



การกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้จากระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วยวิธีการทางเซลล์ไฟฟ้าเคมี

นายณภัทร มั่นนุช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วยวิธีการทางเซลล์ไฟฟ้าเคมี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาลัทธิ

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองโครงงานวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วยวิธีการทางเซลล์ไฟฟ้าเคมี

โดย นายณภัทร มั่นนุช

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ชวงค์ ชัยสุข)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ปกรณ์ กิตติภูมิวงศ์)

กรรมการ

(จันทพร ผลากรกุล)

ชื่อ : นายณภัทร มั่นนุช
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิต
ปิโตรเลียมด้วยวิธีการทางเซลล์ไฟฟ้าเคมี
สาขาวิชา : วิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ปกรณ์ กิตติภูมิวงศ์
ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการเซลล์ไฟฟ้าเคมีในการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม (Produced water) โดยศึกษาปัจจัยสำคัญในระบบแบบกะและแบบต่อเนื่อง พร้อมทั้งพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายผล ผลการศึกษาระบบแบบกะชี้ชัดว่าชั่วไฟฟ้าอวลูมิเนียมให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเหล็กอย่างมีนัยสำคัญ โดยระบบสามารถกำจัดน้ำมันส่วนใหญ่ออกไปอย่างรวดเร็วในช่วง 15 นาทีแรก หลังจากนั้นประสิทธิภาพจะเริ่มคงที่ นอกจากนี้ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น และการจัดเรียงขั้วแบบขนานช่วยประหยัดพลังงานได้มากกว่า ซึ่งเมื่อนำสภาวะที่ดีที่สุดไปทดสอบกับน้ำเสียจริงจากแหล่งขุดเจาะ พบว่าสามารถกำจัดน้ำมันได้สูงถึงกว่า 96% ส่วนสำหรับระบบต่อเนื่อง พบว่าการกวนผสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ โดยสามารถกำจัดน้ำมันจากน้ำเสียจริงได้ประมาณ 93% นอกจากนี้ยังได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความน่าเชื่อถือสูง ($R^2 > 0.92$) เพื่อทำนายประสิทธิภาพได้สำเร็จ โดยสรุปกระบวนการเซลล์ไฟฟ้าเคมีเป็นเทคนิคที่มีศักยภาพสูงสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

(มีจำนวนทั้งสิ้น 98 หน้า)

คำสำคัญ : น้ำที่ได้จากการผลิตปิโตรเลียม, เซลล์ไฟฟ้าเคมี, การบำบัดน้ำ, การกำจัดน้ำมัน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr. Napattra Monnuch
Thesis Title : Removing oil from Petroleum Processed Water using
Electrochemical method
Major Field : Chemical Engineering
King Mongkut's University of Technology North
Bangkok
Thesis Advisor : Prakorn Kittipoomwong
Academic Year : 2024

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the efficiency of the electrochemical process for removing oil from produced water by investigating key factors in both batch and continuous systems, and by developing a mathematical model for predicting performance. The study of the batch system indicated that aluminum electrodes provided significantly higher efficiency than iron electrodes. The system removed the majority of the oil rapidly within the first 15 minutes, after which the efficiency began to stabilize. Additionally, efficiency increased with larger electrode surface area and higher current density. A parallel electrode arrangement was also found to be more energy-efficient. When applying these optimal conditions to produced water from a drilling site, the batch system achieved an oil removal efficiency of over 96%. As for the continuous system, agitation was found to be a key factor in enhancing performance, achieving an oil removal rate of approximately 93% for produced water from a drilling site. Furthermore, a highly reliable mathematical model ($R^2 > 0.92$) was successfully developed to predict efficiency. In conclusion, the electrochemical process was demonstrated to be a technique with high potential for industrial application.

(Total 98 Pages)

Keywords: Produced Water, Electrochemical, Water treatment, Oil removal

Advisor



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายท่าน ซึ่งข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปกรณ์ กิตติภูมิวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำอย่างใกล้ชิด ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย รวมถึงการเสียสละเวลาในการตรวจสอบและแนะนำแนวทางที่ชัดเจน ซึ่งมีส่วนอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิชายุ ดันตชัยปกรณ์ เป็นอย่างสูง ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ซึ่งช่วยส่งเสริมให้งานวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ ประไพย์นา เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการตลอดจนคณาจารย์และบุคลากรทุกท่านของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ประสบการณ์ และเป็นแรงบันดาลใจในการศึกษาและการวิจัย อันเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ดร.พีระวัฒน์ คงเกลี้ยง นางสาวณัฏฐา เทียนบุตร และมิตรสหายทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ แบ่งปันประสบการณ์ ตลอดจนเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ทั้งในด้านวิชาการและด้านกำลังใจ ซึ่งมีความหมายอย่างยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณครอบครัว ผู้เป็นกำลังใจสำคัญและอยู่เบื้องหลังความสำเร็จเสมอมา สำหรับความรัก ความเข้าใจ ความห่วงใย และการสนับสนุนในทุกๆ ด้าน ซึ่งเป็นพลังผลักดันอันยิ่งใหญ่ให้ข้าพเจ้าสามารถก้าวผ่านอุปสรรคต่างๆ และมุ่งมั่นจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ณภัทร มั่นนุช

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กระบวนการชุดเจาะปิโตรเลียม	4
2.2 น้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม	5
2.3 อิมัลชัน	8
2.4 เทคโนโลยีการกำจัดน้ำมัน	9
2.5 เซลล์ไฟฟ้าเคมี	11
2.6 ทบทวนวรรณกรรม	12
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	17
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	17
3.3 การเตรียมน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมสังเคราะห์	18
3.4 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันด้วยวิธี Partition Gravimetric Method	19
3.5 การเตรียมน้ำมันเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกะ	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การเตรียมเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง	21
3.7 วิธีการศึกษาการบำบัดน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วย วิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมี	22
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 การกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วย วิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกะ	23
4.2 การสร้างสมการความสัมพันธ์เพื่อทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมัน	44
4.3 การกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วย วิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง	48
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 ผลการศึกษาในระบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกะ	53
5.2 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายประสิทธิภาพ ในการกำจัดน้ำมัน	54
5.3 ผลการศึกษาในระบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง	54
5.4 ข้อเสนอแนะ	54
บรรณานุกรม.....	56
ภาคผนวก.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	84

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ข้อมูลปริมาณน้ำที่ได้จากกระบวนการปิโตรเลียม	6
2-2 องค์ประกอบของน้ำที่ได้จากกระบวนการปิโตรเลียม	7
2-3 ข้อดีข้อเสียของเทคโนโลยีการกักตุนน้ำจืดจากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม	11
4-1 ประสิทธิภาพการกักตุนน้ำจืดจากการทดลองกับแบบจำลอง	27
4-2 คุณสมบัติของ Produced water จากแหล่งขุดเจาะก่อนและหลังบำบัด	41
4-3 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณเพื่อทำนายประสิทธิภาพในการกักตุนน้ำจืด	44
4-4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกักตุนน้ำจืดที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วยสมการที่ 4.4	47
ก-1 ตัวแปรในการศึกษาระยะเวลาในการบำบัดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกักตุนน้ำจืด	63
ก-2 ตัวแปรในการศึกษาความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกักตุนน้ำจืด	63
ก-3 ตัวแปรในการศึกษาชนิดของวัสดุเล็กโพรทที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกักตุนน้ำจืด	64
ก-4 ตัวแปรในการศึกษาพื้นที่ผิวเล็กโพรทที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกักตุนน้ำจืด	64
ก-5 ตัวแปรในการศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกักตุนน้ำจืด	65
ก-6 ตัวแปรในการศึกษาการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกักตุนน้ำจืด	65
ก-7 ตัวแปรในการทดสอบกับ Produced Water จากแหล่งขุดเจาะ	66
ก-8 ตัวแปรในการทดสอบ Produced Water สังเคราะห์ด้วยเซลล์ไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง	66
ก-9 ตัวแปรในการทดสอบกับ Produced Water จากแหล่งขุดเจาะแบบต่อเนื่อง	67
ข-1 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบของความเข้มข้นเริ่มต้น 2%wt	69
ข-2 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบของความเข้มข้นเริ่มต้น 4%wt	70
ข-3 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบของวัสดุขั้วไฟฟ้าแผ่นเหล็ก	71
ข-4 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบที่พื้นที่ 12 ตารางเซนติเมตร	72
ข-5 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบที่พื้นที่ 48 ตารางเซนติเมตร	73

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-6	ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 62.5 mA/cm^2	74
ข-7	ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 104.17 mA/cm^2	75
ข-8	ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบการทดสอบ Produced Water จากแหล่งขุดเจาะด้วยเซลล์ไฟฟ้าแบบกะ	76
ข-9	ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบการทดสอบ Produced Water สังเคราะห์ด้วยเซลล์ไฟฟ้าแบบต่อเนื่องแบบไม่กวน	77
ข-10	ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบการทดสอบ Produced Water สังเคราะห์ด้วยเซลล์ไฟฟ้าแบบต่อเนื่องแบบกวน	78
ข-12	ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบการทดสอบ Produced Water จากแหล่งขุดเจาะด้วยเซลล์ไฟฟ้าแบบต่อเนื่องแบบกวน	79
ข-13	ตารางผลการคำนวณประสิทธิภาพ ณ สภาวะคงที่ ด้วยแบบจำลองสมการ First-order Model	80
ข-15	ชุดผลการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณสมการ 4-4	81

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2-1	กระบวนการผลิตปิโตรเลียม	5
2-2	น้ำที่ได้จากกระบวนการปิโตรเลียม	5
2-3	กลไกในการเกิดอิมัลชัน	8
2-4	การแยกน้ำมันโดยใช้แรงโน้มถ่วง	9
2-5	กลไกการแยกน้ำมันโดยใช้สารเคมี	10
2-6	ส่วนประกอบของเซลล์ไฟฟ้าเคมี	12
2-7	ภาพแสดงสีของน้ำก่อนและหลังบำบัดด้วยวิธีแบบกะ	14
3-1	ภาพน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง	18
3-2	ชุดการทดลองเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกะ	20
3-3	การจัดเรียงอิเล็กโทรด	20
3-4	แสดงแผนผังชุดการทดลองเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง	21
3-5	ภาพถ่ายอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง	21
3-6	แผนภาพแสดงปัจจัยที่ศึกษาในการทดลองการกำจัดน้ำมันด้วยวิธีแบบกะและแบบต่อเนื่อง	22
4-1	รูปถ่ายแสดงการเปลี่ยนแปลงสีของ Produced water สังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ในช่วง 0 ถึง 30 นาที	24
4-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและระยะเวลา ที่กระแสไฟฟ้า 4 A	25
4-3	กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่เปลี่ยนไปตามเวลา โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันที่ 2%wt และ 4%wt	28
4-4	กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่เปลี่ยนไปตามเวลา เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าทำจากอลูมิเนียมและเหล็ก	29

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4-5	กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่เปลี่ยนไปตามเวลา ที่เปลี่ยนไปตามขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้าต่างกัน	31
4-6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ ณ สภาวะคงที่ กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสำหรับพื้นที่ขั้วไฟฟ้าต่างกัน	32
4-7	กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 3A, 4A และ 5A	33
4-8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสภาวะคงตัว กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	34
4-9	กราฟแสดงอิทธิพลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพ ณ สภาวะคงที่ เปรียบเทียบระหว่างสภาวะกระแสคงที่ กับ สภาวะพื้นที่คงที่	36
4-10	รูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า	37
4-11	กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่เปลี่ยนไปตามเวลาของ การจัดเรียงแบบอนุกรมกับแบบขนาน	38
4-12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน	39
4-13	ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนแปลงสีของ Produced water จากแหล่งขุดเจาะ ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี	40
4-14	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่า pH ตามเวลา	41
4-15	กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันกับเวลาในน้ำ Produced Water จากแหล่งขุดเจาะ	42
4-16	กราฟแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตามเวลา	43
4-17	กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน ระหว่างผลการทดลองกับ แบบจำลองตามสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ	46

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4-18	กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่ได้รับการทดลองหัวข้อ 4.1.6 เปรียบเทียบกับแบบจำลองตามสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ	47
4-19	อุปกรณ์การทดลองเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง	48
4-20	กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่เปลี่ยนไปตามเวลาด้วย เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง	49
4-21	กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่เปลี่ยนไปตามเวลา ด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี แบบต่อเนื่อง เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีและไม่มีกรวนผสมก่อนเข้า ขั้วไฟฟ้าเคมี	50
4-22	กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันจาก Produced Water จากแหล่งขุดเจาะ ที่เปลี่ยนไปตามเวลา ด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง	51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและก๊าซธรรมชาติ มีการขยายกำลังการผลิตอย่างต่อเนื่อง อันเนื่องมาจากความต้องการพลังงานที่สูงขึ้น ไม่ว่าจะในภาคครัวเรือน หรือภาคอุตสาหกรรม โดยอุตสาหกรรมดังกล่าว จะมีวิธีผลิตด้วยการใช้แท่นขุดเจาะเพื่อดุดน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติขึ้นมา จากใต้พื้นผิวโลก สิ่งที่ได้จากการขุดเจาะประกอบไปด้วยน้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และน้ำที่ได้จาก กระบวนการผลิตปิโตรเลียม (Produced Water) ซึ่งน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติที่ได้จะถูกนำไปใช้ใน กระบวนการผลิตต่างๆ ต่อไป ส่วนน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม ซึ่งมีองค์ประกอบของ น้ำมันตกค้าง ทราาย โคลน และสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายอยู่ โดยทั่วไปวิธีการกำจัดน้ำที่เกิดจาก กระบวนการผลิตปิโตรเลียมจะใช้กระบวนการอัดน้ำกลับ ซึ่งจะอัดน้ำกลับเข้าไปสู่ชั้นหินของหลุม น้ำมันเก่าที่มีประสิทธิภาพการผลิตลดลงหรือหลุมผลิตที่ไม่ได้ทำการผลิตแล้ว [1] อย่างไรก็ตาม การจัดการน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตด้วยวิธีดังกล่าว ยังมีข้อจำกัดในหลายๆ ด้าน เช่น ด้าน ค่าใช้จ่ายสำหรับการขนถ่ายน้ำจากพื้นที่ขุดเจาะไปยังพื้นที่ทำการอัดน้ำกลับ ด้านการเกิดสภาวะ อิ่มตัวของชั้นดิน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมเพื่อ ปล่อยเข้าสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และให้เป็นไปตามมาตรฐานการระบายน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม

น้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมมักจะรวมตัวกับน้ำมันอยู่ในรูปของอิมัลชันที่มีความ เสถียรสูง เนื่องจากในกระบวนการปิโตรเลียมมีการใส่สารลดแรงตึงเพื่อช่วยในการขุดเจาะน้ำมัน ซึ่ง สารลดแรงตึงผิวจะส่งผลทำให้น้ำกับน้ำมันสามารถรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็น ที่ต้องบำบัดน้ำเพื่อทำลายความเป็นอิมัลชัน ซึ่งการบำบัดน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมมี หลายแนวทางให้เลือกใช้ ไม่ว่าจะเป็นการใช้ถังแยกโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง โดยวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายแต่ ต้องใช้ระยะเวลานาน จึงไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติที่จะนำมาเป็นวิธีการทำลายอิมัลชันของน้ำมันดิบ ในน้ำ อีกวิธีคือการใช้สารเคมีเพื่อทำปฏิกิริยาในการทำลายอิมัลชันของน้ำมันดิบในน้ำ วิธีนี้ต้อง คำนึงถึงการบริหารจัดการสารเคมีตกค้างและมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมี วิธีการใช้ตัวกลางในการดูดซับ ซึ่งจะเป็นการใช้ตัวกลางที่ทำหน้าที่ในการดูดซับน้ำมันเพื่อให้แยกออก จากน้ำ ข้อดีของวิธีนี้คือจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีกว่าการใช้ถังแยกโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงและ

การใช้สารเคมี อย่างไรก็ตามจะเกิดการอึดตัวของตัวกลางทำให้ต้องมีการเปลี่ยนตัวกลางและซ่อมบำรุง [2] ส่วนอีกวิธีที่มีความน่าสนใจคือการบำบัดน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดที่อาศัยหลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยใช้กระแสไฟฟ้ากระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาถ่ายโอนอิเล็กตรอนเพื่อทำลายความเป็นอิมัลชันของน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม [3] ซึ่งวิธีนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายมากในกระบวนการบำบัดน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มในโรงงานปาล์มน้ำมัน เนื่องจากมีข้อดีคือ ไม่เกิดสารตกค้างในน้ำหลังจากบำบัด และมีประสิทธิภาพในการแยกสารปนเปื้อนสูงกว่าการใช้ถังแยกโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงหรือการใช้สารเคมีบำบัด ดังนั้นในงานวิจัยจึงสนใจนำวิธีการบำบัดน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีมาใช้ในการลดปริมาณน้ำมันในน้ำที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงการนำไปศึกษาและพัฒนาต่อยอดในการประยุกต์และออกแบบอุปกรณ์ในการบำบัดน้ำต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อประเมินประสิทธิภาพและศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีต่อการบำบัดน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วย วิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกะ
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและประเมินประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่องเพื่อใช้บำบัดน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วยวิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกะ
- 1.3.2 ออกแบบและศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ได้องค์ความรู้ในการบำบัดน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วยวิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมีซึ่งสามารถลดปัญหาการบำบัดน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม
- 1.4.2 ได้องค์ความรู้และหลักการทำงานของกระบวนการบำบัดน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วยวิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมีเพื่อใช้ออกแบบระบบทั้งแบบกะและแบบต่อเนื่อง
- 1.4.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการสังเคราะห์แบบจำลองเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของการบำบัดน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วยวิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมี

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งศึกษาการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม โดยได้แบ่งเนื้อหาออกเป็นบทต่างๆเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจดังนี้ บทที่ 2 จะเป็นการทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ครอบคลุมประเด็นสำคัญ เช่น การเกิดน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม ลักษณะของน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดน้ำมัน และรวมถึงหลักการทำงานของเซลล์ไฟฟ้าเคมี จากนั้นในบทที่ 3 จะอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ส่วนผลการดำเนินงานที่ได้จากการศึกษาและการอภิปรายผลจะถูกนำเสนอในบทที่ 4 และท้ายที่สุดแล้วในบทที่ 5 จะเป็นการสรุปผลการวิจัยทั้งหมดตามลำดับ

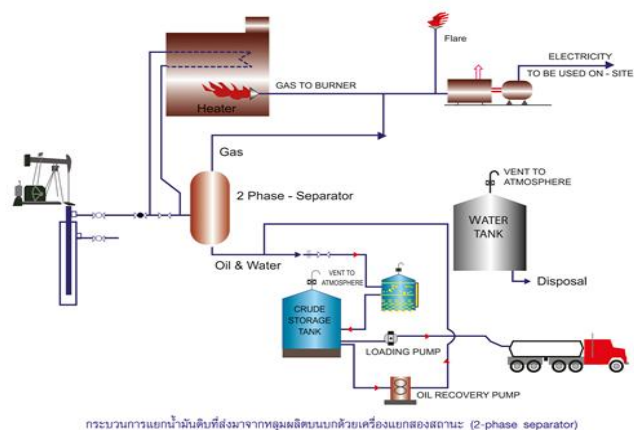
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะนำเสนอทฤษฎีพื้นฐานและภาพรวมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม โดยมุ่งเน้นไปที่การกักตุนน้ำมันออกจากน้ำ และการประยุกต์ใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการดังกล่าว เนื้อหาจะครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการขุดเจาะปิโตรเลียม ลักษณะและผลกระทบของน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม เทคโนโลยีการกักตุนน้ำมันต่างๆ หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ไปจนถึงการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นพื้นฐานความเข้าใจและชี้ให้เห็นถึงแนวทางของงานวิจัยนี้

2.1 กระบวนการขุดเจาะปิโตรเลียม

การขุดเจาะปิโตรเลียมในปัจจุบันดำเนินการทั้งบนบกและในทะเล โดยมีรายละเอียดแตกต่างกันไปตามสถานที่ แต่มีเป้าหมายเดียวกันคือการสกัดน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติเพื่อการพาณิชย์ กระบวนการผลิตเริ่มต้นด้วยการสำรวจแหล่งที่มีศักยภาพโดยใช้วิธีการทางธรณีฟิสิกส์และธรณีเคมี เพื่อประเมินโครงสร้างชั้นหินและปริมาณปิโตรเลียม จากนั้นจึงเตรียมพื้นที่และติดตั้งแท่นขุดเจาะ ซึ่งใช้หัวสว่านหมุนเจาะลงไปได้ดินโดยมีของไหลเจาะ (drilling fluid) เพื่อช่วยหล่อลื่นลดแรงเสียดทาน และป้องกันการพังทลายของผนังหลุม เมื่อเจาะถึงชั้นหินเป้าหมายจะมีการติดตั้งท่อกรุ (casing) และฉีดยูซีเมนต์ (cementing) เพื่อเสริมความแข็งแรงของหลุมเจาะ หลังจากขุดเจาะเสร็จจะนำน้ำมันเข้าสู่กระบวนการแยกน้ำมันดิบต่อไปดังแสดงในรูปที่ 2-1 ก่อนเริ่มการผลิตจะมีการทดสอบหลุม (well testing) เพื่อประเมินศักยภาพการผลิตของแหล่ง หากแรงดันในแหล่งปิโตรเลียมต่ำ อาจจำเป็นต้องใช้เทคนิคการผลิต Enhanced oil recovery (EOR) เพื่อเพิ่มอัตราการผลิต เมื่อแหล่งปิโตรเลียมหมดศักยภาพในการผลิตจะมีการปิดหลุม (well abandonment) โดยอัดยูซีเมนต์เพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารไฮโดรคาร์บอนสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นมาตรการสำคัญในการปกป้องสิ่งแวดล้อม กระบวนการทั้งหมดนี้ต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูงและมาตรการควบคุมที่เข้มงวดเพื่อให้การผลิตปิโตรเลียมเป็นไปอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด [1]



รูปที่ 2-1 แผนผังแสดงกระบวนการผลิตปิโตรเลียม [1]

2.2 น้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม

น้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม (Produced water) คือน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการขุดเจาะปิโตรเลียมมีลักษณะตามรูปที่ 2-2 เกิดจากหินที่มีน้ำมันและก๊าซธรรมชาติโดยส่วนใหญ่จะมีน้ำประกอบอยู่ด้วย จนเมื่อมีการขุดเจาะเพื่อดุดน้ำมันและก๊าซธรรมชาติออกจากหินเหล่านั้นจะทำให้ส่วนนี้จะออกมาพร้อมกับน้ำมันและแก๊สธรรมชาติด้วย ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการขุดเจาะปิโตรเลียม [2]



รูปที่ 2-2 น้ำที่ได้จากกระบวนการปิโตรเลียม [2]

กระบวนการผลิตปิโตรเลียมก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมาก โดยมีแหล่งมาจากน้ำเสียจากกระบวนการขุดเจาะ น้ำเสียจากการแปรรูปและกลั่น และน้ำเสียจากกระบวนการเพิ่มอัตราการผลิต (EOR) เป็นต้น ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละแหล่งจะมีปริมาณ Produced water ที่แตกต่างกันตามข้อมูลในตารางที่ 2-1 ซึ่งอัตราส่วนของน้ำเสียต่อน้ำมันที่ผลิตขึ้นอาจอยู่ที่ 3-10 บาร์เรลต่อน้ำมัน

1 บาร์เรล ในแหล่งน้ำมันทั่วไปและสูงขึ้นเป็น 50-90 บาร์เรลต่อน้ำมัน 1 บาร์เรลในแหล่งที่มีกำลังการผลิตสูง [8]

ตารางที่ 2-1 ข้อมูลปริมาณน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม [8]

แหล่งกำเนิดน้ำเสีย	ปริมาณน้ำเสีย (บาร์เรลต่อน้ำมัน 1 บาร์เรล)
แหล่งน้ำมันทั่วไป	3.02 - 10.00
แหล่งน้ำมันที่มีกำลังการผลิตสูง	50.00 - 90.00
การแปรรูปและกลั่น	3.14 - 9.43
กระบวนการ EOR	5.03 - 15.03

น้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมประกอบด้วยน้ำมันและสารไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันดิบ น้ำมันอิมัลชัน และอนุภาคน้ำมันที่หลงเหลืออยู่ ซึ่งปริมาณน้ำมันในน้ำเสียมีอยู่ประมาณ 2,000-56,500 mg/L ดังข้อมูลที่อยู่ในตารางที่ 2-2 นอกจากนั้นยังมีสารเคมีปนเปื้อนจากกระบวนการผลิตผสมอยู่ด้วย เช่น สารลดแรงตึงผิว สารอินทรีย์ระเหยง่าย และสารตัวเร่งปฏิกิริยารวมถึงตะกอนและอนุภาคของแข็งทรายและเศษวัสดุ นอกจากนี้ยังมีโลหะหนัก เช่น พรอท ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม พร้อมด้วยสารประกอบกำมะถัน และเกลือแร่ ได้แก่ คลอไรด์ โซเดียม และแมกนีเซียม เป็นต้น อีกทั้งค่า pH ที่อาจเปลี่ยนแปลงและปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำที่ต่ำเนื่องจากมีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ซึ่งทำให้มีค่า BOD และ COD สูงขึ้น

ตารางที่ 2-2 องค์ประกอบของน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม [8]

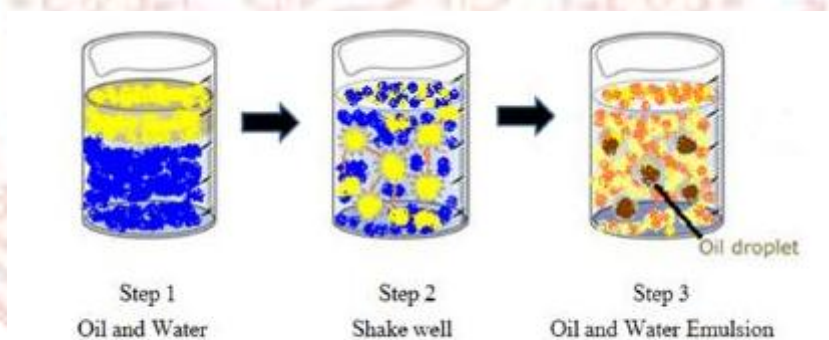
Parameter	Range
Density (kg/m ³)	1,014-1,140
Conductivity (μS)	4,200-58,600
Surface tension (N/cm)	43-78
Turbidity (NTU)	182
pH	4.3-10
TOC (mg/L)	0-1,500
TDS (mg/L)	267,588
TSS (mg/L)	1.2-10,623
Dissolved oxygen (mg/L)	8.2
Total oil (mg/L)	2,000-56,500
Volatiles (BTEX; mg/L)	0.39-35
Total Petroleum Hydrocarbons (mg/L)	>20
Chloride (mg/L)	80-200,000
Bicarbonate (mg/L)	77-3,990
Sulfate (mg/L)	<2-1,650

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหลายด้าน หากไม่มีการจัดการที่เหมาะสม อาจทำให้เกิดมลพิษทางน้ำจากสารไฮโดรคาร์บอน โลหะหนัก และสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ ซึ่งอาจเพิ่มค่าความเค็มและลดออกซิเจนในแหล่งน้ำ ส่งผลให้สัตว์น้ำได้รับอันตราย นอกจากนี้ การรั่วไหลของน้ำเสียลงสู่ดินอาจทำให้ดินเสื่อมคุณภาพจากการสะสมของสารพิษ ทำให้ไม่สามารถเพาะปลูกได้ รวมถึงการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน ซึ่งมีผลต่อระบบนิเวศ อีกทั้งน้ำเสียที่มีสารระเหย เช่น เบนซีนและโทลูอีน ที่สามารถก่อให้เกิดโรคมะเร็ง โรคทางเดินหายใจ และอาจปนเปื้อนเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารผ่านการสะสมของโลหะหนักในสิ่งมีชีวิต ดังนั้น การจัดการน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพ เช่น การใช้เทคโนโลยีบำบัด การนำ Produced water กลับมาใช้ใหม่ และการควบคุมปริมาณการปล่อยน้ำเสีย จึงเป็นมาตรการสำคัญในการลดผลกระทบของอุตสาหกรรมปิโตรเลียมต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ [9]

2.3 อิมัลชัน

อิมัลชัน (Emulsion) คือ สารประเภทคอลลอยด์ชนิดหนึ่ง ที่เกิดจากของเหลว 2 ชนิดขึ้นไป ที่ปกติผสมกันแล้วไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เช่น น้ำกับน้ำมัน ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้โดยไม่แยกชั้น โดยของเหลวส่วนหนึ่งแตกตัวเป็นหยดเล็กๆ เรียกว่า วัฏภาคกระจายตัว (dispersed phase) ซึ่งจะกระจายตัวแทรกอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง เรียกว่า วัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) โดยทั่วไปสามารถแบ่งชนิดของอิมัลชันได้เป็น 2 ประเภท คือ อิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (oil-in-water emulsion) โดยมีน้ำมันเป็นวัฏภาคกระจายตัวและน้ำเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง เช่น นํ้านม เป็นต้น และ อิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (water-in-oil emulsion) โดยมีน้ำเป็นวัฏภาคกระจายตัวและน้ำมันเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง เช่น เนย และน้ำสลัด เป็นต้น [10] ซึ่งน้ำจากกระบวนการปิโตรเลียมจะถือว่าเป็นอิมัลชันประเภทอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ เนื่องจากมีน้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในรูปวัฏภาคต่อเนื่อง

กลไกการเกิดอิมัลชันเกิดจากของเหลว 2 ชนิดซึ่งไม่เข้ากัน เมื่อผสมกันจะเกิดการแยกชั้นกัน เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างผิวของเหลวทั้งสองชนิด หากทำการเขย่าจะทำให้ของเหลวนั้นเกิดเป็นหยดเล็กๆ โดยเป็นผลมาจากการเพิ่มพลังงานอิสระให้แก่พื้นผิว ส่งผลให้ของเหลวแยกออกจากกันได้ชั่วคราว ดังรูปที่ 2.3 แต่จะกลับรวมตัวและแยกชั้นออกจากกันเมื่อเวลาผ่านไปนานเพียงพอ อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการผสมสารลดแรงตึงผิวร่วมกันน้ำมันและน้ำ สารลดแรงตึงผิวจะช่วยทำให้ของผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้โดยไม่เกิดการเสียเสถียรภาพกลับไปแยกชั้นเหมือนเดิม [11]



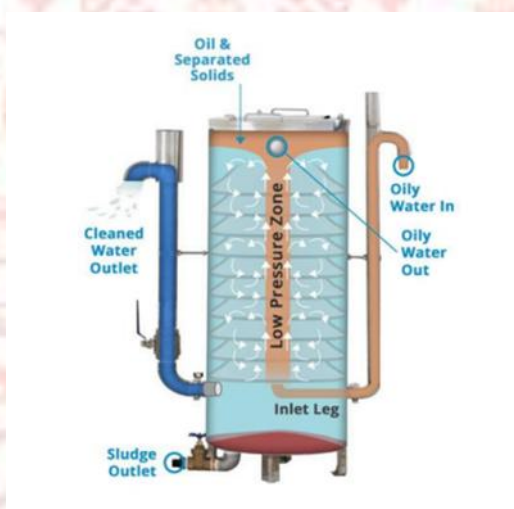
รูปที่ 2-3 กลไกในการเกิดอิมัลชัน [15]

2.4 เทคโนโลยีการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม

น้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมเป็นน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของน้ำมันและสารเคมีหลายชนิดเป็นจำนวนมาก ทำให้ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำหลากหลายรูปแบบ โดยจะแบ่งเทคโนโลยีในการแยกน้ำมันไว้อยู่ 4 กลุ่มหลัก ดังนี้

1. เทคโนโลยีการกำจัดทางกายภาพ (Physical Separation)

เทคโนโลยีนี้จะอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันและน้ำ เช่น ความหนาแน่นที่แตกต่างกัน หรือขนาดของอนุภาคที่สามารถกรองได้ โดยมีวิธีการที่ใช้กัน คือ การใช้ตัวกรอง (Filtration) และการแยกชั้นด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity Separation)

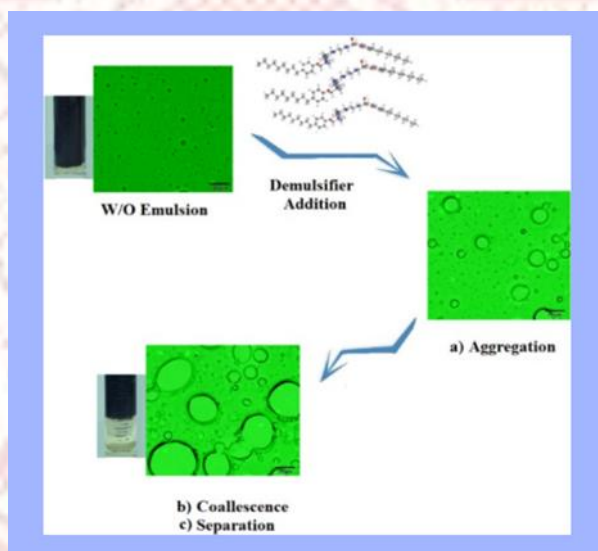


รูปที่ 2-4 การแยกน้ำมันโดยใช้แรงโน้มถ่วง [1]

กลไกการทำงานของเครื่องแยกน้ำมันออกจากน้ำแบบแนวตั้งโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงได้แสดงในรูปที่ 2-4 ซึ่งทำงานโดยรับน้ำปนเปื้อนน้ำมัน (Oily Water In) เข้าทางด้านล่าง แล้วปล่อยให้ไหลขึ้นช้าๆ ผ่านเขตความดันต่ำและแผ่นกั้นภายในด้วยความแตกต่างของความหนาแน่น หยดน้ำมันที่เบากว่าลอยตัวขึ้นไปสะสมอยู่ด้านบนและถูกระบายออกทางช่อง Oil & Separated Solids ส่วนน้ำที่หนักกว่าจะจมลงและถูกระบายออกเป็น Cleaned Water Outlet ด้านข้าง ขณะที่ตะกอนหรือของแข็งที่หนักที่สุดจะตกลงสู่ก้นถังและถูกนำออกทาง Sludge Outlet ซึ่งเป็นการแยกน้ำมัน น้ำ และของแข็งออกจากกันอย่างมีประสิทธิภาพ

2. เทคโนโลยีการกำจัดทางเคมี (Chemical Separation)

สารเคมีที่ใช้ เช่น สารลดแรงตึงผิว จะมีหน้าที่รวมอนุภาคน้ำมันเพื่อบำบัด โดยจะทำอนุภาคของน้ำมันรวมตัวใหญ่ขึ้นและแยกตัวออกมา หลักการของวิธีนี้ คือ การเติมสารที่มีขั้วลบ (Anionic) ไปทำลายความเป็นอิมัลชันเนื่องจากอิมัลชันมีความเสถียรที่มีขั้วบวก (Cationic) เมื่อเติมขั้วลบ (Anionic) ไปก็จะสามารถทำลายกลไกสร้างเสถียรภาพของอิมัลชันได้ เมื่อน้ำที่มีน้ำมันปนเปื้อนมีการเติมสารละลายที่มีขั้วลบลงไปจะทำให้อนุภาคของน้ำมันมีการจับตัวกันเป็นขนาดใหญ่ขึ้น ดังกลไกที่แสดงในรูปที่ 2-5 แสดงกลไกการแยกน้ำออกจากอิมัลชันน้ำในน้ำมันดิบ โดยเริ่มจากการเติมสารจำพวก Demulsifier ซึ่งมีคุณสมบัติทั้งชอบน้ำและชอบน้ำมัน สารนี้จะเข้าไปลดความเสถียรของฟิล์มรอบหยดน้ำ ทำให้หยดน้ำเล็กๆ ที่กระจายตัวอยู่เริ่มเคลื่อนที่เข้ามาจับกลุ่มกัน (Aggregation) จากนั้นหยดน้ำเหล่านี้จะรวมตัวกันเป็นหยดที่ใหญ่ขึ้น (Coalescence) และเมื่อหยดน้ำมีขนาดใหญ่และหนักพอจะตกลงมาตามแรงโน้มถ่วง เกิดเป็นการแยกชั้นของน้ำและน้ำมันออกจากกันอย่างชัดเจน (Separation)



รูปที่ 2-5 กลไกการแยกน้ำมันโดยใช้สารเคมี [13]

3. เทคโนโลยีการกำจัดด้วยความร้อน (Heating Separation)

การกำจัดน้ำมันด้วยการให้ความร้อนเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบต่าง ๆ ของน้ำมันดิบหรือของไหลปิโตรเลียมโดยอาศัยอุณหภูมิที่แตกต่างกันของสารแต่ละชนิดเพื่อนำไปสู่การแยกองค์ประกอบออกจากกัน

4. เทคโนโลยีการกำจัดด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Separation)

การใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดน้ำมันเป็นกระบวนการที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการแยกองค์ประกอบ ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสียและการสกัดสารสำคัญจากกระบวนการอุตสาหกรรม เทคโนโลยีนี้ใช้หลักการของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นบนขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดไอออนส่งผลสารละลายในของเหลวเคลื่อนที่ผสมกันเกิดตะกอนเปลี่ยนสถานะ และแยกตัวออกจากน้ำ

ตารางที่ 2-3 ข้อดีข้อเสียเทคโนโลยีการกำจัดน้ำมันน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม [1,2]

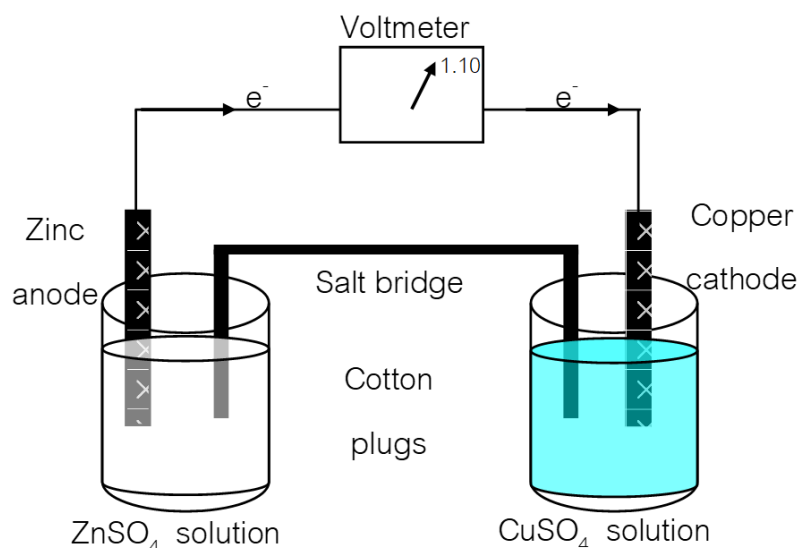
เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อเสีย
กายภาพ	กระบวนการง่าย ไม่ซับซ้อน	ประสิทธิภาพต่ำ
เคมี	ใช้อุปกรณ์น้อย	น้ำอาจมีการปนเปื้อนสารเคมี
การให้ความร้อน	สามารถแยกสารอินทรีย์ได้	ต้นทุนอุปกรณ์สูง
เคมีไฟฟ้า	ประสิทธิภาพสูงในการกำจัดน้ำมัน	ค่าไฟฟ้าสูง

เทคโนโลยีกำจัดน้ำมันมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันจากตารางที่ 2-3 โดยการกำจัดทางกายภาพมีข้อดีที่หลักการง่ายและค่าใช้จ่ายอาจไม่สูงนัก แต่มีข้อจำกัดใช้เวลาในการกำจัดนาน ส่วนการกำจัดทางเคมีสามารถกำจัดน้ำมันได้ดี แต่มีค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีและอาจเกิดสารเคมีตกค้าง ขณะที่การกำจัดด้วยความร้อนสามารถแยกองค์ประกอบน้ำมันได้หลากหลายและทำลายเชื้อโรค แต่ใช้พลังงานสูงและมีค่าลงทุนเริ่มต้นมาก ในทางกลับกันการกำจัดด้วยไฟฟ้าเคมีเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงควบคุมกระบวนการได้ง่ายและในบางกรณีไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีเพิ่มเติม แม้จะยังจะมีข้อจำกัดในความต้องการของพลังงานไฟฟ้า ด้วยปัจจัยเหล่านี้งานวิจัยนี้จึงมุ่งความสนใจไปที่การพัฒนาและประยุกต์ใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม

2.5 เซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Cell)

เซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Cell) เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานเคมีกับพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Redox Reactions) ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell) ซึ่งเป็นเซลล์ที่แปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Cell) เป็นเซลล์ที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเคมีโดยใช้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมี [12]

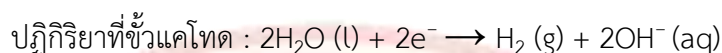
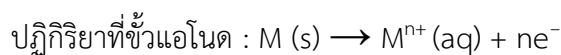
ส่วนประกอบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) ซึ่งเป็นแผ่นโลหะหรือวัสดุนำไฟฟ้าจุ่มในสารละลาย โดยมีสองขั้วคือ ขั้วแอโนด (Anode) ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และขั้วแคโทด (Cathode) ที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน นอกจากนี้ยังมี สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้อิออนเคลื่อนที่เพื่อช่วยในการนำไฟฟ้า และสุดท้ายคือ สะพานเกลือ (Salt Bridge) ที่เชื่อมต่อระหว่างครึ่งเซลล์ทั้งสองเพื่อรักษาสมดุลของประจุและป้องกันไม่ให้อิออนละลายผสมกัน ดังรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 ส่วนประกอบของเซลล์ไฟฟ้าเคมี [12]

เซลล์ไฟฟ้าเคมีถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน โดยอาศัยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) ซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้าโลหะ เช่น อะลูมิเนียมหรือเหล็ก เมื่อผ่าน

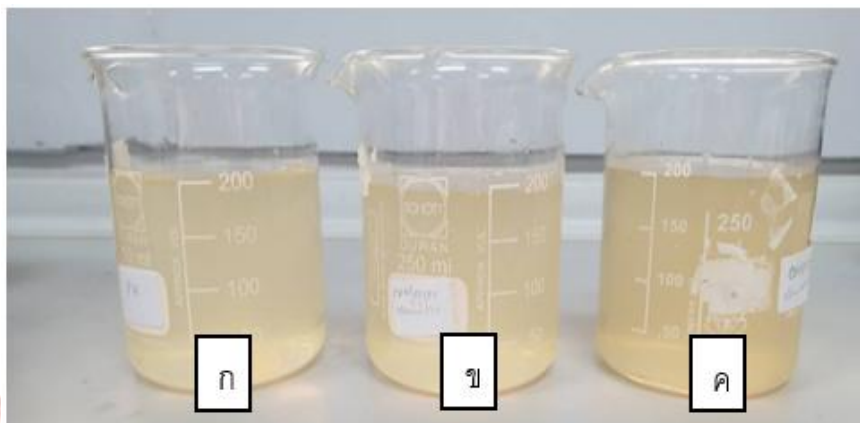
กระแสไฟฟ้า ไอออนโลหะจะถูกปล่อยออกมาและทำปฏิกิริยากับน้ำมันและสารปนเปื้อนอื่น ๆ ทำให้เกิดตะกอนที่สามารถแยกออกได้ง่าย [12]



โลหะไอออน (M^{n+}) ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะที่มีความสามารถในการจับกับอนุภาคน้ำมันและสารปนเปื้อนอื่น ๆ ทำให้เกิดตะกอนที่สามารถแยกออกได้

2.6 ทบทวนวรรณกรรม

การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมมีรูปแบบการบำบัดหลายวิธีดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4 ไม่ว่าจะเป็นการบำบัดโดยใช้สารเคมี การใช้ถังแยกโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงและการแยกโดยใช้ตัวกลาง ซึ่งการแยกโดยใช้ตัวกลางได้มีการศึกษาโดย นางสาวณัฏฐา เทียนบุตร [2] โดยศึกษาผลกระทบชนิดของตัวกลางการปรับสภาพผิวของตัวกลางและเปรียบเทียบการบำบัดแบบกะและแบบไหลเวียนต่อเนื่อง ซึ่งในการศึกษาตัวกลางที่ใช้จะเป็นเส้นใยกล้วยและเส้นใยปาล์ม โดยผลการทดลองแบบกะ เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที พบว่า เส้นใยกล้วยมีประสิทธิภาพในการแยกน้ำมัน 60% และมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อใช้เส้นใยปาล์ม เนื่องจากเส้นใยกล้วยมีขนาดเส้นใยที่ใหญ่กว่าเส้นใยปาล์ม ส่งผลให้สามารถดักจับอนุภาคน้ำมันได้ดีกว่าเส้นใยปาล์ม ส่วนการทดลองแบบไหลเวียนต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที พบว่าเส้นใยกล้วยมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 83% การปรับสภาพเส้นใยพบว่าเส้นใยกล้วยปรับสภาพด้วยวิธีแอลคาไลน์ มีประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน 77.33% ในการทดลองแบบกะตามรูปที่ 2-7 ซึ่งดีกว่าเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพ แต่เมื่อนำเส้นใยแบบปรับสภาพมาทดลองแบบไหลเวียนต่อเนื่อง พบว่าเส้นใยกล้วยแบบปรับสภาพมีประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันที่น้อยลงเมื่อเทียบกับการทดลองแบบกะ เนื่องจากการปรับสภาพพื้นผิวจะเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันของเส้นใยได้ แต่ในการบำบัดพื้นที่ผิวของเส้นใยจะมีผลต่อการแยกน้ำมันมากกว่า เพราะการปรับสภาพจะทำให้พื้นผิวของเส้นใยลดลง จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการบำบัดแบบการแยกโดยใช้ตัวกลางมีศักยภาพในการแยกน้ำมันได้ดี แต่อย่างไรก็ตามการบำบัดน้ำด้วยวิธีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดเรื่องการเตรียมและปรับสภาพเส้นใยให้มีคุณสมบัติในการใช้งานและเรื่องการจัดการเส้นใยที่อึดอัด



รูปที่ 2-7 ภาพแสดงสีของน้ำก่อนและหลังบำบัดด้วยวิธีแบบกะ [2]

(ก) ก่อนการบำบัด (ข) หลังการบำบัดโดยใช้เส้นใยกล้วย (ค) หลังการบำบัดโดยใช้เส้นใยปาล์ม

การบำบัดโดยใช้กระบวนการเซลล์ไฟฟ้าเคมีมีศักยภาพที่จะนำมาใช้ทดแทนการใช้ตัวกลางในการบำบัด ซึ่งการบำบัดด้วยวิธีนี้ จะเป็นการนำเซลล์ไฟฟ้ามาเป็นตัวทำหน้าที่กระตุ้นให้เกิดความไม่เสถียรของสารลดแรงตึงผิวในน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม ที่ทำหน้าที่รวมน้ำกับน้ำมันไว้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยอาศัยหลักการของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างขั้วเซลล์ไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว ทำให้สามารถกำจัดและแยกองค์ประกอบของน้ำเสียได้ โดยวิธีนี้เป็นที่นิยมในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม จากงานวิจัยของ นางสาวอมรภค ชูทอง [4] ที่ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดในกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะศึกษาการลดค่า COD โดยใช้อิเล็กโทรดลิติกเซลล์ที่ทำจากอะคริลิกและใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดมีการจัดเรียงอิเล็กโทรด 3 แบบ คือ แบบขนาน แบบอนุกรม และแบบไบโพลาร์ โดยเดินระบบแบบกะ ทำการศึกษาโดยปรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง ที่ 1.85, 9.1 และ 14.5 kW/m³ และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาอยู่ที่ 10, 20, 30 และ 60 นาที และผลการทดลองที่ได้พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยา คือ พลังงานไฟฟ้าเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยจากการทดลอง พบว่าที่ใช้พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m³ ในตัวอย่างที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาอยู่ที่ 10 นาที มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD อยู่ที่ 85% และการทดลองจนถึงเวลาที่ 60 นาที มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD อยู่ที่ 91% นอกจากนี้การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน ให้ประสิทธิภาพการลด COD ที่ดีและยังใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการจัดเรียงแบบอื่น ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการปรับค่าพลังงานไฟฟ้าที่สูงรวมถึงใช้เวลาบำบัดที่นานขึ้นจะทำให้มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ที่เพิ่มขึ้น จากนั้นได้ทำการสืบค้นเพิ่มเติมงานวิจัยของ นางสาวจุฑามาศ แก้วมณี [5] ที่ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีเช่นกัน

โดยในงานนี้จะใช้ขั้วอลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด ทำการทดลองโดยการปรับกระแสไฟฟ้าที่ 1, 1.5, 2 และ 4A ใช้ระยะเวลาในการทดลอง อยู่ที่ 10, 20, 30 และ 60 นาที พบว่า ที่การทดลองที่ กระแสไฟฟ้า 4A ที่เวลา 10 นาที มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ที่ อยู่ที่ 86% เมื่อถึงที่เวลา 60 นาที ประสิทธิภาพในการลดค่า COD เพิ่มขึ้นอยู่ที่ 97% ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการบำบัดค่า COD ที่เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ แตกต่างจากช่วง 10 นาทีแรก ที่ระบบสามารถลดค่า COD ได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ เมื่อใช้กระบวนการแบบต่อเนื่อง โดยมีการขั้วอิเล็กโทรดเป็นอลูมิเนียม ค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 4A และอัตราการไหลของน้ำอยู่ที่ 1.3 L/hr. พบว่า มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD อยู่ที่ 95% งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นเมื่อมีการปรับกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าความหนาแน่นของ กระแสไฟฟ้ามากขึ้นส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีขึ้นเช่นกัน

กระบวนการเซลล์ไฟฟ้าเคมีได้ถูกนำมาใช้การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการปิโตรเลียม โดย งานวิจัยของ Ezechi และคณะ [3] ซึ่งงานวิจัยนี้จะเป็นการนำน้ำจากกระบวนการปิโตรเลียมมาทำ การบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยจะทำการกำจัดโบรอนจากน้ำเสียจากกระบวนการ ปิโตรเลียม ซึ่งการบำบัดจะใช้วิธีการบำบัดแบบต่อเนื่องโดยกำหนดตัวแปรคือ เวลาที่ใช้ และระยะห่าง ของอิเล็กโทรดขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้คือ แผ่นอลูมิเนียมและแผ่นเหล็ก ผลการทดลองที่ได้พบว่า การ ทดลองกำจัดโบรอนที่เวลา 30 และ 45 นาที แผ่นอลูมิเนียมสามารถกำจัดได้อยู่ที่ 72.7, 84.4% ตามลำดับ ส่วนแผ่นเหล็กสามารถกำจัดได้อยู่ที่ 61.3, 76% ตามลำดับ หลังจากนั้นได้เพิ่มระยะห่าง ของอิเล็กโทรดจาก 0.5 cm เป็น 1.5 cm และใช้เวลาเท่าเดิม พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง แผ่นอลูมิเนียมสามารถกำจัดได้เหลือที่ 60, 78.8 % ตามลำดับ ส่วนแผ่นเหล็กสามารถกำจัดได้อยู่ที่ 53.3, 67.3% ตามลำดับ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณความหนาแน่นประจุที่มีผล ต่อการกำจัดโบรอนใช้ขั้วอิเล็กโทรดคือแผ่นอะลูมิเนียม กำหนดความหนาแน่นประจุไว้ที่ 1200 ถึง 3600 Ah/m³ โดยผลลัพธ์ที่ได้ออกมาพบว่าการความหนาแน่นประจุที่สูงขึ้น จะนำไปสู่การกำจัดโบรอนที่ มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นประจุที่สูงจะทำให้เกิดอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น ซึ่งจะ ช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดโบรอนที่ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถ้าหากใช้ความหนาแน่นประจุที่สูง เกินเป็นอาจทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพลดลงได้ เนื่องจากการเกิดอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการ บำบัดมากเกินไปจนความจำเป็น ทำให้เกิดอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์คั่งในน้ำเสีย ในส่วนของงานวิจัยของ Bayramoglu และคณะ [6] ได้มีการประเมินเชิงลึกถึงผลกระทบของรูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าต่อ ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกูเลชัน (EC) ในการบำบัดน้ำทิ้ง งานวิจัย นี้เปรียบเทียบการใช้ขั้วอิเล็กโทรดอะลูมิเนียมในรูปแบบการเชื่อมต่อที่แตกต่างกัน ได้แก่ แบบขนาน, แบบอนุกรม และแบบไบโพลาร์ ซึ่งผลการวิเคราะห์สรุปได้อย่างชัดเจนว่า การจัดเรียงอิเล็กโทรด แบบต่อขนาน เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในเชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับการบำบัดน้ำทิ้งด้วย

กระบวนการ EC รูปแบบนี้สามารถสร้างสมดุลที่ดีระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดมลพิษกับการลดต้นทุนที่เกี่ยวข้องทั้งในด้านการสิ้นเปลืองอิเล็กทรอนิกส์และการใช้พลังงานไฟฟ้า เมื่อเทียบกับการเชื่อมต่อแบบอนุกรมและไบโพลาร์ ซึ่งแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ใกล้เคียงกัน แต่ก็มีต้นทุนการดำเนินงานที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ อันเนื่องมาจากความต้องการศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้น ดังนั้น จากมุมมองทางเศรษฐศาสตร์การเลือกใช้การกำหนดค่าแบบขนานจึงเป็นกลยุทธ์ที่แนะนำเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการประยุกต์ใช้งานจริง

เนื่องจากส่วนใหญ่งานวิจัยจะเป็นการศึกษาเพื่อลดค่า COD เป็นหลักโดยไม่ได้เจาะจงที่ปริมาณน้ำมันในน้ำโดยเฉพาะ โดย Gomes และคณะ [7] ได้กล่าวไว้ในงานวิจัยการบำบัดน้ำของเขาว่าค่า COD เป็นค่ามาตรวัดอินทรีย์และอนินทรีย์โดยน้ำมันถือว่าเป็นสารอินทรีย์ประเภทหนึ่ง ซึ่งถ้าหากมีปริมาณน้ำมันในน้ำที่มากก็จะส่งผลให้มีค่า COD มากเช่นกัน แต่เมื่อนำน้ำเสียไปทำการบำบัดก็จะพบว่าจะมีค่า COD ส่วนใหญ่จะลดลงแต่ปริมาณน้ำมันในน้ำอาจจะไม่ได้ลดตามค่า COD เพราะแต่ละวิธีการบำบัดมีวิธีการกำจัดสารที่ต่างกัน

การบำบัดน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีเป็นแนวทางที่มีศักยภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการกำจัดน้ำมันซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามการศึกษาเกี่ยวกับสถานะที่เหมาะสมและกลไกการทำงานของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในการกำจัดน้ำมันจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมโดยเฉพาะยังคงเป็นประเด็นที่น่าสนใจและมีความท้าทาย ซึ่งทำให้ในงานวิจัยนี้มีความสนใจในการนำกระบวนการเซลล์ไฟฟ้าเคมีมาศึกษาความสามารถในการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมทั้งแบบกะและแบบต่อเนื่อง เพื่อนำไปประยุกต์หรือพัฒนาการบำบัดน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมต่อไป ดังนั้น ข้อมูลและความรู้ที่ได้รวบรวมไว้ในบทนี้จึงเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะนำเสนอรายละเอียดของวิธีการดำเนินงานวิจัยในบทต่อไป

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

บทนี้จะอธิบายถึงวิธีวิจัยที่ใช้ในการศึกษาการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วยวิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งครอบคลุมรายการอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ ขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ วิธีการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน การเตรียมเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้งแบบกะและแบบต่อเนื่อง รวมถึงสรุปรายละเอียดของแผนการทดลองต่างๆ

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และเก็บตัวอย่าง
 - เครื่องปั่นอิมัลชัน (Homogenizer) ยี่ห้อ Mastermix
 - เครื่องแก้ว ได้แก่ ปีกเกอร์ปริมาตร 100 และ 2000 มิลลิลิตร , กระบอกตวง 100 มิลลิลิตร
2. อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าในระดับห้องปฏิบัติการ
 - เครื่องจ่ายไฟกระแสตรงยี่ห้อ GW Instek รุ่น GPR-3060D
 - แผ่นอลูมิเนียมขนาด 6x2 ตารางเซนติเมตร หนา 1 มิลลิเมตร
 - แผ่นเหล็กขนาด 6x2 ตารางเซนติเมตร หนา 1 มิลลิเมตร
 - ปั๊มจ่ายสาร Dosing pump ยี่ห้อ Prominent fluid control รุ่น CNPA
3. อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน
 - Hotplate ยี่ห้อ Fisher hotplate รุ่น ika c-mag hs 7
 - กรวยแก้วแยกสาร (Separatory funnel) ขนาด 250 มิลลิลิตร
 - กระดาษกรองเบอร์ 5 ยี่ห้อ Whatman
 - เครื่องแก้ว ได้แก่ ปีกเกอร์ปริมาตร 200 มิลลิลิตร และ กระบอกตวง 10 มิลลิลิตร
 - เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลชนิด 3 ตำแหน่งยี่ห้อ Metter Toledo รุ่น pg503-s

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารเคมีที่ใช้เตรียมน้ำเสียอิมัลชันจำลอง
 - น้ำมันเครื่องสังเคราะห์ (Engine oil) ยี่ห้อบางจาก รุ่น GE NGV SAE 15W-40
 - Polysorbate 80 (Tween 80) เป็นสารเคมีระดับ Extra Pure
 - Sorbitan Monostearate (Span 80) เป็นสารเคมีระดับ Extra Pure
 - โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 99.5 เป็นสารเคมีระดับ AR grade

- น้ำกลั่น (Distilled water)
- 2. สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน
 - เฮกเซน (n-Hexane) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 98.5 เป็นสารเคมีระดับ AR grade

3.3 การเตรียมน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมสังเคราะห์

การศึกษานี้ได้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อจำลองลักษณะของน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม จะกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันอยู่ 2% โดยน้ำหนัก โดยมี 4 ขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมน้ำเสีย
 - น้ำมันเครื่องยี่ห้อบางจาก (SAE 15W-40) ในอัตราส่วน 2% โดยน้ำหนัก
 - สารลดแรงตึงผิว ได้แก่ Polysorbate 80 และ Sorbitan Monostearate 80 ในอัตราส่วนอย่างละ 1% โดยน้ำหนัก
 - โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ปริมาณ 0.04 กรัมต่อมิลลิลิตร
 - น้ำกลั่นปริมาณ 960 มิลลิลิตร
2. เทน้ำกลั่นลงในภาชนะ จากนั้นค่อยๆ เติมน้ำมันเครื่องตามอัตราส่วนที่เตรียมไว้ ตามด้วยสารลดแรงตึงผิว Polysorbate 80 และ Sorbitan Monostearate 80 จากนั้นเติมโซเดียมคลอไรด์ลงในสารละลาย
3. ใช้เครื่องปั่นอิมัลชันตั้งความเร็วในการกวนที่ 2000 รอบต่อนาที กวนสารละลายเป็นระยะเวลา 30 นาที เพื่อให้สารทั้งหมดผสมกันอย่างสม่ำเสมอ
4. ตรวจสอบน้ำที่เตรียมมีความเสถียรหรือไม่ โดยตั้งพักไว้ 60 นาที ก่อนนำไปใช้ ดังรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 ภาพน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันด้วยวิธี Partition Gravimetric Method

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันด้วยวิธี Partition gravimetric อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D4281-93 เพื่อหาปริมาณน้ำมันที่คงเหลืออยู่ในน้ำเสีย โดยในการทดลองจะทำการเก็บตัวอย่างก่อนบำบัด และหลังการบำบัด เพื่อให้ทราบน้ำหนักของน้ำมันทั้งก่อนและหลังการบำบัด ซึ่งสามารถนำไปคำนวณประสิทธิภาพในการกำจัดของน้ำมันได้ มีขั้นตอนทั้งหมด 7 ขั้นตอนดังนี้

1. เก็บตัวอย่างน้ำเสียหลังการบำบัดปริมาณ 10 มิลลิลิตร
2. เติมหะเสน 10 มิลลิลิตรลงในตัวอย่างที่เก็บ
3. นำสารผสมที่ได้ไปใส่ในกรวยแก้วแยกสารแล้วเขย่าอย่างแรงเป็นเวลา 2 นาที
4. ตั้งกรวยแยกสารทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้เกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำมันที่ถูกละลายด้วยเฮกเซนกับชั้นของน้ำ
5. เมื่อได้ชั้นของน้ำมันกับเฮกเซนให้ทำการแยกชั้นของน้ำออก
6. หลังจากนั้นทำการระเหยเฮกเซนออกด้วย Hotplate โดยควบคุมอุณหภูมิไม่เกิน 80 องศาเซลเซียส จนเฮกเซนระเหยหมด
7. เมื่อเฮกเซนระเหยหมดแล้วจะเหลือแต่น้ำมัน นำปิเกตอร์ไปชั่งอีกครั้งเพื่อหาน้ำหนักของน้ำมันและเมื่อได้ค่าจากการทดลองข้างต้นแล้วจะนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดของน้ำมันด้วยสมการ 3.1 ดังนี้

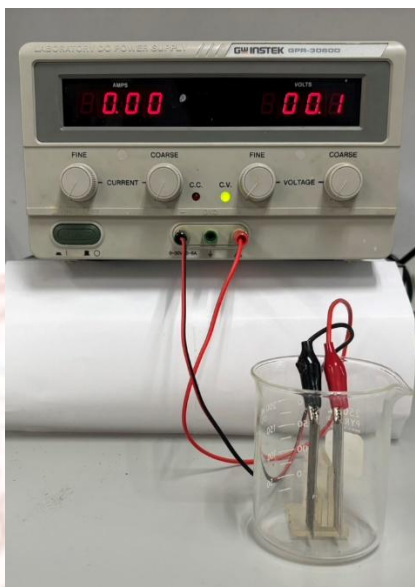
$$\text{ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดของน้ำมัน } (\eta) = \frac{E_0 - E_i}{E_0} \times 100 \quad (3.1)$$

โดย E_0 คือ น้ำหนักน้ำมันก่อนการบำบัด (g)

E_i คือ น้ำหนักน้ำมันหลังการบำบัด (g)

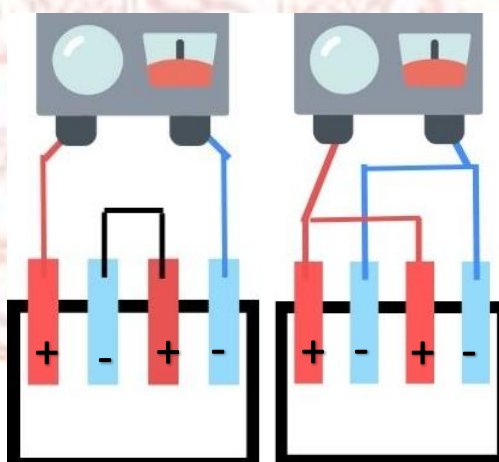
3.5 การเตรียมเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกะ

เซลล์ไฟฟ้าเคมีจะทำการทดลองแบบกะ จะทำการทดลองในปิเกตอร์ขนาด 250 ml โดยจะประกอบไปด้วยขั้วอิเล็กโทรด ขนาด 2×6 cm. ทำการจัดวางระยะห่างของแผ่นขั้วไฟฟ้าอยู่ที่ 1 cm หลังจากนั้นทำการต่อสายไฟกับเครื่องจ่ายไฟกระแสตรงยี่ห้อ GW Instek รุ่น GPR-3060D ดังรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 ชุดการทดลองเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกะ

เมื่อทำการต่อวงจรครบแล้ว ขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ภายในบีกเกอร์จะกับเชื่อมต่อสายไฟจากขั้วบวกที่ออกจาก DC supply จะมีหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และขั้วอิเล็กโทรดอีกฝั่งที่ทำการเชื่อมต่อสายไฟจากขั้วลบของ DC supply จะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด ซึ่งในการศึกษาจะรูปแบบการเรียงตัวของขั้วไฟฟ้า 2 แบบคือ แบบอนุกรม และแบบขนาน ดังแสดงในรูป 3-3



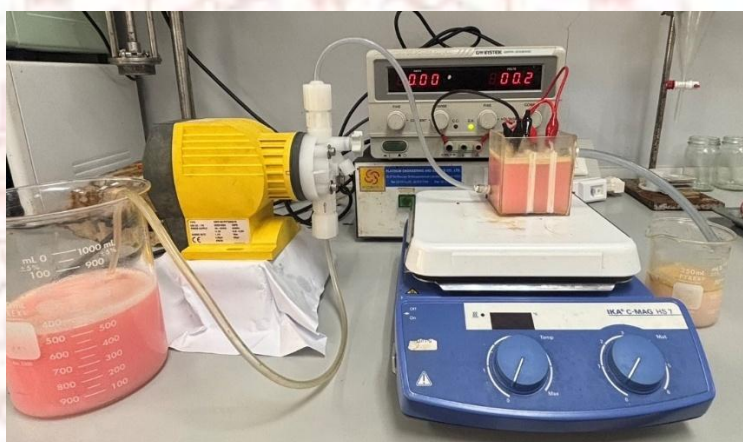
(ก)

(ข)

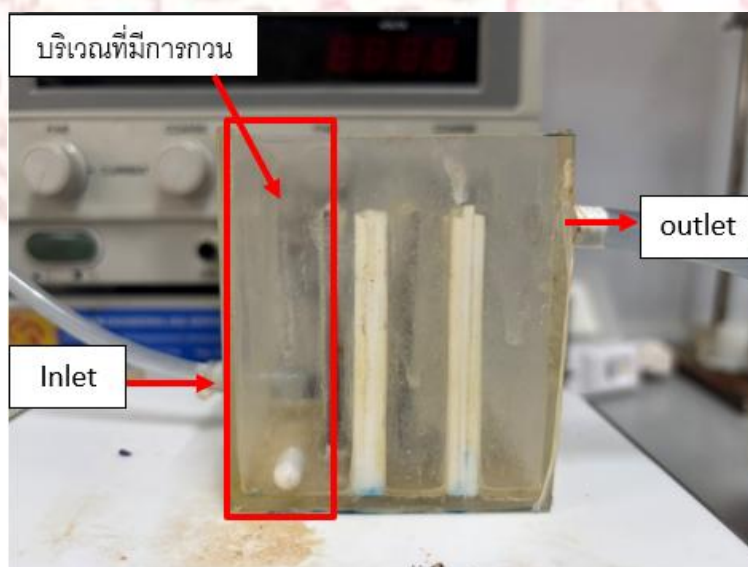
รูปที่ 3-3 การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม ก) แบบอนุกรม ข) แบบขนาน

3.6 การเตรียมเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง

เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่องจะทำการทดลองอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง ดังรูปที่ 3-4 โดยจะประกอบไปด้วยถังน้ำขนาด 200 ml. ขั้วอิเล็กโทรด ขนาด 2×6 cm. จำนวน 4 แผ่น ทำการจัดวางระยะห่างของแผ่นขั้วไฟฟ้าอยู่ที่ 1 cm และทำการต่อสายไฟกับเครื่องจ่ายไฟกระแสตรงยี่ห้อ GW Instek รุ่น GPR-3060D และการใช้ปั๊มเพื่อควบคุมการไหลของน้ำ หลักการทำงานเริ่มต้นจากน้ำที่ต้องการบำบัดจะถูกปั๊มไหลเข้าสู่ทางเข้า (Inlet) ไหลเข้าบริเวณที่มีการกวน ซึ่งบริเวณนี้จะมีการกวนด้วยกวนด้วยแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) ก่อนเข้าสู่บริเวณเซลล์ไฟฟ้า จากนั้นน้ำจะไหลเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมีเพื่อทำการบำบัด ก่อนจะไหลออกผ่านทางออก (Outlet) ดังรูปที่ 3-5



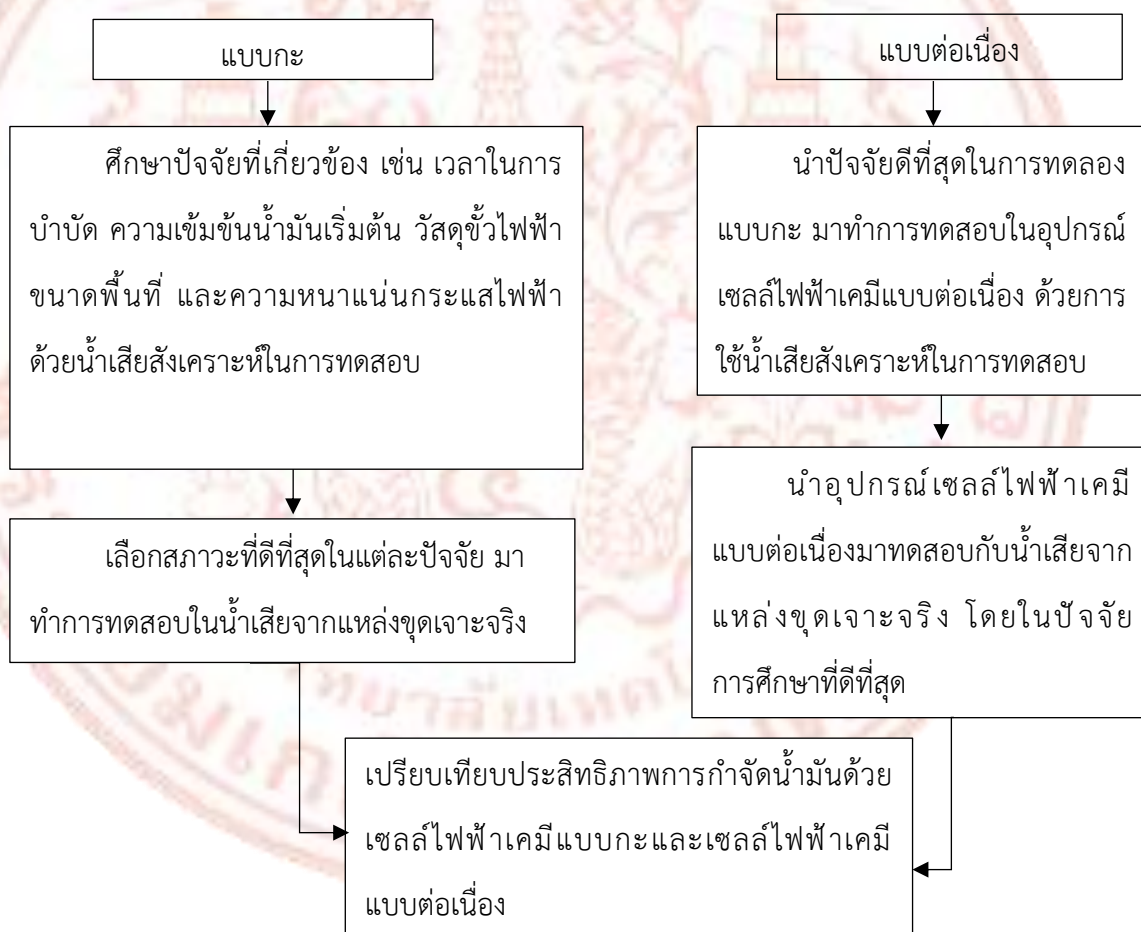
รูปที่ 3-4 แสดงแผนผังชุดการทดลองเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 3-5 ภาพถ่ายอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง

3.7 วิธีการศึกษาการบำบัดน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วยวิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ในงานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกะและแบบต่อเนื่องในการกำจัดน้ำมัน โดยพิจารณาตัวแปรหลายด้าน เช่น เวลาในการบำบัด ความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้น วัสดุขั้วไฟฟ้า ขนาดพื้นที่ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ในเบื้องต้น จะดำเนินการทดลองในระบบแบบกะเพื่อ ค้นหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดจากแต่ละปัจจัย จากนั้นจึงนำสถานะที่เหมาะสมดังกล่าวมาเป็นแนวทาง กำหนดเงื่อนไขการทำงานในระบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้ การทดลองทั้งหมดจะดำเนินไปตามแผนผังในรูปที่ 3-6 โดยรายละเอียดตัวแปรต้น ตัวแปรตาม และตัวแปรควบคุม ในการทดลองต่างๆ ได้แจกแจงและระบุไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 3-6 แผนภาพแสดงปัจจัยที่ศึกษาในการทดลองการกำจัดน้ำมันด้วยวิธีแบบกะ และแบบต่อเนื่อง

บทที่ 4

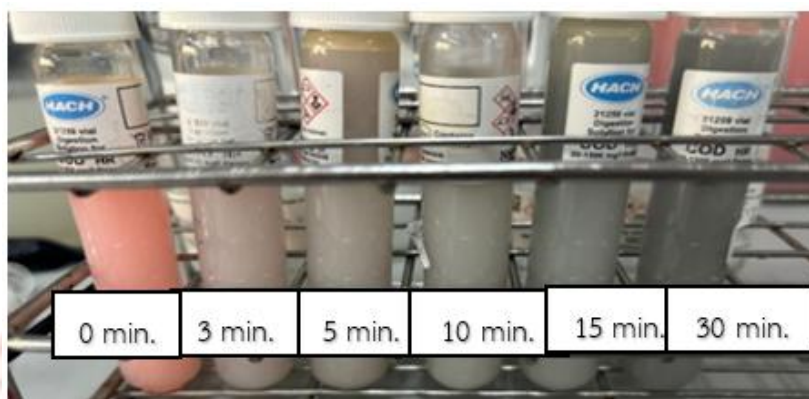
ผลการทดลอง

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการไฟฟ้าเคมีในการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม (Produced Water) โดยในส่วนแรกได้ทำการศึกษากระบวนการบำบัดด้วยวิธีแบบกะ (Batch process) เพื่อหาสภาวะในการทำงานที่มีประสิทธิภาพ ในการนี้ได้ศึกษาผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ เช่น ระยะเวลาในการดำเนินการ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และรูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า เป็นต้น ในส่วนที่สองได้ศึกษากระบวนการบำบัดด้วยวิธีแบบต่อเนื่อง (Continuous process) โดยนำข้อมูลจากกระบวนการแบบกะ มาใช้ในการกำหนดสภาวะการทำงาน และปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการ ในการศึกษาทั้ง 2 ส่วนจะทำการทดสอบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์เป็นหลัก แล้วทำการยืนยันผลบางส่วนโดยใช้น้ำที่ได้จากแหล่งขุดเจาะ นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายพฤติกรรมและกลไกของระบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีในการบำบัด

4.1 การกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้กระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วยวิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกะ

4.1.1 อิทธิพลของระยะเวลาในการบำบัด

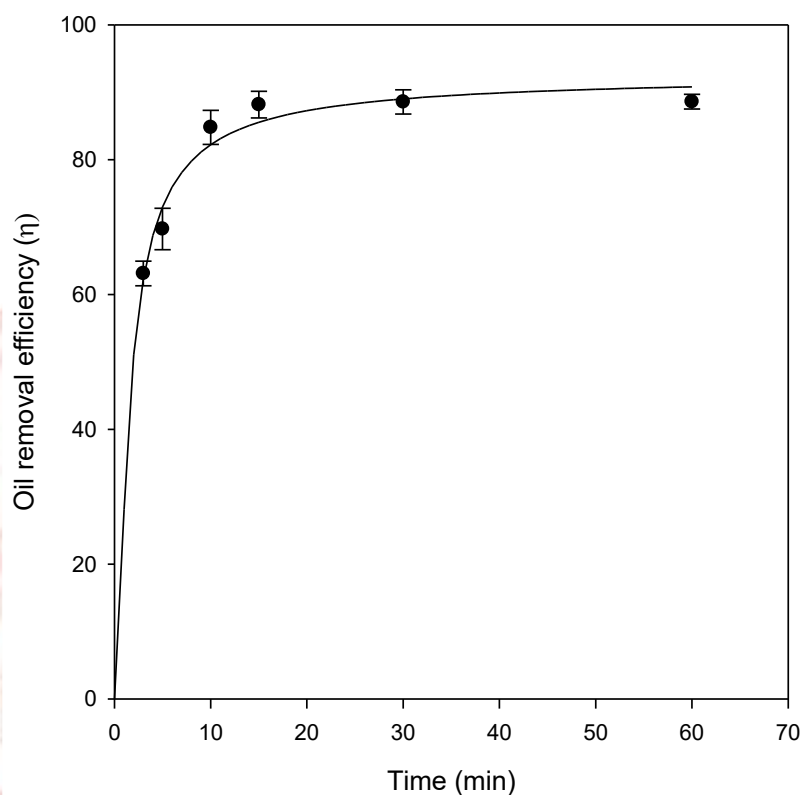
การทดลองเริ่มต้นด้วยการศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการกำจัดน้ำมัน และสังเกตลักษณะทางกายภาพของกระบวนการ โดยใช้ Produced water สังเคราะห์ ปริมาตร 200 ml ที่มีความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้น 2%wt (20,000 mg/L) ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ได้แก่ อลูมิเนียม จำนวน 2 แผ่น มีพื้นที่ผิวรวม 24 cm² และกระแสไฟฟ้าคงที่ 4 A ทำการเก็บตัวอย่าง ณ เวลา 3, 5, 10, 15, 30 และ 60 นาที เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน โดยทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง สำหรับแต่ละจุดการทดลองเพื่อประเมินค่าความคลาดเคลื่อนด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



รูปที่ 4-1 รูปถ่ายแสดงการเปลี่ยนแปลงสีของ Produced water สังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัด ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ในช่วง 0 ถึง 30 นาที

ผลการสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพจากรูปที่ 4.1 พบว่า เมื่อกระบวนการดำเนินไป เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีที่ชัดเจน กล่าวคือ สีของสารละลายเปลี่ยนไปและมีการก่อตัวของตะกอนแขวนลอยเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาปรากฏการณ์นี้เป็นผลมาจากกระบวนการเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรดอลูมิเนียม (Al) โดยอลูมิเนียมจะเกิดการละลายกลายเป็นไอออนของอลูมิเนียม (Al^{3+}) ซึ่งไอออนเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ของอลูมิเนียมในลักษณะของตะกอน (flocclulants) ตะกอนเหล่านี้มีคุณสมบัติในการดักจับและกักเก็บ อนุภาคน้ำมันที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันและตะกอน เกิดเป็นกลุ่มที่แยกชั้นออกจากน้ำในที่สุด

ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน (η) โดยเริ่มต้นจากการวัดปริมาณน้ำหนักของน้ำมันที่เหลือหลังการบำบัดตามรายละเอียดที่ระบุไว้ในหัวข้อ 3.4 จากนั้นจึงนำค่าดังกล่าวมาคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.1 เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน (η) ค่าประสิทธิภาพที่แสดงในแต่ละเวลาดังในรูปที่ 4-2 โดยค่าที่แสดงได้มาจากการคำนวณค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง ร่วมกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากข้อมูลชุดเดียวกัน ซึ่งแสดงในรูปของแถบคลาดเคลื่อน (error bars) ในกราฟ



รูปที่ 4-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและระยะเวลา
ที่กระแสไฟฟ้า 4 A

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันตามระยะเวลาในรูปที่ 4-2 พบว่า ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-15 นาทีแรก และเริ่มคงที่หลังจากนั้น โดยมีค่าสูงสุด 88.60% ที่ 60 นาที ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่พบว่ากระบวนการไฟฟ้าเคมีมักให้ผลเร็วในช่วงแรกแล้วจึงเข้าสู่สมดุล [16] โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในรูปของตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วดังแสดงในรูปที่ 4-1 ในช่วง 0-15 นาทีแรก ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันในรูปที่ 4-2 อธิบายได้จากหยดน้ำมันในตอนเริ่มต้นที่กระจายอยู่ทั่วไปเมื่อการปลดปล่อยไอออนอลูมิเนียม (Al^{3+}) จากขั้วไฟฟ้าส่งผลให้เกิดการก่อตัวของตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ปริมาณมากในระยะเวลานั้นๆ ตะกอนที่เกิดขึ้นใหม่นี้มีความว่องไวสูง (highly active) จึงสามารถดักจับอนุภาคน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านกลไกหลายอย่างที่ทำงานพร้อมกันเช่น การจับกลุ่ม, การลอยตัว และการดูดซับ [14] แต่อย่างไรก็ตามหลัง 15 นาที แม้ตะกอนจะยังคงก่อตัวแต่ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันกลับเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลงและเข้าสู่ภาวะคงที่ ส่วนหนึ่งเป็นเพราะน้ำมัน

ส่วนใหญ่ถูกดักจับไปแล้ว หรือมีปัจจัยอื่นจำกัดปฏิกิริยา เช่น การลดลงของพื้นที่ผิวที่ว่องไวของตะกอนเมื่อเวลาผ่านไปหรือข้อจำกัดด้านการถ่ายโอนมวลของอนุภาคน้ำมันที่เหลืออยู่

การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการกักตุนน้ำมันซึ่งวัดจากปริมาณน้ำมันที่ถูกกักตุนตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นไม่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในรูปที่ 4-1 ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง แม้ว่าจะผ่านการบำบัดเป็นเวลา 30 นาที Produced water ก็ยังไม่แสดงลักษณะการปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงตัว ดังนั้น กลไกการกักตุนจึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้ การสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางการกายภาพจากการเกิดตะกอน และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีไฟฟ้าที่ชั่วไฟฟ้าแต่เพียงอย่างเดียว ยังต้องคำนึงถึงลักษณะและคุณสมบัติของตะกอนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ความสามารถในการเข้าถึงของน้ำมันที่เหลืออยู่ไปยังตำแหน่งที่ว่องไวของตะกอน และอาจรวมถึงลักษณะของน้ำมันส่วนที่เหลืออยู่ที่ยากกักตุนได้ยากกว่า สรุปได้ว่าแม้การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สังเกตเป็นเพียงส่วนหนึ่งที่บ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการกักตุนน้ำมัน แต่การเปลี่ยนแปลงด้วยวิธีทางเคมีมีความเหมาะสมกว่าในการประเมินประสิทธิภาพโดยรวมกระบวนการของการบำบัด

ส่วนต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการกักตุนน้ำมัน ซึ่งจะนำข้อมูลประสิทธิภาพการกักตุนน้ำมันที่เวลาต่าง ๆ มาประเมินหาพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First-Order Kinetics Model) ซึ่งใช้อธิบายพฤติกรรมของระบบที่ โดยมีรูปแบบตามสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$\eta(t) = \eta_{\infty} e^{-k/t} \quad (4.1)$$

โดยที่ η = ประสิทธิภาพการกักตุนน้ำมัน ณ เวลา (t)

η_{∞} = ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่สภาวะคงที่

t = เวลา

k = ค่าคงที่ระบบ

เมื่อวิเคราะห์ regression จากข้อมูลจากการทดลองค่าประสิทธิภาพการกักตุนน้ำมันที่เวลาต่างๆ ได้ค่า $\eta_{\infty} = 92.61\%$ และ $k = 1.19$ และใช้สร้างเส้นแนวโน้มดังแสดงในกราฟรูปที่ 4-2 นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพที่ได้จากแบบจำลอง เทียบกับค่าที่วัดจากการทดลองจริงที่เวลาต่างๆ จะแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบได้ดี โดยเฉพาะเมื่อระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ หลังจาก 15 นาที ทั้งนี้ค่าคลาดเคลื่อนมากที่สุดจะเกิดในช่วงเวลา 15 นาทีแรก ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วดังแสดงในตารางที่ 4-1

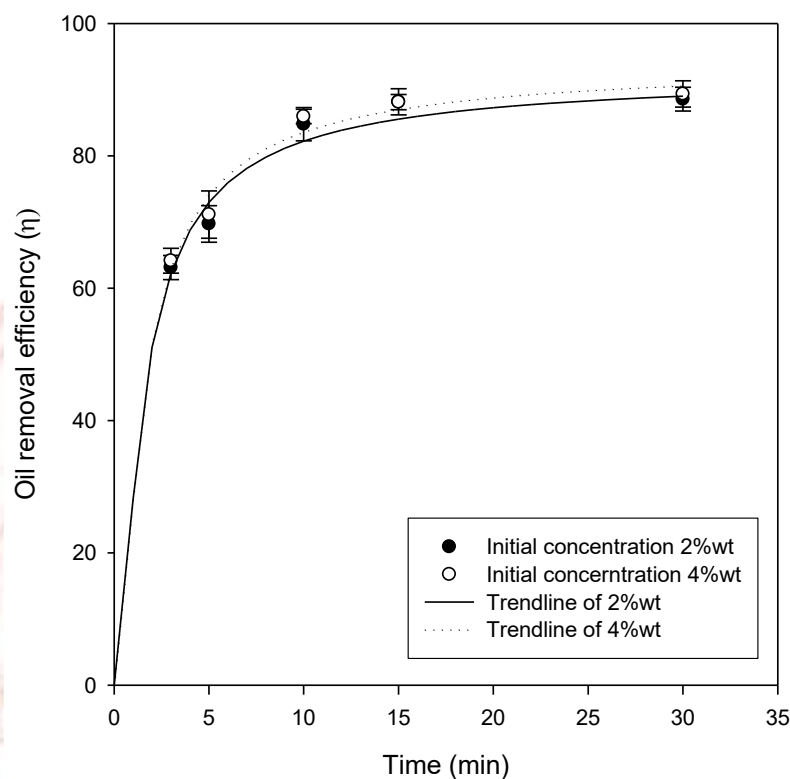
ตารางที่ 4-1 ตารางแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันจากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง

Time	Experiment	Model $\eta = \eta_{\infty}e^{-k/t}$
3	63.11%	62.25%
5	69.71%	72.97%
10	84.78%	82.21%
15	88.16%	85.53%
30	88.57%	89.00%
60	88.60%	90.79%

เมื่อพิจารณาผลการทดลองและวิเคราะห์จากแบบจำลอง พบว่า ที่เวลา 15 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากตั้งแต่ นาทีที่ 15 ถึง 60 นาที จึงสามารถสรุปได้ว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ที่เวลาประมาณ 15 นาที ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองจนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง ดังนั้นในการศึกษาต่อจากนี้ จะทดลองการกำจัดน้ำมันในช่วง 0-30 นาทีเท่านั้น เนื่องจากตั้งช่วงเวลาบำบัดตั้งแต่ 30 นาทีขึ้นไป ค่าประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน (η) จะมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อย นอกจากนี้เส้นแสดงแนวโน้มในกราฟต่างๆ ต่อไป จะสังเคราะห์จากแบบจำลองจนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง โดยรวบรวมและแสดงค่า η_{∞} และ k ของแต่ละกราฟในตาราง ข-13 ส่วนของภาคผนวก ข

4.1.2 อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน

ในการทดลองส่วนนี้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันระหว่าง Produced water สังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้น 2%wt และ 4%wt เพื่อประเมินผลกระทบของความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้น เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วในธรรมชาติ Produced water จะมีความเข้มข้นของน้ำมันเริ่มต้นอยู่ที่ไม่เกิน 5.6%wt ดังแสดงในตารางที่ 2-2

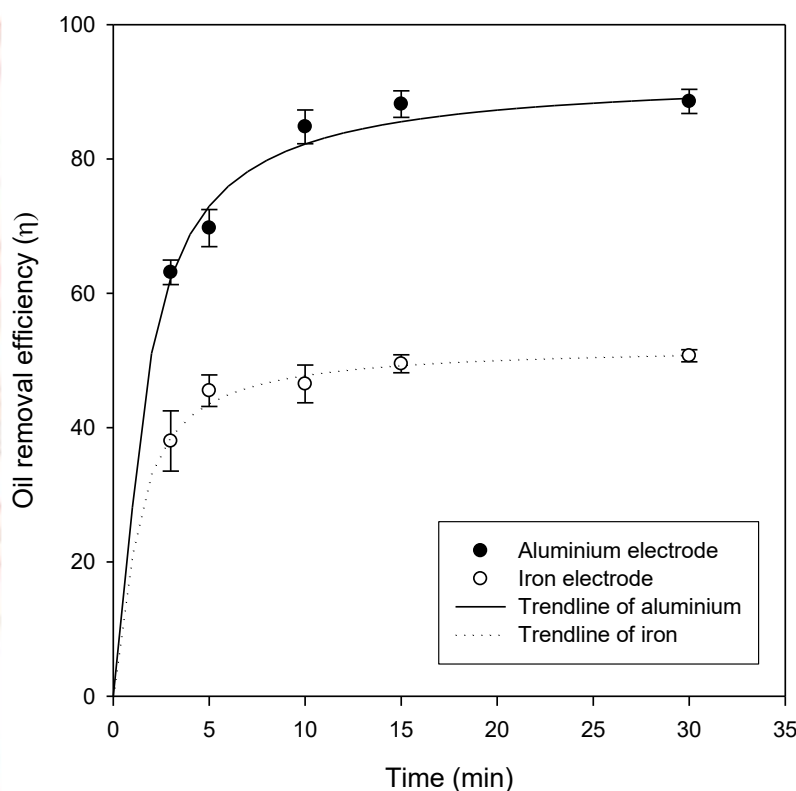


รูปที่ 4-3 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่เปลี่ยนไปตามเวลา โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันที่ 2%wt และ 4%wt

ผลการทดลองจากรูปที่ 4-3 ชี้ให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2%wt และ 4%wt มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันมาก โดยค่าประสิทธิภาพ ณ สภาวะคงที่ (η_{∞}) ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 1 สำหรับความเข้มข้น 2%wt คือ 92.61% และสำหรับ 4%wt คือ 94.3% ทั้งนี้ อัตราการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพ ระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงที่ และค่าประสิทธิภาพที่สภาวะคงที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ บ่งชี้ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันในช่วงที่ศึกษาไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน ดังนั้นในการศึกษาส่วนที่เหลือจึงเลือกใช้ความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นที่ 2%wt

4.1.3 อิทธิพลของชนิดวัสดุของขั้วไฟฟ้า

ลำดับถัดไป เป็นการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุของขั้วไฟฟ้าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน โดยจะเปรียบเทียบวัสดุของขั้วไฟฟ้า 2 แบบ คือ แผ่นอลูมิเนียม และแผ่นเหล็ก ทำการทดลองที่พื้นที่ของอิเล็กโทรดรวม 24 cm^2 และกระแสไฟฟ้า 4 A



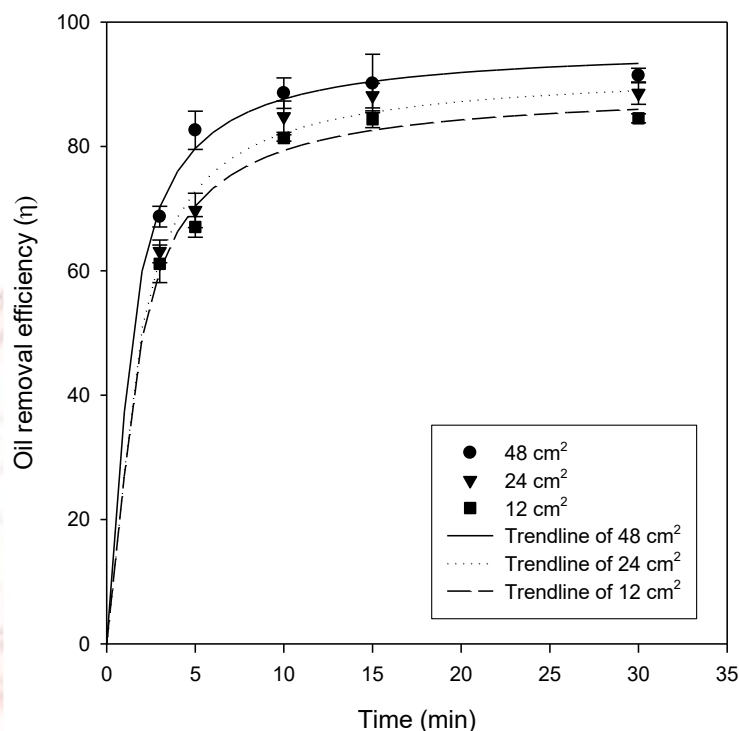
รูปที่ 4-4 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่เปลี่ยนไปตามเวลา เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าทำจากอลูมิเนียมและเหล็ก

ผลการทดลองในรูปที่ 4-4 แสดงว่า เมื่อใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าจะมีแนวโน้มในการบำบัดที่คล้ายคลึงกับแผ่นอลูมิเนียมในเชิงคุณภาพ กล่าวคือ ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเข้าสู่สภาวะคงที่ ณ เวลาประมาณ 15 นาทีเช่นกัน ไม่ว่าจะใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียมหรือเหล็ก อย่างไรก็ตาม ชนิดวัสดุที่ทำขั้วไฟฟ้า มีผลในเชิงปริมาณอย่างมากกล่าวคือ ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันของแผ่นเหล็กมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 50.69% ที่เวลา 30 นาที ซึ่งต่ำกว่าแผ่นอลูมิเนียมซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ที่ 88.57% ที่เวลา 30 นาที ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าและการเกิดออกซิเดชันของวัสดุทั้งสอง

แผ่นอลูมิเนียมเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่า โดยสูญเสียอิเล็กตรอนและเปลี่ยนสถานะเป็นไอออนอลูมิเนียมที่มีประจุ +3 ซึ่งไอออนเหล่านี้จะรวมตัวกันเกิดเป็นตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีลักษณะละเอียดและมีพื้นที่ผิวมาก สามารถกักตุน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่แผ่นเหล็กเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เช่นกัน โดยได้ไอออนเหล็กซึ่งสามารถมีประจุ +2 หรือ +3 ไอออนเหล็กเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกลายเป็นสารประกอบจำพวกสนิม ซึ่งตะกอนสนิมมีลักษณะที่อาจไปรบกวนกระบวนการกักตุนน้ำมัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกักตุนน้ำมันของแผ่นเหล็กต่ำกว่าแผ่นอลูมิเนียม ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยต่างๆ ที่เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมและเหล็ก ซึ่งโดยทั่วไปพบว่าอลูมิเนียมให้ประสิทธิภาพในการกักตุนสารปนเปื้อน โดยเฉพาะน้ำมันและไขมัน หรือสารอินทรีย์ ได้สูงกว่า [17, 18, 23] ด้วยเหตุนี้ ชนิดของวัสดุขั้วอิเล็กโทรดและลักษณะของไอออนและตะกอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงมีผลอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของการกักตุนน้ำมัน ดังนั้นในการทดลองส่วนต่อไปจะใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมซึ่งโดดเด่นในด้านประสิทธิภาพในการกักตุน

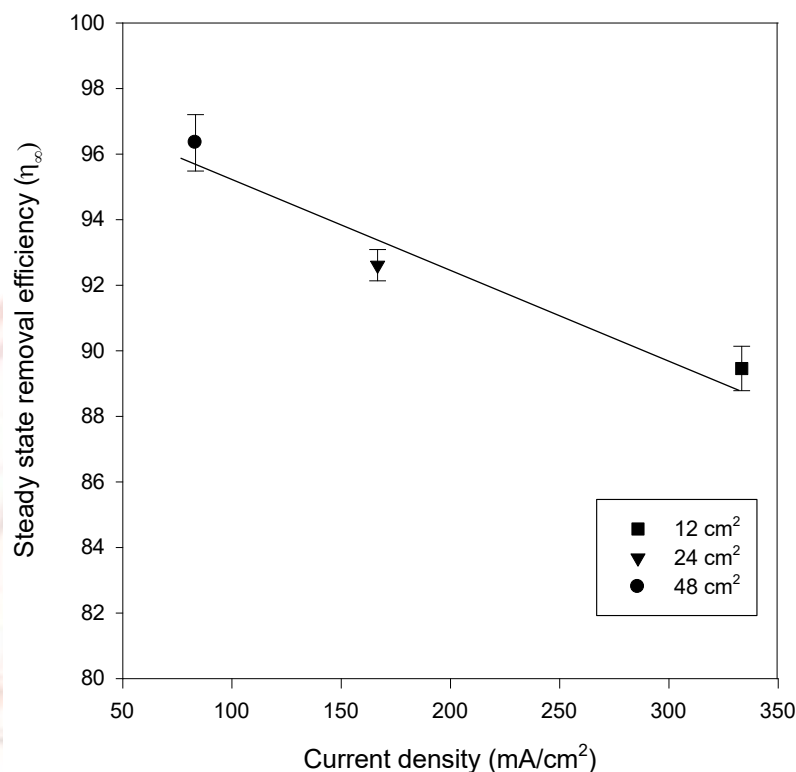
4.1.4 อิทธิพลของพื้นที่ขั้วไฟฟ้า

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกักตุนน้ำมัน โดยทำการทดลองกับขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมที่มีพื้นที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 12 cm^2 , 24 cm^2 และ 48 cm^2 และกระแสไฟฟ้าคงที่ 4 A



รูปที่ 4-5 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่เปลี่ยนไปตามเวลาที่เปลี่ยนไปตาม
ขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้าต่างกัน

ผลการทดลองในรูปที่ 4-5 ชี้ให้เห็นว่า พื้นที่ขั้วไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน เมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าจาก 12cm² เป็น 48cm² พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน ณ เวลาเดียวกันมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน เพื่อให้เห็นผลของพื้นที่ขั้วไฟฟ้าชัดเจนยิ่งขึ้น เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพ ณ สภาวะคงที่ (η_∞) พบว่าที่พื้นที่ขั้วไฟฟ้า 12, 24 และ 48cm² มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 89.46%, 92.61% และ 96.34% ตามลำดับ จากนั้นนำผลการทดลองเรื่องประสิทธิภาพที่สัมพันธ์กับพื้นที่ขั้วไฟฟ้าจากรูปที่ 4-5 มาวิเคราะห์เพิ่มเติมในแง่ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อกระแสไฟฟ้ารวมคงที่ ที่ 4 A ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะแปรผกผันกับพื้นที่ขั้วไฟฟ้า ดังนั้นพื้นที่ขั้วไฟฟ้า 12, 24 , 48 cm² จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 333.33, 166.67, 83.33 mA/cm² ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบกราฟในรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ ณ สภาวะคงที่ (η_{∞}) กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสำหรับพื้นที่ขั้วไฟฟ้าต่างกัน

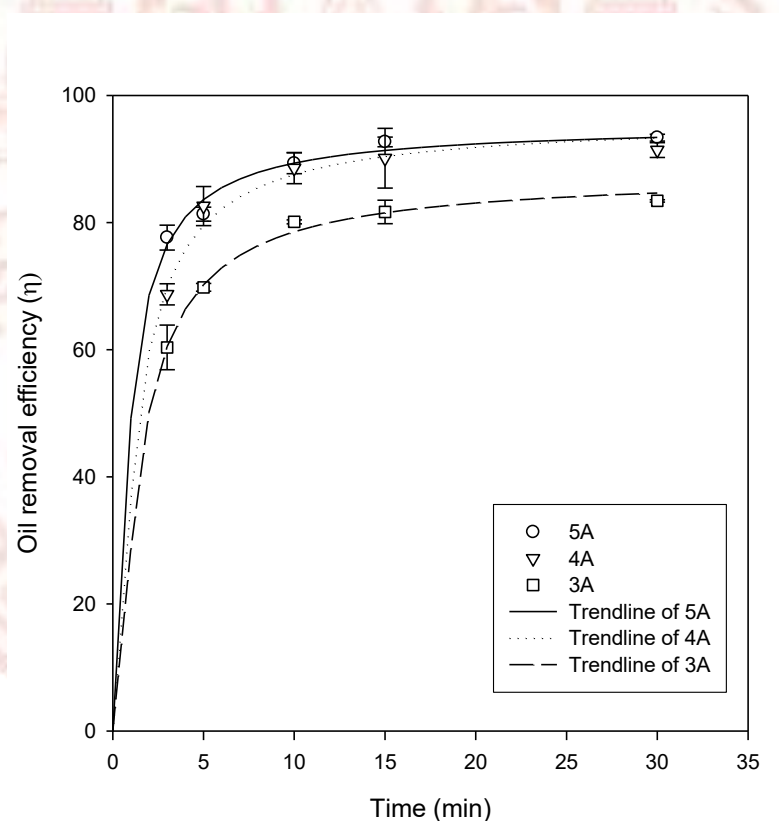
เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์เพิ่มเติมในรูปที่ 4-6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับประสิทธิภาพ ณ สภาวะคงที่ (η_{∞}) สำหรับพื้นที่ขั้วไฟฟ้าต่างกัน พบว่าสำหรับพื้นที่ขั้วไฟฟ้าทุกขนาด ประสิทธิภาพ ณ สภาวะคงที่ (η_{∞}) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ความสัมพันธ์นี้อธิบายได้จากการที่การทดลองควบคุมกระแสไฟฟ้ารวม (I) ให้คงที่ที่ 4 A ทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) แปรผกผันกับพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้า (A) ตามสมการ $J = I/A$ นั่นคือ ขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าจะมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่า ในทางกลับกัน ขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าจะมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำกว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อพิจารณาขั้วไฟฟ้าพื้นที่ 48 cm² ซึ่งมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำสุดในการทดลองนี้ พบว่าให้ประสิทธิภาพ ณ สภาวะคงที่ (η_{∞}) สูงถึงกว่า 96% ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำเสียและขั้วไฟฟ้า มีความสำคัญมากกว่าการลดลงของค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเมื่อพื้นที่ขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

การที่เมื่อใช้พื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าที่มากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นนั้น เนื่องจากการเพิ่มบริเวณพื้นผิวสัมผัสสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และช่วยส่งเสริมการกระจายตัวของไอออนได้ดี

ยิ่งขึ้น ปัจจัยเหล่านี้จึงส่งผลให้สามารถกำจัดน้ำมันออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ [24-26] ที่ศึกษาเกี่ยวกับการบำบัด Produced Water การลดค่า COD ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม รวมถึงการลดปริมาณคลอรีน จากผลการทดลองทั้งหมดนี้ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าพื้นที่ขั้วไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญ ดังนั้นในการศึกษาขั้นต่อไปจึงจะเลือกใช้พื้นที่ขั้วไฟฟ้า 48 cm²

4.1.5 อิทธิพลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

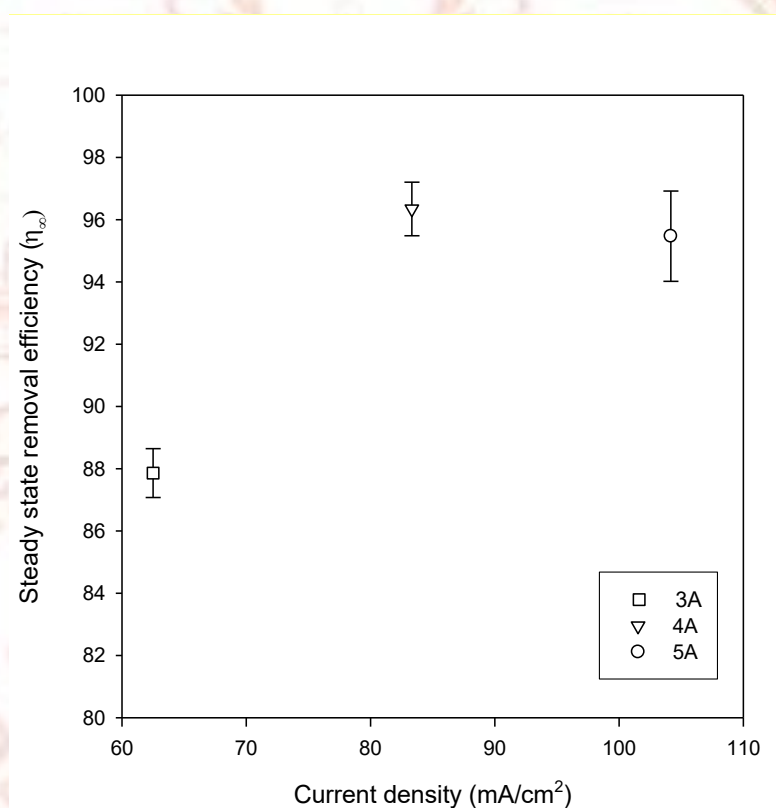
ในส่วนนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน เงื่อนไขการทดลองคือ Produced water ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 2%wt ใช้ขั้วอิเล็กโทรดเป็นแผ่นอลูมิเนียมที่มีพื้นที่ผิวรวม 48 cm² ทำการศึกษาภายใต้ปริมาณกระแสไฟฟ้า 3 ระดับ คือ 3A, 4A และ 5A



รูปที่ 4-7 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 3A, 4A และ 5A

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4-7 พบว่า ที่ทุกระดับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันมีแนวโน้มคล้ายกัน คือ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 15 นาทีแรก ก่อนจะ

เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ อย่างไรก็ตาม ค่าประสิทธิภาพมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือ ยิ่งใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันก็ยิ่งสูงขึ้นตามไปด้วย ที่เวลา 30 นาที กระแสไฟฟ้า 4A และ 5A ให้ประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ที่ 91.4% และ 93.36% ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดไม่ได้แตกต่างกัน หลังจากนั้นนำผลการทดลองจากรูปที่ 4-7 มาคำนวณค่าประสิทธิภาพ ณ สภาวะคงที่ จากแบบจำลองสมการที่ 4.1 จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 3A, 4A และ 5A ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 62.5, 83.33 และ 104.17 mA/cm² ตามลำดับ



รูปที่ 4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสภาวะคงที่กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

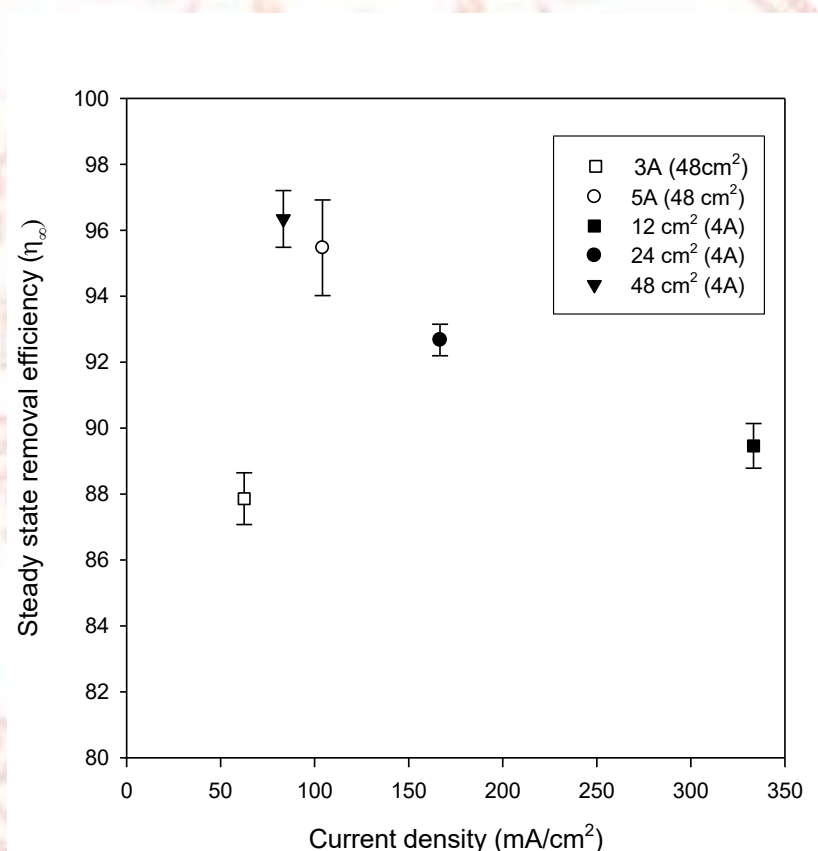
ผลการทดลองในรูปที่ 4-8 แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน โดยเมื่อกำหนดให้พื้นที่ขั้วไฟฟ้าคงที่ ประสิทธิภาพจะเพิ่มสูงขึ้นตามความหนาแน่นกระแส แต่เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้นมากพอค่าประสิทธิภาพการกำจัดจะไม่เพิ่มขึ้นตามและแสดงแนวโน้มลดลงเล็กน้อย แม้ว่าจะอยู่ในช่วงความผันผวนของการทดลอง โดยความสัมพันธ์นี้มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น กล่าวคือ อัตราการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพจะ

ลดลง ณ ความหนาแน่นกระแสที่สูงขึ้น ดังจะเห็นได้ว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้าจาก 3A เป็น 4A ให้ประสิทธิผลสูงกว่าการเพิ่มจาก 4A เป็น 5A พฤติกรรมการเพิ่มขึ้นในอัตราลดถอยนี้ชี้ให้เห็นถึงการมีอยู่ของสถานะที่เหมาะสมที่สุด การเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไม่ได้ส่งผล ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่จะเพิ่มประสิทธิภาพเฉพาะในช่วงที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากหลายสาเหตุประกอบกัน ไม่ว่าจะเป็นประสิทธิภาพถูกจำกัดโดยอัตราการถ่ายโอนมวลมายังพื้นผิวขั้วไฟฟ้า รวมถึงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าส่วนเกินที่ได้สูญเสียไปกับปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์ที่จะส่งผลให้เกิดอนุมูลนิยมไอออนในปริมาณมากเกินความจำเป็น ซึ่งไม่เพียงแต่ทำให้มีไอออนตกค้างในน้ำ [3] แต่ยังอาจลดทอนประสิทธิภาพการบำบัดลงได้อีกด้วย ดังนั้นด้วยข้อจำกัดด้านการถ่ายโอนมวลและผลกระทบจากปฏิกิริยาข้างเคียง การเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเกินกว่าสถานะที่เหมาะสมจึงไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

อิทธิพลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนี้ สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการทางเคมีไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์ เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าก็จะเร็วขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ขั้วอนุมูลนิยมแอโนดละลายตัวได้มากขึ้น ทำให้เกิดปริมาณอนุมูลนิยมไอออนเพิ่มสูงขึ้นซึ่งจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นตะกอนอนุมูลนิยมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่เป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่มีประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคน้ำมันได้มากขึ้น นอกจากนี้ความหนาแน่นกระแสที่สูงยังอาจมีส่วนช่วยในการลดความเสถียรของอิมัลชันน้ำมันในน้ำทำให้การแยกชั้นเกิดขึ้นได้ง่าย ด้วยปัจจัยสนับสนุนเหล่านี้การใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นจึงนำไปสู่การปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของการกำจัดน้ำมัน [20, 21, 24] อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในทางปฏิบัติ ประเด็นความคุ้มค่าด้านพลังงาน มีความสำคัญจะเห็นได้ว่าการเพิ่มกระแสจาก 4A เป็น 5A ให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ต้องแลกมากับการใช้พลังงานที่สูงขึ้นมาก ด้วยข้อจำกัดที่กล่าวมาข้างต้น การเลือกสถานะการทำงานจึงต้องหาจุดสมดุลระหว่างประสิทธิภาพที่ยอมรับได้กับต้นทุนด้านพลังงาน

หากนำการวิเคราะห์ระหว่างอิทธิพลของพื้นที่ขั้วไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพ ณ สถานะคงที่ (η_{∞}) จากการศึกษาในหัวข้อ 4.1.4 (รูปที่ 4-6) ซึ่งดำเนินการภายใต้กระแสไฟฟ้ารวมคงที่ 4A ในขณะที่การศึกษาในหัวข้อ 4.1.5 (รูปที่ 4-8) ซึ่งดำเนินการโดยใช้พื้นที่ขั้วไฟฟ้าคงที่และปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้ารวมเพื่อให้ได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาผลจากทั้งสองส่วนนี้ร่วมกันจากรูปที่ 4-9 จะเห็นว่าแม้ผลกระทบของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อ η_{∞} ในรูปที่ 4-6 และ 4-8 จะดูมีแนวโน้มตรงกันข้าม แต่แท้จริงแล้วเป็นการสะท้อน

บทบาทของแต่ละปัจจัยภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่ต่างกัน รูปที่ 4-6 เน้นความสำคัญของพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า เมื่อปริมาณกระแสมีจำกัด ในขณะที่รูปที่ 4-8 เน้นความสำคัญของความหนาแน่นกระแสที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการเลือกสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุด จึงจำเป็นต้องพิจารณาทั้งสองปัจจัยควบคู่กัน ข้อค้นพบนี้จึงให้แนวทางที่สำคัญในการออกแบบสภาวะที่เหมาะสมที่สุดว่า ควรเริ่มต้นจากการจัดให้มีพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่มากเพียงพอ เพื่อไม่ให้เป็นการจำกัด จากนั้นจึงปรับเพิ่มความหนาแน่นของกระแสเพื่อเพิ่มอัตราเร็วและประสิทธิภาพโดยรวม โดยต้องคำนึงถึงความสมดุลด้านพลังงานและต้นทุนควบคู่กันไป

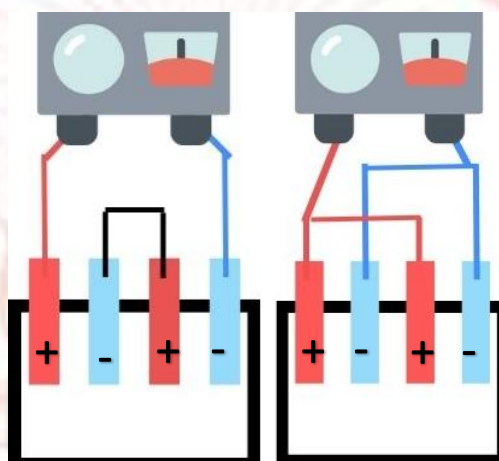


รูปที่ 4-9 กราฟแสดงอิทธิพลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพ ณ สภาวะคงที่ (η_∞)

เปรียบเทียบระหว่างเงื่อนไขกระแสคงที่ (จุดสีดำ) กับ เงื่อนไขพื้นที่คงที่ (จุดสีขาว)

4.1.6 อิทธิพลของรูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า

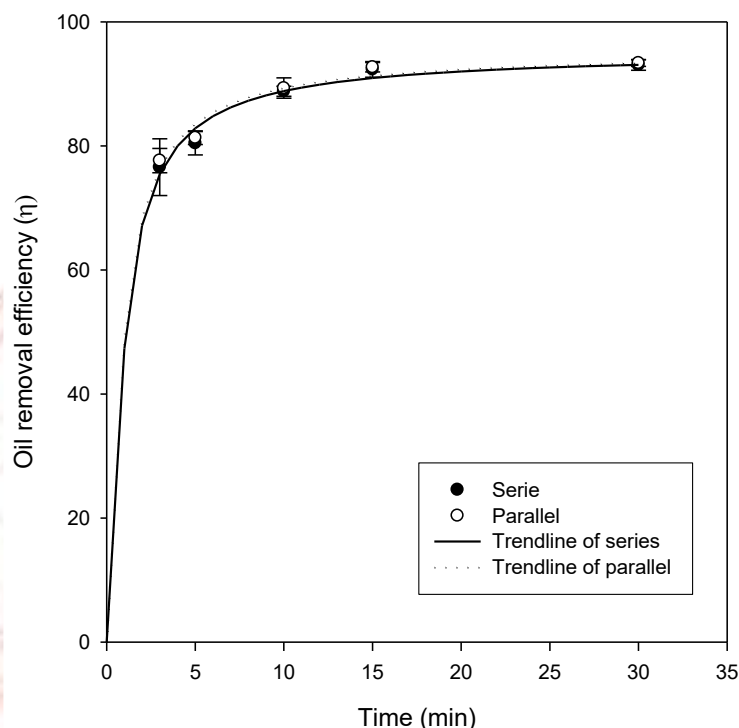
การศึกษานี้เปรียบเทียบผลของรูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า 2 รูปแบบ ตามรูปที่ 4-10 คือ แบบอนุกรม (series) และ แบบขนาน (parallel) โดยทั้ง 2 แบบ จะเป็นขั้วไฟฟ้าชนิด monopolar โดยจะควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้คงที่ที่ 104.17 mA/cm^2



(ก)

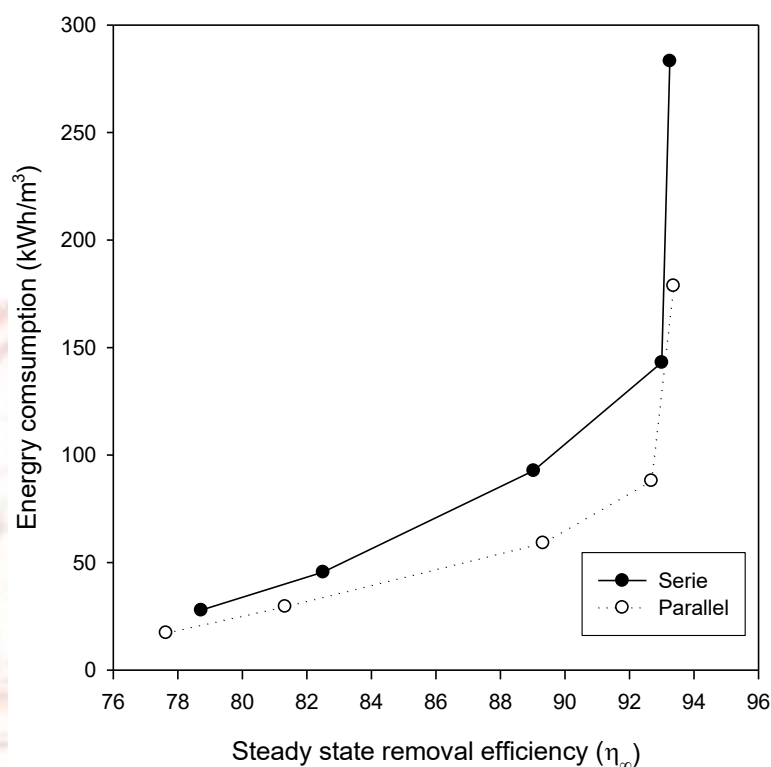
(ข)

รูปที่ 4-10 รูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า ก) แบบอนุกรม ข) แบบขนาน



รูปที่ 4-11 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่เปลี่ยนไปตามเวลาของการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า
แบบอนุกรมกับแบบขนาน

การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าทั้งสองแบบให้ผลลัพธ์ด้านประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในรูปที่ 4-11 ซึ่งแสดงเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพตามเวลาทั้งสองกรณีเข้าสู่สภาวะคงที่ใช้เวลาประมาณ 15 นาที โดยค่าประสิทธิภาพสูงสุด ณ สภาวะคงที่ (η_{∞}) สำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรมคือ 95.26% และแบบขนานคือ 93.47% ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน บ่งชี้ว่ารูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นแบบอนุกรมหรือแบบขนานไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการกำจัดน้ำมัน การศึกษาจึงมุ่งเน้นไปที่ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้กับประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมัน โดยนำข้อมูลจากการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 104.17 mA/cm² จากเงื่อนไขในรูปที่ 4-11 มาวิเคราะห์เพิ่มเติมและแสดงผลในรูปที่ 4-12 มาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่เวลา 30 นาทีกับค่าประสิทธิภาพสูงสุด ณ สภาวะคงที่ (η_{∞}) ได้ดังนี้

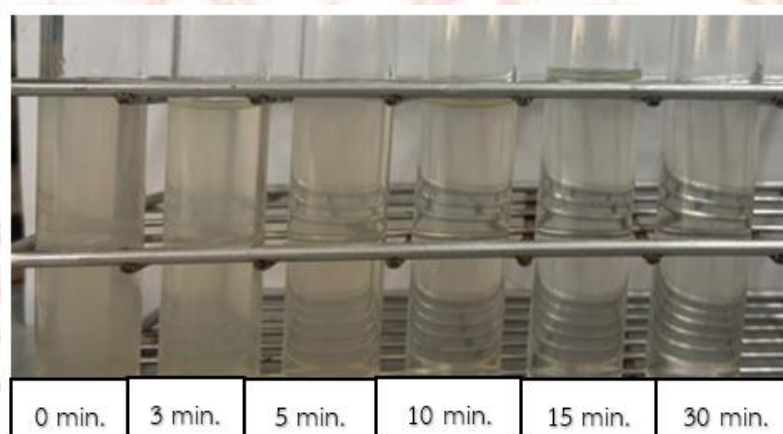


รูปที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน
ที่สภาวะคงที่ (η_{∞}) กรณีจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรมและแบบขนาน

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ใช้และประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน จากข้อมูลการทดลองที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 104.17 mA/cm^2 พบว่าการเพิ่มพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน อย่างไรก็ตามการเพิ่มประสิทธิภาพนี้ส่งผลให้มีการใช้พลังงานที่สูงขึ้น ดังนั้นการเลือกสภาวะดำเนินการจึงต้องพิจารณาความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพที่ต้องการและต้นทุนด้านพลังงาน จากผลการทดลองนี้ การจัดเรียงแบบขนานให้ประสิทธิภาพเทียบเท่ากับแบบอนุกรมแต่ใช้พลังงานน้อยกว่า จึงเป็นทางเลือกที่ดีในด้านประสิทธิภาพด้านพลังงาน [6]

4.1.7 การกำจัดน้ำมันออกจาก Produced Water จากแหล่งขุดเจาะ

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันศักยภาพของกระบวนการไฟฟ้าเคมีภายใต้สภาวะที่คัดเลือกจากการศึกษาเบื้องต้น ในการกำจัดน้ำมันจากน้ำ Produced Water จากแหล่งผลิตจริง จึงได้ดำเนินการทดสอบในระบบแบบกะ โดยใช้น้ำตัวอย่างจากแหล่งผลิตปิโตรเลียม ความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้น 1.8%wt และใช้สภาวะการทดลองที่ดีที่สุดจากการศึกษาก่อนหน้านี้ ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม ซึ่งมีพื้นที่ 48 cm^2 , การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน และกระแสไฟฟ้า 5 A เทียบเท่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 104.17 mA/cm^2

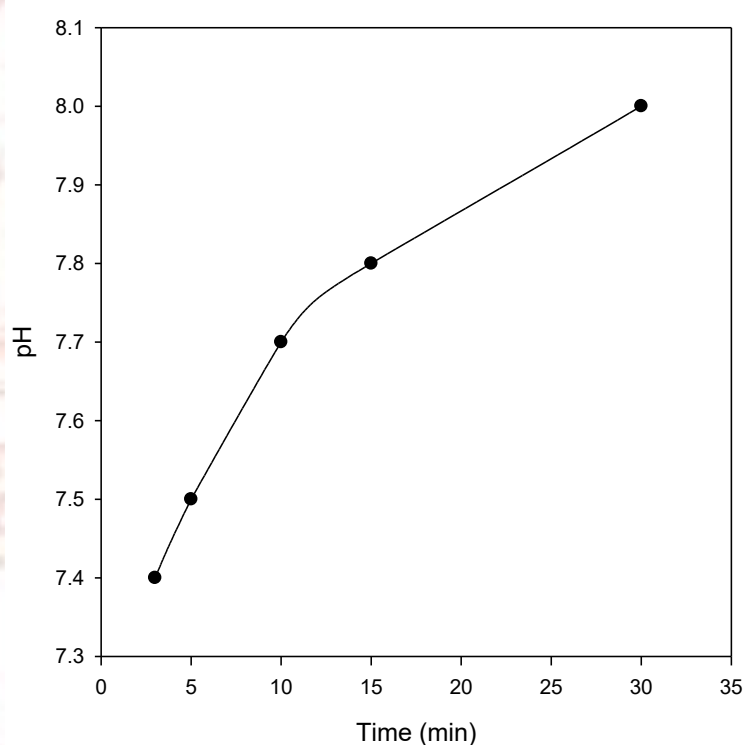


รูปที่ 4-13 ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนแปลงสีของ Produced water จากแหล่งขุดเจาะที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ที่เวลาต่างๆ

ผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพในรูปที่ 4-13 เป็นการแสดงผลของการทำงานของกระบวนการเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่สามารถแยกน้ำมันและสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำเสียได้ โดยสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงความขุ่นและความใสของน้ำรวมถึงการก่อตัวและการแยกตัวของตะกอนของเสียตามระยะเวลาการบำบัดซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกันกับรูปที่ 4-1 ซึ่งทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าน้ำ Produced Water จากแหล่งขุดเจาะหลังผ่านการบำบัดมีปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นน้อยกว่ากรณีของน้ำเสียสังเคราะห์ (รูปที่ 4-1) ความแตกต่างหลังการบำบัดนี้เกิดจากน้ำจากแหล่งขุดเจาะจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่หลากหลายและซับซ้อนกว่ามาก เช่น ปริมาณอิเล็กโทรไลต์ โดยค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) ในน้ำเสียสังเคราะห์วัดได้ $2130 \mu\text{S}$ ขณะที่ใน Produced Water จากแหล่งขุดเจาะวัดได้ประมาณ $534.5 \mu\text{S}$ นอกจากนี้ ชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์และแร่ธาตุต่างๆ ที่ปนเปื้อนมาตามธรรมชาติก็มีความแตกต่างกัน ด้วยองค์ประกอบที่หลากหลายเหล่านี้จึงส่งผลให้ลักษณะปรากฏของน้ำหลังการบำบัดอาจแตกต่างกันได้

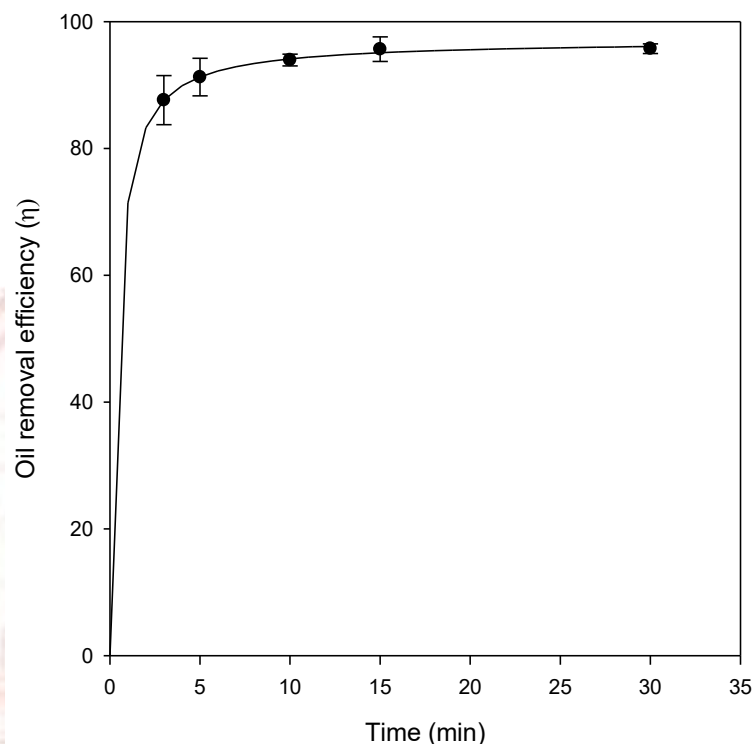
ตารางที่ 4-2 คุณสมบัติของ Produced water จากแหล่งขุดเจาะก่อนและหลังบำบัด

Parameter	Before	After
Density (g/ml)	1.018	1.014
Turbidity (NTU)	118	50.8
Conductivity (μS)	534.5	529



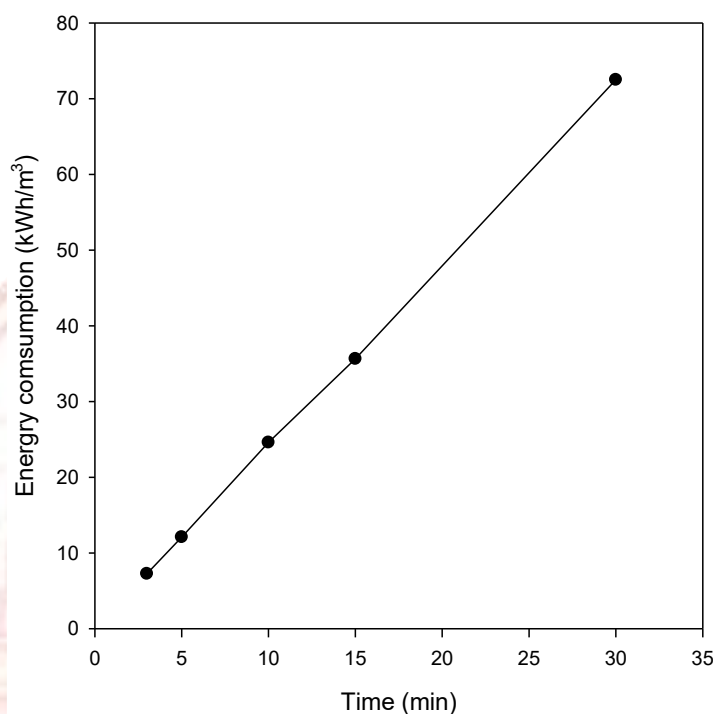
รูปที่ 4-14 กราฟกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่า pH ตามเวลา

ข้อมูลเชิงปริมาณจากตารางที่ 4-2 แสดงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยค่าความขุ่น (Turbidity) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 118 เหลือเพียง 50.8 NTU ขณะเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในรูปที่ 4-14 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและชะลอตัวลง มีแนวโน้มที่สอดคล้องโดยตรงกับกราฟประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันตามรูปที่ 4-15 ส่วนลักษณะแนวโน้ม pH เปลี่ยนไปเป็นไปตามกลไกของกระบวนการไฟฟ้าเคมี อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด ทำให้เกิดการสะสมของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในระบบ ส่งผลให้สารละลายมีสถานะเป็นเบสสูงขึ้นสถานะเบสจะส่งผลต่อปฏิกิริยาโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ก่อให้เกิดตะกอนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ซึ่งทำหน้าที่ดักจับน้ำมันและสารปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4-15 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันกับเวลา
ในน้ำ Produced Water จากแหล่งชุดเจาะ

ผลการกำจัดน้ำมันในน้ำ Produced Water จากแหล่งชุดเจาะจากรูปที่ 4-15 พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันในน้ำ Produced Water จากแหล่งชุดเจาะ มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับการทดลองในน้ำสังเคราะห์ โดยประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามเวลาและเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่เวลาประมาณ 15 นาทีเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่ได้จากน้ำจากแหล่งชุดเจาะอยู่ที่ประมาณ 96.45% ที่เวลา 30 นาทีซึ่งใกล้เคียงกับกรณีสังเคราะห์ภายใต้สภาวะเดียวกันที่มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 93.36% ซึ่งความแตกต่างนี้อาจมีสาเหตุมาจากองค์ประกอบทางเคมีที่หลากหลายในน้ำ Produced Water จากแหล่งชุดเจาะ การที่ประสิทธิภาพในน้ำจริงแตกต่างจากน้ำสังเคราะห์ เป็นสิ่งที่พบได้ในการศึกษาอื่น ๆ เนื่องจากองค์ประกอบที่ซับซ้อนในน้ำจริง เช่น ปริมาณอิเล็กโทรไลต์, สารอินทรีย์ หรือลักษณะของอิมัลชัน สามารถส่งผลกระทบต่อกระบวนการได้ [27, 28] ผลการทดลองนี้เป็นการยืนยันศักยภาพของกระบวนการไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำ Produced Water จากแหล่งผลิตจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4-16 กราฟแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตามเวลา

การวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าตามรูปที่ 4-16 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ใช้และเวลา พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นตรงตามระยะเวลา ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้กระแสไฟฟ้าคงที่และความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในช่วง 5.7–5.9 V ตลอดการทดลอง ข้อมูลนี้มีความสำคัญต่อการประเมินต้นทุนการดำเนินงาน โดยสามารถนำไปคำนวณการใช้พลังงานจำเพาะเพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าของกระบวนการสำหรับการประยุกต์ใช้ในระดับที่ใหญ่มากขึ้น

4.2 การสร้างสมการความสัมพันธ์เพื่อทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมัน

ในส่วนนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ใช้ในการทดลองกับประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันโดยได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะใช้สมการความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุคูณ (multiple regression) เพื่อทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันโดยมีรูปแบบสมการดังสมการที่ 4.2

$$y = a_0 + (a_1X_1) + (a_2X_2) + (a_3X_3) \quad (4.2)$$

โดยที่ y คือตัวแปรตาม (dependent variable) ที่ต้องการทำนาย X_1 , X_2 และ X_3 คือตัวแปรอิสระ (independent variables) ที่ส่งผลต่อค่า y และ a_0 , a_1 , a_2 , a_3 คือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficients) ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อบ่งบอกขนาดและทิศทางความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระแต่ละตัวกับตัวแปรตาม

ในการศึกษานี้ ตัวแปรตามที่เราสนใจทำนายคือ ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน (%) และตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทำนาย ได้แก่ $\frac{1}{\text{เวลา}}$ (min^{-1}), $\frac{1}{\text{พื้นที่}}$ (cm^{-2}) และปริมาณกระแสไฟฟ้า (A) ดังนั้นจึงได้นำรูปแบบสมการทั่วไปในสมการที่ 2 มาปรับใช้ให้เฉพาะเจาะจงกับการทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันดังแสดงในสมการที่ 4.3

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน } (\eta) = a_0 + (a_1 \times \frac{1}{\text{Time}}) + (a_2 \times \frac{1}{\text{Area}}) + (a_3 \times \text{Current}) \quad (4.3)$$

ผลการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ (a_0 , a_1 , a_2 , a_3) ของตัวแปรต่างๆ และค่าสถิติสำคัญที่เกี่ยวข้อง ได้สรุปและแสดงไว้ในตารางที่ 4-2 โดยแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ สถิติการถดถอย (Regression Statistics), การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients) ทั้งนี้ ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์นำมาจากข้อมูลการทดลองในหัวข้อ 4.1.1-4.1.6

ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณเพื่อทำนายประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน

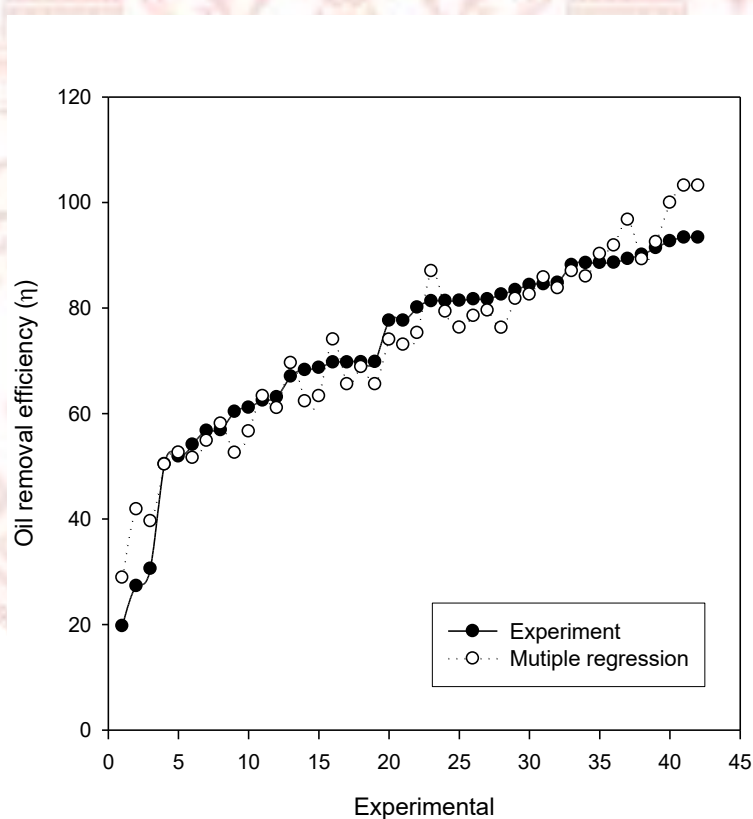
สถิติการถดถอย (Regression Statistics)	
Multiple R	0.96
R Square	0.92
Adjusted R Square	0.91
Standard Error	5.23
Observations	41
การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)	
Source	df
Regression	3
Residual	37
Total	40
สัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients)	
ตัวแปร	Coefficients
a_0	55.07
a_1	-106.93
a_2	-97.31
a_3	10.72

จากข้อมูลในตารางที่ 4-3 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันได้ดีมาก โดยดูจากค่า R Square เท่ากับ 0.92 ซึ่งหมายความว่าตัวแปรอิสระที่ใช้ร่วมกันอธิบายการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพได้ประมาณ 92%

จากค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากส่วนสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficients) ในตารางที่ 4-3 สามารถเขียนเป็นสมการทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันตามสมการที่ 4.4 ดังนี้

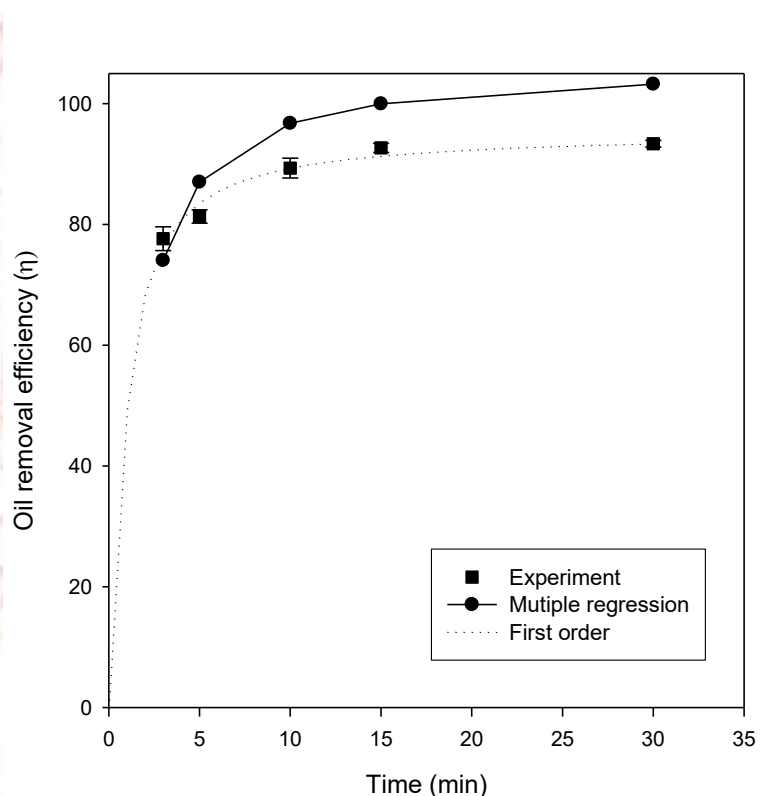
$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน } (\eta) = 55.07 + (-106.93 \times \frac{1}{\text{Time}}) + (-97.31 \times \frac{1}{\text{Area}}) + (10.72 \times \text{Current}) \quad (4.4)$$

การเปรียบเทียบในกราฟรูปที่ 4-17 แกน x จะเป็นผลการทดลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมด 41 การทดลอง โดยจะเป็นการศึกษาจากปัจจัยของพื้นที่ กระแสไฟฟ้า รวมถึงเวลา ที่ได้แสดงในรูปที่ 4-2, 4-5 และ 4-7 ก่อนหน้านี้ ซึ่งเป็นกรณีที่ใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นอลูมิเนียม และความเข้มข้นของน้ำมันเริ่มต้น 2%wt ส่วนจุดสีขาวในกราฟรูปที่ 4-17 จะเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 4-4 โดยรายละเอียดข้อมูลแต่ละการทดลองจะแสดงในตารางที่ ข-15 ในภาคผนวก ข ผลวิเคราะห์จากรูปที่ 4-17 พบว่า แบบจำลองตามสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณสามารถทำนายค่าประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันได้ใกล้เคียงกับผลที่วัดได้จากการทดลองจริง โดยจะเห็นได้ว่าชุดข้อมูลทั้งสอง มีแนวโน้มเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกันตลอดช่วงการทดลอง ผลลัพธ์นี้เป็นการยืนยันแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความน่าเชื่อถือ ซึ่งสอดคล้องกับค่า R-Square ที่มีค่าสูงถึง 0.92



รูปที่ 4-17 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน ระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองตามสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

เมื่อนำผลการทดลองจากหัวข้อที่ 4.1.6 ซึ่งทำการทดลองที่สภาวะกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 A และพื้นที่ขั้วไฟฟ้า 48 cm² โดยปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการดำเนินการ มาทำการทดสอบความสามารถในการทำนายของสมการที่ 4.4 ผลการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันที่ทำนายได้จากสมการที่ 4.4 ที่สภาวะการทดลองดังกล่าว และนำมาเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองจริง ดังรูปที่ 4-18



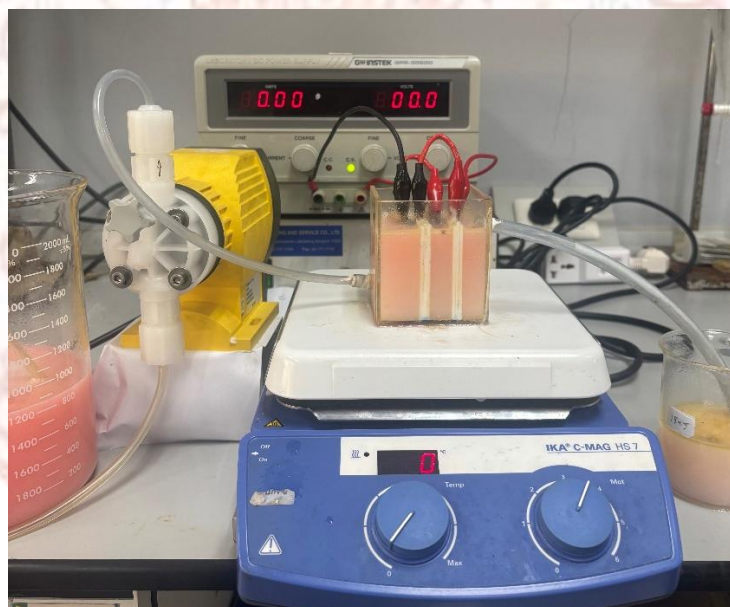
รูปที่ 4-18 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่ได้การทดลองหัวข้อ 4.1.6 เปรียบเทียบกับแบบจำลองตามสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

ผลการเปรียบเทียบจากรูปที่ 4-18 จะเห็นว่า ค่าประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันจากสมการค่อนข้างใกล้เคียงระดับหนึ่งกับค่าที่วัดได้จริงในการทดลอง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (first-order model) โดยทั่วไปมักใช้อธิบายระบบที่อัตราการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับปัจจัยหลักเพียงปัจจัยเดียวและอาจแสดงแนวโน้มอย่างง่ายในช่วงสภาวะการทดลองนั้นๆ ส่วนแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถอธิบายความซับซ้อนของระบบได้ครอบคลุมกว่า เนื่องจากรวมอิทธิพลของหลายปัจจัยมาพิจารณาพร้อมกัน แม้ว่าแบบจำลองอันดับหนึ่งอาจช่วยอธิบายพฤติกรรมเฉพาะส่วนได้ดีในบางกรณี แต่สำหรับกระบวนการที่ซับซ้อนและมี

หลายตัวแปรส่งผลกระทบร่วมกันเช่นนี้ แบบจำลองเชิงเส้นพหุคูณย่อมให้ภาพรวมที่ครอบคลุมกว่าสามารถใช้เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการประมาณแนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันภายใต้สภาวะต่างๆ ที่ศึกษา และช่วยให้เข้าใจถึงอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีต่อกระบวนการได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะเป็นแนวทางในการปรับปรุงหรือออกแบบสภาวะการทำงานที่เหมาะสมต่อไป

4.3 การกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วยวิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง

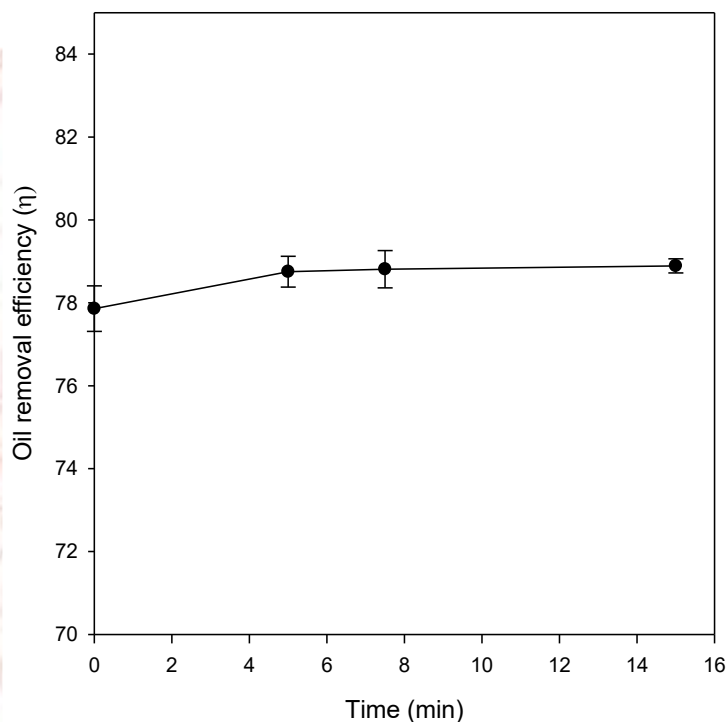
การออกแบบอุปกรณ์ในการทดลองเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง จะอ้างอิงมาผลศึกษาจากการทดลองเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกะเพื่อใช้กำหนดสภาวะการทำงาน ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมจัดเรียงแบบ monopolar แบบขนาน มีพื้นที่รวม 48 cm^2 และทำงานภายใต้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 104.17 mA/cm^2 โดยติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 4-19 สำหรับอัตราการป้อนสารจะปรับให้มี Hydraulic Retention Time (HRT) กำหนดไว้ที่ 15 นาที เนื่องจากพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อเวลาทำปฏิกิริยาเข้าใกล้ 15 นาที ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลานี้เป็น HRT สำหรับการทดลองแบบต่อเนื่อง สอดคล้องกับแนวทางที่มีการศึกษาในงานวิจัยอื่น [29, 30]



รูปที่ 4-19 อุปกรณ์การทดลองเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง

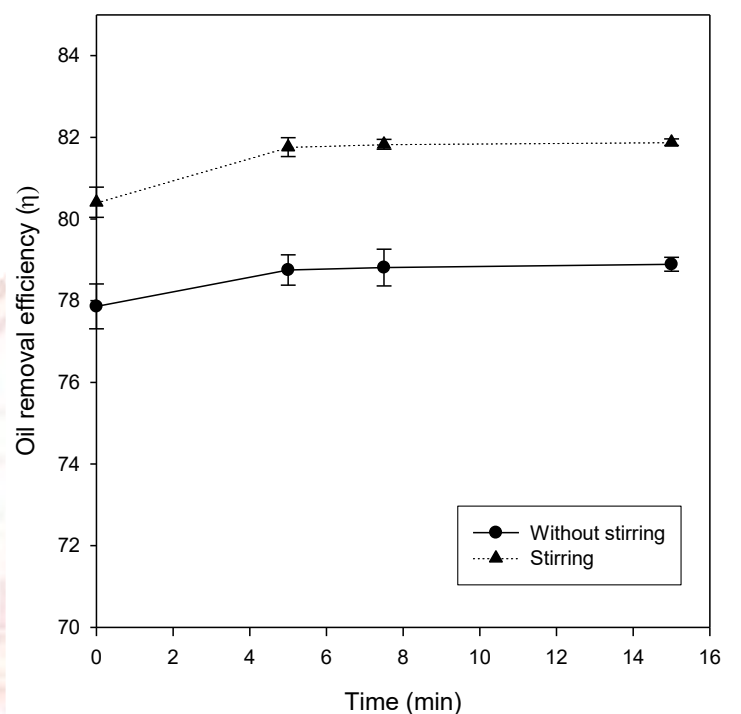
4.3.1 การทดสอบด้วย Produced water สังเคราะห์

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันโดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง ใช้น้ำ Produced Water สังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้น 2%wt



รูปที่ 4-20 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่เปลี่ยนไปตามเวลาด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง

ผลการทดลองใน รูปที่ 4-20 ชี้ให้เห็นว่า ภายใต้สภาวะดังกล่าว ระบบสามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง และให้ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันสูงสุดที่สภาวะคงที่ โดยมีค่าประมาณ 78% ตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ เมื่อนำผลการทดลองนี้ไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพที่ได้จากระบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกะ ซึ่งดำเนินการภายใต้สภาวะที่เทียบเคียงกันที่การทดลองในหัวข้อ 4.1.5 และ 4.1.6 พบว่าระบบกะสามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน ณ สภาวะคงที่ได้ถึงประมาณ 93.36% ดังนั้นประสิทธิภาพที่วัดได้จากระบบต่อเนื่องมีค่าต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ความแตกต่างนี้อาจมีสาเหตุหลักมาจากข้อจำกัดด้านการถ่ายเทมวลในระบบไหลต่อเนื่องเมื่อเทียบกับระบบกะ [31] เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพจึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมโดยทำการทดลองเพิ่มเติมโดยใช้ทำการกวนผสมภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ที่ความเร็ว 750 rpm บริเวณก่อนไหลผ่านขั้วไฟฟ้าดังแสดงในรูป 3-4

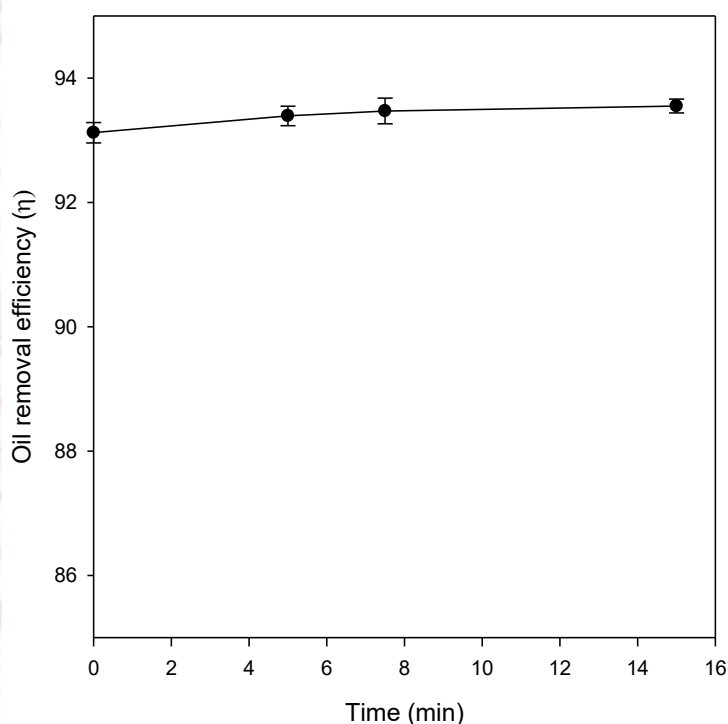


รูปที่ 4-21 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่เปลี่ยนไปตามเวลา ด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีและไม่มีการกวนผสมก่อนเข้าขั้วไฟฟ้าเคมี

ผลการทดลองจากรูปที่ 4-21 พบว่าการกวนผสมส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันในระบบต่อเนื่องเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 81.9% ในขณะที่ระบบที่ไม่มีการกวนมีประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 78% สามารถอธิบายได้ว่าการกวนช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลของอนุภาคน้ำมันไปยังพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้า และช่วยให้ตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นกระจายตัวได้ทั่วทั้งปริมาตรของเหลว เพิ่มโอกาสในการสัมผัสและดักจับอนุภาคน้ำมันได้ดียิ่งขึ้น [30,31] อย่างไรก็ตามแม้ว่าการกวนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่องขึ้นมาอยู่ที่ประมาณ 82% แต่ก็ยังคงต่ำกว่าประสิทธิภาพที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกะภายใต้สภาวะที่เทียบเคียงกัน เนื่องจากในระบบแบบกะ น้ำทั้งหมดมีเวลาสัมผัสกับขั้วไฟฟ้าและตะกอนเป็นระยะเวลาสั้นและสม่ำเสมอ ทำให้การกำจัดน้ำมันสมบูรณ์กว่า ในขณะที่ระบบต่อเนื่องอาจมีเวลาพักของน้ำที่สั้นกว่าหรือมีการไหลที่ไม่ทั่วถึง ทำให้น้ำบางส่วนไม่ได้รับการบำบัดอย่างเพียงพอ

4.3.2 การทดสอบด้วย Produced water จากแหล่งขุดเจาะ

ส่วนนี้จะดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่องด้วยน้ำ Produced Water จากแหล่งขุดเจาะ ซึ่งมีความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้น 1.8%wt โดยใช้สภาวะการทดลองเดียวกับหัวข้อ 4.2.1 มีการกวนผสมก่อนเข้าเซลล์ไฟฟ้า ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4-19



รูปที่ 4-22 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันจาก Produced Water จากแหล่งขุดเจาะที่เปลี่ยนไปตามเวลา ด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4-22 ได้ทดลองประสิทธิภาพเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่องกับน้ำ Produced Water จากแหล่งขุดเจาะ โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีการกวนและไม่มีการกวนพบว่าในกรณีที่ไม่มีการกวนมีประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันสูงสุดอยู่ที่ 90.8% จะเห็นได้ว่าการใช้การกวนส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 93% ผลการทดลองนี้ยืนยันว่าการกวนเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเมื่อใช้น้ำจากแหล่งขุดเจาะ ซึ่งเกิดจากการส่งเสริมการถ่ายเทมวลและการกระจายตัวของตะกอนเพื่อดักจับน้ำมันได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่องที่มีการกวน กับประสิทธิภาพที่ได้จากระบบแบบกะสำหรับน้ำจากแหล่งขุดเจาะภายใต้สภาวะเดียวกัน พบว่าประสิทธิภาพที่ได้มีความใกล้เคียง

กันมากขึ้น แม้จะยังคงต่ำกว่าเล็กน้อย ความแตกต่างดังกล่าวเป็นผลมาจากลักษณะในระบบแบบกะที่น้ำภายในระบบมีโอกาสสัมผัสกับขั้วไฟฟ้าส่งผลให้กระบวนการกำจัดน้ำมันดำเนินไปอย่างสมบูรณ์มากกว่าแบบต่อเนื่อง แต่ก็แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่องในการบำบัดน้ำ Produced Water จากแหล่งขุดเจาะได้อย่างมีประสิทธิภาพ [29, 30, 31]

ในบทนี้นำเสนอผลการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับประสิทธิภาพของกระบวนการเซลล์ไฟฟ้าเคมีในการกำจัดน้ำมันจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม ทั้งในระบบแบบกะและแบบต่อเนื่อง โดยการทดลองในระบบแบบกะพบว่าขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเหล็กอย่างชัดเจน และระยะเวลาดำเนินการที่เหมาะสมคือประมาณ 15 นาที ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง ทั้งนี้ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันในช่วง 2-4%wt ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพคือ พื้นที่ขั้วไฟฟ้า และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ซึ่งต้องพิจารณาให้เกิดความสมดุลกัน โดยการเพิ่มพื้นที่ขั้วไฟฟ้าให้เพียงพอเป็นปัจจัยหลัก ขณะที่การเพิ่มความหนาแน่นกระแสภายใต้พื้นที่คงที่เป็นปัจจัยเสริมในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ส่วนการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรมและขนานให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสต่อหน่วยเซลล์ให้เท่ากันโดยที่การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนานจะประหยัดพลังงานมากกว่า และกระบวนการยังคงให้ประสิทธิภาพสูงเมื่อทดสอบกับน้ำจากแหล่งขุดเจาะจริง นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ ซึ่งสามารถทำนายประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันจากตัวแปรดำเนินการหลักได้ดี ($R^2 > 0.92$) ส่วนการศึกษาในระบบแบบต่อเนื่อง ซึ่งออกแบบตามสภาวะที่ได้จากระบบแบบกะ ผลการทดลองเบื้องต้นแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบแม้จะมีลักษณะประสิทธิภาพที่แตกต่างออกไปเมื่อเทียบกับระบบแบบกะ โดยรวมแล้ว การศึกษาในบทนี้ได้ระบุสภาวะสำคัญและพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้และปรับปรุงเทคโนโลยีนี้สำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในระดับอุตสาหกรรม

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการเซลล์ไฟฟ้าเคมีในการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำเสียจากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม ตลอดจนศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบทั้งในรูปแบบกะและแบบต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังมุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการ และทดสอบระบบกับน้ำเสียจากแหล่งขุดเจาะเพื่อประเมินศักยภาพในการประยุกต์ใช้งานจริง บทนี้จะเป็นการสรุปผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 โดยรวบรวมประเด็นสำคัญที่ค้นพบอภิปรายผลลัพธ์ที่ได้และให้ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

5.1 ผลการศึกษาในระบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกะ

การศึกษาเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกะได้ว่า วัสดุขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอะลูมิเนียมให้ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันสูงกว่าเหล็กอย่างชัดเจน ระยะเวลาในการกำจัดมีผลอย่างมากในช่วงแรก โดยจะกำจัดน้ำมันส่วนใหญ่ออกไปอย่างรวดเร็วในช่วง 15 นาทีแรก จากนั้นประสิทธิภาพจะค่อยๆ คงที่ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First-Order Kinetics Model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของระบบที่ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันจะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนเข้าใกล้ค่าสูงสุดค่าหนึ่ง เมื่อกระบวนการดำเนินไปถึงสภาวะคงที่ ส่วนของปัจจัยการทำงาน พบว่าการเพิ่มพื้นที่ขั้วไฟฟ้าให้ใหญ่ขึ้น หรือการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้น ล้วนส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันดีขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันไม่ได้ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพอย่างมีนัยสำคัญ สุดท้ายคือ รูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า ซึ่งทั้งแบบอนุกรมและแบบขนานให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันที่ไม่แตกต่างกัน แต่การจัดเรียงแบบขนานมีข้อดีคือช่วยประหยัดพลังงานได้มากกว่า โดยรวมแล้วเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกะนี้สามารถกำจัดน้ำมันจากน้ำเสียจริงจากแหล่งขุดเจาะได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่า 96% แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการใช้งานได้เป็นอย่างดี

5.2 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมัน

การศึกษานี้ได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมัน โดยใช้สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (multiple linear regression) ซึ่งพิจารณาจากตัวแปรอิสระ ได้แก่ เวลา, พื้นที่ขั้วไฟฟ้า, และกระแสไฟฟ้า ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้มีความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันได้เป็นอย่างดี โดยมีค่า R Square ประมาณ 0.92 ทั้งนี้ตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันมากที่สุดคือเวลา ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมจลนพลศาสตร์ของกระบวนการที่ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อเวลาผ่านไป

5.3 ผลการศึกษาในระบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง

ผลการศึกษาในระบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง ซึ่งได้รับการออกแบบตามสภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากระบบแบบกะ พบว่า เมื่อทดสอบกับน้ำเสียสังเคราะห์ ระบบให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันสูงสุดประมาณ 78% และเมื่อเพิ่มการกวนผสมก่อนที่น้ำจะไหลเข้าสู่ขั้วไฟฟ้า พบว่า ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 82% อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพนี้ยังคงต่ำกว่าที่ได้จากระบบแบบกะภายใต้สภาวะเทียบเคียงกัน ในส่วนของการทดสอบกับน้ำเสียจริงจากแหล่งขุดเจาะ พบว่าประสิทธิภาพอยู่ประมาณ 93% ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับประสิทธิภาพของระบบแบบกะเมื่อทดสอบกับน้ำเสียจริงเช่นกัน ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าการกวนเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบต่อเนื่อง

5.4 ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยนี้ มีข้อเสนอแนะให้ดำเนินการนำสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดที่ค้นพบไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาระดับนำร่อง (pilot scale) เพื่อประเมินประสิทธิภาพและปัญหาที่อาจเกิดขึ้นก่อนขยายผลสู่ระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้ควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมในระยะยาวเพื่อครอบคลุมประเด็นสำคัญต่างๆ ได้แก่ การศึกษาการเพิ่มลดระยะห่างของขั้วไฟฟ้า การประเมินอายุการใช้งานและความทนทานของขั้วไฟฟ้า การประเมินประสิทธิภาพการกวนในระบบต่อเนื่อง การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์อย่างละเอียดสำหรับการประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ รวมถึงการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ครอบคลุมในหลายๆ ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพบำบัด เพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น สุดท้ายนี้ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัด

ร่วมกับกระบวนการอื่น เช่น การใช้แรงโน้มถ่วงหรือตัวกลางดูดซับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนที่ซับซ้อนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้ได้มากที่สุด



บรรณานุกรม

- [1] ณชภา ชูจันทร์ และปณณธร ตุลยวณิชย์. (2561). การทำลายอิมัลชันของน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวกลางแบบเส้นใย. ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [2] ณัฐฐา เทียนบุตร. (2564). การทำลายความเป็นอิมัลชันของน้ำมันในน้ำที่ได้จากระบวนการผลิตปิโตรเลียมโดยใช้ตัวกลางแบบเส้นใย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [3] Ezechi, E. H., Isa, M., Muda, K., & Kutty, S. R. (2020). A comparative evaluation of two electrode systems on continuous electrocoagulation of boron from produced water and mass transfer resistance. *Journal of Water Process Engineering*, 34, Article 101133. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101133>
- [4] อมรภัค ชูทอง. (2550). การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] จุฑามาศ แก้วมณี. (2553). การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิตภาควิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [6] Bayramoglu, M., Eyvaz, M., & Kobya, M. (2007). Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal*, 128(2–3), 155–161. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.10.008>
- [7] Gomes, J., Cocke, L., Das, K., Guttula, M., & Beckman, J. (2009). Treatment of produced water by electrocoagulation. In *Characterization of materials, minerals, and metals: Vol. 2. TMS Annual Meeting & Exhibition*, 459–466. The Minerals, Metals & Materials Society.

- [8] Igunnu, E. T., & Chen, G. Z. (2014). Produced water treatment technologies. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9(3), 157–177.
<https://doi.org/10.1093/ijlct/cts049>
- [9] Fakhrul-Razi, A., Pendashteh, A., Abdullah, L., Biak, D. R., Madaeni, S., & Abidin, Z. (2009). Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 170(2–3), 530–551.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.103>
- [10] Schramm, L. L. (2005). *Emulsions, foams, and suspensions: Fundamentals and applications*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/3527605489>
- [11] Myers, D. (2006). *Surfactant science and technology* (3rd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/047174607X>
- [12] Emamjomeh, M., & Sivakumar, M. (2009). Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation flotation processes. *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1663–1679.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.10.015>
- [13] Ezzat, A. O., Atta, A. M., Al-Lohedan, A., El-Sawy, A., & Abdullah, M. (2020). One-step synthesis of amphiphilic nonylphenol polyethyleneimine for demulsification of water in heavy crude oil emulsions. *ACS Omega*, 5(16), 9212–9223. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00002>
- [14] American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- [15] ชัยศรี สุขสาโรจน์ และฉันทิ เตชะภักทวรกุล สุขสาโรจน์. (2556). กระบวนการโคอะเลสเซอร์สำหรับการแยกน้ำมันจากน้ำในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน (รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ENG560087S). มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
<https://kb.psu.ac.th/psukb/handle/2016/11301>

- [16] Duan, J., & Gregory, J. (2003). Coagulation by hydrolysing metal salts. *Advances in Colloid and Interface Science*, 100-102, 475–502.
[https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(02\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(02)00067-2)
- [17] Owoyomi, O. T., Abdulkareem, A. S., & Kovo, A. S. (2020). Electrochemical based processes for oily wastewater and produced water treatment: A review. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 47, 147–166.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.47.147>
- [18] Alsalhy, Q. F., Al-Zuhairi, S., & Hasan, B. (2023). Treatment of oilfield produced water using three electrochemical processes: Comparative study. *Kirkuk University Journal of Engineering*, 11(2), 1–13.
<https://doi.org/10.53332/kuej.v11i2.858>
- [19] Said, M. A., Ishak, M. F., Zularisam, A. W., & Ghazali, A. M. (2014). Effect of high current density in electrocoagulation process for sewage treatment. *Asian Journal of Chemistry*, 26(Special Issue), S23–S27.
<https://doi.org/10.14233/ajchem.2014.16134>
- [20] Sachett, F. H., Duarte, J., Silvestre, W. P., & Baldasso, C. (2024). Effect of current density variation in the electrocoagulation process for the treatment of brewery wastewater. *Revista Caderno Pedagogico*, 21(8), 01-21.
<https://doi.org/10.54033/cadpedv21n8-066>
- [21] Abunada, S., Giama, M., El-Shorbagi, Y., Abdel-Jabbar, N., & Ali, M. (2020). Ultrasonic (US)-assisted electrocoagulation (EC) process for oil and grease removal from restaurant wastewater. *Applied Sciences*, 10(1), Article 61.
<https://doi.org/10.3390/app10010061>

- [22] Drogui, P., Asselin, M., Brar, S. K., Benmoussa, H., & Blais, J. F. (2008). Electrochemical removal of pollutants from agro-industry wastewaters. *Recent Patents on Engineering*, 2(1), 19-28.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.10.013>
- [23] Putri, I., Dwicahyani, S., Shofiyani, A., & Atmaja, A. P. (2019). Electrocoagulation treatment of swine slaughterhouse wastewater: Effect of electrode material. *E3S Web of Conferences*, 116, Article 00020.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911600020>
- [24] Lutfi, M., Zullaikah, S., Darmawan, A., & Altw, A. (2024). Influence of electrode surface area and processing time on chemical oxygen demand (COD) and total suspended solid (TSS) reduction in tofu wastewater using electrocoagulation. *Research in Chemical Engineering*, 3(1), 26–30.
<https://doi.org/10.20956/rice.v3i1.30715>
- [25] Guzmán-Mar, J. L., et al. (2024). Continuous electrocoagulation for a sustainable water treatment: Effects of electrode configuration, electrical connection mode, and polarity reversal on fluoride removal. *Sustainability*, 16(13), Article 5765. <https://doi.org/10.3390/su16135765>
- [26] Ghorbani, F., Emamjomeh, M., Bazargan, A., & Sillanpaa, M. (2024). Kinetic study of mineral oil removal from wastewater by the sono-electrochemical process. *Water Science & Technology*, 90(10), 2911–2921.
<https://doi.org/10.2166/wst.2024.370>
- [27] Alruwaili, E. (2022). Comparative analysis of boron removal by electrocoagulation in synthetic and local real produced waters [Master's thesis, University of Kansas]. KU ScholarWorks. <http://hdl.handle.net/1808/33297>

- [28] Kobya, M., Gengec, E., & Demirbas, E. (2016). Operating parameters and cost assessments of a real dyehouse wastewater effluent treated by a continuous electrocoagulation process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 101, 87–100.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.12.010>
- [29] Mohamed, M. H., El-Gendy, A. S., El Nadi, M., & Aboulfotoh, A. M. (2023). Treating hydraulic fracturing-produced water by electrocoagulation. *Separation Science and Technology*, 58(11), 1931–1943.
<https://doi.org/10.1080/01496395.2023.2179492>
- [30] Yasa et. (2022, October 27). Electrocoagulation system for water and wastewater treatment. Yasa et Blog. <https://www.yasa.ltd/post/electrocoagulation-system-for-water-and-wastewater-treatment>
- [31] Yaghmaeian, M., Mahvi, A. H., Nasser, S., Shayesteh, M. H., Mansoorian, H. J., & Khanjani, N. (2015). Drinking water softening with electrocoagulation process: Influence of direct and alternating currents as inductive with different arrangement rod electrodes and polarity inverter. *Scientia Iranica, Transaction A: Civil Engineering*, 22(1), 110–118.
<https://doi.org/10.24200/sci.2015.21776>

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

รายละเอียดตัวแปรต้น ตัวแปรตามและตัวแปรควบคุม



ตารางที่ ก-1 ตัวแปรในการศึกษาระยะเวลาในการบำบัดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน

ตัวแปร		ค่า/รายละเอียด
ตัวแปรต้น	ระยะเวลาบำบัด	3, 5, 10, 15, 30 และ 60 นาที
ตัวแปรตาม	ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน (%)	คำนวณจากความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นและหลังบำบัด
ตัวแปรควบคุม	ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน (สังเคราะห์)	2%wt (20,000 mg/L)
	ชนิดของวัสดุขั้วไฟฟ้า	อลูมิเนียม
	พื้นที่รวมขั้วไฟฟ้า	24 ตารางเซนติเมตร
	กระแสไฟฟ้า	4 แอมแปร์
	ปริมาณน้ำเสีย	200 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก-2 ตัวแปรในการศึกษาความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน

ตัวแปร		ค่า/รายละเอียด
ตัวแปรต้น	ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน (สังเคราะห์) ระยะเวลาบำบัด	2%wt และ 4%wt (20,000 และ 40,000 mg/L) 0-30 นาที
ตัวแปรตาม	ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน (%)	คำนวณจากความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นและหลังบำบัด
ตัวแปรควบคุม	ชนิดของวัสดุขั้วไฟฟ้า	อลูมิเนียม
	พื้นที่รวมขั้วไฟฟ้า	24 ตารางเซนติเมตร
	กระแสไฟฟ้า	4 แอมแปร์
	ปริมาณน้ำเสีย	200 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก-3 ตัวแปรในการศึกษาชนิดของวัสดุอิเล็กโทรดมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน

ตัวแปร		ค่า/รายละเอียด
ตัวแปรต้น	ชนิดของวัสดุขั้วไฟฟ้า ระยะเวลาบำบัด	แผ่นอลูมิเนียม และ แผ่นเหล็ก 0-30 นาที
ตัวแปรตาม	ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน (%)	คำนวณจากความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นและ หลังบำบัด
ตัวแปรควบคุม	ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน (สังเคราะห์)	2%wt (20,000 mg/L)
	พื้นที่รวมขั้วไฟฟ้า	24 ตารางเซนติเมตร
	กระแสไฟฟ้า	4 แอมแปร์
	ปริมาณน้ำเสีย	200 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก-4 ตัวแปรในการศึกษาพื้นที่อิเล็กโทรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน

ตัวแปร		ค่า/รายละเอียด
ตัวแปรต้น	พื้นที่รวมขั้วไฟฟ้า ระยะเวลาบำบัด	12, 24 และ 48 ตารางเซนติเมตร 0-30 นาที
ตัวแปรตาม	ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน (%)	คำนวณจากความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นและ หลังบำบัด
ตัวแปรควบคุม	ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน (สังเคราะห์)	2%wt (20,000 mg/L)
	ชนิดของวัสดุขั้วไฟฟ้า	อลูมิเนียม
	กระแสไฟฟ้า	4 แอมแปร์
	ปริมาณน้ำเสีย	200 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก-5 ตัวแปรในการศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน

ตัวแปร		ค่า/รายละเอียด
ตัวแปรต้น	กระแสไฟฟ้า (ส่งผลต่อความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า) ระยะเวลาบำบัด	3A, 4A และ 5A (62.5, 83.33 และ 104.17 mA/cm ² ตามลำดับ) 0-30 นาที
ตัวแปรตาม	ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน (%)	คำนวณจากความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นและ หลังบำบัด
ตัวแปรควบคุม	ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน (สังเคราะห์)	2%wt (20,000 mg/ml)
	ชนิดของวัสดุขั้วไฟฟ้า	อลูมิเนียม
	พื้นที่รวมขั้วไฟฟ้า	48 ตารางเซนติเมตร
	ปริมาณน้ำเสีย	200 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก-6 ตัวแปรในการศึกษาการจัดเรียงอิเล็กโทรดกับประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน

ตัวแปร		ค่า/รายละเอียด
ตัวแปรต้น	รูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า ระยะเวลาบำบัด	แบบอนุกรม และ แบบขนาน 0-30 นาที
ตัวแปรตาม	ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน (%)	คำนวณจากความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นและ หลังบำบัด
ตัวแปรควบคุม	ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน (สังเคราะห์)	2%wt (20,000 mg/L)
	ชนิดของวัสดุขั้วไฟฟ้า	อลูมิเนียม
	พื้นที่รวมขั้วไฟฟ้า	48 ตารางเซนติเมตร
	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	104.17 mA/cm ²
	ปริมาณน้ำเสีย	200 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก-7 ตัวแปรในการทดสอบกับ Produced Water จากแหล่งขุดเจาะ

ตัวแปร		ค่า/รายละเอียด
ตัวแปรต้น	ระยะเวลาบำบัด	3, 5, 10, 15 และ 30 นาที
ตัวแปรตาม	ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน (%)	คำนวณจากความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นและหลังบำบัด
ตัวแปรควบคุม	ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน	1.8%wt (18,000 mg/L)
	ชนิดของวัสดุขั้วไฟฟ้า	อลูมิเนียม
	พื้นที่รวมขั้วไฟฟ้า	48 ตารางเซนติเมตร
	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	104.17 mA/cm ²
	รูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า	แบบขนาน
	ปริมาณน้ำเสีย	200 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก-8 ตัวแปรในการทดสอบ Produced Water สังเคราะห์ด้วยเซลล์ไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง

ตัวแปร		ค่า/รายละเอียด
ตัวแปรต้น	การกวน ระยะเวลาบำบัด	ไม่มี และ มีการกวน (750 rpm) 0-15 นาที
ตัวแปรตาม	ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน (%)	คำนวณจากความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นและหลังบำบัด
ตัวแปรควบคุม	ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน	2%wt (20,000 mg/L)
	ชนิดของวัสดุขั้วไฟฟ้า	อลูมิเนียม
	พื้นที่รวมขั้วไฟฟ้า	48 ตารางเซนติเมตร
	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	104.17 mA/cm ²
	รูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า	แบบขนาน
	เวลากักเก็บน้ำในระบบ (HRT)	15 นาที
	ปริมาณน้ำเสีย	200 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก-9 ตัวแปรในการทดสอบ Produced Water จากแหล่งขุดเจาะด้วยเซลล์ไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง

ตัวแปร		ค่า/รายละเอียด
ตัวแปรต้น	การกวน ระยะเวลาบำบัด	ไม่มี และ มีการกวน (750 rpm) 0-15 นาที
ตัวแปรตาม	ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน (%)	คำนวณจากความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นและ หลังบำบัด
ตัวแปรควบคุม	ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน	1.8%wt (18,000 mg/L)
	ชนิดของวัสดุขั้วไฟฟ้า	อลูมิเนียม
	พื้นที่รวมขั้วไฟฟ้า	48 ตารางเซนติเมตร
	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	104.17 mA/cm ²
	รูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า	แบบขนาน
	เวลากักเก็บน้ำในระบบ (HRT)	15 นาที
	ปริมาณน้ำเสีย	200 มิลลิลิตร



ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ข-1 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบของความเข้มข้นเริ่มต้น 2%wt แสดงในรูปที่ 4-2

เวลา (นาท)	จำนวนครั้ง	น้ำหนักปี เกอร์รวม สกัดน้ำมัน (g)	น้ำหนักปี เกอร์ก่อน สกัดน้ำมัน (g)	น้ำมันที่ เหลือ (g)	ประสิทธิภาพ การจัด น้ำมัน (%)	S.D.
3	1	42.47	41.69	0.78	61.03	1.82
	2	105.45	104.73	0.72	63.96	
	3	103.70	102.99	0.71	64.36	
5	1	49.79	49.14	0.66	67.09	2.76
	2	106.79	106.14	0.65	67.46	
	3	109.77	109.22	0.55	72.59	
10	1	49.97	49.68	0.30	85.09	2.52
	2	104.99	104.63	0.36	82.12	
	3	104.35	104.09	0.26	87.14	
15	1	49.70	49.50	0.20	90.09	1.97
	2	105.57	105.34	0.24	88.24	
	3	105.65	105.38	0.28	86.15	
30	1	48.47	48.21	0.26	87.09	1.80
	2	106.33	106.09	0.24	88.05	
	3	103.77	103.58	0.19	90.58	
60	1	48.47	48.23	0.24	87.99	1.00
	2	106.33	106.09	0.24	88.05	
	3	103.77	103.56	0.20	89.76	

ตารางที่ ข-2 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบของความเข้มข้นเริ่มต้น 4%wt แสดงในรูปที่ 4-3

เวลา (นาท)	จำนวนครั้ง	น้ำหนักปี เกอร์รวม สกัดน้ำมัน (g)	น้ำหนักปี เกอร์ก่อน สกัดน้ำมัน (g)	น้ำมันที่ เหลือ (g)	ประสิทธิภาพ การกำจัด น้ำมัน (%)	S.D.
3	1	42.47	43.90	1.43	64.28	1.88
	2	110.54	112.05	1.51	62.19	
	3	106.87	108.23	1.36	65.95	
5	1	48.47	49.62	1.15	71.17	3.58
	2	105.41	106.71	1.30	67.50	
	3	95.37	96.38	1.01	74.65	
10	1	49.70	50.22	0.51	87.13	1.09
	2	106.87	107.44	0.57	85.68	
	3	103.66	104.26	0.60	85.00	
15	1	49.79	50.22	0.42	89.41	1.14
	2	106.97	107.46	0.49	87.65	
	3	96.35	96.86	0.51	87.27	
30	1	106.82	107.29	0.47	88.21	1.99
	2	111.43	111.77	0.33	91.64	
	3	104.87	105.34	0.47	88.19	

ตารางที่ ข-3 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบของวัสดุขี้ไฟฟ้าแผ่นเหล็กแสดงในรูปที่ 4-4

เวลา (นาท)	จำนวนครั้ง	น้ำหนักปี เกอร์รวม สกัดน้ำมัน (g)	น้ำหนักปี เกอร์ก่อน สกัดน้ำมัน (g)	น้ำมันที่ เหลือ (g)	ประสิทธิภาพ การจัด น้ำมัน (%)	S.D.
3	1	105.43	104.23	1.21	39.67	4.48
	2	105.76	104.59	1.17	41.4	
	3	103.70	102.36	1.34	32.93	
5	1	105.34	104.28	1.06	47.09	2.35
	2	107.32	106.18	1.14	42.80	
	3	110.44	109.37	1.07	46.61	
10	1	105.76	104.70	1.06	46.89	2.82
	2	104.99	103.97	1.02	49.10	
	3	104.35	103.22	1.13	43.51	
15	1	105.43	104.39	1.04	48.12	1.33
	2	110.65	109.65	1.01	49.60	
	3	110.65	109.67	0.98	50.78	
30	1	103.56	102.55	1.01	49.67	0.89
	2	106.33	105.35	0.98	51.09	
	3	103.77	102.79	0.97	51.30	

ตารางที่ ข-4 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบที่พื้นที่ 12 ตารางเซนติเมตร แสดงในรูปที่ 4-5

เวลา (นาท)	จำนวนครั้ง	น้ำหนักปี เกอร์รวม สกัดน้ำมัน (g)	น้ำหนักปี เกอร์ก่อน สกัดน้ำมัน (g)	น้ำมันที่ เหลือ (g)	ประสิทธิภาพ การจัด น้ำมัน (%)	S.D.
3	1	105.68	104.88	0.80	60.00	3.02
	2	110.54	109.83	0.71	64.54	
	3	110.43	109.61	0.82	58.82	
5	1	106.86	106.24	0.62	68.98	1.67
	2	110.13	109.45	0.68	65.99	
	3	111.01	110.34	0.68	66.18	
10	1	104.79	104.41	0.38	80.90	0.52
	2	110.54	110.17	0.38	81.23	
	3	107.23	106.87	0.36	81.92	
15	1	104.65	104.32	0.34	83.10	1.35
	2	105.77	105.45	0.32	84.23	
	3	109.77	109.48	0.28	85.78	
30	1	110.39	110.07	0.32	84.11	0.72
	2	110.25	109.93	0.32	84.10	
	3	107.38	107.09	0.29	85.35	

ตารางที่ ข-5 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบที่พื้นที่ 48 ตารางเซนติเมตร แสดงในรูปที่ 4-5

เวลา (นาท)	จำนวนครั้ง	น้ำหนักปี เกอร์รวม สกัดน้ำมัน (g)	น้ำหนักปี เกอร์ก่อน สกัดน้ำมัน (g)	น้ำมันที่ เหลือ (g)	ประสิทธิภาพ การจัด น้ำมัน (%)	S.D.
3	1	103.53	102.92	0.61	69.34	1.67
	2	106.65	105.99	0.66	66.80	
	3	106.79	106.19	0.60	69.95	
5	1	103.35	103.07	0.28	86.00	3.08
	2	106.41	106.01	0.40	80.00	
	3	106.66	106.29	0.36	81.76	
10	1	108.17	107.96	0.21	89.46	2.45
	2	110.29	110.10	0.19	90.43	
	3	104.35	104.06	0.28	85.79	
15	1	103.11	102.98	0.14	93.12	4.71
	2	109.68	109.53	0.15	92.53	
	3	106.31	106.00	0.31	84.69	
30	1	108.09	107.94	0.15	92.67	1.15
	2	103.80	103.61	0.19	90.44	
	3	105.71	105.53	0.18	91.09	

ตารางที่ ข-6 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 62.5 mA/cm^2
แสดงในรูปที่ 4-7

เวลา (นาท)	จำนวนครั้ง	น้ำหนักปี เกอร์รวม สกัดน้ำมัน (g)	น้ำหนักปี เกอร์ก่อน สกัดน้ำมัน (g)	น้ำมันที่ เหลือ (g)	ประสิทธิภาพ การกำจัด น้ำมัน (%)	S.D.
3	1	108.17	107.21	0.96	63.78	3.51
	2	110.29	109.31	0.98	60.47	
	3	104.35	103.31	1.03	56.77	
5	1	103.11	102.41	0.70	70.12	0.61
	2	109.68	108.92	0.76	69.10	
	3	106.31	105.52	0.79	70.18	
10	1	109.51	109.06	0.44	79.87	0.31
	2	110.36	109.97	0.39	80.45	
	3	104.43	103.92	0.51	79.99	
15	1	110.13	109.78	0.35	82.45	1.85
	2	107.23	106.84	0.39	83.01	
	3	104.65	104.28	0.37	79.56	
30	1	110.65	110.29	0.36	83.40	0.20
	2	103.56	103.17	0.39	83.21	
	3	106.33	105.98	0.35	83.60	

ตารางที่ ข-7 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 104.17 mA/cm^2

แบบขนาน แสดงในรูปที่ 4-7

เวลา (นาท)	จำนวนครั้ง	น้ำหนักปี เกอร์รวม น้ำมัน(g)	น้ำหนักปี เกอร์ก่อน สกัดน้ำมัน (g)	น้ำมันที่ เหลือ (g)	ประสิทธิภาพ การกำจัด น้ำมัน (%)	S.D.
3	1	103.31	102.84	0.47	76.45	1.97
	2	102.41	102.01	0.40	79.90	
	3	108.92	108.45	0.47	76.54	
5	1	105.52	105.13	0.39	80.45	1.10
	2	109.06	108.72	0.35	82.56	
	3	109.97	109.59	0.38	80.95	
10	1	103.92	103.67	0.25	87.45	1.64
	2	109.78	109.59	0.19	90.55	
	3	106.84	106.64	0.20	89.95	
15	1	104.28	104.12	0.16	91.79	0.77
	2	110.29	110.15	0.14	93.08	
	3	103.17	103.03	0.14	93.16	
30	1	105.98	105.85	0.13	93.36	0.54
	2	109.68	109.55	0.12	93.90	
	3	106.31	106.17	0.14	92.83	

ตารางที่ ข-8 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองดิบที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 104.17 mA/cm^2

แบบอนุกรม แสดงในรูปที่ 4-7

เวลา (นาท)	จำนวนครั้ง	น้ำหนักปี เกอร์รวม น้ำมัน(g)	น้ำหนักปี เกอร์ก่อน สกัดน้ำมัน (g)	น้ำมันที่ เหลือ (g)	ประสิทธิภาพ การกำจัด น้ำมัน (%)	S.D.
3	1	106.56	106.12	0.44	77.90	4.57
	2	104.15	103.75	0.39	80.32	
	3	110.12	109.55	0.57	71.48	
5	1	103.06	102.65	0.40	79.87	1.89
	2	105.90	105.55	0.35	82.54	
	3	102.41	101.99	0.42	78.89	
10	1	108.92	108.67	0.24	87.91	0.81
	2	105.52	105.30	0.22	89.03	
	3	109.06	108.85	0.21	89.49	
15	1	109.97	109.85	0.12	93.78	1.26
	2	106.56	106.39	0.17	91.53	
	3	104.15	103.98	0.17	91.68	
30	1	110.12	110.00	0.12	93.87	0.86
	2	103.06	102.92	0.14	93.12	
	3	105.90	105.74	0.16	92.16	

ตารางที่ ข-9 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองตีบการทดสอบ Produced Water จากแหล่งขุดเจาะ
ด้วยเซลล์ไฟฟ้าแบบกะ แสดงในรูปที่ 4-11

เวลา (นาทื)	จำนวนครั้ง	น้ำหนักปี เกอร์รวม น้ำมัน(g)	น้ำหนักปี เกอร์ก่อน สกัดน้ำมัน (g)	น้ำมันที่ เหลือ (g)	ประสิทธิภาพ การกำจัด น้ำมัน (%)	S.D.
3	1	106.34	106.13	0.21	88.35	3.87
	2	105.32	105.02	0.30	83.43	
	3	103.53	103.37	0.16	91.08	
5	1	106.65	106.43	0.22	87.88	2.96
	2	106.79	106.67	0.12	93.45	
	3	108.32	108.18	0.14	92.41	
10	1	110.43	110.31	0.13	93.03	0.93
	2	106.89	106.78	0.11	93.90	
	3	103.22	103.12	0.09	94.88	
15	1	109.75	109.68	0.07	96.34	1.93
	2	106.31	106.19	0.12	93.46	
	3	108.09	108.04	0.05	97.13	
30	1	103.80	103.73	0.08	95.78	0.75
	2	105.71	105.65	0.06	96.45	
	3	105.35	105.26	0.09	94.95	

ตารางที่ ข-10 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองตีบการทดสอบ Produced Water สังเคราะห์ด้วย
เซลล์ไฟฟ้าแบบต่อเนื่องแบบไม่วาน แสดงในรูปที่ 4-17

เวลา (นาทื)	จำนวนครั้ง	น้ำหนักปี เกอร์รวม สกัดน้ำมัน (g)	น้ำหนักปี เกอร์ก่อน สกัดน้ำมัน (g)	น้ำมันที่ เหลือ (g)	ประสิทธิภาพ การกำจัด น้ำมัน (%)	S.D.
0	1	105.03	104.59	0.44	78.13	0.55
	2	107.53	107.07	0.46	77.23	
	3	110.12	109.68	0.44	78.22	
5	1	105.45	105.02	0.43	78.32	0.37
	2	107.01	106.59	0.42	78.98	
	3	110.14	109.72	0.42	78.95	
7.5	1	105.45	105.02	0.43	78.34	0.45
	2	104.86	104.44	0.42	78.90	
	3	106.19	105.77	0.42	79.19	
15	1	103.07	102.65	0.43	78.71	0.17
	2	106.01	105.59	0.42	78.91	
	3	106.29	105.87	0.42	79.05	

ตารางที่ ข-11 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองตีบการทดสอบ Produced Water สังเคราะห์ด้วย
เซลล์ไฟฟ้าแบบต่อเนื่องแบบกวนแสดงในรูปที่ 4-17

เวลา (นาท)	จำนวนครั้ง	น้ำหนักปี เกอร์รวม สกัดน้ำมัน (g)	น้ำหนักปี เกอร์ก่อน สกัดน้ำมัน (g)	น้ำมันที่ เหลือ (g)	ประสิทธิภาพ การกำจัด น้ำมัน (%)	S.D.
0	1	104.20	103.81	0.40	80.12	0.37
	2	109.46	109.07	0.38	80.82	
	3	109.48	109.09	0.39	80.29	
5	1	102.36	101.99	0.37	81.50	0.23
	2	106.79	106.43	0.36	81.84	
	3	109.77	109.41	0.36	81.94	
7.5	1	107.14	106.77	0.37	81.60	0.12
	2	110.25	109.89	0.36	82.02	
	3	110.14	109.78	0.36	81.87	
15	1	105.45	105.09	0.36	81.88	0.08
	2	104.86	104.49	0.36	81.80	
	3	104.22	103.86	0.36	81.96	

ตารางที่ ข-12 ตารางแสดงข้อมูลการทดลองตีบการทดสอบ Produced Water จากแหล่งชุดเจาะด้วยเซลล์ไฟฟ้าแบบต่อเนื่องแบบกวนแสดงในรูปที่ 4-19

เวลา (นาทื)	จำนวนครั้ง	น้ำหนักปี เกอร์รวม สกัดน้ำมัน (g)	น้ำหนักปี เกอร์ก่อน สกัดน้ำมัน (g)	น้ำมันที่ เหลือ (g)	ประสิทธิภาพ การกำจัด น้ำมัน (%)	S.D.
0	1	103.97	103.78	0.19	90.58	0.16
	2	103.22	103.02	0.20	90.19	
	3	104.39	104.20	0.19	90.52	
5	1	109.65	109.46	0.19	90.61	0.15
	2	109.67	109.48	0.18	90.79	
	3	102.55	102.36	0.19	90.46	
7.5	1	105.35	105.16	0.19	90.43	0.21
	2	107.32	107.14	0.18	90.76	
	3	110.44	110.25	0.18	90.79	
15	1	105.76	105.58	0.19	90.71	0.11
	2	104.99	104.80	0.18	90.90	
	3	105.65	105.47	0.19	90.70	

ตารางที่ ข-13 ผลการคำนวณประสิทธิภาพ ณ สภาวะคงที่ ด้วยแบบจำลองสมการ

First-order

รูปที่	η_{∞}	K	Note
4-2	92.61	1.19	2% wt
4-3	92.61	1.19	2% wt
	94.30	1.2	4% wt
4-4	92.61	1.19	Al
	52.32	0.907	Fe
4-5	89.46	1.2	12cm ²
	92.61	1.19	24cm ²
	96.34	0.95	48cm ²
4-7	87.85	1.12	3A
	96.34	0.95	4A
	95.46	0.66	5A
4-11	95.26	0.69	Series
	95.46	0.66	Parallel
4-14	98.59	0.47	Real water

ตารางที่ ข-14 ผลการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณสมการ 4-4

การทดลอง	พื้นที่ (cm ²)	กระแส (A)	เวลา (นาท.)	ค่าที่ได้จาก การทดลอง	ค่าที่ได้จาก สมการ 4.4
1	24	1	3	19.74	28.90
2	24	1	5	27.30	41.88
3	24	1	10	54.11	39.63
4	24	1	15	56.75	50.35
5	24	1	30	56.88	52.60
6	24	2	3	30.57	51.61
7	24	2	5	51.90	54.85
8	24	2	10	68.26	58.10
9	24	2	15	69.71	52.58
10	24	2	30	69.72	56.62
11	24	3	3	50.42	63.33
12	24	3	5	62.46	61.07
13	24	3	10	77.64	69.59
14	24	3	15	81.40	62.33
15	24	3	30	81.68	63.30
16	24	4	3	63.11	74.05
17	24	4	5	69.71	65.58
18	24	4	10	84.78	68.82
19	24	4	15	88.16	65.55
20	24	4	30	88.57	74.03
21	24	4	60	88.60	73.06
22	12	4	3	61.12	75.28
23	12	4	5	67.05	87.00
24	12	4	10	81.35	79.32
25	12	4	15	84.37	76.30
26	12	4	30	84.52	78.53
27	48	3	3	60.34	79.54

การทดลอง	พื้นที่ (cm ²)	กระแส (A)	เวลา (นาท.)	ค่าที่ได้จาก การทดลอง	ค่าที่ได้จาก สมการ 4.4
28	48	3	5	69.80	76.28
29	48	3	10	80.11	81.77
30	48	3	15	81.67	82.57
31	48	3	30	83.40	85.81
32	48	4	3	68.70	83.78
33	48	4	5	82.59	87.02
34	48	4	10	88.56	86.01
35	48	4	15	90.11	90.27
36	48	4	30	91.40	91.89
37	48	5	3	77.63	96.73
38	48	5	5	81.32	89.25
39	48	5	10	89.32	92.50
40	48	5	15	92.68	99.97
41	48	5	30	93.36	103.22

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายณภัทร มั่นนุช
ชื่อวิทยานิพนธ์	การกำจัดน้ำมันออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วย วิธีการทางเซลล์ไฟฟ้าเคมี
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ประวัติ	เกิดวันที่ 6 กรกฎาคม พ.ศ.2542 ภูมิลำเนา ปทุมธานี สำเร็จการศึกษา - ประถมต้น โรงเรียนไพฑูริย์ศึกษา - มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนดอนเมืองทหารอากาศบำรุง - ประกาศนียบัตรวิชาชีพ โรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ ไทย-เยอรมัน - ปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าพระนครเหนือ
สถานที่ติดต่อ	50/134 หมู่ 1 ตำบลคูคต อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12130