมออกไซด์

- ขั้วแอโนดทำจากไทเทเนียมเคลือบด้วยรูทีเนียมออกไซด์ มีพื้นที่เท่ากับ 816 ตารางเมตร
- เครื่องปั้มน้ำ รุ่น Masterflex model 77200-60
- ถังจ่ายน้ำขนาด 3 ลิตร
- ถังเก็บน้ำขนาด 2 ลิตร

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาการจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการนำกลับทางเคมีและกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ การนำกลับไบโอดีเซลด้วยกรด และการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

ส่วนแรกเป็นการศึกษาถึงองค์ประกอบของไบโอดีเซลที่แยกได้จากน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยการเติมกรดซัลฟิวริก และนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี และวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี เช่น ค่าความหนืด จุดวาบไฟ ค่าความร้อน ค่าความหนาแน่น และค่าร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ เป็นต้น ตามมาตรฐานของ ASTM สำหรับส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาผลการลดลงของสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าทั้งแบบทางตรงและทางอ้อม ซึ่งใช้ไทเทเนียมเคลือบด้วยรูทีเนียมออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง ซึ่งแสดงผลดังนี้

4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

การทดลองเบื้องต้นได้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งในการผลิตไบโอดีเซลนั้นมีการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ใช้แล้วมาใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิต โดยพบว่าลักษณะน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลมีสีขาวคล้ายสบู่เหลวและมีกลิ่นคล้ายน้ำมัน และเมื่อนำผลการวิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง โดยมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 312,000-588,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าบีโอดีมีค่าอยู่ในช่วง 168,000-300,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และไขมันมีค่าอยู่ในช่วง 18,000-22,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าสูงเกินมาตรฐานน้ำทิ้งจากกรมโรงงานอุตสาหกรรมมาก กล่าวคือค่าซีโอดีสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 1,470 เท่า ค่าบีโอดีสูงกว่าประมาณ 5,000 เท่า และไขมันสูงกว่าประมาณ 4,400 เท่า นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด-เบส ค่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดยังมีค่าสูงมากเช่นเดียวกัน คือมีค่าความเป็นกรด-เบสในช่วง 9.25-10.76 ซึ่งมากกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากกรมโรงงานอุตสาหกรรมประมาณ 2 เท่า ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 439-464 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมากกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากกรมโรงงานอุตสาหกรรมประมาณ 5 เท่า และปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

มีค่าอยู่ในช่วง 26,580-26,740 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมากกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากกรมโรงงานอุตสาหกรรมประมาณ 9 เท่า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากการผลิตไบโอดีเซลก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตน้อยที่สุด

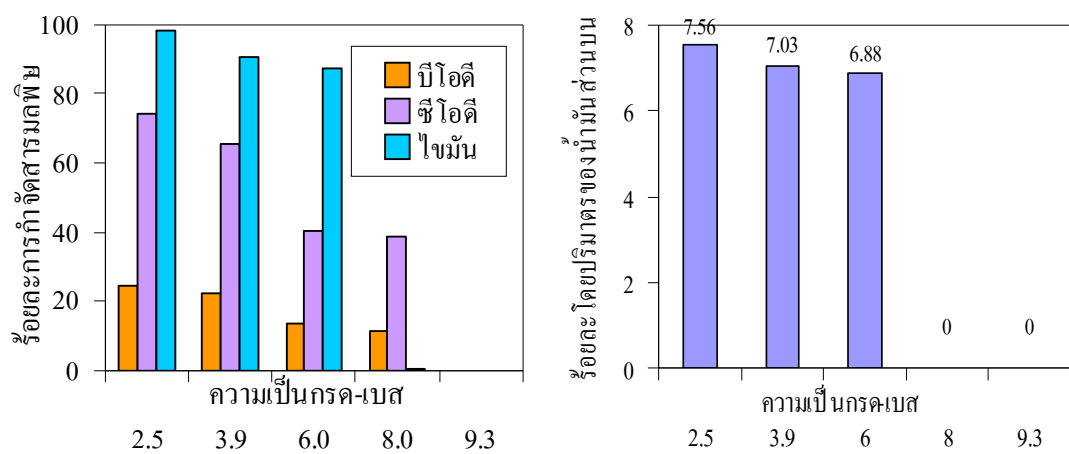
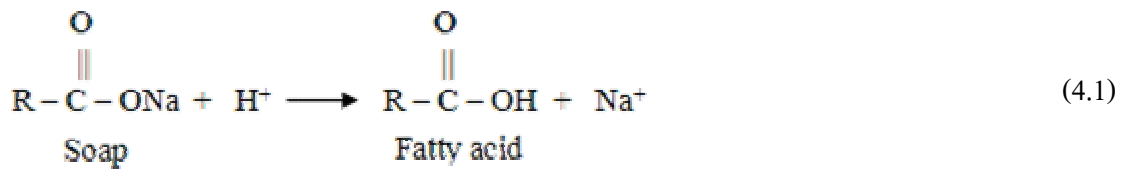
ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากระบวนการผลิตไบโอดีเซล

พารามิเตอร์	ปริมาณ	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง
ค่าความเป็นกรด-เบส	9.25-10.76	5.5-9.0
ไขมันและน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	18,000-22,000	≤ 5
ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	312,000-588,000	≤ 400
ค่าบีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	168,000-300,000	≤ 60
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	439-464	≤ 100
ของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	26,580-26,740	≤ 3,000

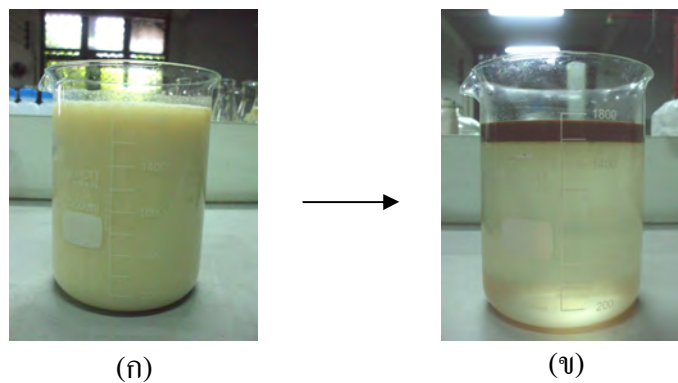
4.2 การนำกลับไบโอดีเซล

การนำกลับไบโอดีเซลจากน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลจะดำเนินการโดยนำน้ำตัวอย่างมาปรับค่าความเป็นกรด-เบสที่ค่าต่างๆกัน คือ 2.5 3.9 6.0 8.0 และ 9.0 ตามลำดับ ด้วยกรดซัลฟิวริก และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นเวลาครึ่งชั่วโมง จะสังเกตเห็นน้ำตัวอย่างแยกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนล่างมีลักษณะเป็นสารละลายค่อนข้างขุ่น โปร่งแสงและเมื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีพบว่าร้อยละการกำจัดสารมลพิษจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรด-เบสลดลง โดยที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมันมีค่าเท่ากับ 40-74 13-24 และ 87-98 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.1(ก) สำหรับสารละลายส่วนบนจะมีสีน้ำตาลเข้มคล้ายน้ำมัน โดยพบว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่ำร้อยละการนำกลับน้ำมันดังกล่าวจะสูงขึ้น โดยที่ค่าความเป็นกรด 2.5 3.9 และ 6 สามารถนำกลับมาได้ร้อยละ 7.56 7.03 และ 6.88 โดยปริมาตร ตามลำดับ แต่ในภาวะที่เป็นเบสพบว่าไม่สามารถนำน้ำมันส่วนบนกลับมาได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.1(ข) ทั้งนี้เนื่องจากโปรตอนที่เกิดขึ้นจากการเติมกรดจะเข้าไปแทนที่โซเดียมในโครงสร้างของสบู่และเปลี่ยนเป็นโครงสร้างของกรดไขมันแทน ดังแสดงในสมการ (4.1) ซึ่งกรดไขมันจะละลายอยู่ในไบโอดีเซล และจะลอยขึ้นไปอยู่บนผิวน้ำทำให้เกิดการ

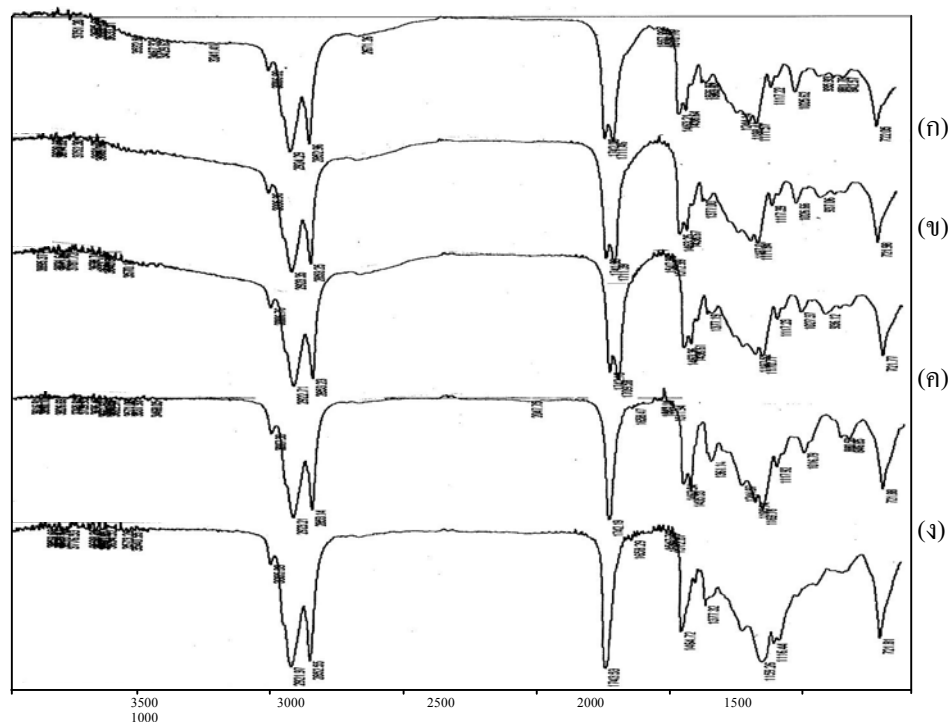
แยกชั้นขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.2 โดยหากเติมเบสเข้าสู่ระบบจะไม่ทำให้เกิดการแยกชั้น แต่จะมีสบู่ออกมา



ภาพที่ 4.1 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษและความเป็นกรด-เบส และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยปริมาตรของน้ำมันส่วนบน และความเป็นกรด-เบสของสารละลาย



ภาพที่ 4.2 (ก) ลักษณะของน้ำตัวอย่างก่อนทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบส (ข) ลักษณะของน้ำตัวอย่างภายหลังจากปรับค่าความเป็นกรด-เบส



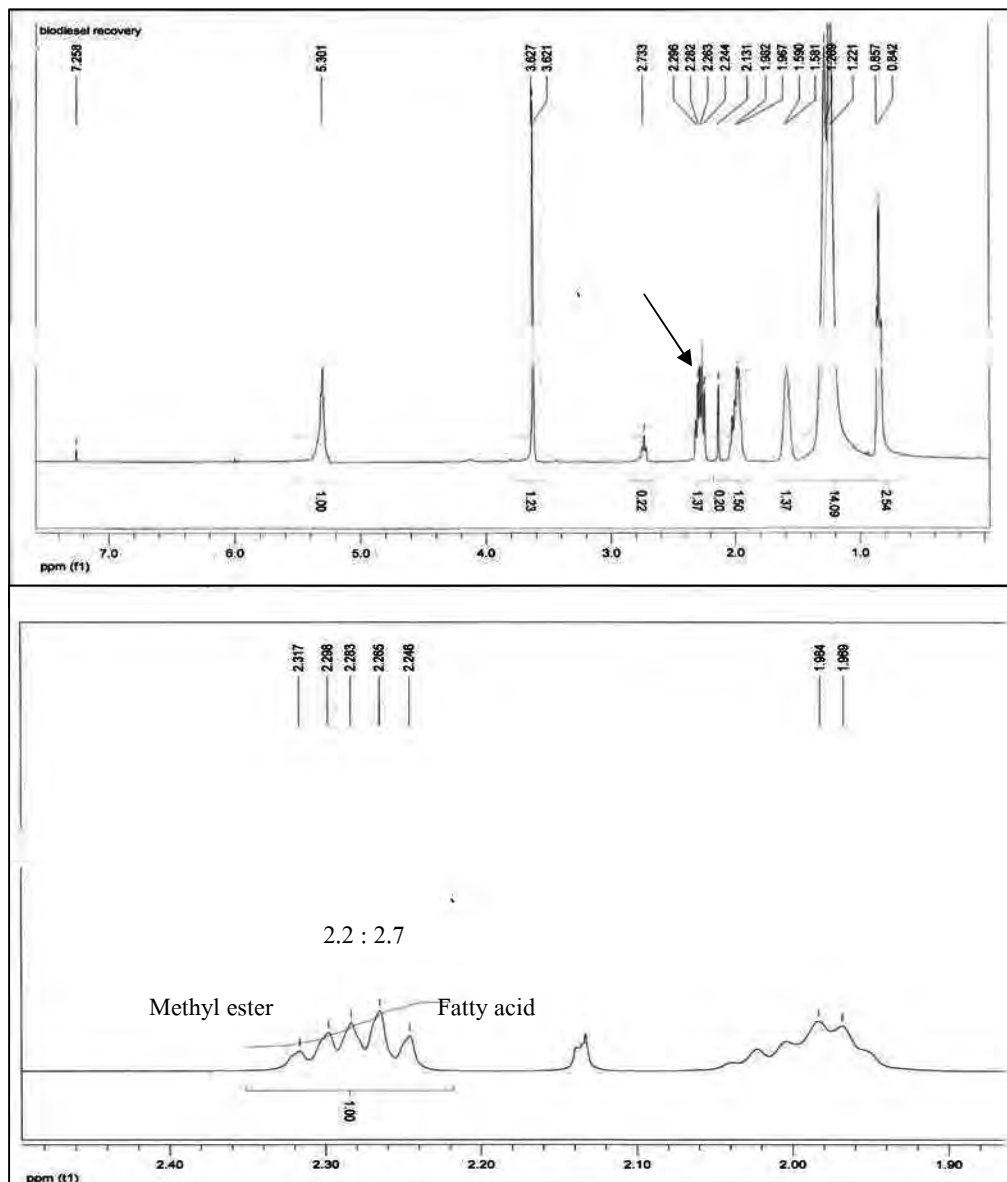
ภาพที่ 4.3 IR สเปกตรัมของน้ำมันส่วนบนที่นำกลับ (ก) ที่ความเป็นกรด-เบส 2.46 (ข) 3.87 (ค) 6.04 (ง) ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ และ (จ) น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ใช้แล้ว

ภาพที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันส่วนบนที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่างๆ โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีเปรียบเทียบกับหมู่ฟังก์ชันกับไบโอดีเซลบริสุทธิ์ พบว่าหมู่ฟังก์ชันหลักของน้ำมันที่นำกลับมาได้ประกอบด้วยแถบยืดของ CH_3 ของหมู่แอลเคนที่ความยาวคลื่นประมาณ $2,923 \text{ cm}^{-1}$ และ $2,853 \text{ cm}^{-1}$ แถบยืดของ C=O ซึ่งเป็นของ COOMe และ COOH ของหมู่เอสเทอร์ ที่ความยาวคลื่นประมาณ $1,742 \text{ cm}^{-1}$ และ $1,709.58 \text{ cm}^{-1}$ และแถบการงอของ CH_3 ของหมู่แอลเคนที่ความยาวคลื่นประมาณ $1,436 \text{ cm}^{-1}$ และ $1,463 \text{ cm}^{-1}$ โดยจะสังเกตเห็นว่าแถบยืดของ C=O ของ COOH จะยาวกว่า COOMe ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีโดยใช้เครื่องโปรตอนนิวเคลียสมกเนติกเรโซแนนซ์ ($^1\text{H-NMR}$) ดังแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระมีค่าสูงกว่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์ กล่าวคือ กรดไขมันอิสระมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 55.10 และเมทิลเอสเทอร์มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 44.80 ซึ่งคิดเทียบจากค่าของพีค ทั้งนี้เนื่องจากไบโอดีเซลที่นำกลับมาได้เป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากการผลิตไบโอดีเซลที่นำเอาน้ำมันพืช หรือน้ำมันสัตว์ที่ผ่านการใช้งานแล้วมาเป็นสารตั้งต้น และเมื่อนำน้ำมันดังกล่าวมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีอื่นๆ ได้แก่ ค่าความหนืด ค่าความร้อน ปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบ จุดวาบไฟ ค่าความหนาแน่น และค่าร้อยละโดยน้ำหนัก

ของเมทิลเอสเทอร์ ตามมาตรฐานของ ASTM ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าน้ำมันที่นำกลับมาได้มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 881 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความหนืดเท่ากับ 7.95 เซนติสโตก จุดวาบไฟเท่ากับ 191 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบมีค่าเท่ากับร้อยละ โดยน้ำหนัก 1.05 และค่าความร้อนเท่ากับ 39.24 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของไบโอดีเซลที่ระบุในประกาศกรมธุรกิจพลังงาน พบว่าสมบัติต่างๆ ของน้ำมันที่นำกลับมาได้นั้นมีค่าที่ผ่านมาตรฐานไบโอดีเซลชุมชนเกือบทั้งหมด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ พบว่ามีเพียงค่าความหนาแน่น และจุดวาบไฟเท่านั้นที่ผ่านมาตรฐาน ส่วนปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบยังคงมีปริมาณที่ค่อนข้างสูง ซึ่งมีค่ามากกว่ามาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน 5.25 เท่า และมากกว่ามาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ 25 เท่า สำหรับค่าความหนืดพบว่ามีค่ามากกว่ามาตรฐานเชิงพาณิชย์ 2.27 เท่า ส่วนปริมาณเมทิลเอสเทอร์และค่าความร้อนของน้ำมันที่นำกลับมาได้ พบว่าไม่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐานไบโอดีเซลชุมชนตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน แต่พบว่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์มีค่าที่ต่ำกว่ามาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ 0.46 เท่า ส่วนค่าความร้อนของไบโอดีเซลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของไบโอดีเซลจากโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบโอดีเซลที่นำกลับมาได้กับไบโอดีเซลบริสุทธิ์ น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ใช้แล้ว และกลีเซอรอลดิบตามมาตรฐานของ ASTM

คุณสมบัติ	มาตรฐาน		ไบโอดีเซลที่นำกลับมาได้	ไบโอดีเซล (บางจาก)	น้ำมันพืช/น้ำมันสัตว์ที่ใช้แล้ว
	ไบโอดีเซลชุมชน	เมทิลเอสเทอร์			
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	860-900	860-900	881	869	937
ค่าความหนืด (เซนติสโตกส์)	1.9-8.0	3.5-5.0	7.95	4.67	35.44
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	> 120	> 120	191	175	> 270
น้ำ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	< 0.2	< 0.05	1.05	-	-
ค่าความร้อน (เมกกะจูลต่อกิโลกรัม)	-	-	39.24	40.33	39.19
เมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	-	96.5	44.80	77.98	-
กรดไขมันอิสระ (ร้อยละ โดยโมล)	-	-	55.10	-	-



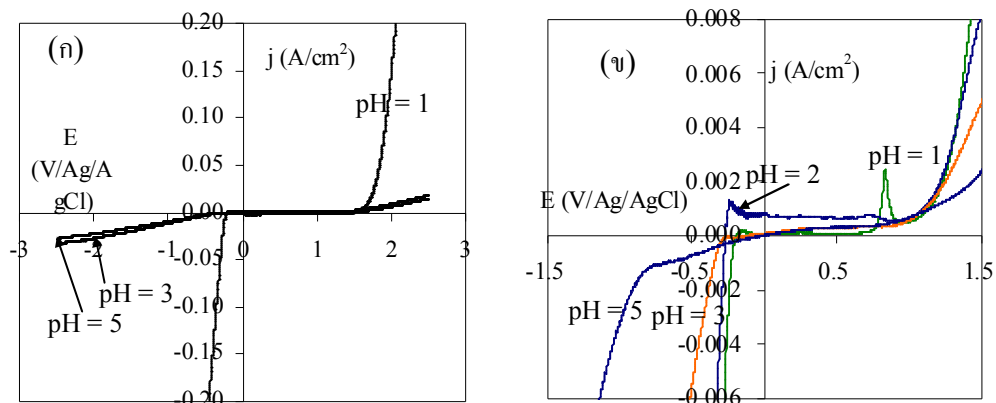
ภาพที่ 4.4 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของน้ำมันส่วนบนที่นำกลับมาได้

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันส่วนบนที่นำกลับมาได้ในข้างต้นเปรียบเทียบกับไบโอดีเซล (บางจาก) พบว่าน้ำมันส่วนบนที่นำกลับมาได้นั้นมีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ใกล้เคียงกับไบโอดีเซล (บางจาก) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าน้ำมันส่วนบนที่นำกลับมาได้นั้นคือไบโอดีเซล แต่เป็นไบโอดีเซลที่ยังไม่บริสุทธิ์มากนักซึ่งจะต้องมีการศึกษาต่อไปเพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น

4.3 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า

4.3.1 การศึกษาความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารมลพิษในน้ำเสีย

ก่อนทำการศึกษาลักษณะที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบว่าสารมลพิษในน้ำเสียนั้นสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้หรือไม่ และช่วงกระแสไฟฟ้าใดที่เหมาะสมสำหรับการบำบัด ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาช่วงกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารมลพิษในน้ำเสียด้วยเครื่อง Potentiostat/Galvanostat โดยนำน้ำตัวอย่างปรับค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 1 2 3 และ 5 ตามลำดับ ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น และนำไปศึกษาโดยใช้เครื่อง Potentiostat/Galvanostat โดยเปรียบเทียบกับน้ำกลั่นที่ปรับค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 1 3 และ 5 เช่นเดียวกัน ภาพที่ 4.5 (ก) แสดงช่วงกระแสไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำกลั่นที่ปรับค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 1 3 และ 5 พบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของน้ำจะเกิดขึ้นในช่วงความเป็นกรดสูง โดยที่ความเป็นกรดเท่ากับ 1 น้ำจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้แก๊สออกซิเจน (O_2) และไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่ศักย์ไฟฟ้ามากกว่า $+1.5$ V/Ag/AgCl และปฏิกิริยารีดักชันของน้ำจะเกิดขึ้นในช่วงศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า -0.05 V/Ag/AgCl ซึ่งจะให้แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) แต่เมื่อสังเกตที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และ 5 พบว่าจะเห็นพิกของการเกิดออกซิเดชันและรีดักชันที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า -0.05 V/Ag/AgCl และที่ศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า $+1.15$ V/Ag/AgCl เพียงเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 4.5 (ข) ซึ่งแสดงช่วงกระแสไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำเสีย พบว่าน้ำเสียที่มีภาวะเป็นกรดสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ในช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.05 V/Ag/AgCl ถึง $+1.5$ V/Ag/AgCl โดยที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 1 จะเห็นพิกของการเกิดออกซิเดชันในช่วง $+0.7$ V/Ag/AgCl และเกิดการออกซิเดชันสูงสุดที่ศักย์ไฟฟ้า 0.83 V/Ag/AgCl ส่วนที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงสุดที่ศักย์ไฟฟ้า -0.23 V/Ag/AgCl ส่วนที่ค่าความเป็นกรด-เบส 3 และ 5 จะไม่เห็นพิกของการเกิดออกซิเดชันในช่วงศักย์ไฟฟ้างกล่าว จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าน้ำเสียที่เหลือจากการนำกลีบไบโอดีเซลสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าได้ โดยน้ำเสียที่จะเกิดออกซิเดชันได้ดีคือน้ำเสียที่มีค่าความเป็นกรด-เบสต่ำ



ภาพที่ 4.5 (ก) กราฟโพลาริเซชันของน้ำกลั่นที่ความเป็นกรด-เบสแตกต่างกัน และ (ข) กราฟโพลาริเซชันของน้ำเสียที่ความเป็นกรด-เบส 1 2 3 และ 5

4.3.2 การบำบัดในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบกะ

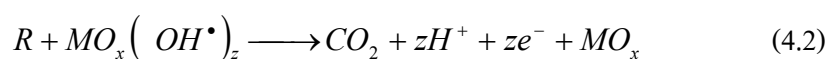
การกำจัดสารมลพิษออกจากน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยวิธีการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าจะดำเนินในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบกะ โดยใช้ไทเทเนียมเคลือบด้วยรูทีเนียมออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้า ในการทดลองแต่ละครั้งจะใช้น้ำตัวอย่างประมาณ 2 ลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 2 ซึ่งทำการศึกษา 2 ตัวแปรคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าชนิดและความเข้มข้นของสารเดิมแต่ง

4.3.2.1 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

การทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยทำการทดลองผ่านกระแสไฟฟ้าในช่วง 1.5-4.5 แอมแปร์ หรือที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 1.84-5.51 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 2.5 และเก็บตัวอย่างที่เวลา 0-8 ชั่วโมง ตามลำดับ

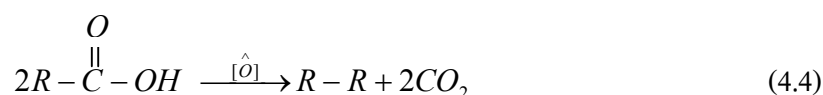
ภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมันกับเวลาที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ พบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมันจะมีค่าสูงขึ้นด้วย ตามกฎของฟาราเดย์ที่กล่าวว่า “ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณการเปลี่ยนแปลงสมมูลของสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์นั้น” โดยที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 1.84-5.51 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จะสามารถลดค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมันได้

ร้อยละ 34-61 29-42 และ 57-99 ตามลำดับ ที่เวลา 3 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป ร้อยละการลดลงของสารมลพิษจะสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี และค่าบีไอดีจะเริ่มคงที่ที่เวลา 7 ชั่วโมง ส่วนร้อยละการลดลงของไขมันจะเริ่มคงที่ที่เวลา 5 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นปริมาณสารมลพิษในระบบเริ่มมีปริมาณน้อยลงเรื่อยๆ โดยการลดลงของสารอินทรีย์ในน้ำเสียนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^{\bullet}) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงที่ถูกผลิตขึ้นในระบบและจะไปออกซิไดซ์สารมลพิษในระบบทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงจนกระทั่งกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ (4.2) และ (4.3) (Piya-areetham และคณะ, 2006)



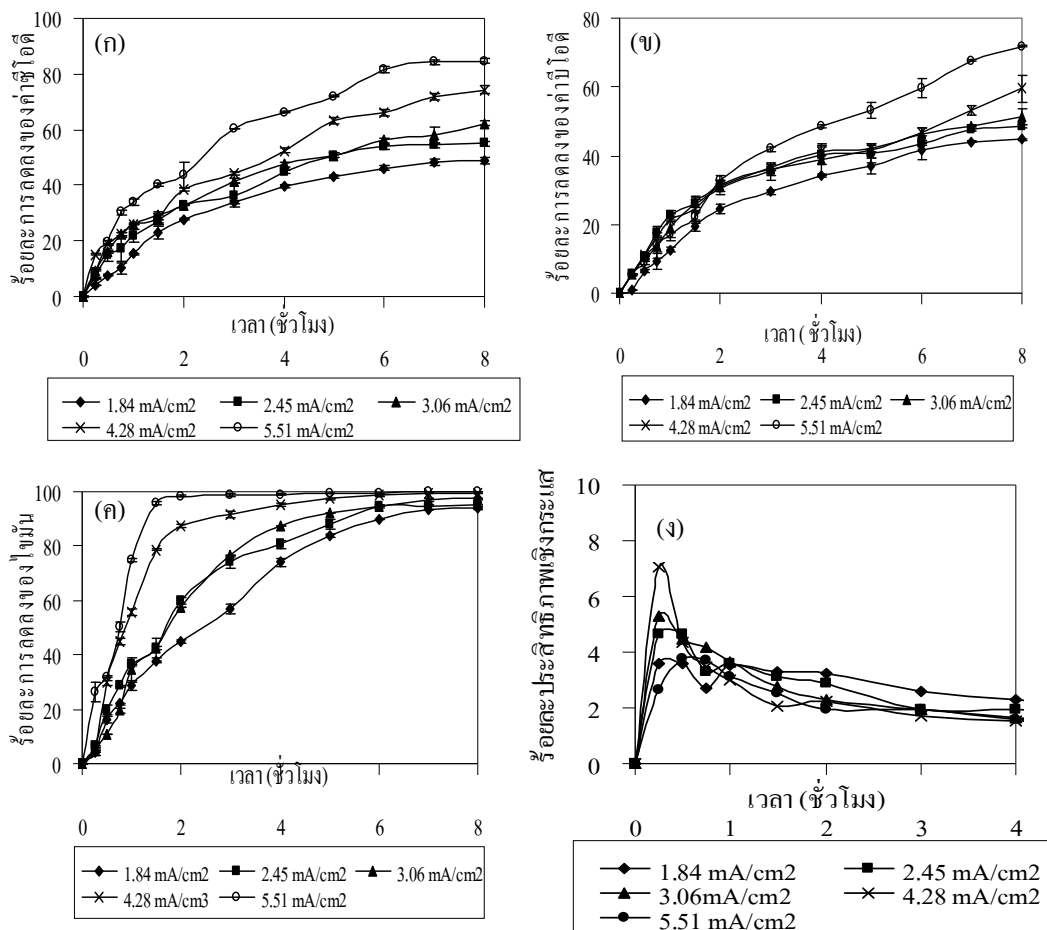
เมื่อ $MO_x(OH^{\bullet})_z$ คือไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ดูดซับบนผิวของขั้วแอโนด R คือสารอินทรีย์ และ RO คือผลิตภัณฑ์ของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์

นอกจากนี้การลดลงของสารอินทรีย์ในน้ำเสียยังเกิดจากปฏิกิริยาอื่นๆอีก คือ ปฏิกิริยาของโคร์เบ (Kolbe reaction) โดยหมู่คาร์บอกซิลิก ($R-COOH$) ซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำเสียเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดการสลายตัวเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชัน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในสมการที่ (4.4)



เมื่อศึกษาประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า (Instantaneous current efficiency, ICE) ดังแสดงในภาพที่ 4.6 (ง) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากภาคผนวก (ง) (Rajkumar และคณะ, 2005) พบว่าที่เวลา 15 นาที และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.28 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร จะให้ผลสูงสุดในการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าค่าอื่นคือประมาณร้อยละ 7.05 และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าจะค่อยๆลดลงเนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นสารอินทรีย์ที่อยู่ในระบบจะถูกกำจัดออกไป ทำให้เหลือปริมาณสารอินทรีย์น้อย ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆในน้ำเสียลดลงเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำเกินไปและสูงเกินไปประสิทธิภาพ

เชิงกระแสไฟฟ้าก็จะต่ำลง เนื่องจากที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำการเกิดปฏิกิริยาจะดำเนินไปอย่างช้าๆ เพราะปริมาณไอออนถ่ายเทไปยังขั้วไฟฟ้าได้เพียงพอกับปริมาณอิเล็กตรอนที่จะเกิดปฏิกิริยา จึงทำให้ระบบถูกควบคุมด้วยการถ่ายเทประจุ และเมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยา ก็จะเร็วขึ้น แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้ามากเกินไปจนเกินค่าลิมิตของการเกิดปฏิกิริยาจะพบว่ากระแสไฟฟ้าส่วนเกินจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงขึ้นในระบบ (Bard และ Faulkner, 2001) ดังนั้นจากการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า สามารถสรุปได้ว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.28 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าสูงสุด



ภาพที่ 4.6 ร้อยละการลดลงของ (ก) ค่าซีไออดี (ข) ค่าบีไออดี และ (ค) ไขมันที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ และ (ง) ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ

4.3.2.2 ผลของชนิดและความเข้มข้นของสารเติมแต่ง

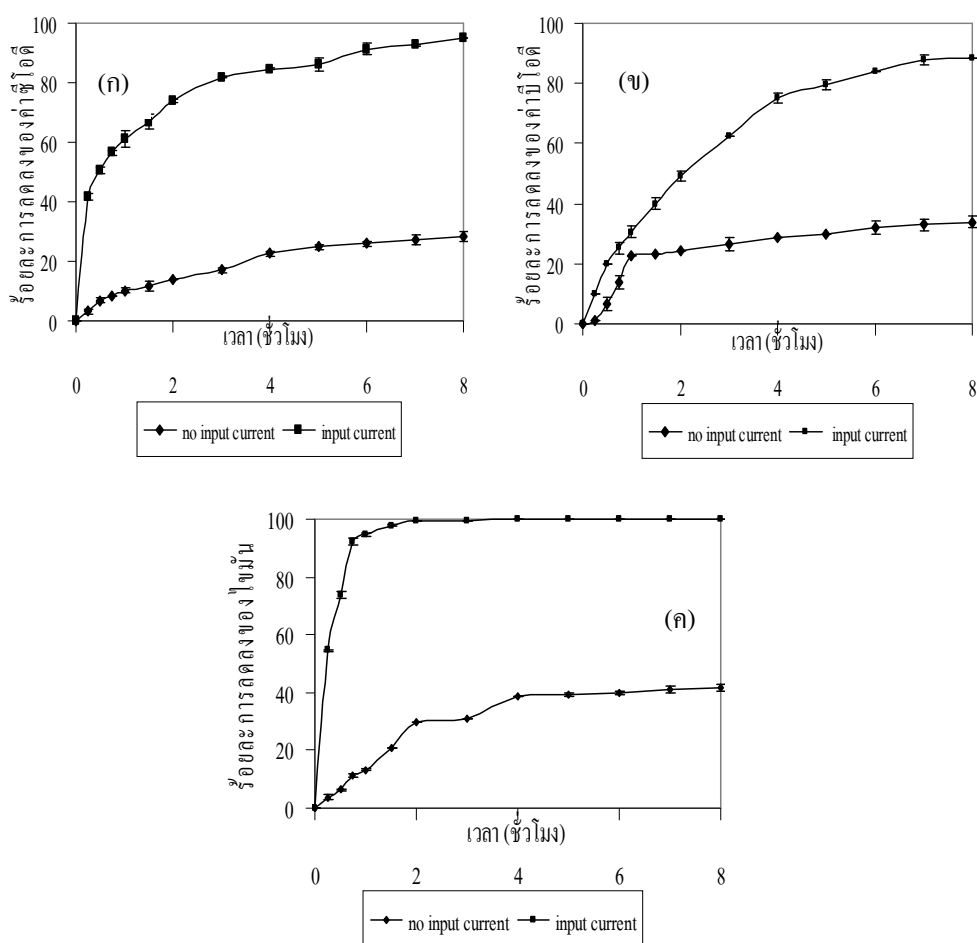
เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล จึงได้มีการเติมสารเติมแต่งลงไปในระบบ โดยชนิดของสารเติมแต่งที่เลือกใช้ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.274-1.646 โมลต่อลิตร และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.015-0.092 โมลต่อลิตร โดยในการทดลองทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองที่ได้กับผลการทดลองเมื่อไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับระบบและเก็บตัวอย่างที่เวลา 0-8 ชั่วโมง เพื่อนำมาวิเคราะห์หรืออัตราการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมัน

ภาพที่ 4.7 (ก-ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมันกับเวลาในระบบบำบัดที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในภาวะที่มีและไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้า พบว่าภาวะที่ไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้าสามารถกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียได้ในระดับหนึ่ง โดยอัตราการลดลงของ ค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 23 29 และ 39 ตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากในภาวะที่เป็นกรดสูง (ความเป็นกรดประมาณ 1-2) จะมีผลต่อการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดสารมลพิษในน้ำเสียได้เป็นอย่างดี (Nimura, Itagaki และ Nanba, 1992) นอกจากนี้ยังมีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อีกด้วย (US peroxide, 2008) และยังทำให้น้ำเสียมีความใสมากขึ้น แต่เมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะพบว่าอัตราการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมันจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป โดยจะสามารถลดค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมันได้ร้อยละ 85 75 และ 100 ตามลำดับที่เวลาเดียวกัน ซึ่งสูงกว่าค่าอัตราการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมัน ในภาวะที่ไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้าประมาณ 3.4 2.6 และ 2.4 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากกระแสไฟฟ้าจะช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้มีการผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลได้มากยิ่งขึ้น

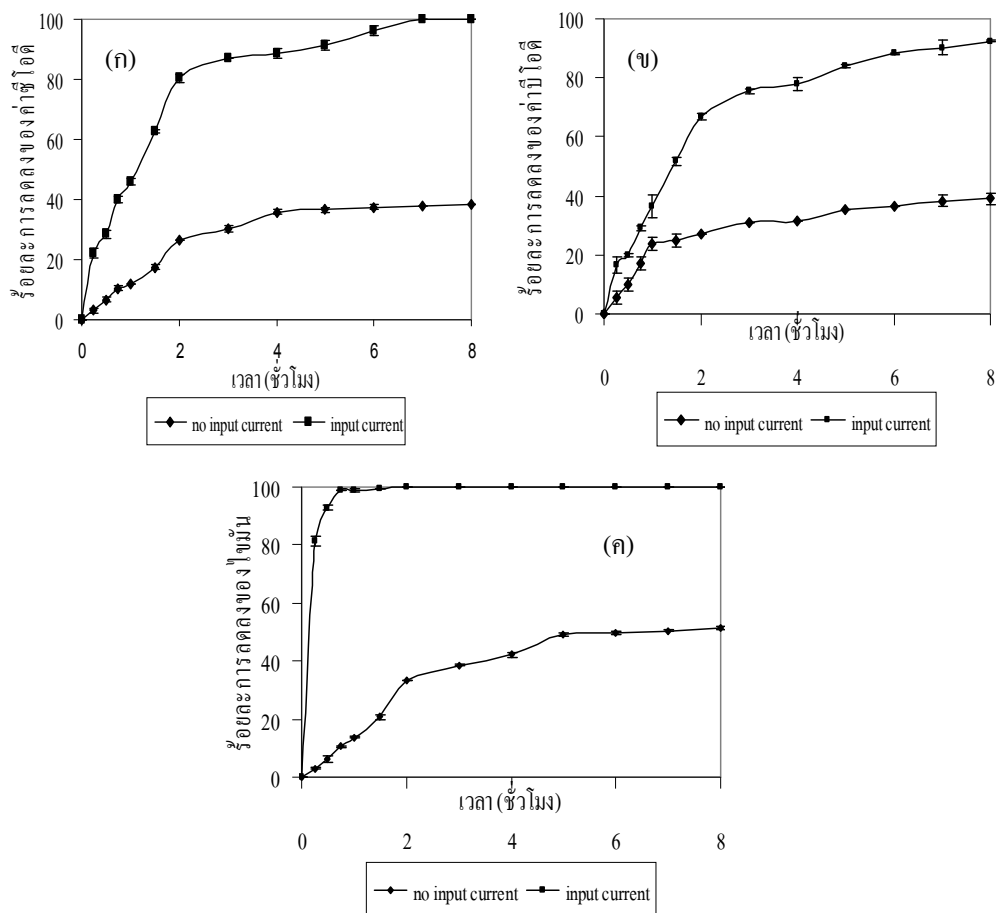
ภาพที่ 4.8 (ก-ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมันของน้ำเสียในระบบที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์กับเวลาในภาวะที่มีการป้อนและไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้า พบว่าภาวะที่ไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้าจะสามารถกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียได้ในระดับหนึ่ง เช่นเดียวกับการทดลองเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยจะสามารถลดค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมันได้ร้อยละ 36 32 และ 42 ตามลำดับที่เวลา 4 ชั่วโมง แต่เมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะพบว่าอัตราการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมันจะเพิ่มสูงขึ้น โดยจะสามารถลดค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมันได้ร้อยละ 88.5 78 และ 100 ตามลำดับที่เวลาเดียวกัน ซึ่งมากกว่าระบบที่ไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้า 2.5 2.4 และ 2.4 เท่า ตามลำดับ โดยการลดลงของสารมลพิษในภาวะที่ไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้าเกิดจากในระบบมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิด

จากการเติมโซเดียมคลอไรด์โดยมีสมบัติในการนำไฟฟ้า ซึ่งเมื่ออยู่ในน้ำจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในระบบอย่างต่อเนื่อง และจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวขั้วไฟฟ้าได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สารมลพิษในน้ำเสียมีปริมาณลดลงในระดับหนึ่ง

จากการศึกษาในข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าภาวะที่มีการป้อนกระแสไฟฟ้าจะสามารถกำจัดสารมลพิษได้มากกว่าภาวะที่ไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้า ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงทำการทดลองในภาวะที่มีการป้อนกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 4.7 ร้อยละการลดลงของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ไขมันในน้ำเสียของระบบที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในภาวะที่มีการป้อนและไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 4.8 ร้อยละการลดลงของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ไขมันของน้ำเสียในระบบที่มีโซเดียมคลอไรด์ในภาวะที่มีการป้อนและไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้า

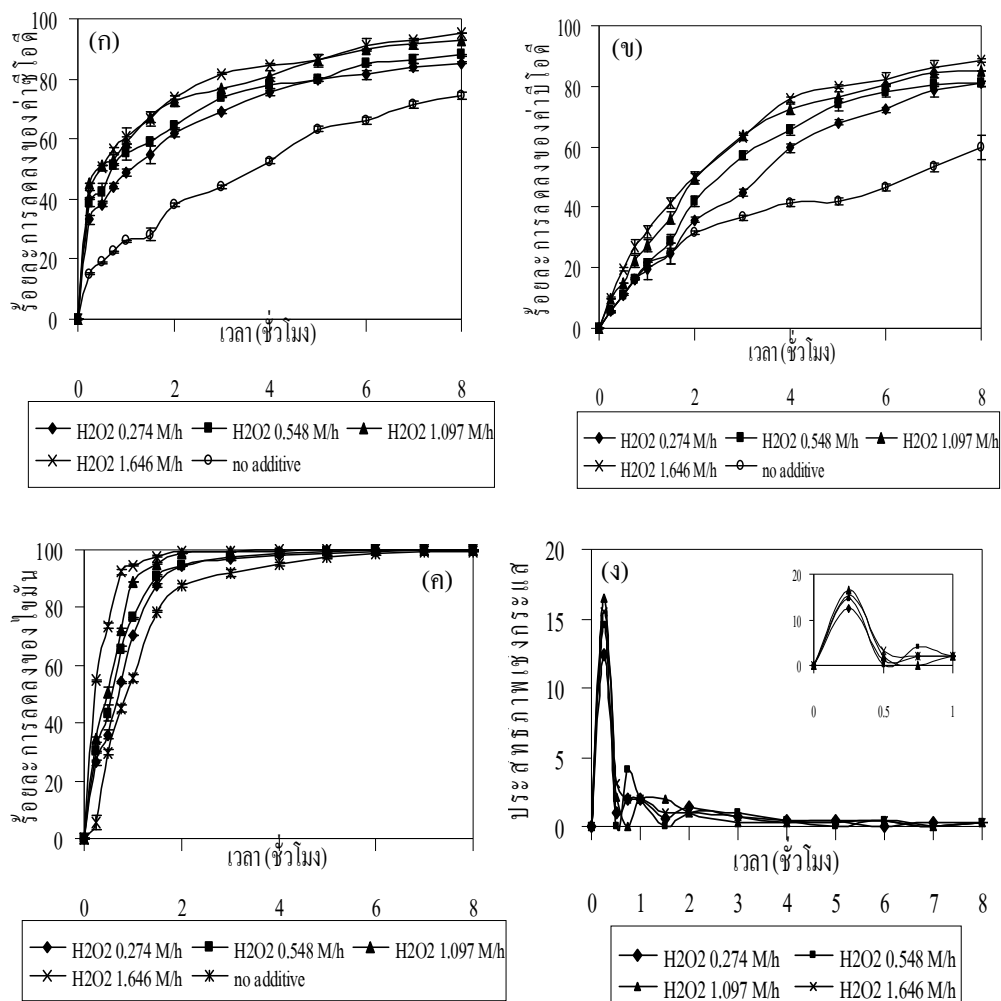
ภาพที่ 4.9 (ก-ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของค่าซีโอดี ค่าบีโอดี และไขมันกับเวลาที่ความเข้มข้นต่างๆของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะส่งผลต่อการลดค่าซีโอดี และค่าบีโอดีอย่างมาก โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จาก 0-1.646 โมลต่อลิตร การลดค่าซีโอดีจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 71 ไปร้อยละ 92 ส่วนค่าบีโอดีจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 53 ไปร้อยละ 86 ในเวลา 7 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากสารอินทรีย์ถูกทำลายด้วยอนุพันธ์ของไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งมีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง โดยสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดซ์ทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงและเมื่อเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์จะกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังแสดงในสมการที่ (4.5) และ (4.6)



อย่างไรก็ดีพบว่า การเพิ่มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วงที่ศึกษาไม่ส่งผลต่อร้อยละการลดลงของไขมันมากนัก โดยการเพิ่มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วง 0-1.646 โมลต่อลิตร จะทำให้ร้อยละการลดลงของไขมันเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 87 ไปร้อยละ 99 ในเวลา 2 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมจะพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 4.9 (ง) พบว่าที่ความเข้มข้น 1.097 โมลต่อลิตร จะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าความเข้มข้นอื่นๆ โดยที่เวลา 15 นาที จะให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าสูงสุดในการกำจัดสารมลพิษคือประมาณร้อยละ 16.1 และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าก็จะค่อยๆ ลดลง ดังนั้นความเข้มข้น 1.097 โมลต่อลิตร จึงเป็นความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม โดยจะสามารถลดค่าซีไอดี ค่าบีไอดี ได้สูงถึงร้อยละ 92 และ 86 ตามลำดับ ภายในเวลา 7 ชั่วโมง และสามารถกำจัดไขมันได้หมดภายในระยะเวลาเพียง 5 ชั่วโมง

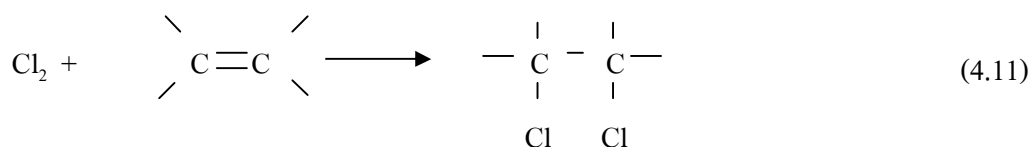
ภาพที่ 4.10 (ก-ค) แสดงร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมัน กับเวลาที่ความเข้มข้นต่างๆ ของโซเดียมคลอไรด์ จากผลการทดลองพบว่า การเติมโซเดียมคลอไรด์ลงในน้ำเสียจะมีผลต่อการลดค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมันอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์จาก 0-0.061 โมลต่อลิตร พบว่าการลดค่าซีไอดี และค่าบีไอดีจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 72 ไปร้อยละ 100 และจากร้อยละ 53 ไปร้อยละ 90 ในเวลา 7 ชั่วโมง สำหรับไขมันจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 79 ไปร้อยละ 100 ในเวลา 2 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากคลอไรด์ไอออนที่เกิดขึ้นในระบบ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้แก่สคลอรีนออกมา โดยสามารถละลายอยู่ในรูปของไฮโปคลอไรต์ และจะแตกตัวเป็นไฮโปคลอไรท์ไอออนซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้เช่นเดียวกับไฮดรอกซิลเรดิคัล โดยสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็ก และหากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยสมบูรณ์จะได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังแสดงในสมการที่(4.7)-(4.10) (Zhang และคณะ, 2006) เมื่อ R คือสารอินทรีย์ เช่น แอลกอฮอล์ เป็นต้น



ภาพที่ 4.9 ร้อยละการลดลงของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าไคลน และ (ค) ไคลนกับเวลาที่ความเข้มข้นต่างๆของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ (ง) ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ

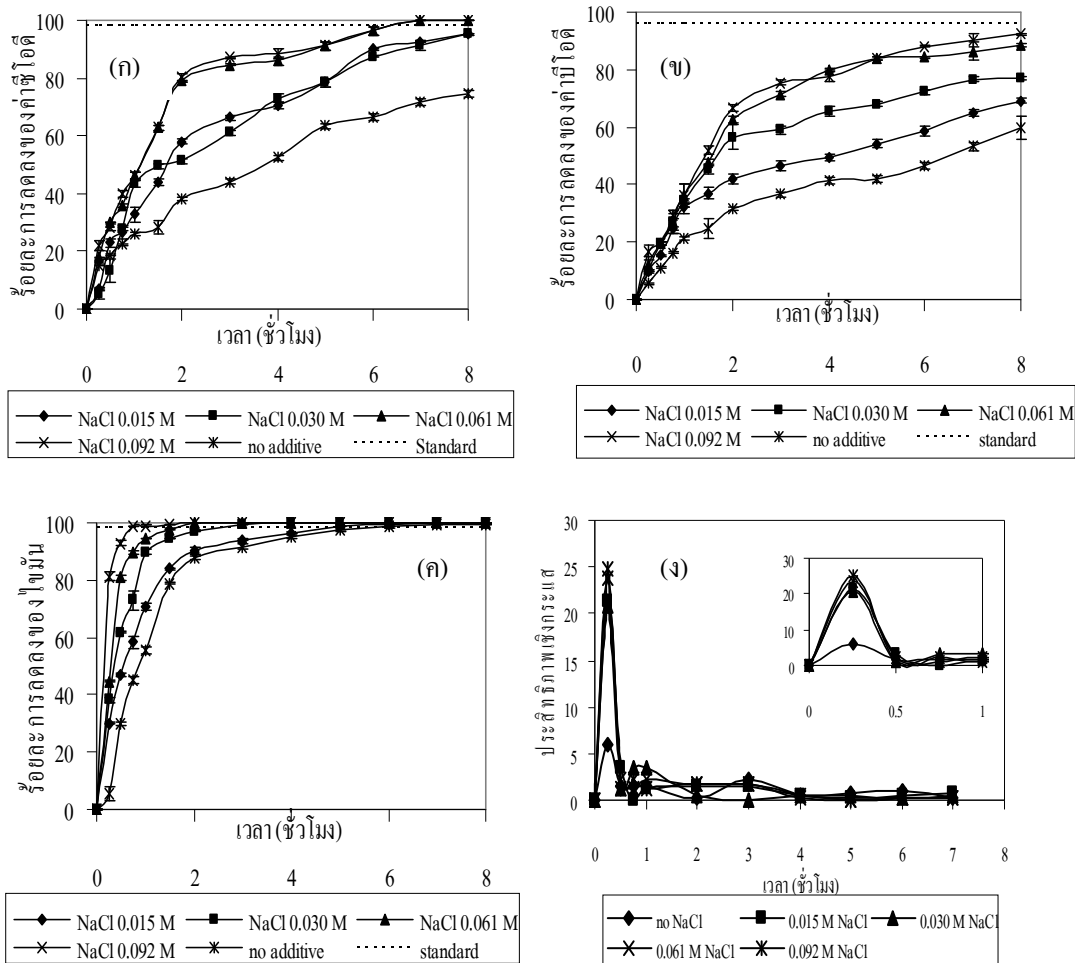


นอกจากนี้ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาอื่นๆ อีก ได้แก่ คลอรีนทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ได้เป็นไดคลอไรด์ ดังแสดงในสมการที่ (4.11) คลอรีนทำปฏิกิริยากับสีที่เกิดจากกรดไขมันอิสระบางตัว ทำให้เกิดการฟอกสี ดังแสดงในสมการที่ (4.12) คลอรีนทำปฏิกิริยากับเอทิลแอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นคาร์บอกซิลิก ดังแสดงในสมการที่ (4.13) และหากคลอรีนทำปฏิกิริยากับเมทิลแอลกอฮอล์ จะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ (4.14)



อย่างไรก็ดีเมื่อเพิ่มโซเดียมคลอไรด์มากกว่า 0.061 โมลต่อลิตร คือเพิ่มไปเป็น 0.092 โมลต่อลิตร จะไม่ทำให้ร้อยละการลดลงของสารมลพิษเพิ่มขึ้นมากนัก

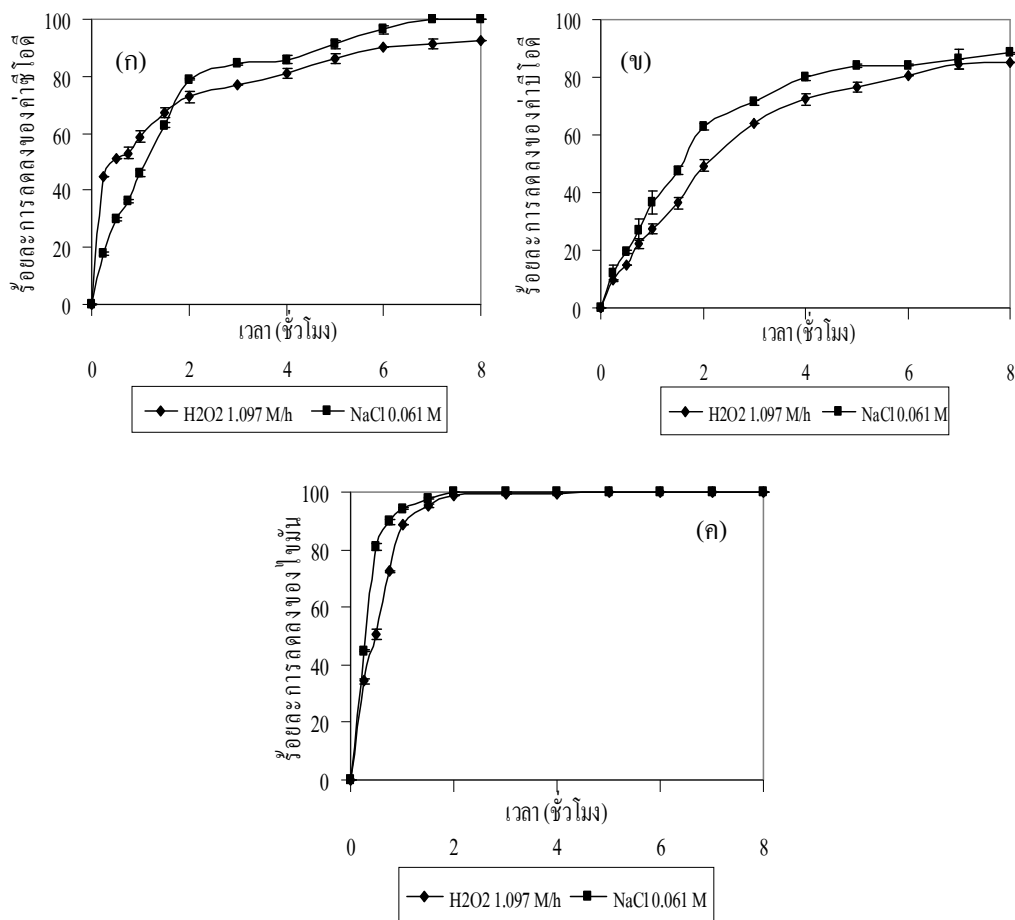
เมื่อศึกษาประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่ความเข้มข้นต่างๆ ของโซเดียมคลอไรด์ ดังแสดงในภาพที่ 4.10 (ง) จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าก็จะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่ความเข้มข้น 0.015 0.030 0.061 และ 0.092 โมลต่อลิตร ที่เวลา 15 นาที จะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าประมาณร้อยละ 21 20 25 และ 24 ตามลำดับ ซึ่งที่ความเข้มข้น 0.061 ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นอื่น ดังนั้นที่ความเข้มข้น 0.061 โมลต่อลิตร จึงเป็นความเข้มข้นที่ดีที่สุดของการเติมโซเดียมคลอไรด์ โดยร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี มีค่าเท่ากับร้อยละ 90 และ 84 ตามลำดับ ภายในเวลา 5 ชั่วโมง และสามารถกำจัดไขมันได้หมดภายในระยะเวลาเพียง 2 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.10 ร้อยละการลดลงของ (ก) ค่าซีโอดี (ข) ค่าบีโอดี และ (ค) ไขมันกับเวลาที่ความเข้มข้นต่างๆ ของโซเดียมคลอไรด์ และ (ง) ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ

ภาพที่ 4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการลดลงของสารมลพิษน้ำเสียเมื่อผ่านการบำบัดในภาวะที่มีการเติมสารเติมแต่งที่ภาวะที่เหมาะสมคือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.097 โมลต่อชั่วโมง และโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.061 โมลต่อลิตร พบว่าร้อยละการลดลงของค่าซีโอดี ค่าบีโอดี และไขมัน ของโซเดียมคลอไรด์มีค่าสูงกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแสดงในภาคผนวก ง ข้อ3) ถึงแม้ว่าไฮดรอกซิลเรดิคัลจะมีคุณสมบัติในการออกซิไดซ์ที่รุนแรงกว่าไฮโปคลอไรต์ แต่ไฮดรอกซิลเรดิคัลจะสลายตัวอย่างรวดเร็วในภาวะที่มีน้ำ ซึ่งตรงข้ามกับไฮโปคลอไรต์ที่สามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงได้อีกเรื่อยๆ แบบเป็นวัฏจักรกล่าวคือ คลอไรต์ เป็นคลอรีน เป็นไฮโปคลอไรต์ และเป็นคลอไรท์ไอออน (Rajkumar, Kim และ

Palanivelu, 2005) อย่างไรก็ตามการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปในระบบ ในภาวะที่อิมิตัวจะก่อให้เกิดแก๊สคลอรีนขึ้นซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน และเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมหากตกค้างอยู่ในน้ำเสียปริมาณมาก ดังนั้นหากจะนำไปประยุกต์ใช้จริงกับโรงงานอุตสาหกรรมสมควรที่จะเลือกใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แทนโซเดียมคลอไรด์ เนื่องจากไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และมีสมบัติในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์เช่นเดียวกัน

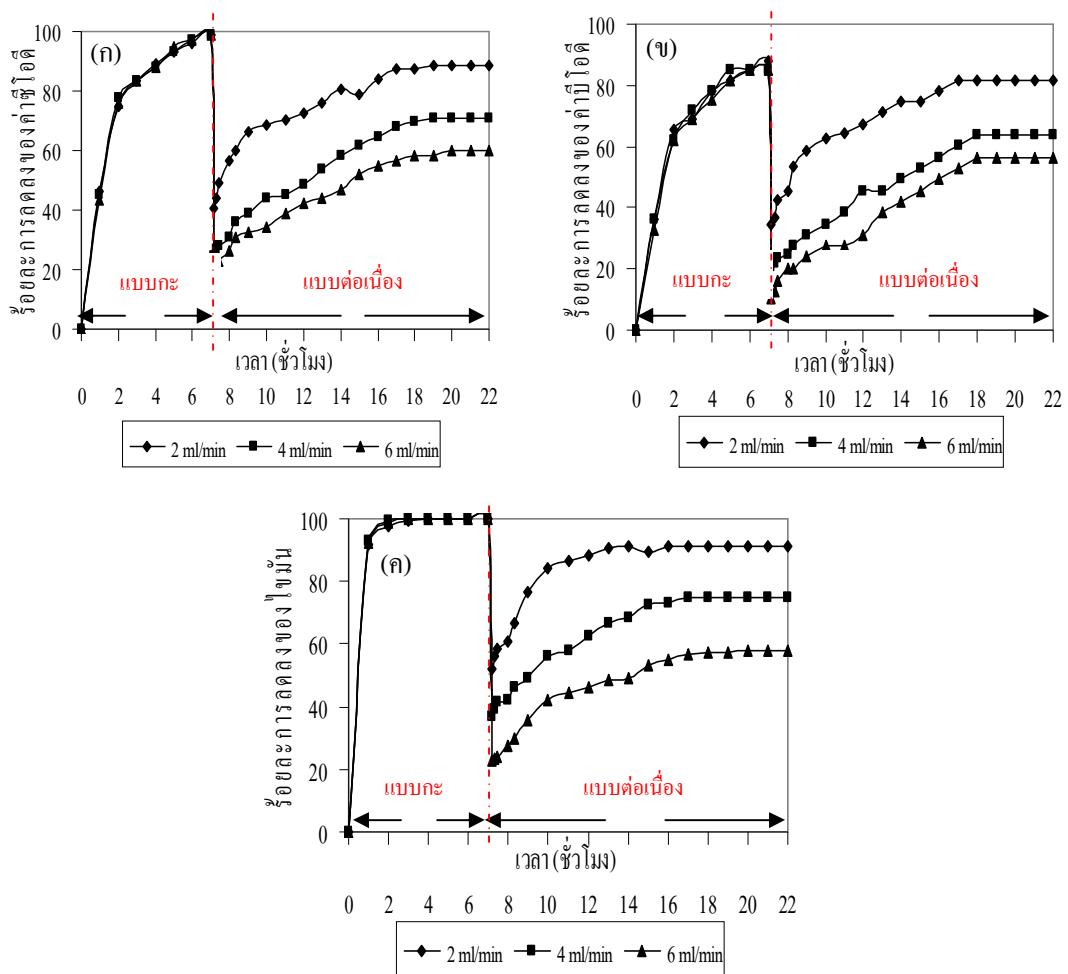


ภาพที่ 4.11 ร้อยละการลดลงของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ไขมันของน้ำเสียในระบบที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.097 โมลต่อชั่วโมง และโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.061 โมลต่อลิตร ที่เวลาต่างๆ

4.3.4 การบำบัดน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง

การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่องนั้นจะทำการศึกษาโดยนำภาวะที่ดีที่สุดของการบำบัด โดยใช้

เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบกะมาทำการศึกษาต่อ กล่าวคือ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.28 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0.061 โมลต่อลิตร ที่ความเป็นกรด-เบส 2.5 และจะทำการศึกษาอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่ค่าต่างๆ คือ 2 4 และ 6 มิลลิลิตรต่อนาที หรือคิดเป็นเวลาคงอยู่ (Retention time) เท่ากับ 1,000 500 และ 333.3 นาที ตามลำดับ โดยในการทดลองจะเริ่มจากการทำงานแบบกะเป็นเวลา 7 ชั่วโมง จากนั้นจึงเริ่มป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ และจะทำการทดลองจนระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล



ภาพที่ 4.12 ร้อยละการลดลงของ (ก) ค่าซีไอดี (ข) ค่าบีไอดี และ (ค) ไนมันกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง

ภาพที่ 4.12 แสดงร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมัน กับเวลา ที่อัตราการไหลของน้ำตัวอย่าง 2 4 และ 6 มิลลิลิตรต่อนาที จากการทดลองจะเห็นว่าในช่วง 7 ชั่วโมงแรก ซึ่งเป็นการทำงานแบบกะและยังไม่ได้ป้อนน้ำเสียใหม่เข้าสู่ระบบโดยร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมัน จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อมีการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง จะส่งผลให้ร้อยละการลดลงของสารมลพิษลดลงอย่างชัดเจนโดยที่อัตราการไหล 2 4 และ 6 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าซีไอดีจะลดลงจากร้อยละ 100 ไปร้อยละ 40 26 และ 16 ตามลำดับ ส่วนค่าบีไอดีจะลดลงจากร้อยละ 88 ไปร้อยละ 34 20 และ 10 ตามลำดับ และสำหรับไขมันจะลดลงจากร้อยละ 100 ไปร้อยละ 52 36 และ 22 ตามลำดับ จากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมันจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและคงที่ที่ชั่วโมงที่ 18 18 และ 15 ซึ่งสามารถลดค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมันได้ถึงร้อยละ 88 81 และ 91 ตามลำดับ โดยที่อัตราการไหลต่ำจะสามารถกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียได้ดีกว่าที่อัตราการไหลสูง เนื่องจากอัตราการไหลต่ำจะทำให้ น้ำเสียที่ปล่อยเข้าสู่ระบบสามารถเกิดปฏิกิริยากับตัวออกซิไดซ์ในระบบ ได้มากขึ้นจึงทำให้สารมลพิษในน้ำเสียลดลง อย่างไรก็ตามน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดยังคงมีค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมันที่สูงกว่ามาตรฐาน 84 500 และ 9.33 เท่า ตามลำดับ

4.4 เปรียบเทียบกับการวิจัยอื่น

จากการศึกษาการจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการนำกลับทางเคมีและกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า และนำมาทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ซึ่งเป็นการบำบัดโดยวิธีทางชีวภาพ พบว่างานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพที่สูงกว่างานวิจัยอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยเมื่อนำร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมัน ในการบำบัดแบบกะและการบำบัดแบบต่อเนื่องมาทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Suehara และคณะ (2005) จะเห็นว่างานวิจัยนี้สามารถที่จะกำจัดไขมันได้สูงถึงร้อยละ 100 และ 91 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Kato และคณะ (2005) พบว่าวิธีนี้สามารถที่จะลดค่าซีไอดี และค่าบีไอดีได้มากกว่า กล่าวคือสามารถลดค่าซีไอดีได้ร้อยละ 100 และ 81 ตามลำดับ และลดค่าบีไอดีได้ร้อยละ 95 และ 81 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่าไขมันเริ่มต้นของ Kato และคณะ (2005) จะมีค่าที่สูงกว่าในงานวิจัยนี้แต่วิธีนี้ยังมีข้อเด่นกว่าคือสามารถนำกลับไบโอดีเซลที่ตกค้างในน้ำเสียซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้วิธีดังกล่าวยังมีข้อดีคือใช้เวลาในการบำบัดที่สั้นกว่าวิธีทางชีวภาพ ไม่ก่อให้เกิดกากตะกอนและสารเคมีตกค้างในระบบ สามารถดำเนินการได้ง่าย และใช้พื้นที่น้อยในการบำบัด

การจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการนำกลับทางเคมีและกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าจะนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลได้ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการลดสารมลพิษในน้ำเสียได้เป็นอย่างดี โดยสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดพบว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ลดลงจากค่าเริ่มต้นค่อนข้างมาก มีเพียงค่าความเป็นกรด-เบส ค่าบีโอดี และค่าของแข็งละลายน้ำซึ่งพบว่ายังคงมีค่าที่เกินมาตรฐานประมาณ 0.4 300 และ 8.05 เท่า ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 นอกจากนี้ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดยังมีลักษณะที่ใส ไม่มีสี ไม่เป็นที่น่ารังเกียจอีกด้วย ดังแสดงในภาพที่ 4.13

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ ในการจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

ผู้วิจัย (ปี)	ซีโอดี		บีโอดี		ไขมัน	
	ค่าซีโอดีเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัดซีโอดี	ค่าบีโอดีเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัดบีโอดี	ค่าไขมันเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัดไขมัน
Suehara et al., 2005*	-	-	-	-	15,100	98
Kato et al., 2005*	60,000	99	2,900	98	120,000	99
งานวิจัยนี้**	312,000	100	168,000	95	18,010	100
งานวิจัยนี้***	556,800	88	216,000	81	19,510	91

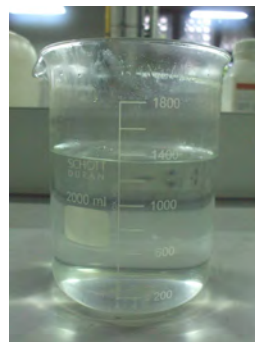
หมายเหตุ * กระบวนการทางชีวภาพ

** กระบวนการทางเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

*** กระบวนการทางเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



ก่อนการบำบัด



หลังการบำบัด

ภาพที่ 4.13 สีของน้ำตัวอย่างก่อนและหลังการบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการนำกลับทางเคมีและกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน น้ำทิ้ง	ค่าเริ่มต้น	ภายหลังการ นำกลับทางเคมี	ภายหลังการ บำบัด
ความเป็นกรด-เบส	5.5-9	9.25-10.76	2.5	2.2
ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 400	312,000-588,800	129,600	-
ค่าบีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 60	168,000-300,000	204,000	18,000
ไขมันและน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 5	18,000-22,000	320	-
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 100	439-464	NA	NA
ของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$\leq 3,000$	26,580-26,740	22,620	24,140

4.5 ต้นทุนในการดำเนินงาน

ต้นทุนในการดำเนินงานจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลในงานวิจัยนี้จะพิจารณาจากค่าใช้จ่ายเนื่องจากกระแสไฟฟ้า และสารเคมีเป็นหลัก ตารางที่ 4.4 แสดงถึงต้นทุนในการดำเนินงานที่ภาวะที่เหมาะสมของทุกการทดลอง โดยจะเห็นได้ว่าวิธีการบำบัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบทางตรง

จะใช้ต้นทุนในการดำเนินงานประมาณ 333.45 บาทต่อลูกบาศก์เมตร หรือ 9.14 เหรียญสหรัฐต่อลูกบาศก์เมตร แต่พบว่าสมบัติของน้ำเสียยังคงมีค่าสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งกรมโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ ซึ่งน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วและมีค่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานพบว่าจะเป็นน้ำเสียที่มาจาก การบำบัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบทางอ้อมที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไป ในน้ำเสียทำให้สามารถกำจัด สารมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งพบว่าวิธีการดังกล่าวใช้ต้นทุนในการดำเนินงานที่ต่ำกว่าการ บำบัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบทางตรงเพียงเล็กน้อย โดยใช้ต้นทุนในการดำเนินงานประมาณ 323.05 บาทต่อลูกบาศก์เมตรหรือประมาณ 8.86 เหรียญสหรัฐต่อลูกบาศก์เมตรของน้ำตัวอย่าง (การ คำนวณแสดงในภาคผนวก ง ข้อ1) และเมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนการจัดการน้ำเสียของโรงงาน พบว่าวิธีการนี้มีต้นทุนในการจัดการที่ต่ำกว่า 0.16 เท่า นอกจากนี้ไบโอดีเซลที่นำกลับมาได้นั้นยัง สามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมัน B100 ที่ผลิตจากกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันได้อีกประมาณ 70 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตร และยังจัดเป็นสารที่สามารถสร้างมูลค่าได้อีกด้วย

ตารางที่ 4.5 ต้นทุนในการดำเนินงานจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

รายการ	วิธีการบำบัดน้ำเสีย						
	การนำกลับมาใช้ไบโอดีเซล		เคมีไฟฟ้าแบบทางตรง	เคมีไฟฟ้าแบบทางอ้อม		เคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง	
	สารเคมี (149.8 บาทต่อ ลิตร)	ไบโอดีเซล ที่นำ กลับมาได้	ไฟฟ้า (2.5 บาทต่อกิโลวัตต์ ชั่วโมง)	ไฟฟ้า (2.5 บาทต่อกิโลวัตต์ ชั่วโมง)	สารเติมแต่ง (12 บาทต่อกิโลกรัม)	ไฟฟ้า (2.5 บาทต่อกิโลวัตต์ ชั่วโมง)	สารเติมแต่ง (12 บาทต่อกิโลกรัม)
ข้อมูล	2,500 มล./ลบ.ม.	70 ลิตร/ลบ.ม.	133.38 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม.	123.89 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม.	1.11 กก./ลบ.ม.	259.17 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลบ.ม.	0.24 กก./ลบ.ม.
มูลค่า (บาท/ลบ.ม.)		1,050					
ต้นทุน (บาท/ลบ.ม.)	374.34		333.45	309.73	13.32	647.93	2.88
รวม	374.34		333.45	323.05		650.76	
ต้นทุนการจัดการน้ำเสียจริงของโรงงาน (บาทต่อลูกบาศก์เมตร)							2,000

หมายเหตุ ไบโอดีเซลที่นำกลับมาได้จะนำไปใช้ในการผลิตน้ำมันดีเซลผสม ซึ่งคิดเป็นมูลค่า 15 บาทต่อลิตร

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการนำกลับทางเคมีและกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า พบว่ากระบวนการนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียและยังสามารถนำไบโอดีเซลกลับคืนมาจากน้ำเสียได้อีกด้วย โดยในส่วนของขั้นตอนการนำกลับไบโอดีเซล พบว่าไบโอดีเซลที่สามารถนำกลับมาได้มีประมาณร้อยละ 7 โดยปริมาตร โดยสามารถนำกลับมาได้ในช่วงความเป็นกรดสูง คือในช่วงความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2-6 ซึ่งสามารถนำกลับไบโอดีเซลมาได้มากที่สุดที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 นอกจากนี้ยังพบว่า ภายหลังจากการนำกลับไบโอดีเซลแล้ว สารมลพิษต่างๆในน้ำเสียจะมีค่าที่ลดลง โดยร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมัน มีค่าสูงถึงร้อยละ 40-74 13-24 และ 87-98 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการเกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยเครื่อง Potentiostat/Galvanostat พบว่าน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีที่ภาวะความเป็นกรดสูง โดยภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบกะ ได้แก่ ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 2 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.28 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.061 โมลต่อลิตร โดยที่ภาวะดังกล่าวสามารถกำจัดค่าซีไอดี และไขมัน ได้หมดภายในเวลา 5 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมงตามลำดับ ส่วนค่าบีไอดีพบว่าร้อยละการลดลงมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 และสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง พบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมได้แก่ อัตราการไหลที่ 2 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ต่ำที่สุด โดยร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และไขมัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 88 81 และ 91 ตามลำดับ แม้ว่าวิธีการดังกล่าวจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลได้ แต่น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง ยังคงมีสมบัติที่ไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งยังไม่สามารถจะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติดังนั้นจึงควรที่จะนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วนั้น มาหมุนเวียนใช้ในส่วนของขั้นตอนอื่นแทน เช่น ขั้นตอนการล้างไบโอดีเซล เป็นต้น

ข้อเสนอแนะ

- ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีการทำไบโอดีเซลที่นำกลับมาใช้ใหม่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น
- ควรศึกษาวิธีการจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าร่วมกับการบำบัดแบบชีวภาพ เนื่องจากสมบัติของน้ำเสียมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สูงมาก
- ควรศึกษาการใช้กรดไฮโดรคลอริกแทนการใช้กรดซัลฟิวริกในขั้นตอนของการนำกลับมาใช้ไบโอดีเซล เพื่อจะได้ไม่เกิดซัลเฟตไอออนตกค้างในระบบ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.). 2550. กระบวนการผลิตไบโอดีเซล. [Online]. แหล่งที่มา: <http://www.tistr.or.th>. [16 กันยายน 2551]
- กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.). 2550. ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล. [Online]. แหล่งที่มา: <http://www.tistr.or.th>. [16 กันยายน 2551]
- กัณหา มาศ สุธธิเรืองวงศ์. 2539. การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2543. การจัดการเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร: มิตรนราการพิมพ์.
- เทอดพงศ์ ศรีสุขพันธุ์. 2549. ระบบบำบัดแบบโปรยกรอง. [Online]. แหล่งที่มา: www.health.hcu.ac.th. [12 มกราคม 2552]
- ธุรกิจพลังงาน, กรม. 2550. สมบัติมาตรฐานไบโอดีเซลของยุโรป สหรัฐอเมริกา และไทย. [Online]. แหล่งที่มา: www.energy.go.th. [26 ธันวาคม 2551]
- ณัฐฐา รัตนปัญญา. 2550. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ได้จากราแอนด์ไฟต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐพงศ์ วรรณจิตร และ สุรีย์ บุญญานุพงศ์. 2551. ระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์. [Online]. แหล่งที่มา: www.sri.cmu.ac.th. [12 มกราคม 2552]
- บางจากปิโตรเลียม. 2550. เทคโนโลยีและกระบวนการผลิตไบโอดีเซล. [Online]. แหล่งที่มา: <http://www.bangchak.co.th/th/energyDetail>. [20 กุมภาพันธ์ 2551]
- บางจากปิโตรเลียม. 2550. ความหมายไบโอดีเซล. [Online]. แหล่งที่มา: <http://www.bangchak.co.th/th/energyDetail>. [20 กุมภาพันธ์ 2551]
- ปัทมากร เจริญสาคร. 2549. การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยวิธีทางเคมีและทางชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิสมัย เจนวนิชปัญญกุล และ ลลิตา อัดนโถ. 2549. รอบรู้เรื่องราวไบโอดีเซล. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: พิมพ์พินิจ การพิมพ์.

- มันสิน ตันจุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่ม 1 และเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. 2539. กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3.
- สังกรม์ คงเกาะ. 2548. การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สภาผู้แทนราษฎร, คณะกรรมาธิการพลังงาน. 2545. พลังงานทดแทน เอทานอล และไบโอดีเซล. กรุงเทพมหานคร.
- สวีณา เกตุสุวรรณ. 2543. การลดค่าซีโอดีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีกับโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ เฟอร์ริกซัลเฟตแลแคลเซียมไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อุดมศักดิ์ เจียรวิชัย. 2541. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดขั้นต้นสำหรับน้ำเสียโรงงานผลิตนมถั่วเหลืองด้วยกระบวนการดีเอเอฟกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Agriculture and Consumer Protection. 2009. Anaerobic Baffled Reactor. [Online]. Available from: www.fao.org/docrep/T0541E/T0541E09.html. [2009, January 12]
- Bard A.J. and Faulkner L.R. 2001. Electrochemical Methods: Fundamental and Application 2^{ed} edition (n.p.): John Wiley & Sons.
- Cabeza, A., Urriaga, A., Rivero, M-J., and Ortiz, I. 2007. Ammonium removal from landfill leachate by anodic oxidation. J. Hazard Mater. 144: 715-719.
- Chen, G. 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. Sep. Purif. Technol. 38: 11-41.
- Hunsom M. 2001. Recovery of copper, chromium and nickel from electroplating effluent by electrochemical technique. A Dissertation of Doctor of Philosophy in Chemical Technology, Department of chemical technology, Faculty of Science, Chulalongkorn university, Bangkok, Thailand.

- Israilides C.J., Vlyssides A.G., Mourafeti V.N. and Karvouni G. 1997. Olive oil wastewater treatment with the use of an electrolysis system. Bioresource Technology 61: 163 - 170.
- Kato, S., Yoshimura, H., Hirose, K., Amornkitbamurung, Mana., Sakka, M., and Sugahara, I. 2005. Application of microbial consortium system to wastewater from biodiesel fuel generator (CD-ROM). IEA-Waterqual (Singapore).
- Ken-ichiro, S., Kawamoto, Y., Fujii, E., Kohda, J., Nakano, Y., and Yano, T. 2005. Biological treatment of wastewater discharged from biodiesel fuel production plant with alkali-catalyzed transesterification. J.Bio. Sci. and Bio.Eng. Sci. 100: 437-442.
- Nimura, Y., Itagaki, K., and Nanba, K. 1992. Colorimetric determination of COD(Mn) using hydrogen peroxide. Nippon Suisan Gakkaishi. 58(6) 1129-1137.
- Piya-areetham, P., shenchunthichai, K., and Hunsom, M. 2006. Application of electrooxidation process for treating concentrated wastement from distillery industry with a voluminous electrode. Water research. 40: 2857-2864.
- Rajkumar, D., Kim, J.G and Palanivelu, K. 2005. Indirect Electrochemical oxidation of phenol in the presence of chloride for wastewater treatment, Chem. Eng.Technol. 28: 98-105.
- US peroxide. 2008. Introduction to hydrogen peroxide. [Online]. Available from: www.h2o2.com. [2009, February 3]
- Zhang, Q., Kang, B., XU, H., and Lin, H. 2006. Indirect electrooxidation of 4-amino- dimethyl-aniline hydrochloride. Chem. Res. Chinese U. 22(3) 360-363.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ความหมายของค่าพารามิเตอร์ในน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์, 2543)

ค่าพารามิเตอร์ (Parameter)

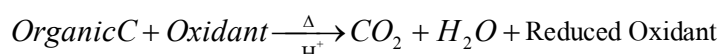
จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าสิ่งเจือปนในน้ำเสียมีหลายชนิด ดังนั้นเพื่อความเหมาะสม และสะดวกในการวิเคราะห์สิ่งเจือปนดังกล่าว จึงได้มีการกำหนดใช้ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญและมักจะกำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งที่ควรทราบ

1. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) เป็นค่าที่แสดงถึงภาวะความเป็นกรดและเบส ซึ่งสิ่งที่ชี้บอกความเป็นกรดคือความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน $[H^+]$ และสิ่งที่ชี้บอกความเป็นเบสคือความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน $[OH^-]$ เนื่องจากความเป็นกรด-เบสมีสเกลอยู่ในช่วง 0 ถึง 14 โดยสามารถแบ่งภาวะความเป็นกรด เบส และกลางได้ดังนี้ กล่าวคือ เมื่อความเป็นกรด-เบสมีค่าเท่ากับ 7 แสดงว่าสารละลายมีสภาพเป็นกลาง ถ้าค่าความเป็นกรด-เบสมีน้อยกว่า 7 แสดงว่าสารละลายเป็นกรด หรือค่าความเป็นกรด-เบสมีค่ามากกว่า 7 แสดงว่าสารละลายเป็นเบส โดยทั่วไปค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายในสภาพปกติจะมีค่าอยู่ในช่วง 6-8 ซึ่งจะไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ค่าความเป็นกรด-เบสมีสถิติการดังนี้

$$pH = -\log[H^+]$$

2. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ภายใต้ภาวะที่มีออกซิเจน โดยผลพลอยได้จากการออกซิเดชันนี้ทำให้แบคทีเรียได้รับพลังงานไปใช้ในการเจริญเติบโตเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ หรือแอมโมเนีย ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร ซึ่งค่าบีโอดีหาได้จากทรทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) ที่ถูกใช้ไปโดยจุลชีพ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ณ ปัจจุบัน เรียกว่า DO_0 และในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในเวลา 5 วัน ภายใต้อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เรียกว่า DO_5

3. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำทางเคมีให้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยอาศัยหลักการที่สารอินทรีย์เกือบทั้งหมดสามารถที่จะถูกออกซิไดซ์โดยตัวเดิมออกซิเจนอย่างแรง ภายใต้ภาวะเป็นกรด ดังสมการ



ค่าซีโอดีจัดเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงให้เห็นว่าน้ำนั้นมีความสกปรกที่เกิดจากสารอินทรีย์อยู่ในระดับมากน้อยเพียงใด

4. ไนโตรเจน (Nitrogen) หมายถึงไนโตรเจนที่ปะปนอยู่ในน้ำ ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่

4.1 ทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen: TKN) คือผลบวกของไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของออร์แกนิก-ไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจน

4.2 ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen: T-N) คือผลบวกของออร์แกนิก-ไนโตรเจน แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนไตรท์-ไนโตรเจน และไนเตรต-ไนโตรเจน

5. น้ำมันและไขมัน คือ สารส่วนใหญ่ที่ได้มาจากพืชและสัตว์ที่ใช้ในการประกอบอาหารและจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ อีกด้วย เช่น โรงฟอกหนัง โรงฆ่าสัตว์ บางส่วนได้มาจากน้ำมันและไขมันที่ใช้หล่อลื่นเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม โดยสารเหล่านี้ส่วนใหญ่ลอยน้ำได้ซึ่งขัดขวางการแพร่ของออกซิเจนลงสู่ น้ำ ทำให้แหล่งรับน้ำเสียเกิดสภาพไม่น่าดูและทำให้น้ำเน่าเสียได้ง่าย

ภาคผนวก ข

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพของน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH value)	5.5 – 9.0	pH Meter
2. ค่า TDS (Total Dissolved Solid)	- ไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างกัน แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร - น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความ เค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือลง สู่ทะเล ค่า TDS ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าTDS ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร	ระเหยแห้งที่ อุณหภูมิ 103 – 105 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกัน แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภท ของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการ ควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มิลลิกรัม ต่อลิตร	กรองผ่านกระดาษ กรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บ ตัวอย่าง
5. ซัลไฟด์ (Sulfide as H ₂ S)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	ไทเทรต
6. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร	กลั่นและตามด้วย วิธี Pyridine Barbituric Acid

ดัชนีคุณภาพของน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
7. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกัน แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่ เกิน 15 มิลลิกรัมต่อลิตร	สกัดด้วยตัวทำ ละลาย แล้วแยกหา น้ำหนักของน้ำมัน และไขมัน
8. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	กลั่นและตามด้วย วิธี 4- Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Iodometric method
12. สารที่ใช้ป้องกัน หรือกำจัดศัตรูพืชหรือ สัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas chromatography
13. ค่าบีโอดี 5 วันที่ อุณหภูมิ 20 องศา เซลเซียส (Biochemical Oxygen Demand: BOD)	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือแตกต่างกันแล้วแต่ ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภท ของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการ ควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	Azide modification ที่ อุณหภูมิ 20 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl)	ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือแตกต่างกัน แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่ เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร	Kjeldahl

ดัชนีคุณภาพของน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์	
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือแตกต่าง แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร	Potassium Dichromate Digestion	
16. โลหะหนัก (Heavy Metal) 1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma: ICP	
2. โครเมียมชนิดเฮกซะ วาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic Absorption Spectrophotometry	
3. โครเมียมชนิดไตรวา เลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร		
4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร		
5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร		
6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร		
7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร		
8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร		
9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร		
10. อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร		Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission

ดัชนีคุณภาพของน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
		Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma: ICP
11. ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic absorption Cold Vapor Technique
12. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma: ICP

แหล่งที่มา : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ. ศ. 2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

ภาคผนวก ค

การหาสมบัติของน้ำเสีย

1. pH

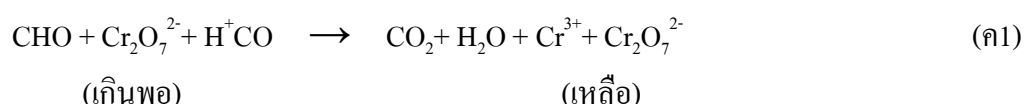
วิธีวิเคราะห์: วิเคราะห์โดยตรงด้วยเครื่อง pH meter 7020 Electronic Instrument Limited

หมายเหตุ: รายละเอียดการใช้เครื่อง pH meter ศึกษาได้จากคู่มือเฉพาะเครื่องนั้นๆ

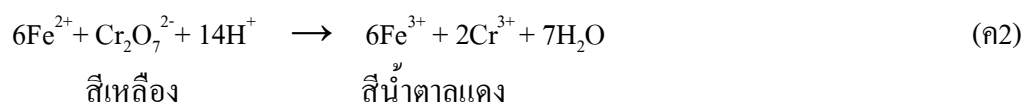
2. การวิเคราะห์หาคะโหลกด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Closed reflux, Titrimetric method)

สำหรับการวิเคราะห์หาคะโหลก มี 2 แบบ คือวิธีฟลักซ์แบบปิดและวิธีฟลักซ์แบบเปิดแต่ในการทดลองจะใช้วิธีฟลักซ์แบบปิด โดยมีหลักการดังนี้ ภายใต้ภาวะการรีฟลักซ์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่มีอุณหภูมิสูง สารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดซ์โดยสารละลายโปตัสเซียมไดโครเมตที่ทราบความเข้มข้นและมีปริมาณเกินพอที่ทราบจำนวน หลังจากรีฟลักซ์แล้วทำการวัดปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตที่เหลือ โดยนำไปไทเทรตกับเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate, FAS) และใช้เฟอโรอิน (Ferrouin) เป็นอินดิเคเตอร์ ทำให้ทราบปริมาณของโปตัสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการออกซิไดซ์ สารอินทรีย์ได้ปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

เมื่อรีฟลักซ์ด้วย $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$



หาปริมาณ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ที่เหลือโดยการไทเทรตด้วย FAS ที่มีเฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์



$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับ Fe^{2+} (FAS) ได้โครมิก (Cr^{3+}) จนหมด แล้ว Fe^{2+} จึงทำปฏิกิริยากับเฟอโรอินได้สารประกอบสีน้ำตาลแดงซึ่งแสดงจุดยุติของการไทเทรต

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หลอดย่อย (Digestion vessels) เป็นหลอดแก้วบอโรซิลิเกตขนาด 20x150 หรือ 25x150 มิลลิเมตร มีฝาสลักเกลียวซึ่งทำด้วยพีทีเอฟอี
2. บล็อกหรือที่ใส่หลอดแก้วแบบตันทำด้วยอะลูมิเนียม โดยความลึกของช่องใส่หลอด ประมาณ 45-50 มิลลิเมตร
3. ตู้อบ (Oven) สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ 150 ± 2 องศาเซลเซียส
4. บิวเรต
5. ขวดรูปกรวยขนาด 125 มิลลิลิตร

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย (Standard potassium digestion solution) 0.1 นอร์มัล
 - นำ $K_2Cr_2O_7$ อบที่ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก $K_2Cr_2O_7$ มา 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร และเติมปรอทซัลเฟต 33.3 กรัม ทิ้งให้ละลายและปล่อยให้เย็นจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1,000 มิลลิลิตร
2. กรดซัลฟิวริกที่เติมซิลเวอร์ซัลเฟต
 - ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) 22 กรัม เติมลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นซึ่งมีน้ำหนัก 4.1 กิโลกรัม (2.5 ลิตร) ทิ้งไว้ 1 - 2 วัน ซิลเวอร์ซัลเฟตจึงละลาย
3. สารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตไทเทรนต์ (Ferrous ammonium sulfate titrant) เข้มข้นโดยประมาณ 0.05 นอร์มัล
 - ละลายไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) ชนิด AR. Grade ประมาณ 19.6 กรัมในน้ำกลั่น เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร ทำให้เย็นแล้วเจือจาง 1000 มิลลิลิตร
 - สารละลายนี้ต้องนำมาหาความเข้มข้นที่แน่นอน (Standardization) ก่อนใช้ทุกครั้งด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต ทำได้ดังนี้คือนำ $K_2Cr_2O_7$ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร มาเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรแล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำมาไทเทรตกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตโดยใช้เฟอโรอิน จำนวน 2 - 3 หยด เป็นอินดิเคเตอร์จุดยุติจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง
4. สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์

5. สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต
 - ชั่ง KHP จำนวน 425 มิลลิกรัม ที่บดแห้งและอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ละลายด้วยในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตรสารละลายนี้จะมีค่าซีไอดี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (ปกติเก็บไว้ในตู้เย็นได้นาน 3 เดือน)

วิธีวิเคราะห์

1. ล้างหลอดแก้วและฝาปิดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 20 ทุกครั้งก่อนใช้งาน
2. เลือกขนาดของหลอดแก้วสำหรับต้มซีไอดีให้เหมาะสม
3. ถ้าตัวอย่างน้ำมีค่าซีไอดีต่ำให้เลือกใช้หลอดแก้วขนาด 25x150 มิลลิเมตร (ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร) และถ้าค่าซีไอดีสูงสามารถใช้หลอดแก้วขนาด 16x100 มิลลิเมตร (ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 2.5 มิลลิลิตร)
4. การเลือกปริมาตรน้ำตัวอย่าง ถ้าเป็นน้ำสะอาด น้ำธรรมชาติ หรือน้ำที่มีค่าซีไอดีต่ำ (<40 มิลลิกรัมต่อลิตร) ควรใช้ตัวอย่างน้ำ 10 มิลลิลิตร โดยใช้หลอดแก้วขนาด 25 x 150 มิลลิเมตร แต่ถ้าซีไอดีสูงกว่านั้นให้ใช้หลอดแก้วขนาด 20 x 150 โดยเลือกใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำมากที่สุด 5 มิลลิลิตร หรือใช้น้อยกว่า แล้วเติมน้ำกลั่นให้เป็น 5 มิลลิลิตร และถ้าตัวอย่างน้ำมีค่าซีไอดีสูงมากต้องเจือจางตัวอย่างน้ำก่อนนำมาใช้การเลือกขนาดตัวอย่างน้ำที่จะใช้วิเคราะห์ให้เหมาะสมอาจดูได้จาก ตารางที่ ค.1
5. ใส่ตัวอย่างลงในหลอดแก้วขนาดเหมาะสม แล้วเติมน้ำยาล้างสลายนหรือโปตัสเซียมไดโครเมต ตามด้วยกรดกำมะถันอย่างช้าๆ ในปริมาณที่แสดงอยู่ในตารางที่ ค.2 ปิดฝาให้แน่นและเขย่าผสมกันให้ดี สำหรับแบลนค์ (Blank) ใช้น้ำกลั่นแล้วทำเหมือนตัวอย่างทุกอย่าง
6. วางหลอดแก้วในบล็อคน้ำแล้วใส่ตู้อบ และตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 150 ± 2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
7. นำออกมาจากตู้อบ และทิ้งให้เย็น
8. เทสารละลายออกจากหลอดแก้วลงในขวดรูปกรวย ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลาย
9. ในหลอดแก้วให้หมดแล้วเทรวมลงในขวดรูปกรวย เติมเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด แล้วไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน FAS สีของสารละลายจะค่อยๆ เปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีเขียวอมเหลือง สีฟ้า และสีน้ำตาลแดง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดยุติ จดปริมาณ FAS ที่ใช้ไทเทรต

ตารางที่ ค.1 ปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์หาซีโอดี*

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 ปริมาณตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม

ขนาด หลอดแก้ว (มิลลิลิตร)	ปริมาตร ตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)	สารละลาย ไดโครเมต (มิลลิลิตร)	สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิลิตร)	ปริมาตร ทั้งหมด (มิลลิลิตร)
16 x 100	2.5	1.5	3.5	7.5
20 x 150	5.0	3.0	7.0	15.0
25 x 150	10.0	6.0	14.0	30.0

การคำนวณ

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

เมื่อ A = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตกับแบลงค์ (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตกับน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของ FAS (นอร์มัล)

V = ปริมาตรน้ำเสียตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

3. การวิเคราะห์หีโอดี

การวิเคราะห์หีโอดี วิธีการวิเคราะห์หีมี 2 วิธี คือ วิธีแบบโดยตรงและวิธีแบบโดยเจือจาง แต่ในการทดลองจะใช้วิธีแบบโดยเจือจางซึ่งวิธีแบบโดยเจือจางแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

วิธีแบบเจือจางใช้สำหรับตัวอย่างสารที่มีความสกปรก เช่น มีค่าบีโอดีเกิน 7 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนที่ใช้ไปในการย่อยสลายสารอินทรีย์จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับจำนวนสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำนั้น เมื่อตัวอย่างน้ำมีสารอินทรีย์จำนวนมากจึงต้องเจือจางตัวอย่างเพื่อให้มีออกซิเจนเพียงพอที่แบคทีเรียจะใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งวิธีแบบเจือจางจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือไม่ต้องเติมหัวเชื้อและต้องเติมหัวเชื้อในการทดลองเลือกแบบไม่ต้องเติมหัวเชื้อ

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดบีโอดี (BOD Bottle) ขนาด 250 – 300 มิลลิลิตร พร้อมจุกปิดสนิท
2. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียสและต้องมี
3. อุปกรณ์และเครื่องแก้วต่างๆเช่น กระจกตวง บิวเรต ขวดรูปชมพู่ เป็นต้น
4. เครื่องจ่ายลม แบบเดียวกันกับที่ใช้กับตู้เลี้ยงปลาสวยงามและหัวจ่ายลม

สารเคมี

1. น้ำกลั่นต้องมีคุณภาพสูง ควรมีทองแดงน้อยกว่า 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร ปราศจากการคลอรีน คลอรามิน สารอินทรีย์ กรด – เบส ต้องเป็นกลาง
2. สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเป็นกรด-เบส 7.2 โดยละลายโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 8.5 กรัม ไดโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) 21.75 กรัม แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) 17.2 กรัม และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต เฮปตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 33.4 กรัม และในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร แล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร
3. สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ทำการละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 22.5 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

4. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ละลายแคลเซียมคลอไรด์ปราศจากน้ำ (Anhydrous CaCl_2) จำนวน 27.5 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร
5. สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 0.25 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร
6. สารละลายแมงกานีสซัลเฟต ละลายแมงกานีสซัลเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 364 กรัม หรือแมงกานีส ซัลเฟตเตตระไฮเดรต ($\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 480 กรัมหรือแมงกานีสซัลเฟตไดไฮเดรต ($\text{MnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 400 กรัมในน้ำกลั่น กรองแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร
7. สารละลายแอลคาไล-ไฮโดรอกไซด์ ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 500 กรัมและโซเดียมไอโอดาอิด (NaI) 135 กรัมในน้ำกลั่นเจือจางให้ได้ 950 มิลลิลิตร และทำให้เย็น จากนั้นค่อย ๆ เติมสารละลายโซเดียมเอไซด์ (NaN_3) ที่ละลายในน้ำ 40 มิลลิลิตร อย่างช้าๆ ทำให้มีฤทธิ์เป็นกรดและเจือจางจนได้ปริมาตร 1 ลิตร
8. สารละลายโซเดียมโซลฟิเตอไซด์ 0.1 นอร์มัล ละลายโซเดียมโซลฟิเตเพนตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 24.82 กรัมในน้ำต้มที่เย็นแล้ว เติมคลอโรฟอร์ม 5 มิลลิลิตรหรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม เพื่อเก็บไว้ใช้งาน ๑ ปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร เมื่อใช้งานให้เจือจางเป็น 0.025 นอร์มัล
9. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น
10. น้ำแข็ง

วิธีวิเคราะห์แบบเจือจางที่ไม่ต้องเติมหัวเชื้อ Seed

1. การเตรียมน้ำเจือจาง โดยน้ำกลั่นมาแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส และพ่นอากาศก่อนทำการเจือจางอย่างน้อย 1 ชั่วโมง แล้วเติมสารเคมีข้อ 2 - 5 อย่างละ 1 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1 ลิตร
2. การเลือกปริมาณตัวอย่างที่จะใช้ ถ้าไม่ทราบค่าบีโอดีโดยประมาณของตัวอย่างน้ำ ต้องหาซีโอดีก่อน พร้อมกับพิจารณาลักษณะของตัวอย่างน้ำและแหล่งเก็บตัวอย่างน้ำร่วมด้วยเพื่อกะประมาณค่าซีโอดี เช่น น้ำตัวอย่างที่มีค่าของแข็งละลายมากควรจะมีค่าบีโอดีระหว่าง 100–300 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการเลือกปริมาณตัวอย่างนิยมเลือกให้มีปริมาณออกซิเจนเหลืออยู่อย่างน้อย 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และควรจะมีการใช้ออกซิเจนอย่างน้อย 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทราบค่าบีโอดีโดยประมาณควรที่จะเลือกปริมาณตัวอย่างที่คาดว่าจะให้ค่าบีโอดีอยู่ในช่วงที่กำหนดแล้วจึงเลือก

ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ให้สูงและต่ำกว่าที่อยู่ติดกันตามตารางที่ ค.3 เช่น ปริมาณค่า บีโอดีไว้ประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเลือกใช้ปริมาณตัวอย่าง 10 มิลลิกรัม เล็กสูงขึ้นไปเป็น 5 มิลลิกรัม และต่ำลงเป็น 20 มิลลิกรัม

ตารางที่ ค.3 การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วงบีโอดี

ปริมาณตัวอย่าง (มิลลิกรัม)	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
1.0	600 - 2,100	300
2.0	300 - 1,050	150
5.0	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 มิลลิกรัม ควรเจือจางตัวอย่างก่อนไปใส่ขวด บีโอดี

3. ปิเปตตัวอย่างตามจำนวนที่เลือกไว้ลงในขวดบีโอดี ขนาด 300 มิลลิกรัม อย่างละ 2 ขวด
4. ทำการเติมน้ำสำหรับใช้เจือจางจนเต็มขวดบีโอดี แต่ต้องระมัดระวังพยายามอย่าให้เกิดฟองอากาศ โดยปิดฝาให้แน่น
5. นำขวดบีโอดีขวดหนึ่งของแต่ละปริมาณที่เลือกมาหาค่าออกซิเจนละลายที่มีเริ่มต้น สมมุติเป็น DO₀ ส่วนอีกขวดนำไปบ่มที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน

6. เมื่อครบ 5 วัน นำขวดบีโอดีที่บ่มไว้มาหาค่าออกซิเจนละลายที่เหลืออยู่เรียกว่า DO_5

การวิเคราะห์ค่าดีไอ

1. ใต้น้ำตัวอย่างลงในขวดบีโอดีให้เต็มขวดพร้อมปิดจุก
2. เติมน้ำสารละลาย $MnSO_4$ 1.0 มิลลิลิตร และสารละลายแอลคาไล - ไอโอดี - เอไซด์ 1.0 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปตวัดปริมาตรและจุ่มลงใต้ผิวน้ำตัวอย่างปิดจุกอย่างระมัดระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ เขย่าโดยคว่ำขึ้น - ลง แร้ง ๆ หลาย ๆ ครั้ง ให้ผสมเข้ากันปล่อยให้เกิดการตกตะกอนและเขย่าใหม่ซ้ำอีกครั้ง
3. เมื่อตกตะกอนได้ส่วนในสมากกว่า 100 มิลลิลิตร เปิดจุกและค่อย ๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2.0 มิลลิลิตร ให้ไหลรินตามต่อขวดบีโอดี
4. ปิดจุกและทำการเขย่าคว่ำ ขึ้น - ลง จนเห็นไอโอดีกระจายทั่ว (I_2 มีสีเหลืองแกมน้ำตาล) และตะกอนละลายหมด
5. ปิเปตใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร จำนวน 203 มิลลิลิตร นำไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.025 นอร์มัล เมื่อสารละลายได้สีเหลืองฟางให้เติมน้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ 1 - 2 มิลลิลิตร และไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินจางหายไป

การคำนวณ

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

* **ข้อสังเกต** - การนำสารละลายจากข้อที่ 4 มาไทเทรตจำนวน 203 มิลลิลิตร แต่ในการคำนวณคิดปริมาณเพียง 200 เนื่องจากคิดเทียบจากเมื่อใช้น้ำ 300 มิลลิลิตร เติมน้ำเคมีจากข้อ 1 ลงไป 4 มิลลิลิตร น้ำตัวอย่างเหลือในขวดเพียง 296 มิลลิลิตร

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

การคำนวณค่าบีโอดี

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

เมื่อ DO_0 = ค่าออกซิเจนละลายที่ไทเทรตได้ในวันแรก

DO_5 = ค่าออกซิเจนละลายที่ไทเทรตได้ในวันที่ 5

$$\text{อัตราเจือจาง} = \frac{\text{ปริมาตรน้ำเต็มขวดบีโอดี (300 มิลลิลิตร)}}{\text{ปริมาณตัวอย่างที่ใช้}}$$

4. การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN)

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด หมายถึงผลรวมของแอมโมเนียและสารอินทรีย์ไนโตรเจน การหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไนโตรเจนให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียก่อนแล้วจึงวัดปริมาณของแอมโมเนียทั้งหมด โดยไนโตรเจนที่ได้คือปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด แต่ถ้านำไปวิเคราะห์หาแอมโมเนียก่อนแล้วนำมาวิเคราะห์ต่อด้วยวิธีนี้ ไนโตรเจนที่ได้คือสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ชุดย่อยสลาย (Digestion apparatus) ประกอบด้วย Kjeldahl flask ขนาด 750-800 มิลลิลิตร และเตาให้ความร้อน (Heating device) ที่ให้ความร้อน ขนาด 300-400 องศาเซลเซียส
2. Distillation apparatus ประกอบด้วย Kjeldahl flask มีกระเปาะข้างบน และ Condensor ในแนวตั้ง

สารเคมี

1. น้ำยาสำหรับย่อยสลาย (Digestion reagent):
 - ละลายโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) 134 กรัม ในน้ำกลั่น 650 มิลลิลิตร แล้วค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 200 มิลลิลิตร ลงไปคนให้เข้ากันและเติมสารละลายปรอทซัลเฟต 25 มิลลิลิตร (เตรียมจากปรอทออกไซด์ : HgO (red) 2 กรัม ในกรดซัลฟิวริก 6 นอร์มัล 100 มิลลิลิตร) เจือจางด้วยน้ำกลั่นให้สารละลายมีปริมาณ 1 ลิตร เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ - โซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium hydroxide - sodium thiosulfate reagent)
 - สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 500 กรัม และโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) 25 กรัม ในน้ำและเจือจางเป็น 1 ลิตร
2. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator solution)
 - ละลายเมธิลเรด 200 มิลลิกรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์เข้มข้นร้อยละ 95 หรือไอโซโพรพิล

แอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร

- ละลายเมธิลดีนบลู 100 มิลลิกรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ 95% หรือไอโซโพรพิล

แอลกอฮอล์ 50 มิลลิลิตร

- นำทั้งสองผสมกัน สารละลายนี้ไม่ควรเก็บไว้เกิน 1 เดือน

3. สารละลายกรดบอริกที่มีอินดิเคเตอร์ผสม (Indicating boric acid solution):

- ละลายกรดบอริก (H_3BO_3) 20 กรัม ในน้ำกลั่นเติมสารละลายอินดิเคเตอร์ผสม 10 มิลลิลิตร เจือจางให้เป็น 1 ลิตร ไม่ควรเก็บไว้เกิน 1 เดือน

- สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มัล ก่อนใช้ทุกครั้งควรไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนกับสารละลายมาตรฐาน โซเดียมคาร์บอเนต

4. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์วิธีการทดลอง

วิธีการทดลอง

1. การเลือกตัวอย่างน้ำ (ขึ้นอยู่กับปริมาณอินทรีย์ในโตรเจนที่คาดว่าจะมีเจือปนในน้ำเสีย)

ตารางที่ ค.4 การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่าง

สารอินทรีย์ในโตรเจนในน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ขนาดตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
0 – 1	500
1 – 10	250
10 – 20	100
20 – 50	50
50 – 100	25

กรณีที่มีสารอินทรีย์ในโตรเจนมากๆ ให้ใช้วิธีเจือจางให้มีปริมาตรเป็น 300 แล้วปรับค่าความเป็นกรด - เบสให้เป็นกลาง จากนั้นนำไปใส่ขวดเคลดดาห์ล

2. การย่อยสลาย (Digestion)

- นำตัวอย่างน้ำซึ่งมีปริมาตรดังข้อ (1) มาเติมน้ำยาสำหรับย่อยสลาย 50 มิลลิลิตร นำไปต้มในตู้ควันเพื่อออกแก๊สพิษพวก SO_2 หรือ SO_3 ออก ต้มจนสารละลายใส หรือมีสีเหลืองฟาง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจึงเติมน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร

- ใส่ฟีนอล์ฟทาลิน 0.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วเติมน้ำยาโซเดียมไฮดรอกไซด์
- โซเดียมไทโอซัลเฟต 50 มิลลิลิตร จะเกิดเป็นชั้นของค่า่าง (Alkaline layer) อยู่ที่ก้นขวดนำไปต่อกับเครื่องกลั่นแล้วผสมให้เข้ากันดี สีของของผสมจะเป็นสีชมพูอ่อนถ้ายังไม่เกิดให้เติมน้ำยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปอีก

3. กลั่น (Distillation)

- ตัวอย่างน้ำที่ย่อยสลายแล้วมาต่อเข้าเครื่องกลั่น โดยให้ส่วนที่กลั่นออกมาได้ (Distillate) จุ่มอยู่ที่สารละลายกรดบอริก 50 มิลลิลิตร ใช้เป็นสารจับ แอมโมเนียมไนโตรเจนสารที่กลั่นออกมาได้มีปริมาตรรวมประมาณ 200 มิลลิลิตร
- ในการวิเคราะห์ทุกครั้งให้ทำเบลนจ์เพื่อหาปริมาณไนโตรเจนในน้ำกลั่น
- โดยทำทุกขั้นตอนเช่นเดียวกับการหาในตัวอย่าง
- นำสารที่ได้ไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มัลเมื่อถึงจุดยุติสีจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วงอ่อน

การคำนวณ

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

A = ปริมาตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้กับตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้กับเบลนจ์ (มิลลิลิตร)

5. การวิเคราะห์ไขมัน

การสกัดไขมันด้วยกรวยแยก (Partition - Gravimetric method) ไขมันหรือน้ำมันที่อยู่ในรูปสารละลายหรือไม่ละลายในตัวอย่างน้ำจะถูกทำให้เป็นกรดด้วยการปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้ต่ำกว่า 2 และสกัดไขมันออกจากตัวอย่างน้ำโดยการนำไปเขย่ากับตัวทำละลาย เช่น ฟริออน หรือ เฮกเซนในกรวยแยกจากนั้นระเหยตัวทำละลายจนแห้ง ทิ้งให้เย็นในโลกรทำแห้งให้วิธีนี้จะเหมาะสมสำหรับน้ำที่ประกอบด้วยไขมันและน้ำมันที่มีจุดเดือดสูง

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กรวยแยกที่จุกปิดด้วย ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. ขวดก้นกลมขนาด 125 มิลลิลิตร
3. เครื่องอังน้ำ

4. กระจกกรอง
5. เครื่องชั่งละเอียด

สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc.H₂SO₄)
2. เฮกเซน (n - Hexane) หรือพีริออน
3. โซเดียมซัลเฟตปราศจากน้ำ (Sodium sulfate anhydrous)

วิธีการวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างน้ำที่ทราบปริมาตรแน่นอน (500 มิลลิลิตร) ใส่ในบีกเกอร์ที่ล้างด้วยเฮกเซนแล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น จนมีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า
2. เทตัวอย่างน้ำลงในกรวยแยก ล้างภาชนะที่ใส่ตัวอย่างน้ำด้วยเฮกเซน 30 มิลลิลิตร แล้วเทใส่กรวยแยกปิดฝาและเขย่าอย่างแรง 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้สารผสมแยกชั้นโดยชั้นเฮกเซนจะอยู่บน และตัวอย่างน้ำจะอยู่ด้านล่าง
3. ทำการถ่ายชั้นตัวอย่างน้ำไว้ในบีกเกอร์ที่สะอาดเพื่อนำมาสกัดซ้ำอีกครั้งหนึ่งถ่ายชั้นเฮกเซนซึ่งมีไขมันและน้ำมันละลายอยู่หลังการสกัดเทไว้ในขวดรูปชมพู่หรือขวดก้นกลมซึ่งทำให้แห้งและมีน้ำหนักคงที่ซึ่งได้ชั่งไว้แล้วสมมติมีน้ำหนัก = A กรัม
4. นำตัวอย่างน้ำที่เก็บไว้จากข้อ 3 กลับมาสกัดอีกครั้งด้วยเฮกเซน 15 - 20 มิลลิลิตร สกัดด้วยวิธีเดียวกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้นทำหลาย ๆ ครั้งจนไขมันและน้ำมันถูกสกัดออกจากน้ำตัวอย่างน้ำทั้งหมด
5. นำขวดชมพู่ที่มีเฮกเซนไขมันและน้ำมันที่ได้จากการสกัด มาระเหยเฮกเซนออกบนเครื่องอังน้ำจนแห้งปราศจากความชื้น แล้วนำมาทำให้เย็นในโลแห้งประมาณ 30 นาที แล้วชั่ง สมมติมีน้ำหนักที่ชั่งได้เป็น B กรัม

การคำนวณ

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

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

B = น้ำหนักของขวดรูปชมพู่และไขมันกับน้ำมัน(กรัม)

หมายเหตุ ในกรณีที่ชั้นของตัวทำละลายมีน้ำปนอยู่ให้ใส่โซเดียมซัลเฟตจนได้สารละลายใสหรือโซเดียมซัลเฟตจับตัวกันดี กลิ้งไปกลิ้งมาได้ไม่เหลว และควรรีใส่โซเดียมซัลเฟตไว้บนกระดาษกรองด้วย แล้วจึงเทตัวทำละลายที่ใสผ่านกระดาษกรองเพื่อให้มีลชั้น และโซเดียมซัลเฟตจับกับน้ำ

6. การวิเคราะห์หาของแข็งละลายน้ำ (TDS)

หมายถึง ส่วนของน้ำตัวอย่างที่กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วแล้วนำไปใส่ถ้วยระเหยที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน และนำไประเหยด้วยไอน้ำจนแห้งแล้วจึงนำไปอบแห้งที่ 103 -105 องศาเซลเซียส น้ำหนักส่วนที่เพิ่มคือน้ำหนักของของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. โถดูดความชื้น (Desiccator)
2. ตู้อบ (Oven) ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103 - 105 องศาเซลเซียส
3. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) สามารถชั่งได้ถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
4. กระดาษกรอง GF/C (Glass fiber filter) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร
5. เครื่องดูดสุญญากาศ (Suction pump) พร้อมขวดดูดสุญญากาศ
6. ถ้วยระเหย (Evaporating dishes)

วิธีวิเคราะห์

1. นำน้ำตัวอย่างมากรองเอาสารแขวนลอยออกทั้งหมดก่อน โดยกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วและเครื่องกรองสุญญากาศ
2. นำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการกรองใส่ถ้วยระเหยนำไปอบแห้งที่ 103 – 105 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้นชั่งหาน้ำหนัก

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B-A)}{C} \times 10^6$$

A = น้ำหนักถ้วยระเหยอย่างเดียว(กรัม)

B = น้ำหนักถ้วยระเหยและของแข็ง (กรัม)

C = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณ

1. ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า

$$ICE(\%) = \frac{(COD)_t - (COD)_{t+\Delta t}}{8I\Delta t} FL100$$

COD_t = ปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เวลาชั่วโมง (มิลลิกรัม ออกซิเจนต่อลิตร)

$COD_{t+\Delta t}$ = ปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เวลา $t+\Delta t$ ชั่วโมง (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร)

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (คูณออมป์ต่อโมลของออกซิเจน)

L = ปริมาตรของอิเล็กโทรไลต์ (ลิตร)

I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

Δt = เวลาที่เปลี่ยนไป (ชั่วโมง)

2. การคำนวณต้นทุนในการดำเนินงาน

ให้ ค่ากระแสไฟฟ้า (Electricity cost) = 2.50 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง

ปริมาณน้ำตัวอย่าง = 1 ลิตร

อัตราแลกเปลี่ยนเงินตรา 36.45 บาทต่อ 1 เหรียญสหรัฐ

มูลค่าไปโอดีเซล = 15 บาทต่อลิตร

มูลค่าเนื่องจากการนำกลับไบโอดีเซล

- ปริมาณไบโอดีเซลที่นำกลับมาได้ = 7 มิลลิลิตร

= 70 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตร

มูลค่าของไบโอดีเซลที่นำกลับมาได้ = 70 x 15 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

= 1,050 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

พิจารณาค่าใช้จ่ายเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเป็นหลักของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบการออกซิเดชันแบบทางตรง (Direct oxidation)

กระแสไฟฟ้า (i)	= 3.5 แอมแปร์
ปริมาณน้ำตัวอย่าง (L)	= 1 ลิตร
ศักย์ไฟฟ้า (V)	= 9.8 โวลต์
ชั่วโมง (t)	= 7 ชั่วโมง
- กำลังไฟฟ้า (Electricity consumption)	$= (i \times V \times t)$ $= (3.5 \times 9.8 \times 7) / 1000$ กิโลวัตต์-ชั่วโมง $= 0.2401$ กิโลวัตต์-ชั่วโมง $= (0.2401 \times 1000 / 1.8) / 1$ กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร
- ค่ากระแสไฟฟ้ารวม (Electricity cost)	= กำลังไฟฟ้า \times ค่ากระแสไฟฟ้า $= 133.38 \times 2.5$ $= 333.45$ บาทต่อลูกบาศก์เมตร
ต้นทุนในการดำเนินงาน	= ค่ากระแสไฟฟ้า $= 333.45$ บาทต่อลูกบาศก์เมตร $= 9.53$ เหรียญสหรัฐต่อลูกบาศก์เมตรของสารตัวอย่าง

พิจารณาค่าใช้จ่ายเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเป็นหลักของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบการออกซิเดชันแบบทางอ้อม (Indirect oxidation)

กระแสไฟฟ้า (i)	= 3.5 แอมแปร์
ปริมาณน้ำตัวอย่าง (L)	= 1 ลิตร
ศักย์ไฟฟ้า (V)	= 9.1 โวลต์
ชั่วโมง (t)	= 7 ชั่วโมง
โซเดียมคลอไรด์ 2 กรัม	$= (10^6 \times 10^{-3} \times 2) / 1,800$ $= 1.11$ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
โซเดียมคลอไรด์ 1 กิโลกรัม	= 12 บาท $= 12 \times 1.11$ บาทต่อลูกบาศก์เมตร $= 13.32$ บาทต่อลูกบาศก์เมตร

$$\begin{aligned}
 \text{- กำลังไฟฟ้า (Electricity consumption)} &= (i \times V \times t) \\
 &= (3.5 \times 9.1 \times 7) / 1000 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง} \\
 &= 0.223 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง} \\
 &= (0.223 \times 1000 / 1.8) / 1 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 &= 123.89 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{- ค่ากระแสไฟฟ้ารวม (Electricity cost)} &= \text{กำลังไฟฟ้า} \times \text{ค่ากระแสไฟฟ้า} \\
 &= 123.89 \times 2.5 \\
 &= 309.73 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ต้นทุนในการดำเนินงาน} &= \text{ค่ากระแสไฟฟ้า} + \text{ค่าสารเคมี} \\
 &= 309.73 + 13.32 \\
 &= 323.05 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 &= 8.86 \text{ เหรียญสหรัฐต่อลูกบาศก์เมตรของสารตัวอย่าง}
 \end{aligned}$$

พิจารณาค่าใช้จ่ายเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเป็นหลักของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่อง (Continuous process)

$$\begin{aligned}
 \text{กระแสไฟฟ้า (i)} &= 3.5 \text{ แอมแปร์} \\
 \text{ปริมาณน้ำตัวอย่าง (L)} &= 1 \text{ ลิตร} \\
 \text{ศักย์ไฟฟ้า (V)} &= 8.9 \text{ โวลต์} \\
 \text{ชั่วโมง (t)} &= 1 \text{ ชั่วโมง} \\
 \text{โซเดียมคลอไรด์} &= 0.24 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 \text{โซเดียมคลอไรด์ 1 กิโลกรัม} &= 12 \text{ บาท} \\
 &= 12 \times 0.24 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 &= 2.88 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{- กำลังไฟฟ้า (Electricity consumption)} &= (i \times V \times t) \\
 &= (3.5 \times 8.9 \times 1) / 1000 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง} \\
 &= 0.0311 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง} \\
 &= (0.0311 \times 1000 / 0.12) / 1 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 &= 259.17 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{- ค่ากระแสไฟฟ้ารวม (Electricity cost)} &= \text{กำลังไฟฟ้า} \times \text{ค่ากระแสไฟฟ้า} \\
 &= 259.17 \times 2.5 \\
 &= 647.93 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 \text{ต้นทุนในการดำเนินงาน} &= \text{ค่ากระแสไฟฟ้า} + \text{ค่าสารเคมี} \\
 &= 647.93 + 2.88 \\
 &= 650.76 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 &= 17.85 \text{ เหรียญสหรัฐต่อลูกบาศก์เมตรของสาร} \\
 &\quad \text{ตัวอย่าง}
 \end{aligned}$$

3. ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางที่ ง.1 ผลการวิเคราะห์ T-test ค่าซีไอดีของสารเติมแต่งสองชนิด

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
NaCl	13	63.7971	34.14396	9.46983
H ₂ O ₂	13	66.6775	25.79231	7.15350

One-Sample Test

	Test Value = 0					
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
NaCl	6.737	12	.000	63.7971	43.1641	84.4301
H ₂ O ₂	9.321	12	.000	66.6775	51.0913	82.2636

ตารางที่ ๓.2 ผลการวิเคราะห์ T-test ค่าบีโอดีของสารเติมแต่งสองชนิด

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
NaCl	13	53.8073	31.64499	8.77674
H ₂ O ₂	13	47.9426	30.99714	8.59706

One-Sample Test

	Test Value = 0					
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
NaCl	6.131	12	.000	53.8073	34.6844	72.9302
H ₂ O ₂	5.577	12	.000	47.9426	29.2112	66.6740

ตารางที่ ๓.3 ผลการวิเคราะห์ T-test ค่าไขมันของสารเติมแต่งสองชนิด

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
NaCl	13	85.1915	29.86689	8.28359
H ₂ O ₂	13	79.9021	32.18992	8.92788

One-Sample Test

	Test Value = 0					
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
NaCl	10.284	12	.000	85.1915	67.1431	103.2399
H ₂ O ₂	8.950	12	.000	79.9021	60.4499	99.3543

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภัทรลักษณ์ จารุวัตร เกิดวันที่ 18 มีนาคม 2528 ณ จังหวัดปราจีนบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จังหวัดกรุงเทพมหานคร ในปีการศึกษา 2549 และเข้ารับการศึกษาคือในระดับปริญญาโท หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550