

การเปรียบเทียบประเภทของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

นางสาวชนารัตน์ สุทธะนันท์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Comparison of the Electro-Fenton processes for treatment of cutting oil wastewater.

Miss Chanarach Suthanan



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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบประเภของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟนตัน ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด
โดย	นางสาวชนารัตน์ สุทธะนันท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

.....กรรมการ  
(ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.มรุพัชร จำนงค์วงศ์)

ชนารัตน์ สุทธะนันท์ : การเปรียบเทียบประเภทของกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (Comparison of the Electro-Fenton processes for treatment of cutting oil wastewater.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 167 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟนตันและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันทั้ง 3 ประเภท โดยสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันคือที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่ต้องใช้ขั้นตอนการแบ่งเติมเหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 90 % ในส่วนของความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการแบ่งเติม 3 ครั้ง ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 93 % และ 91 % ตามลำดับ สำหรับพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาเพื่อวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด (ซีโอดี) ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าทั้งแอโนดและแคโทด (เหล็ก-เหล็ก,เหล็ก-เหล็กกล้าไร้สนิม,เหล็กกล้าไร้สนิม-เหล็กกล้าไร้สนิม,เหล็ก-แกรไฟต์ และเหล็ก-ไททาเนียม) กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในช่วง 0.25-0.55 แอมแปร์ อัตราการไหลของอากาศ 0.2-0.6 ลิตรต่อนาที พบว่าที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะที่เหมาะสมคือ กระแสไฟฟ้าที่ 0.35 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) อัตราการไหลของอากาศ 0.4 ลิตรต่อนาที โดยใช้เหล็ก-ไททาเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 100 % ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ อัตราการไหลของอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที โดยใช้เหล็ก-ไททาเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 100 % เช่นกัน ในขณะที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 150 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ โดยใช้เหล็ก-ไททาเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 98.2 % โดยไม่เติมออกซิเจนภายในระบบ กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานโดยมีสภาวะการทำงานเหมาะสมคือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยใช้เหล็ก-แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้า และระยะเวลาการเก็บกัก 10-45 นาที และอัตราการไหล 1.5-6 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพรวมสูงสุดในการบำบัดน้ำเสียมีค่าประมาณ 100 % ในอนาคตอาจจะมีการนำกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันชนิดอื่นหรือพัฒนาไปใช้กับน้ำเสียจริงได้

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
ปีการศึกษา	2558	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5670154421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: ELECTRO-FENTON, HYDROGENPEROXIDE, CUTTING OILL

CHANARACH SUTHANAN: Comparison of the Electro-Fenton processes for treatment of cutting oil wastewater.. ADVISOR: ASST. PROF.ON-ANONG LARPPARISUDTHI, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF.PISUT PAINMANAKUL, 167 pp.

This research work described the comparison between 2 wastewater treatment processes, namely Fenton and 3 types of Electro-Fenton, regarding to ability of COD removal from cutting oil wastewater, which contains low oil concentration. The optimal condition of Fenton process for 50 mg/l oil concentration was revealed, only initial full feeding of Fenton’s reagent is enough to achieve high oxidation (COD removal efficiency= 90%), thus multiple step feeding was not necessary. However, the superior concentration samples, which contain 100 mg/l and 150 mg/l oil concentration, should be treated by three feeding in order to achieve high COD removal efficiency 93% and 91% respectively. A subsequent studying analysis of waste water treatment by using Electro-Fenton process, which applied a selected type of anode and cathode (Fe-Fe, Fe-St, St-St, Fe-Gr, Fe-Ti), current range (0.25-0.55 A,  $CD = 35.71 A/m^2$ ), air flow rate (0.2-0.6 l/min) and operating time (0-60 minutes). The optimal condition for Electro-Fenton processes was revealed, where the selected electrode are Fe-Ti electrode system, for 100% COD removal of 50 mg/l and 100 mg/l oil concentration can be achieved by applying 0.35 A (current density =  $35.71 A/m^2$ ), 0.4 l/min (air flow) and 0.35 A, 0.2 l/min respectively. On the other hand, the maximum COD removal of 150 mg/l oil concentration sample (98.2%) can be accomplished at 0.35 A without air flow in Fe-Ti electrode system. The optimal operating conditions, by using the Electro-Fenton process, were current 0.35 A ( $CD = 35.71 A/m^2$ ), electrodes are Fe-Gr and operating time 10-45 minutes. Finally, the continuous system of Electro-Fenton process provided 100 % overall treatment efficiency. In future, the Electro-Fenton process should be possibly applied for not only treating the stabilized oily wastewater but also recovering the real oil phase.

Department: Environmental Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Environmental Engineering      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2015      Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรอนงค์ ลาภปรีสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักและรองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ พิชยมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งเป็นผู้มีพระคุณประสิทธิ์ประสาทให้วิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยตลอดจนให้การสนับสนุนและช่วยเหลือผู้วิจัยเป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำ รวมถึงตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัย และทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการติดตั้งอุปกรณ์และเดินระบบในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ นิสิตระดับปริญญาโท และรุ่นพี่ปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การช่วยเหลือให้คำปรึกษาและให้กำลังใจในช่วงตลอดระยะเวลาของการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอขอบ พระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่คอยอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจที่สำคัญให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ .....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 น้ำมันตัด.....	5
2.1.1 ประเภทของน้ำมันตัด.....	6
2.2 รูปแบบของน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำ (มันรักรัษ และ มันสิน ตัณทุลเวศม์,2545).....	7
2.2.1 น้ำมันที่ละลายน้ำ (Dissolved oil).....	7
2.2.2 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว (Non-stabilized emulsion).....	8
2.2.3 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว (Emulsion).....	8
2.2.4 น้ำมันที่ลอยเป็นฟิล์มอยู่บนผิวน้ำ (Oil film).....	10
2.3 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant).....	10
2.3.1 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant) .....	11
2.3.2 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant).....	11

2.3.3 สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant).....	11
2.3.4 สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุลบและประจุบวก (Amphoteric surfactant) .....	11
2.4 การใช้เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในปัจจุบัน.....	12
2.4.1 การกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำ .....	12
2.4.2 การจัดการน้ำในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว.....	13
2.4.3 การจัดการน้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว .....	13
2.4.4 การกำจัดน้ำมันที่ลอยบนผิวน้ำ.....	13
2.5 การแบ่งกระบวนการบำบัดน้ำปนเปื้อนน้ำมันตามระดับความเข้มข้นของน้ำมัน .....	14
2.5.1 กระบวนการบำบัดเบื้องต้น (Pre-treatment process) .....	14
2.5.2 กระบวนการบำบัดขั้นที่ 2 (Secondary treatment process).....	14
2.6 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไฟฟ้า.....	18
2.6.1 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ.....	18
2.7 กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electro-chemistry process).....	21
2.7.1 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน.....	22
2.7.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) (อภิรดี สุนทรภา,2549) .....	25
2.8 กระบวนการออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation) และสารออกซิไดซ์ที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย (G. Chen,2004) .....	27
2.9 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance oxidation process, AOPs) (Parsons S.,2004).....	29
2.9.1 กระบวนการการสร้างอนุมูลอิสระ (Free radical generation).....	29
2.9.2 กระบวนการออกซิไดซ์กับสสารในน้ำเสีย (Free radical oxidation).....	30
2.9.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) (P. Nidheesh and R. Gandhimathi,2012).....	31
2.9.4 ประเภทของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (AOPs).....	31
2.9.5 ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton Reaction).....	32



2.9.6	ข้อได้เปรียบปฏิกิริยาเฟนตันในการบำบัดน้ำเสียเมื่อเทียบกับกระบวนการออกซิเดชันอื่น.....	33
2.9.7	ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาเฟนตัน .....	34
2.10	กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (Electro-Fenton Process).....	35
2.11	ประเภทของการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (P. Nidheesh and R. Gandhimathi,2012).....	37
2.11.1	กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการเฟนตัน (Cathodic Fenton Process, EF-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ).....	37
2.11.2	กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อผลิตไอออนเหล็ก (Fe <sup>2+</sup> ) ในการบวนการเฟนตัน (Anodic Fenton Process, EF-FeOX).....	37
2.11.3	กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าในการหมุนเวียนไอออนเหล็ก (Fe <sup>2+</sup> ) ในกระบวนการเฟนตัน (Fenton sludge Recycling System, E-FSR).....	38
2.12	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน .....	40
2.13	สรุปการศึกษาสถานะต่างๆในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทต่างๆ .....	47
บทที่ 3	ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	54
3.1	แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	54
3.2	วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี .....	54
3.2.1	วัสดุอุปกรณ์.....	54
3.2.2	สารเคมี.....	57
3.3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	58
3.3.1	การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด .....	58
3.3.2	การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาหาสถานะที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในประเภทที่ 1 (EF-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ).....	60

3.3.3 การทดลองส่วนที่ 3 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการ บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในประเภทที่ 2 (EF-FeOX).....	63
3.3.4 การทดลองส่วนที่ 4 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการ บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในประเภทที่ 3 (ผลิตเพอร์ร็อกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า).....	67
3.3.5 การทดลองส่วนที่ 5 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดโดยการเดินระบบ แบบต่อเนื่อง .....	71
3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์ในงานวิจัย .....	73
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล .....	74
4.1 ศึกษาลักษณะทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดเบื้องต้น .....	74
4.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตัน .....	78
4.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทร เฟนตัน (ประเภทที่ 1).....	81
4.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทร เฟนตัน (ประเภทที่ 2).....	90
4.5 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทร เฟนตัน (ประเภทที่ 3).....	94
4.5.1 การเปรียบเทียบการใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน .....	94
4.5.2 การเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน .....	96
4.5.3 การวิเคราะห์ผลกระทบจากปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในกระบวนการอิเล็กโทร เฟนตัน .....	97
4.5.4 การวิเคราะห์ปริมาณเพอร์ร็อกไซด์ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน .....	100
4.5.5 การวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน .....	103

4.5.6 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) และปริมาณน้ำมันใน กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ ..... 104	104
4.6 การวิเคราะห์แนวทางการเดินระบบแบบต่อเนื่องอัตราการไหลและสภาวะการทำงานที่ เหมาะสมในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ (ประเภทที่ 3)..... 106	106
4.7 ผลการศึกษาค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเพื่อบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ 111 ตารางที่ 4.11 ..... 111	111
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ ..... 113	113
5.1 สรุปงานวิจัย..... 113	113
5.2 ข้อเสนอแนะ ..... 114	114
รายการอ้างอิง ..... 116	116
ภาคผนวก..... 122	122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 167	167



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ปริมาณน้ำมันในแต่ละแหล่งที่มาของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน (Coca J. and Gutierrez G.,2011) .....	5
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความสามารถในการละลายน้ำของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ น้ำมันรั่ว และ น้ำมันดิน ต้นฤดูพฤษภาคม,2545).....	7
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย (Water Quality Division Aquifer Protection Program.,1996) .....	16
ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศา (ทบวงมหาวิทยาลัย,2528)....	23
ตารางที่ 2.5 ความสามารถในการปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารเคมีชนิดต่าง ๆ (Canizares P., Loberto J. et al.,2007).....	29
ตารางที่ 2.6 สารประกอบที่สามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยไฮดรอกซิลเรดิคัล.....	30
ตารางที่ 2.7 ความแตกต่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียวกันและแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับปฏิกิริยาเฟนตันออกซิเดชัน .....	31
ตารางที่ 2.8 ประเภทของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (AOPs).....	32
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน .....	58
ตารางที่ 3.2 ลักษณะสมบัติของน้ำมันตัด (cutting oil); Castrol Cooledge BI ที่ใช้ในงานวิจัย....	59
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1 (EF-FeOX).....	61
ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองส่วนที่ 2 .....	63
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 2 (EF-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) .....	64
ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองส่วนที่ 3 .....	67
ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการศึกษากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3.....	68
ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองส่วนที่ 4 .....	71
ตารางที่ 3.9 ตัวแปรในการศึกษากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง .....	71
ตารางที่ 3.10 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์ .....	73
ตารางที่ 4.1 แสดงศึกษาลักษณะทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดเบื้องต้น .....	75

ตารางที่ 4.2 การทดลองควบคุมโดยใช้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	76
ตารางที่ 4.3 แสดงสถานะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเฟนตัน .....	79
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณ $H_2O_2$ ที่แตกต่างกัน เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าคือเหล็ก-เหล็กกล้าไร้สนิม (Fe-St) .....	85
ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณ $H_2O_2$ ที่แตกต่างกัน เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าคือเหล็ก - เหล็ก (Fe-Fe).....	88
ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณ $H_2O_2$ ที่แตกต่างกัน.....	89
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) ที่แตกต่างกัน เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าคือแกรไฟต์-แกรไฟต์ (Gr-Gr).....	91
ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณ $Fe^{2+}$ 100, 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	93
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบการศึกษาสถานะที่ดีที่สุดและเหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตัน กับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (ประเภทที่ 1 และ 2).....	93
ตารางที่ 4.10 ตัวแปรการออกแบบการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ค่าความเข้มข้น 50 - 150 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	110
ตารางที่ 4.11 ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบแบบที่ละเทเมื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทต่างๆ.....	111
ตารางที่ 5.1 แสดงสถานะที่ดีที่สุดของการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1 2 และ 3 .....	113

## สารบัญภาพ

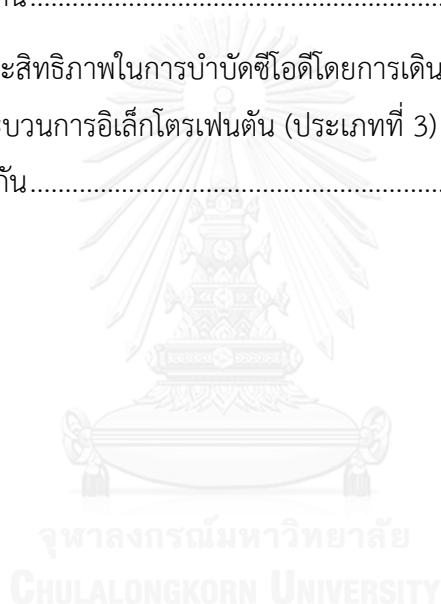
ภาพที่ 2.1 (1) การใช้น้ำมันตัดในขั้นตอนการหล่อเย็นโลหะ (2) การใช้น้ำมันตัดในขั้นตอนการตัดโลหะ .....	7
ภาพที่ 2.2 การผลึกกันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิว (Aurette Y.,1985) .....	9
ภาพที่ 2.3 การเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวร่วม (Aurette Y.,1985).....	9
ภาพที่ 2.4 น้ำมันที่ลอยเป็นฟิล์มอยู่บนผิวน้ำ.....	10
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว (M. Sun, F. Chen et al.,2015).....	10
ภาพที่ 2.6 การจัดการน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตามรูปแบบของน้ำมันในน้ำเสีย (P. Painmanakul, T. Chintateerachai et al.,2013) .....	12
ภาพที่ 2.7 อิเล็กโทรไคเนติก (Electrokinetic) (Iannelli R., Masi M. et al.,2015) .....	22
ภาพที่ 2.8 ปฏิกริยาการใช้อินทรีย์ไฮดรอกซิลในการออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์.....	35
ภาพที่ 2.9 กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (Electro-Fenton Process) (Nidheesh P.V. and Gandhimathi R.,2012) .....	36
ภาพที่ 2.10 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ของ EF-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	37
ภาพที่ 2.11 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ของ EF-FeOX.....	38
ภาพที่ 2.12 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ของ E-FSR.....	39
ภาพที่ 2.13 ความสามารถในการเกิดออกซิเจนตามวิถี 2 อิเล็กตรอน .....	39
ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนวิธีดำเนินงาน.....	54
ภาพที่ 3.2 แสดงชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรเฟนตันในถังปฏิกริยา.....	56
ภาพที่ 3.3 (1) ขนาดของขั้วที่ใช้ในการทดลอง (2) ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (3) ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากเหล็ก (4) ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากไททาเนียม .....	56
ภาพที่ 3.4 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ใช้ในการทดลอง.....	59
ภาพที่ 3.5 แผนผังการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ .....	59
ภาพที่ 3.6 แสดงชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1 (EF-FeOX) .....	60

ภาพที่ 3.7 แผนผังการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด.....	62
ภาพที่ 3.8 แผนผังการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	65
ภาพที่ 3.9 แผนผังการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วย กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 2 (EF-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ).....	67
ภาพที่ 3.10 แสดงชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3.....	68
ภาพที่ 3.11 แผนผังการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วย กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 (ผลิตเพอร์ร็อกซิไดซ์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า).....	70
ภาพที่ 3.12 แผนผังการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วย กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันแบบต่อเนื่อง.....	72
ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายของอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น.....	75
ภาพที่ 4.2 (1) น้ำมันตัดที่ยังไม่ได้ผสมน้ำประปา (2) น้ำมันตัดที่ผสมน้ำประปาเพื่อเตรียมเป็นน้ำ เสียสังเคราะห์.....	76
ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	78
ภาพที่ 4.4 (1) น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสังเคราะห์ก่อนทำปฏิกิริยา (2) น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ขณะเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน.....	79
ภาพที่ 4.5 แสดงความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันในถังปฏิกิริยา.....	80
ภาพที่ 4.6 (1) น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการเริ่มบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (2) น้ำเสีย สังเคราะห์ขณะบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน.....	82
ภาพที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีโดยเติม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ตัด 50 mg/l.....	83
ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีโดยเติม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ตัด 100 mg/l.....	83
ภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีโดยเติม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ตัด 150 mg/l.....	84

ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีโดยเติม $H_2O_2$ ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันตัด 50 mg/l.....	86
ภาพที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีโดยเติม $H_2O_2$ ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันตัด 100 mg/l.....	86
ภาพที่ 4.12 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีโดยเติม $H_2O_2$ ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันตัด 150 mg/l.....	87
ภาพที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน 50 100 และ 150 mg/l โดยเติมเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) ที่แตกต่างกัน .....	90
ภาพที่ 4.14 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบโดยใช้ขั้วแกรไฟต์-แกรไฟต์ .....	92
ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน .....	95
ภาพที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยใช้กระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน .....	96
ภาพที่ 4.17 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยศึกษาปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเริ่มต้น (DO).....	98
ภาพที่ 4.18 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยศึกษาปริมาณอัตราการเติมอากาศ (Og) หน่วย เป็นลิตรต่อนาที (l/min) ที่แตกต่างกัน.....	99
ภาพที่ 4.19 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 mg/l เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 0.25 แอมแปร์ .....	100
ภาพที่ 4.20 ปริมาณเฟอร์รัสไอออนในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1 และ 3 ที่ค่า กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร).....	102
ภาพที่ 4.21 ปริมาณเหล็กทั้งหมดในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1 และ 3 ที่ค่า กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร).....	102
ภาพที่ 4.22 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 ที่ค่า กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) โดย ขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน .....	103
ภาพที่ 4.23 ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำทั้งหมด (TOC) ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) โดยขั้วไฟฟ้าที่เป็นเหล็ก-แกรไฟต์ (Fe-Gr) .....	105



ภาพที่ 4.24 ปริมาณน้ำมันในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) โดยขั้วไฟฟ้าที่เป็นเหล็ก-แกรไฟต์ (Fe-Gr).....	106
ภาพที่ 4.25 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อชั่วโมง กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (ประเภทที่ 3) ที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่แตกต่างกัน.....	107
ภาพที่ 4.26 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อชั่วโมง กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (ประเภทที่ 3) ที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่แตกต่างกัน.....	107
ภาพที่ 4.27 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 6 ลิตรต่อชั่วโมง กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (ประเภทที่ 3) ที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่แตกต่างกัน.....	108



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศที่กำลังพัฒนามีการขยายตัวของอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก จึงทำให้มีปริมาณน้ำเสียปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำเพิ่มมากขึ้นโดยปัญหาน้ำเสียเป็นปัญหาหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม กล่าวได้ว่าแหล่งกำเนิดน้ำเสียส่วนหนึ่งนั้นมีสาเหตุมาจากอุตสาหกรรมโดยตรง โดยอุตสาหกรรมหลักเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในอุตสาหกรรมนี้มักจะมีขั้นตอนการหล่อเย็น การตัดหรือกลึงโลหะ ทำให้น้ำมันตัดมีความจำเป็นและมีปริมาณการใช้ที่เพิ่มสูงขึ้น โดยน้ำมันที่ปนเปื้อนน้ำเสียมี 4 รูปแบบ คือ น้ำมันที่ละลายน้ำ น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว น้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว และน้ำมันที่ลอยเป็นฟิล์มอยู่บนผิวน้ำ โดยน้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิวสามารถก่อให้เกิดปัญหาในการบำบัดมากเนื่องจากมีความคงตัวสูง ขนาดอนุภาคเล็ก ไม่แยกเป็นชั้นน้ำมัน และสามารถปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย น้ำมันตัดเป็นตัวอย่างหนึ่งของน้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนของน้ำมันในน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขอนามัยของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศ เนื่องจากน้ำมันจัดเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก และเป็นสิ่งที่กีดขวางการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพทุกชนิด เกิดผลเสียต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ระบบห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิต

เนื่องจากวิธีการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันในประเทศไทยยังมีอยู่จำกัดทั้งด้านเทคโนโลยีวัสดุอุปกรณ์ จึงไม่สามารถแก้ไขปัญหการปนเปื้อนของน้ำมันได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้กระบวนการไฟฟ้าเคมียังคงเป็นกระบวนการที่นิยมใช้บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด เมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น เช่น กระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นกระบวนการที่มีต้นทุนต่ำ ใช้เวลาในการเดินระบบน้อย และมีประสิทธิภาพการบำบัดที่สูง ด้วยเหตุนี้จึงสนใจกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation processes) โดยนำกระบวนการฟenton มาประยุกต์ใช้ร่วมกับไฟฟ้าเคมีเรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นว่ากระบวนการอิเล็กโทรฟenton (Electro-Fenton processes) มาใช้ในการบำบัดโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะสร้างอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\cdot\text{OH}$ ) จากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) และเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ซึ่งอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงจึงสามารถเปลี่ยนมลสารในน้ำเสียให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในที่สุด

การใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับสารประกอบเพนตันมีหลายประเภทขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้กระแสไฟฟ้าโดยสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

1. กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อผลิตไอออนเหล็ก ( $Fe^{2+}$ ) ในกระบวนการเพนตัน (EF-FeOX) และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ )
2. กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการเพนตัน (EF- $H_2O_2$ ) และเติมเหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ )
3. กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าในการหมุนเวียนไอออนเหล็ก ( $Fe^{2+}$ ) ในกระบวนการเพนตัน (E-FSR) ผลิตทั้งเหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ )

ซึ่งจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำกระบวนการอิเล็กโทรเพนตัน 3 ประเภทนี้มาทำการบำบัดน้ำเสีย เช่น การบำบัดน้ำชะขยะ (E-FSR) (X. Zhang, J. Fu et al.,2008) บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม (EF- $H_2O_2$ ) (C. Wang, J. Hu et al.,2008) การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตแอลกอฮอล์ (EF-FeOX) (Y. Yavuz,2007) เป็นต้น โดยมีงานวิจัยที่ใช้กระบวนการเพนตันมาบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัด 86 เปอร์เซ็นต์ (Nasr B., Ahmed B. et al. (2004) แต่ยังไม่มีการศึกษาการเปรียบเทียบประเภทของกระบวนการอิเล็กโทรเพนตัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาระบบการอิเล็กโทรเพนตันในแต่ละประเภทและกระบวนการเพนตันมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุด โดยศึกษาจากสภาวะต่างๆ เช่น ขั้วไฟฟ้า ความเข้มข้นของน้ำมัน ปริมาณเฟอร์รัสไอออน ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้นต่ำให้ได้คุณภาพที่เหมาะสมต่อการปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ ยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในเรื่องสารเคมีและเวลาที่ใช้ในการทำการบำบัดโดยรวมไปถึงลดปริมาณสารอินทรีย์ย่อยสลายยากในน้ำเสียที่ได้จากการบำบัดให้เหลือน้อยที่สุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหาประเภทของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่สามารถบำบัดได้ประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุด โดยเดินระบบแบบทีละเท โดยนำมาเปรียบเทียบกับกระบวนการเพนตัน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเพนตัน (ประเภทที่ 1,2 และ 3) เช่น ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (DO) ค่ากระแสไฟฟ้า (ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า) และชนิดของขั้วไฟฟ้า เป็นต้น

1.2.3 เพื่อเสนอแนวทางการออกแบบและการเดินระบบที่เหมาะสมในการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกริยา

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตงานวิจัยดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเตรียมจากน้ำมันตัดยี่ห้อคลอสตรอลที่มีความเข้มข้น 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ผสมกับน้ำประปา

2. ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ขั้วเหล็ก (Fe) ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม (St) ขั้วแกรไฟต์ (Gr) และขั้วไททาเนียม (Ti) ซึ่งมีขนาด กว้าง 7 เซนติเมตร ยาว 17 เซนติเมตรหนา 2 มิลลิเมตร

3. ทำการเดินระบบแบบที่ละเทโดยการศึกษาลักษณะพบจากปัจจัยต่างๆ และนำมาประยุกต์ใช้โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกริยา

4. การทดลองประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

4.1 วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของน้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2 ศึกษาการเดินระบบแบบที่ละเทของกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน 3 ประเภทดังนี้

- ศึกษาการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1 โดยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{EF} - \text{H}_2\text{O}_2$ ) และขั้วแคโทดที่ใช้คือเหล็กและเหล็กกล้าไร้สนิม ขั้วแอโนดที่ใช้คือเหล็ก

- ศึกษาการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 2 โดยการเติมเฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{EF-FeOX}$ ) และขั้วแคโทดและขั้วแอโนดที่ใช้คือแกรไฟต์

- ศึกษาการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 (E-FSR) ขั้วแคโทดที่ใช้คือแกรไฟต์ ไททาเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม ขั้วแอโนดที่ใช้คือเหล็กและเหล็กกล้าไร้สนิม

ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ค่าซีโอดี (COD) ค่ากระแสไฟฟ้า(ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า) ความเข้มข้นของน้ำเสียน้ำมันตัด ชนิดของขั้วไฟฟ้า ปริมาณเหล็กเฟอร์รัสไอออนและเหล็กทั้งหมด ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ

4.3 การศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องในทั้งปฏิกิริยา โดยใช้ประเภทที่เหมาะสมที่สุดจากขั้นตอนการเดินระบบแบบที่ละเทของทั้ง 3 ประเภทของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์

1.4.2 ทราบถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ในประเภทต่างๆ

1.4.3 สามารถประยุกต์ใช้กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการเดินระบบแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่องในถึงปฏิกิริยาได้



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 น้ำมันตัด

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมโลหะมีการขยายตัวมากขึ้นเนื่องจากโลหะเป็นวัสดุที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ มากขึ้นซึ่งในขั้นตอนของการผลิตโลหะจะมีการใช้น้ำมันตัด (Cutting oil) ทำหน้าที่ในกระบวนการตัด กลึง โลหะ (Metal processing and finishing) ระบายความร้อนออก ลดแรงเสียดทานและช่วยในการนำเศษชิ้นโลหะออกจากชิ้นงาน โดยทั่วไปแล้วน้ำมันตัดมีส่วนผสมของน้ำมันแร่ (mineral oil) สารลดแรงตึงผิว (surfactant) สารป้องกันการเกิดแบคทีเรีย จากตารางที่แสดงความเข้มข้นของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตามประเภทของอุตสาหกรรม ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระบวนการตัด กลึงโลหะ มีช่วงความเข้มข้นของน้ำเสียที่ปนเปื้อนค่อนข้างกว้างจึงทำให้สามารถแยกประเภทของรูปแบบของการปนเปื้อนเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกกระบวนการบำบัดที่เหมาะสม ซึ่งอนุภาคน้ำมันมีความเสถียรและยากต่อการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพและกระบวนการอื่น ๆ ดังนั้น การทิ้งน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (Cutting oil-wastewater) โดยไม่ผ่านการบำบัดหรือไม่ผ่านมาตรฐานของน้ำเสียอาจจะก่อให้เกิดปัญหามลพิษอย่างรุนแรงต่อสิ่งแวดล้อมเป็นวงกว้างได้ (H. Bataller, Lamaallam, S., Lachaise, J., Graciaa, A., Dicharry, C. ,2004)

ตารางที่ 2. 1 ปริมาณน้ำมันในแต่ละแหล่งที่มาของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน (Coca J. and Gutierrez G.,2011)

ประเภทอุตสาหกรรม	ความเข้มข้นน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
กระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum refining)	20-4,000
กระบวนการตัด กลึงโลหะ (Metal processing and finishing)	100-20,000
กระบวนการขึ้นรูปอะลูมิเนียม (Aluminum rolling)	5,000-50,000
กระบวนการทำสายไฟทองแดง (Copper wire drawing)	1,000-10,000
กระบวนการผลิตอาหาร (Food processing (fish and seafood))	500-14,000
กระบวนการกลั่นน้ำมัน (ที่รับประทานได้) (Edible oil refining)	4,000-6,000
กระบวนการผลิตสี (Paint manufacturing)	1,000-2,000

ตารางที่ 2.1 ปริมาณน้ำมันในแต่ละแหล่งที่มาของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน (Coca J. and Gutierrez G.,2011) (ต่อ)

ประเภทอุตสาหกรรม	ความเข้มข้นน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
กระบวนการทำความสะอาดเรือ (Cleaning bilge water from ships)	30-2,000
กระบวนการล้างรถ (Car washing)	50-2,000
กระบวนการซ่อมบำรุงอากาศยาน (Aircraft maintenance)	500-1,500
กระบวนการฟอกหนัง (Leather processing (tannery effluents))	200-40,000
กระบวนการผลิตไม้ (Wool scouring)	1,500-12,500
กระบวนการรักษาสภาพไม้ (Wood preservation)	50-1,500

### 2.1.1 ประเภทของน้ำมันตัด

น้ำมันตัดสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ดังนี้

1. น้ำมันตัดที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนโลหะซึ่งจะทำหน้าที่ในการช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างชิ้นส่วนงานกับใบมีด
2. น้ำมันตัดที่ทำหน้าที่เป็นสารหล่อเย็นจะช่วยในการระบายความร้อนของใบมีดที่คมตัด
3. ชะล้างแล้วพาเศษโลหะที่เกิดจากขั้นตอนการตัดเฉือนให้ออกจากชิ้นงาน
4. ป้องกันการเกิดสนิมในชิ้นส่วนงานโดยเฉพาะบริเวณผิวของโลหะที่ไวต่อการเกิดสนิม



(1)



(2)

ภาพที่ 2.1 (1) การใช้น้ำมันตัดในขั้นตอนการหล่อเย็นโลหะ (2) การใช้น้ำมันตัดในขั้นตอนการตัดโลหะ (สืบค้นออนไลน์: <http://www.directindustry.com/prod/fuchs-lubriquant-france/product-12077-332546.html>)

## 2.2 รูปแบบของน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำ (มันรักร์ และ มันลิน ตัณทุลเวศม์,2545)

น้ำเสียที่มีน้ำมันปนเปื้อนจะอยู่ในรูปของของผสมของน้ำและน้ำมันซึ่งผสมรวมกันอยู่ได้ในหลายลักษณะ เช่น น้ำมันละลายน้ำ น้ำมันที่อยู่ในรูปของอิมัลชันทั้งที่มีสารลดแรงตึงผิวและไม่มีสารลดแรงตึงผิว และน้ำมันที่เป็นชั้นลอยอยู่เหนือน้ำ เป็นต้น การจะบำบัดหรือแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียเหล่านี้ จึงมีวิธีที่เหมาะสมแตกต่างกันตามลักษณะของน้ำและน้ำมันที่ผสมรวมกันอยู่ น้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบ ได้แก่

### 2.2.1 น้ำมันที่ละลายน้ำ (Dissolved oil)

น้ำมันละลายน้ำเป็นน้ำมันที่สามารถละลายน้ำได้เล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลงทำให้ความสามารถในการละลายน้ำ (Solubility) เพิ่มขึ้น ดังนั้น ถ้าวัดว่าน้ำมันที่ละลายน้ำเป็นสารมลพิษที่อันตรายรูปแบบหนึ่ง หากน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำอยู่ในรูปละลายน้ำได้ การตรวจสอบจะเป็นไปได้ยาก ทำให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นและรสของน้ำที่เปลี่ยนไป

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความสามารถในการละลายน้ำของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ มันรักร์ และ มันลิน ตัณทุลเวศม์,2545)

ไฮโดรคาร์บอน	ความสามารถในการละลายน้ำ (มก./ล.)
Straight chain hydrocarbons C <sub>8</sub>	
n-octane	0.66
octene-1	2.7
octyne-1	24
Straight chain hydrocarbons C <sub>6</sub>	
n-hexane	9.5
hexene-1	50
hexyne-1	360
Cyclic hydrocarbons C <sub>6</sub>	
Cyclohexene	213
Benzene	1650



ปัญหาของน้ำมันที่ละลายน้ำ คือจะมีลักษณะใสและละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ จึงทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า นอกจากนี้ยังทำให้เกิดกลิ่นและรสในน้ำรวมถึงเป็นพิษ เพราะน้ำมันที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่จะเป็นพวกอะโรมาติก ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำอาจก่อปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้

### 2.2.2 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว (Non-stabilized emulsion)

น้ำมันชนิดนี้เกิดจากอนุภาคอิมัลชันที่สามารถรวมตัวกันตัวเองหรือเกิดจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำให้เกิดความปั่นป่วน (Turbulence) เช่น วาล์ว ใบพัด เครื่องสูบน้ำ ข้อต่อต่างๆ ฯลฯ เมื่อสัมผัสกันจะมีแนวโน้มที่จะรวมกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับของการกระจาย (Degree of dispersion) หรือขนาดของอนุภาคน้ำมัน ถ้าอนุภาคลอยและกระจายอยู่ในน้ำนานถือว่าอิมัลชันมีความคงตัวมาก ในขณะที่เดียวกันถ้าขนาดอนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กจะทำให้เวลาในการลอยขึ้นและรวมตัวกับอนุภาคน้ำมันอื่นๆจะสูงมากขึ้น ปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อความเสถียรของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียประเภทนี้คือ ลักษณะการกวนผสม เช่น พลังงานที่ทำให้เกิดความปั่นป่วนและแรงตึงผิวระหว่างน้ำกับน้ำมันแต่ความเสถียรของอนุภาคน้ำมันจะเกิดขึ้นเพียงชั่วคราวเท่านั้น เมื่อหยุดการปั่นกวนหยุดน้ำมันเหล่านี้จะรวมตัวกันและกลับมาแยกชั้นเช่นเดิม

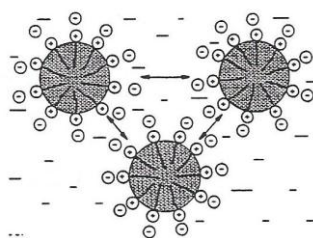
ซึ่งน้ำมันในรูปอิมัลชันที่ปั่นเป็อนอยู่ในน้ำเสียสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

- อิมัลชันขั้นต้น (Primary emulsion) คือ อิมัลชันที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะมีลักษณะเป็นหยดน้ำมันขนาดเล็กที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า
- อิมัลชันขั้นสอง (Secondary emulsion) คือ อิมัลชันที่มีขนาดเล็กจึงมีลักษณะคล้ายกับน้ำมัน

### 2.2.3 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว (Emulsion)

น้ำเสียนิดนี้จะประกอบไปด้วยน้ำ น้ำมัน และสารลดแรงตึงผิว (Surface-active agent) โดยสารลดแรงตึงผิวจะทำให้แรงตึงระหว่างผิวของน้ำกับน้ำมันมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้อนุภาคน้ำมันที่เป็นสารกระจายมีขนาดเล็ก โดยน้ำเสียที่มีลักษณะการปนเป็อนแบบนี้ได้แก่น้ำเสียจากชุมชนหรือจากอุตสาหกรรม นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวเหล่านี้จะทำให้เม็ดอนุภาคน้ำมันมีประจุชนิดเดียวกัน (ซึ่งอาจเป็นประจุบวกหรือลบก็ได้) เกิดแรงผลักทางขั้วไฟฟ้าขึ้น ทำให้อนุภาคไม่เกิดการชนและรวมตัวกับอนุภาคอื่นได้ เนื่องจากอนุภาคอิมัลชันชนิดนี้มีขนาดเล็กมากและไม่สามารถรวมตัวกัน

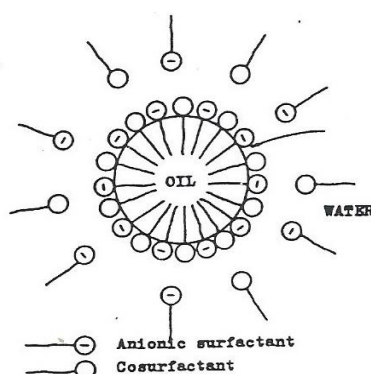
ได้จึงทำให้มีความคงตัวสูงและอยู่ในสภาพลอยกระจายอยู่เป็นระยะเวลานาน ไม่สามารถแยกออกได้เองตามธรรมชาติ สารลดแรงตึงผิวประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ โมเลกุลที่ชอบน้ำมันและโมเลกุลที่ชอบน้ำ จึงทำให้สารลดแรงตึงผิวจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การผลักกันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิว (Aurelle Y.,1985)

อนุภาคน้ำมันที่เกิดขึ้นในอิมัลชันจะมีขนาดเล็กมาก ซึ่งโดยทั่วไปมักจะมีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน ดังนั้นความเร็วในการลอยขึ้นจึงมีค่าต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian movement) และเนื่องจากขั้วไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน (Electrokinetic หรือค่า Zeta potential) จึงทำให้ไม่เกิดการชนและการรวมตัวกันในระหว่างการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน

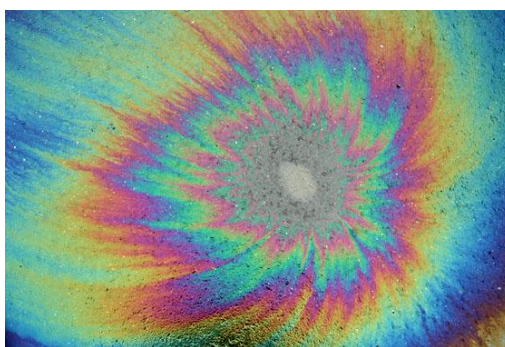
นอกจากนี้ยังพบอีกว่า น้ำเสียมีการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวร่วม (Cosurfactant) ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับสารลดแรงตึงผิว คือจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ ผลที่เกิดขึ้นก็คือจะทำให้อิมัลชันมีเสถียรภาพสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวร่วมจะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว และจะไปลดแรงผลักระหว่างโมเลกุลที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิว (ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว) ดังแสดงในภาพที่ 2.3 อิมัลชันที่เกิดขึ้นเมื่อมีสารลดแรงตึงผิวร่วมจะมีขนาดอนุภาคน้ำมันเล็กมาก โดยจะมีขนาดประมาณ  $10^{-2} - 6 \times 10^{-2}$  ไมครอมเมตร



ภาพที่ 2.3 การเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวร่วม (Aurelle Y.,1985)

## 2.2.4 น้ำมันที่ลอยเป็นฟิล์มอยู่บนผิวน้ำ (Oil film)

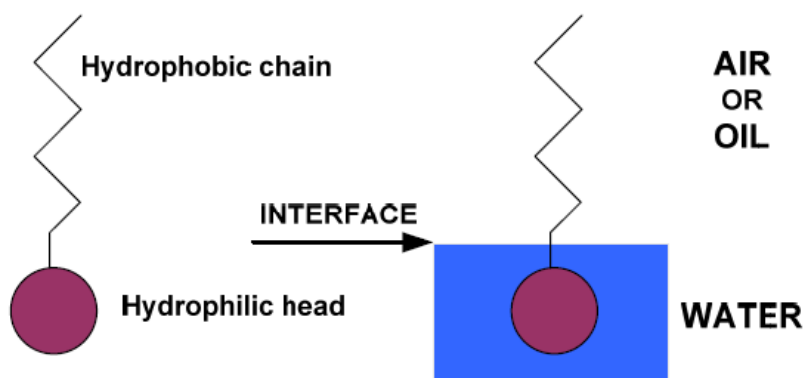
น้ำมันส่วนใหญ่มักจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ จึงมักจะลอยอยู่บนผิวน้ำในลักษณะของฟิล์มบางๆ ซึ่งจะไปขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจนและแสง ปัญหาของน้ำมันในลักษณะนี้ก็คือสามารถปนเปื้อนได้เป็นพื้นที่กว้าง ถึงแม้จะมีน้ำมันปริมาณน้อยก็ตาม เพราะจะมีการแพร่กระจายออกไปในลักษณะของแผ่นฟิล์มโมเลกุลเดียว โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะแพร่กระจายได้เป็นพื้นที่กว้างมาก ซึ่งการปนเปื้อนในลักษณะนี้จะสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า คือจะสะท้อนเป็นฟิล์มสีรุ้งลอยอยู่บนผิวน้ำ ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 น้ำมันที่ลอยเป็นฟิล์มอยู่บนผิวน้ำ (จิตรภา มงคลเนาวรัตน์,2557)

## 2.3 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

สารลดแรงตึงผิว หรือ Surfactant เป็นคำย่อของ Surface active agent เป็นสารที่ทำให้แรงตึงผิว (Surface tension) ลดลง สารลดแรงตึงผิวมีโครงสร้างของโมเลกุลประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เป็นส่วนหัวของโมเลกุล และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เป็นส่วนหางของโมเลกุลเป็นอนุพันธ์ของสารอินทรีย์ไฮยาดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว (M. Sun, F. Chen et al.,2015)

เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงในน้ำที่มีน้ำมัน โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลน้ำมันกับน้ำ โดยส่วนหัวเป็นส่วนที่ชอบน้ำและส่วนหางเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ โดยสารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งตามประจุไฟฟ้าของส่วนชอบน้ำออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

### 2.3.1 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าเป็นลบในส่วนที่ชอบน้ำของโมเลกุล อยู่ในรูปของ carboxylate, sulfate, sulfonate หรือ phosphate สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ใช้มากในอุตสาหกรรมการผลิตผงซักฟอก ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด น้ำยาล้างจาน เนื่องจากสามารถใช้ขจัดคราบสกปรกได้ดี

### 2.3.2 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าของส่วนที่ชอบน้ำเป็นประจุบวก ส่วนมากจะเป็นพวก Quaternary ammonium ที่ไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะที่เป็นด่างสูง (pH 10 - 11) เนื่องจากเกลือแอมโมเนียมจะมีการสูญเสียประจุบวกทำให้เกิดเป็นตะกอน

### 2.3.3 สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

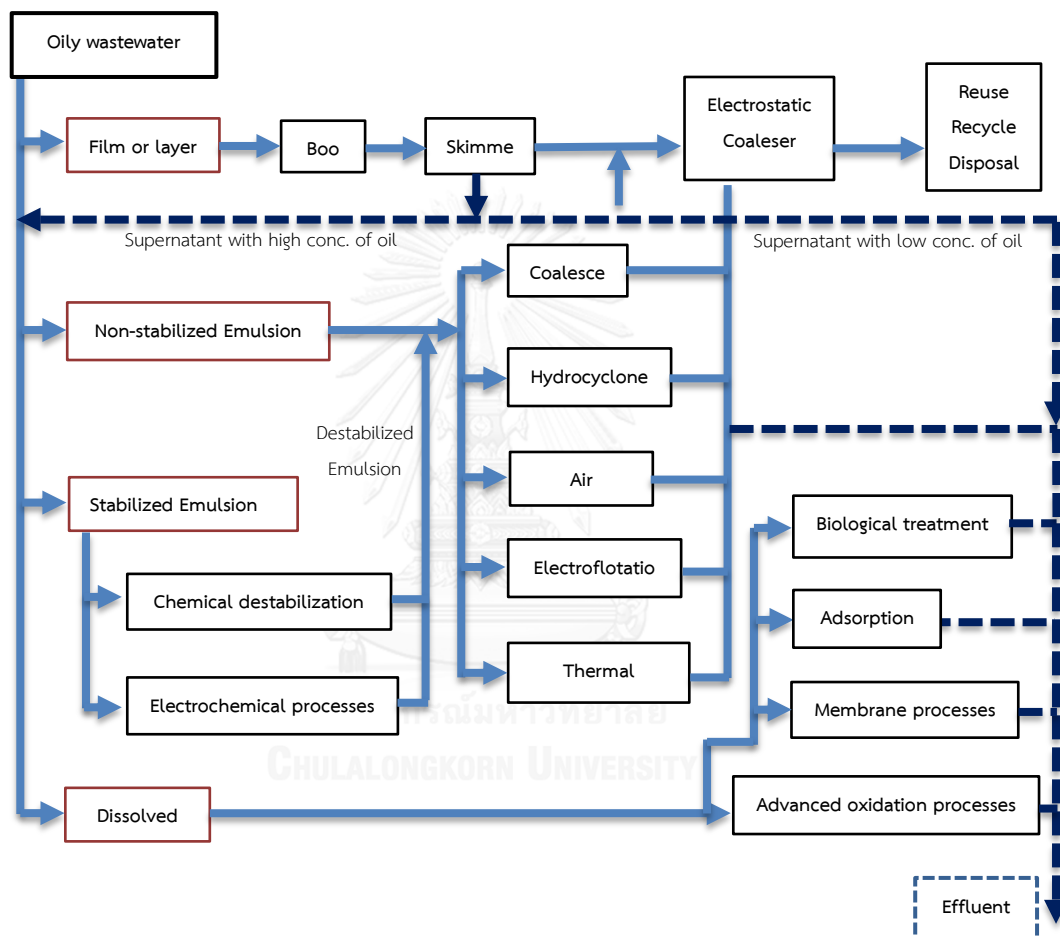
เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้าในส่วนที่ชอบน้ำของโมเลกุล โดยจะมีพวก polyhydroxyl หรือ polyether เป็นกลุ่มที่แสดงคุณสมบัติคล้ายพวกที่มีประจุ ใช้มากในผงซักฟอก น้ำยาล้างจาน ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดพื้นผิว เป็นต้น

### 2.3.4 สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุลบและประจุบวก (Amphoteric surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าเป็นได้ทั้งประจุบวกและลบในส่วนที่ชอบน้ำ โดยจะแสดงคุณสมบัติประเภทใดนั้น ขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสภาวะนั้นๆ ถ้าสภาวะเป็นด่าง (pH >7) ประจุไฟฟ้าในส่วนที่ชอบน้ำจะเป็นประจุลบ ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นกรด (pH <7) ประจุไฟฟ้าในส่วนที่ชอบน้ำจะเป็นประจุบวก และในสภาวะที่เป็นกลางจะไม่เกิดประจุไฟฟ้า ในปัจจุบันมีการใช้น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทอื่น

## 2.4 การใช้เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในปัจจุบัน

ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ปัจจัยที่นำมาใช้ในการพิจารณาเลือกกระบวนการบำบัด คือ รูปแบบของน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียนั้น ๆ จากรูปแบบน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันทั้ง 4 ประเภทที่ได้กล่าวมาในข้างต้น สามารถสรุปแนวทางการใช้ระบบบำบัดที่เหมาะสมได้ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การจัดการน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตามรูปแบบของน้ำมันในน้ำเสีย (P. Painmanakul, T. Chintateerachai et al.,2013)

### 2.4.1 การกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำ

อนุภาคของน้ำมันประเภทนี้ขนาดเล็กมากจนเป็นเนื้อเดียวกับน้ำจึงทำให้ความเสถียรสูง ไม่สามารถใช้กระบวนการทางกายภาพในการแยกน้ำมันออกจากน้ำ โดยทั่วไปจะใช้วิธีการที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำมันในระดับโมเลกุล เช่น การใช้ปฏิกิริยาทางเคมี คือ กระบวนการ

ออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation processes : AOPs) การกรองผ่านเมมเบรน (Membrane process) เช่น การกรองด้วยอัลตราฟิวเทรชันเมมเบรน (Ultrafiltration : UF) การดูดซับน้ำมันด้วยตัวกลางดูดซับ (Adsorption) และการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biological treatment process) (J. Virkutyte and V. Jegatheesan,2009)

#### 2.4.2 การจัดการน้ำในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว

น้ำมันประเภทนี้จะแขวนลอยอยู่ในน้ำในลักษณะของเม็ดน้ำมัน สามารถใช้วิธีการทางกายภาพในการบำบัด โดยอาศัยหลักการเพิ่มความเร็วในการลอยตัวของอนุภาคน้ำมัน เพื่อให้ไขมันที่แขวนลอยอยู่ในน้ำรวมกลุ่มกันและแยกออกจากน้ำ การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความเร็วลอยตัวนี้เช่น โคเอเลสเซอร์ (Coalescer) การทำให้ลอย (Flotation) ไฮโดรไซโคลอน (Hydrocyclone) การตกตะกอน (Decantation) เป็นต้น

#### 2.4.3 การจัดการน้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว

น้ำมันประเภทนี้จะเป็ยหยदन้ำมันที่มีขนาดเล็กและมีเสถียรภาพเกินกว่าที่จะแยกได้โดยกระบวนการทางกายภาพในแบบเดียวกับกับอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว จึงต้องมีการทำลายเสถียรภาพของหยदन้ำมันด้วยการเติมสารเคมี (Chemical destabilization) หรือใช้กระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrochemical destabilization) เพื่อให้หยदन้ำมันรวมตัวกันมีขนาดใหญ่จนเป็นเม็ดน้ำมัน จากนั้นจึงสามารถแยกน้ำมันออกด้วยวิธีทางกายภาพได้เช่นเดียวกับน้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว

#### 2.4.4 การกำจัดน้ำมันที่ลอยบนผิวน้ำ

น้ำมันลักษณะนี้จะลอยอยู่เหนือผิวน้ำรวมตัวกันเป็นฟิล์มบางซึ่งแยกออกจากน้ำอย่างชัดเจน สามารถใช้ฟุ่นน้ำมัน (Boom) จำกัดขอบเขตการแพร่กระจายของน้ำมันที่ลอยบนผิวน้ำให้มีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น แล้วใช้ตัวกลางดูดซับน้ำมันออกจากน้ำ โดยพื้นผิวของส่วนที่สัมผัสฟิล์มน้ำมันจะต้องมีความชอบน้ำมัน เช่น สกิมเมอร์ (Skimmer) และอุปกรณ์ดูดซับ (Adsorbent) ชนิดต่างๆ เป็นต้น

## 2.5 การแบ่งกระบวนการบำบัดน้ำปนเปื้อนน้ำมันตามระดับความเข้มข้นของน้ำมัน

### 2.5.1 กระบวนการบำบัดเบื้องต้น (Pre-treatment process)

กระบวนการบำบัดเบื้องต้นเป็นกระบวนการทางกายภาพที่มีเป้าหมายในการแยกน้ำมันและสารที่สามารถแยกออกได้ง่าย เช่น ตะกอนดิน หิน กรวด ทราย และอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำเสีย เพื่อนำน้ำมันส่วนใหญ่ที่อยู่ในน้ำเสียมาเข้ากระบวนการผลิตต่อไป ตัวอย่างในการบำบัดในขั้นนี้คือ

- การตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity separation)
- การใช้อุปกรณ์โคalesceอร์ (Coalescer)

### 2.5.2 กระบวนการบำบัดขั้นที่ 2 (Secondary treatment process)

ภายหลังจากการแยกของแข็งและอนุภาคขนาดใหญ่ออกจากน้ำเสียแล้วหรือผ่านกระบวนการบำบัดเบื้องต้น กระบวนการถัดไป คือกระบวนการบำบัดขั้นที่ 2 โดยมีเป้าหมายในการลดปริมาณอนุภาคแขวนลอยและปริมาณน้ำมันส่วนใหญ่ที่เกินความสามารถการบำบัดของกระบวนการบำบัดขั้นต้น โดยอาศัยเกณฑ์ความเข้มข้นของน้ำมันเป็นเกณฑ์ในการเลือกใช้เทคโนโลยีการบำบัด ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระดับความเข้มข้น กล่าวคือ น้ำเสียที่มีความเข้มข้นน้ำมันสูง (มากกว่า 2% v/v) น้ำเสียที่มีความเข้มข้นน้ำมันปานกลาง (0.5 – 2% v/v) และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นน้ำมันต่ำ (น้อยกว่า 0.5% v/v) ตัวอย่างของการบำบัดในขั้นนี้มีดังนี้

- Dissolved Air Flootation (DAF)
- Induce Air Flootation (IAF)

#### 2.5.2.1 การใช้กระบวนการแยกทางเคมี (Chemical processes)

การเติมสารเคมีลงในน้ำเสียที่ต้องการบำบัดเป็นวิธีช่วยกำจัดไขมันหรือน้ำมันต่างๆ ออกจากน้ำเสีย เนื่องจากทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันหรือทำลายโครงสร้างจนสามารถแยกน้ำมันออกมาได้ นิยมใช้อย่างกว้างขวางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน เช่น การใช้สารลดแรงตึงผิวหรือการเติมสารติ่มลชีฟายเออร์ การเติมคลอรีน (Cl<sub>2</sub>) ทั้งนี้จะเกิดการทำลายสภาพอิมัลชัน (Demulsification) ประกอบด้วยการกวนเร็ว (Rapid mixing) เมื่อเติมสารเคมีเพื่อลดประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมันซึ่งจะช่วยเพิ่มโอกาสในการชน (Flocculation) และอนุภาคน้ำมันสามารถรวมตัวกันและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้านบน (Floatation)

### 2.5.2.2 กระบวนการแยกทางกายภาพ-เคมี (Physio-Chemical processes)

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยทั้งเทคนิคทางกายภาพและทางเคมีร่วมกัน เพื่อใช้ในการกำจัดทั้งสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียเช่น การตกตะกอน การทำให้ลอยตัว และการกรองเบื้องต้น เป็นต้น ตัวอย่างของการบำบัดได้แก่

- การดูดซับ (Adsorption)
- การกรอง (Filtration)
- การทำให้ลอย (Floatation)
- การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane processes)
- การใช้ความร้อน (Thermal process)

### 2.5.2.3 กระบวนการแยกไฟฟ้าเคมี (Electro-Chemical processes)

การเพิ่มความสามารถในการทำลายเสถียรภาพ และการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น (Coagulation) และการแยกสารโดยทำให้ลอยขึ้น (Floatation) ด้วยไฟฟ้า โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้า ทั้งนี้การสลายตัวของขั้วไฟฟ้าจะไม่ขึ้นกับปริมาณและขนาดของขั้วไฟฟ้า จะขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด ข้อดีของระบบนี้ คือ ควบคุมและสามารถดำเนินการง่าย ประสิทธิภาพสูงและระบบบำบัดมีขนาดเล็ก

### 2.5.2.4 กระบวนการแยกทางชีวภาพ (Biological treatment processes)

เป็นการอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์ต่าง ๆ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้ต้องเลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์ โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย แบคทีเรียที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นพวกไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria) เป็นกระบวนการที่สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยน้ำมันจะถูกย่อยสลายทางกระบวนการชีวภาพ แต่จะต้องมีการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการ ระบบบำบัดที่นิยมใช้ เช่น ระบบ Activated sludge, Tricking filter เป็นต้น



ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย (Water Quality Division Aquifer Protection Program.,1996)

กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Gravitational separator	ตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Decantation)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- กำจัดของแข็งแขวนลอยได้</li> <li>- กำจัดน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำได้ดี</li> <li>- ใช้งานง่ายและประหยัด</li> <li>- เป็นขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นก่อนนำไปบำบัดต่อ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีข้อจำกัดในการกำจัดอิมัลชันน้ำมันจะต้องเล็กกว่า 20 ไมครอนหรือน้ำมันที่ละลายน้ำไม่ได้</li> <li>- ต้องใช้ความเร็วการไหลต่ำ</li> <li>- ต้องการถังแยกขนาดใหญ่</li> </ul>
Air Flotation	DAF, IAF	<ul style="list-style-type: none"> <li>- กำจัดน้ำมันขนาดเล็กที่แพร่กระจายในน้ำและอิมัลชันได้ เมื่อมีการเติมสารเคมีช่วย</li> <li>- รับน้ำเสียที่มีน้ำมันความเข้มข้นสูงได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้พลังงานในส่วนเติมอากาศมาก</li> <li>- ต้องกำจัดตะกอนทางเคมีที่เกิดขึ้น ถ้าใช้สารเคมีช่วยสร้างตะกอน</li> </ul>
Chemical flocculation	ใช้ร่วมกับ gravity separation และ air flotation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ประสิทธิภาพการบำบัดสูง</li> <li>- สารเคมีหาซื้อง่าย ราคาถูก</li> <li>- ใช้กับน้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ปฏิกริยาทำให้พีเอชของน้ำเสียที่ถูกบำบัดลดลง</li> <li>- ตะกอนที่เกิดขึ้นมีสัดส่วนของน้ำมาก</li> <li>- ใช้สารเคมีปริมาณมาก</li> </ul>
Filtration	Sand, anthracite, multimedia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถกำจัดน้ำมันขนาดเล็กออกจากน้ำเสียได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องทำการล้างย้อนซึ่งต้องบำบัดน้ำล้างย้อนต่อไป</li> <li>- เกิดการอุดตันง่าย</li> </ul>
Coalescence	Fibrous membrane	<ul style="list-style-type: none"> <li>- กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภท ยกเว้นน้ำมันที่ละลายน้ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องมีการบำบัดขั้นต้น</li> <li>- เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่าย</li> </ul>

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย (Water Quality Division Aquifer Protection Program.,1996) (ต่อ)

กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Membrane processes	Reverse osmosis, ultrafiltration	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถกำจัดน้ำมันที่มีอนุภาคขนาดเล็กและลอยน้ำได้</li> <li>- ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง</li> <li>- ใช้เวลาในการเดินระบบรวดเร็ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่ายและอายุการใช้งานจำกัด</li> </ul>
Biological processes	Activated sludge	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องมีการบำบัดขั้นต้นให้ปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 40 มิลลิกรัมต่อลิตร</li> </ul>
Electro-Chemistry	Electro-Fenton	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารพิษได้ดี</li> <li>- มีความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ไม่เฉพาะเจาะจงโดยลดความเป็นพิษของน้ำเสียลงและสามารถบำบัดต่อด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้</li> <li>- ตะกอนเหล็กที่เกิดขึ้นสามารถแยกออกจากระบบและนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้</li> <li>- กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทรวมถึงน้ำมันที่ละลายน้ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องควบคุมความเข้มข้นของเหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ค่าอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-เบส และระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาให้เหมาะสม</li> </ul>

## 2.6 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไฟฟ้า

### 2.6.1 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ

การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งของการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า วัดได้ในหน่วยแอมแปร์ (Amp) ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density,  $J$ ) คือ กระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ที่ผ่านไปหนึ่งหน่วย พื้นที่หน้าตัด ( $A$ ) ดังแสดงในสมการ (2.1)

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.1)$$

$$J = \sigma E_0 \quad (2.2)$$

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{V}{l} \quad (2.3)$$

$$V = \left(\frac{l}{\sigma A}\right) I \quad (2.4)$$

ความต่างศักย์กับกระแสจะเป็นสัดส่วนโดยตรง ด้วยค่าคงที่  $\left(\frac{l}{\sigma A}\right)$  ซึ่ง  $\left(\frac{l}{\sigma A}\right)$  เรียกว่าความต้านทาน (Resistance,  $R$ ) ดังนั้น

$$R = \frac{l}{\sigma A} = \frac{V}{I} \quad (2.5)$$

ส่วนกลับของค่าความนำไฟฟ้า  $\sigma$  คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้า  $\rho$  ซึ่ง

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \text{ ดังนั้น}$$

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.6)$$

โดยที่  $J$  ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current Density) (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

$A$  พื้นที่ (ตารางเซนติเมตร)

$E_0$  ความเข้มของสนามไฟฟ้า (โวลต์/เซนติเมตร)

$\rho$  สภาพความต้านทานไฟฟ้า (เซนติเมตร/โอห์ม)

$l$  ความยาวของตัวนำไฟฟ้า (เซนติเมตร)

$\sigma$  ค่าการนำไฟฟ้า (โอห์ม/เซนติเมตร)

$V$  ความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด (โวลต์)

$R$  ความต้านทานระหว่างจุดสองจุด (โอห์ม)

$I$  ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (แอมแปร์)

**2.6.1.1 สภาพการนำไฟฟ้า ( $\sigma$ )** มีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียและมีผลต่อปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยาการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ตามกฎของฟาราเดย์ที่ว่า 1 ฟาราเดย์ ของประจุที่ผ่านเข้าวงจร จะชะเหล็กออกมาจากขั้วไฟฟ้า 27.9 กรัม ซึ่งถ้าจำนวนประจุมากขึ้นก็จะทำให้มีเหล็กหลุดออกมาจากอิเล็กโทรดเพียงพอที่จะทำให้โลหะไฮดรอกไซด์ตกตะกอนได้มากขึ้น จากกฎของโอห์ม กล่าวถึงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร มีค่าดังสมการที่ (2.7)

$$V = IR \quad (2.7)$$

โดยที่  $V$  ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)  
 $I$  ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)  
 $R$  ความต้านทาน (โอห์ม)

**2.6.1.2 ความต้านทานไฟฟ้า ( $R$ )** เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของสาร เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ถ้ามีความต้านทานน้อยกระแสไฟฟ้าจะไหลมาก (โลหะจะนำไฟฟ้าได้ดีที่สุดเมื่อความต้านทานเป็นศูนย์) และเป็นส่วนกลับกับค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) นอกจากนี้ค่าการนำไฟฟ้ายังสัมพันธ์กับงานทางไฟฟ้า ดังนั้นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี จะมีค่าเท่ากับ ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

$$R = \frac{D}{CA} \quad (2.8)$$

โดยที่  $R$  ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (โอห์ม)  
 $D$  ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (เซนติเมตร)  
 $C$  ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (โอห์ม)  
 $A$  พื้นที่หน้าตัดที่อิเล็กโทรดสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ (เซนติเมตร<sup>2</sup>)

**2.6.1.3 กระแสไฟฟ้า ( $I$ )** เป็นปริมาณของประจุทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดขวางของตัวนำใดๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา โดยทิศทางของกระแสจะเป็นไปตามการเคลื่อนที่ของประจุบวก ซึ่งจะไหลจากศักย์ที่สูงกว่าไปยังศักย์ที่ต่ำกว่า เมื่อประจุไฟฟ้าได้รับพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วบวกของเซลล์ไฟฟ้า ผ่านขดลวดความต้านทานไปยังขั้วลบของเซลล์ ทั้งนี้กระแสอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไหลต่อเนื่องบนตัวนำไฟฟ้าที่เป็นของแข็งซึ่งจะเกิดขึ้นเนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างจุด 2 จุด ซึ่งจะไหลจากศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าไปยังศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่า

**2.6.1.4 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์** ในเซลล์ไฟฟ้ามีการไหลของกระแสไฟฟ้า เพราะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ เซลล์ไฟฟ้าหนึ่งต้องการพลังงาน 1 จูลในการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ 1 คูลอมบ์จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเซลล์จะหมายความว่า จุดสองจุดมีความต่างศักย์ 1 โวลต์ ฉะนั้น 1 โวลต์ จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูล/คูลอมบ์ และทางไฟฟ้าเคมีมักจะแทนโวลต์เตจด้วยเทอมแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force (E), emf) จากความหมายของพลังงานไฟฟ้าพบว่า

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{\text{elec}}) = \text{คูลอมบ์} \times \text{โวลต์} \quad (2.9)$$

เนื่องจากงานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้ามาจากการถ่ายอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุในหน่วยคูลอมบ์ จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา ซึ่งทุก 1 โมลของอิเล็กตรอนจะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ สมมติว่าในปฏิกิริยาของเซลล์ไฟฟ้ามีการถ่ายอิเล็กตรอน  $n$  โมลจะมีปริมาณประจุเท่ากับ  $n \times 96,487$  หรือ  $nF$  คูลอมบ์ ในเมื่อ  $F$  คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ เท่ากับ 96,487 คูลอมบ์/โมล เมื่อเป็นเช่นนี้สมการ (2.10) จะเปลี่ยนเป็น

$$\begin{aligned} W_{\text{elec.}} &= (nF) (E) \\ &= nE \times 96,487 \end{aligned} \quad (2.10)$$

**2.6.1.5 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี** ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ต้องผ่านเข้าไปในสารละลายในเซลล์อิเล็กโทรไลติก เพื่อให้อิเล็กตรอนหนึ่งโมลทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดออกซิเดชันและรีดักชัน หรือคือ ผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอน 1 โมล

$$\begin{aligned} 1 \text{ F (Faraday)} &= eN \\ &= (1.602 \times 10^{-19} \text{ C}) (6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \\ &= 96487 \text{ C mol}^{-1} \text{ (C = coulomb)} \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\text{จะได้ } Q \text{ (coulomb)} = I \text{ (ampere)} \times t \text{ (second)}$$

หรือ 1 ฟาราเดย์ คือ ไฟฟ้าฟาราเดย์ทำให้เกิดสารแต่ละชนิดที่ขั้วอิเล็กโทรดจำนวน 1 โมล โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณของขั้วโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายนำไฟฟ้าจะสามารถอธิบายด้วยกฎฟาราเดย์ ดังสมการที่ (2.12) ต่อไปนี้

$$W = \frac{ItM}{ZF} \quad (2.12)$$

โดยที่	$W$	ปริมาณโลหะที่ละลายน้ำ (กรัม)
	$I$	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (แอมแปร์)
	$M$	น้ำหนักโมเลกุลที่ขั้วแอโนด (กรัมต่อโมล)

$Z$  จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์ (ประจุต่อโมล)

$t$  เวลาที่ใช้ (วินาที)

$F$  ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487 (แอมแปร์.วินาทีต่อประจุ, คูลอมบ์)

เช่น ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ลงใน  $\text{Fe}^{2+}$  จะได้  $\text{Fe}_{(s)}$  1 โมล = น้ำหนักกรัมโมลต่อประจุ  
 = 55.85/2  
 = 27.9 กรัม

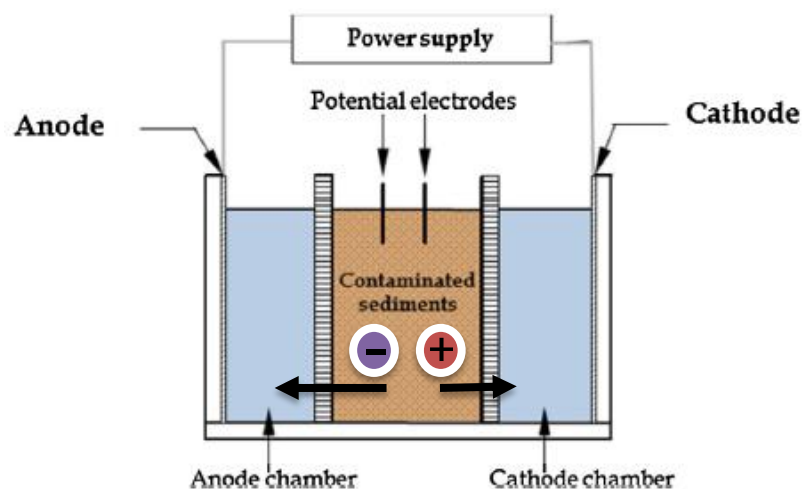
มวลของสารที่คำนวณได้จากกฎฟาราเดย์ คือ มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎี หมายความว่า กระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ให้แก่ระบบถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนโลหะทั้งหมด ซึ่งในทางปฏิบัติปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบไม่ได้ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด เนื่องจากการสูญเสียไปในการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเป็นแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำเป็นแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนด หรืออาจเกิดจากความต้านทานต่างๆ เนื่องจากมีตัวออกซิไดซ์หลายชนิดละลายอยู่รวมกันในสารละลาย ดังนั้นจึงต้องมีการวัดประสิทธิภาพเชิงกระแส ดังสมการที่ (2.13)

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกระแส} = \frac{\text{มวลที่ได้จริงจากกระบวนการ}}{\text{มวลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี}} \quad (2.13)$$

## 2.7 กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electro-chemistry process)

เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Density current:  $J$ ) และความต่างศักย์ (Voltage:  $V$ ) โดยพิจารณาจำนวนครั้งในการสัมผัสกันของอนุภาคน้ำมันซึ่งมีความสำคัญต่อการบำบัดและเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการทำมลพิษเคซันคือ เมื่อผ่านสนามไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าจะผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น ส่งผลให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคของน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากอนุภาคน้ำมันถูกทำลายเสถียรภาพเมื่อเคลื่อนผ่านบริเวณดังกล่าว ทั้งนี้ความขุ่นของน้ำเสียจะลดลงมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับประจุที่อยู่บนผิวหน้าของอนุภาคน้ำมันว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยวิธีทางไฟฟ้ามีดังนี้

อิเล็กโทรไคเนติก (Electrokinetic) กระบวนการแยกสารมลพิษออกจากน้ำ โดยทำให้ไอออนของมลพิษเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า โดยใส่สนามไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง (ดังภาพที่ 2.7)



ภาพที่ 2.7 อิเล็กโทรไคเนติก (Electrokinetic) (Iannelli R., Masi M. et al., 2015)

หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบอิเล็กโทรลิติกเซลล์ (Electrolytic cell) ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ชั่วไฟฟ้า 2 ขั้ว จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ชั่วไฟฟ้าที่ต่อกับขั้วบวกของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เรียกชั่วไฟฟ้านี้ว่าแอโนดและเป็นขั้วบวก ส่วนชั่วไฟฟ้าที่ต่อกับขั้วลบแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยารีดักชัน เรียกชั่วไฟฟ้านี้ว่าแคโทด และเป็นขั้วลบ

กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า (Electro-oxidation: EO) (Nidheesh P.V. and Gandhimathi R., 2012) กระบวนการนี้จะผลิตอนุพันธ์ของ  $\text{OH}\cdot$  (Hydroxyl radicals) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง (Strong oxidizing agent) (แสดงในตารางที่ 2.4) โดยสามารถเรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า Direct anodic process ทำให้สารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกออกซิไดซ์ทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงจนกระทั่งกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

### 2.7.1 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์คือผลรวมของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วอิเล็กโทรด (ในทางปฏิบัตินั้นไม่มีวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าเฉพาะแต่ละขั้วเดี่ยวได้โดยตรงจึงต้องวัดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์) โดยนำอิเล็กโทรดเหล่านั้นมาจับคู่กับอิเล็กโทรดมาตรฐานและวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ ซึ่งค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่ต้องการทราบ ทั้งนี้เพราะศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าอิเล็กโทรดนั้นอยู่ในสภาวะมาตรฐานด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน ( $E^0_{\text{cell}}$ ) และเป็นค่าเดียวกับศักย์มาตรฐานของอิเล็กโทรดเดี่ยว ( $E^0_{\text{cell}}$ ) ที่มาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมาตรฐาน โดยการทำเช่นนี้กับอิเล็กโทรดอื่นๆ ทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดต่างๆ (ดังตารางที่ 2.4)

ศักย์ไฟฟ้าจะแสดงให้เห็นแนวโน้มของขั้วอิเล็กโทรดที่จะรับอิเล็กตรอน (เป็นตัวออกซิไดซ์หรือตัวรีดิวซ์)  $\text{MnO}_4^-$  กับ  $\text{Fe}^{2+}$  ในสารละลายกรดพบว่า จากตารางที่ 2.3 ค่า  $E^\circ$  ของระบบ  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} = +0.77$  โวลต์ และค่า  $E^\circ$  ของ  $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+} = +1.52$  โวลต์ แสดงว่าระบบ  $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}$  มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าระบบ  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  จึงเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีกว่า โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐานหรือที่สภาวะใดๆ คำนวณได้สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐานคือ

$$E^\circ_{\text{cell}} = E^\circ(\text{ขั้วบวก}) - E^\circ(\text{ขั้วลบ}) \quad (2.14)$$

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศา (ทบวงมหาวิทยาลัย, 2528)

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด(โวลต์)
$\text{TiO}^{2+} + 2\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ti}^{3+} + \text{H}_2\text{O}$	0.1
$\text{AgBr(s)} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag(s)} + \text{Br}^-$	0.095
$\text{S}_4\text{O}_6^{2-} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	0.08
$\text{Ag(S}_2\text{O}_3)_2^{3-} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag(s)} + 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	0.010
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g})$	0.000
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb(s)}$	-0.126
$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn(s)}$	-0.136
$\text{AgI(s)} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag(s)} + \text{I}^-$	-0.151
$\text{CuI(s)} + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu(s)} + \text{I}^-$	-0.185
$\text{N}_2(\text{g}) + 5\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow \text{N}_2\text{H}_5^+$	-0.23
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni(s)}$	-0.250
$\text{V}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{V}^{2+}$	-0.255
$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Co(s)}$	-0.277
$\text{Ti}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ti(s)}$	-0.336
$\text{PbSO}_4(\text{s}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb(s)} + \text{SO}_4^{2-}$	-0.356
$\text{Ti}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ti}^{2+}$	-0.37
$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd(s)}$	-0.403
$\text{Cr}^{3+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}^{2+}$	-0.41



ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศา (ทบวงมหาวิทยาลัย,2528)  
(ต่อ)

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด(โวลต์)
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe(s)}$	-0.440
$2\text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$	-0.49
$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr(s)}$	-0.74
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn(s)}$	-0.763
$\text{Mn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn(s)}$	-1.18
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al(s)}$	-1.66
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg(s)}$	-2.37
$\text{Ca}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ca(s)}$	-2.87
$\text{Ba}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ba(s)}$	-2.90
$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{K(s)}$	-2.925
$\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Li(s)}$	-3.045
$\text{F}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{HF}$	3.06
$\text{O}_3(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$	2.07
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{SO}_4^{2-}$	2.01
$\text{Co}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Co}^{2+}$	1.842
$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.776
$\text{MnO}_4^- + 4\text{H}^+ + 3\text{e}^- \rightarrow \text{MnO}_2(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O}$	1.695
$\text{MnO}_2(\text{s}) + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	1.23
$\text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.229
$\text{IO}_3^- + 6\text{H}^+ + 5\text{e}^- \rightarrow 1/2\text{I}_2(\text{s}) + 3\text{H}_2\text{O}$	1.195
$\text{HNO}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{NO}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$	1.00
$\text{NO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	0.94
$2\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg}_2^{2+}$	0.92
$\text{HO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 3\text{OH}^-$	0.88

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศา (ทบวงมหาวิทยาลัย,2528)  
(ต่อ)

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด(โวลต์)
$\text{Cu}^{2+} + \text{I}^- + \text{e}^- \rightarrow \text{CuI(s)}$	0.86
$\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg(l)}$	0.854
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag(s)}$	0.799
$\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg(l)}$	0.789
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	0.771
$\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	0.682
$\text{PtCl}_6^{2-} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{PtCl}_4^{2-} + 2\text{Cl}^-$	0.68
$\text{Hg}_2\text{SO}_4(\text{s}) + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg(l)} + \text{SO}_4^{2-}$	0.615

### 2.7.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) (อภิตติ สุนทรภา,2549)

ขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของแต่ละเซลล์ไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ขั้วที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Active Electrodes) ขั้วที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Inert Electrodes) และขั้วแก๊ส (Gas Electrodes) และสามารถจำแนกตามการเกิดปฏิกิริยา โดยขั้วแอโนด (Anode) เป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และขั้วแคโทด (Cathode) เป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน

ระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดมีผลต่อปฏิกิริยาเมื่อระยะห่างเพิ่มมากขึ้นพบว่าความต้านทานในระบบจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดที่ห่างกันมากทำให้การถ่ายเทอิเล็กตรอนกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกิดปฏิกิริยาได้ช้าและมีความต้านทานเกิดขึ้น แต่เมื่อทำการลดระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดให้แคบลงจะทำให้ความต้านทานของระบบนั้นต่ำมาก ซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนต่ำลง จึงจำเป็นต้องหาระยะที่เหมาะสมเพื่อลดค่าความต้านทานที่จะเกิดในขณะที่ปฏิกิริยาเคมีดำเนินไปได้ โดยวัสดุที่นำมาใช้ทำขั้วมีหลายชนิดดังนี้

อะลูมิเนียม (Aluminium) มีลักษณะสีขาวเหมือนเงิน มีน้ำหนักเบา นำความร้อนได้ดี ไม่สึกกร่อนได้ง่าย อะลูมิเนียมมีความว่องไวจึงสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นๆ ได้ มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 มักจะเป็นสารประกอบโคเวเลนต์ เมื่ออยู่ในน้ำ  $\text{Al}^{3+}$  จะเกิด ไฮเดรชันและไฮโดรไลซิส

เกลือซัลเฟต ไนเตรท และเฮไลต์ของอะลูมิเนียมละลายน้ำได้ดี แต่ไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมไม่ละลายน้ำ การใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสขึ้นทำให้อะลูมิเนียมเกิดการกัดกร่อนและจะละลายในสารละลาย ดังนั้นในสารละลายอาจจะมีคอลลอยด์อยู่มาก

ไทเทเนียม (Titanium) โลหะทรานซิชันลักษณะขาวเทาคล้ายเงิน จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงแข็งและเหนียว ที่สภาวะปกติไทเทเนียมค่อนข้างเฉื่อยมาก สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจน ไทเทเนียมมีเลขออกซิเดชัน +2, +3 และ +4 ซึ่งจะเสถียรที่ +4 ไทเทเนียมขาวถูกนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ และไม่ทำให้โลหะตัวอื่นกัดกร่อนในระหว่างเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส และยังเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเพราะจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงในสภาวะปกติ ดังนั้นจึงมีการนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแต่ข้อเสียคือไทเทเนียมมีราคาสูง หาซื้อได้ยาก

แพลทินัม (Platinum) ธาตุสีขาว มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่าตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญคือ +2 ถึง +4 มีจุดเดือด 3,827 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลว 1,770 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความแข็งแรงของพันธะโลหะและไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา นอกจากนี้สารประกอบของแพลทินัมมักไม่ค่อยเสถียร โดยเมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นจะสลายตัวเป็นโลหะ ดังนั้นจึงพบโลหะพวกนี้ในรูปของธาตุอิสระในธรรมชาติอยู่บ้าง ข้อเสียของแพลทินัมคือ หาซื้อได้ยากมีน้อยมาก จึงมีราคาแพงมาก แต่มีสมบัติในการนำความร้อนและไฟฟ้าดีมาก มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาจึงมีประโยชน์ในการทำอิเล็กโทรดเบตาไฟ และภาชนะสำหรับงานที่อุณหภูมิสูงและต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูงได้

แกรไฟต์ (Graphite) แกรไฟต์เป็นคาร์บอนชนิดหนึ่งซึ่งประกอบแร่เรียงตัวเป็นชั้นๆ คาร์บอนมีการจัดเรียงตัวแบบเฮลฟา หรือเป็นรูปผลึก 6 หน้า (hexagonal) และจัดเรียงตัวแบบเบต้าหรือรูปผลึกขนมเปียกปูน (rhombohedral) โดยมีลักษณะทางกายภาพเหมือนกัน แผ่นแร่รูปผลึก 6 หน้า มีลักษณะบางทึบแสงและไม่แข็ง สีเทาเข้มถึงดำ เนื้ออ่อน เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าดีมาก ในทิศทางที่ขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของอะตอมจะนำไฟฟ้าได้น้อย

คาร์บอน (Carbon) เป็นธาตุที่มีความพิเศษ คาร์บอนมีประโยชน์ในการทำขั้วอิเล็กโทรดหรือขั้วไฟฟ้าเพราะจะสามารถเพิ่มการนำไฟฟ้าได้ นอกจากนั้นยังหาซื้อได้สะดวกและราคาถูก ซึ่งคาร์บอนมีอยู่หลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นผง เป็นแท่ง นอกจากนี้ยังสามารถนำมาทอเป็นแผ่นบางซึ่งก๊าซสามารถแพร่ผ่านได้

เหล็กกล้า (Steels) เป็นโลหะหนักที่มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูงมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปานกลาง สารประกอบของเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 และเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรง ถ้าวางทิ้งไว้ในที่มีความชื้นมักจะเกิดสนิมเหล็ก เหล็กสามารถทำปฏิกิริยารวมกับบอโลหะได้เมื่อทำให้ร้อนเล็กน้อยแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจน เมื่ออยู่ในสารละลายเหล็กมักอยู่ในรูปของ  $Fe^{2+}$

และ  $Fe^{3+}$  ปนกัน เหล็กที่มีเลขออกซิเดชัน +2 นั้นเสถียรมากและสามารถเกิดเกลือต่างๆ กับแอนไอออนที่เสถียรได้  $Fe^{2+}$  นี้ถูกออกซิไดซ์ด้วยอากาศกลายเป็น  $Fe^{3+}$  ได้  $Fe^{3+}$  อยู่ในสารละลายของน้ำเป็น hydrated ion เนื่องจาก  $Fe^{3+}$  มีขนาดไอออนเล็กและมีประจุมากจึงแสดงสมบัติเป็นกรด ทั้ง  $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  ทำปฏิกิริยากับสารที่ให้อิเล็กตรอนและเกิดสารเชิงซ้อนได้ การใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสขึ้นที่ผิวของแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนดจะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาพร้อมเหล็กในรูป  $Fe^{2+}$  ที่ขั้ว แคโทดจะมีการให้ไฮดรอกไซด์ไอออนที่ทำให้ค่าพีเอชของน้ำสูงขึ้นได้ ทำให้เหล็กที่มาจากแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนดสามารถตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ เช่น  $Fe(OH)_2$  ได้ ปริมาณการตกตะกอนของเหล็กจึงขึ้นกับปริมาณไฮดรอกไซด์ที่ได้จากขั้วแคโทดและค่าพีเอชของน้ำเสีย ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนแผ่นเหล็กในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ เมื่อใช้ไประยะหนึ่งโดยมากแผ่นเหล็กจะหาซื้อง่ายและราคาถูกยิ่งไปกว่านั้นมันมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายไอออนโลหะหนักได้ดีจึงเป็นที่นิยม

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นเหล็กกล้าที่จัดอยู่ในขอบข่ายเหล็กกล้าผสมธาตุผสม Ni, Mo ที่ช่วยให้ทนต่อการกัดกร่อน ที่สำคัญคือมีโครเมียม (Cr) ซึ่งจะมีตั้งแต่ร้อยละ 11 ขึ้นไป โครเมียมที่อยู่ในเนื้อเหล็กกล้าจะก่อให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ ( $Cr_2O_3$ ) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงทนทานต่อการกัดกร่อนหรือการเกิดสนิม และทนการกัดกร่อนดีเยี่ยมใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ ( $\sim 1000$  °C) ในกรณีที่น่ามาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าเมื่อเราเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าหรือเพิ่มความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารละลาย เหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งมีโครเมียมเจืออยู่ในปริมาณมากกว่า 12% จะเกิดปฏิกิริยาที่ผิวได้ผลิตภัณฑ์เป็นชั้นของสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและโครเมียม ( $FeO.Cr_2O_3$ ) ชั้นที่แน่นและเสถียรนี้จะทำหน้าที่ป้องกันโลหะด้านในจากการกัดกร่อนได้

## 2. 8 กระบวนการออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation) และสารออกซิไดซ์ที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย (G. Chen, 2004)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีออกซิเดชันทางเคมี เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยการใช้สารเคมีในการออกซิไดซ์สารประกอบมลพิษต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานเช่น การกำจัดสารมลพิษที่มีความเข้มข้นต่ำ การบำบัดน้ำเสียที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากให้สามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น การบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงในปริมาณที่น้อย การใช้กระบวนการนี้ในการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นก่อนนำไปบำบัดด้วยกระบวนการชีวภาพ โดยสารเคมีที่ใช้เป็นตัวออกซิแดนท์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ

### 1. โอโซน (Ozone, O<sub>3</sub>)

โอโซนเป็นก๊าซสีฟ้ามีกลิ่นเล็กน้อยโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีค่าศักย์รีดอกซ์ 2.07 โวลต์นิยมใช้ฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา ก๊าซโอโซนสามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่มีพิษและสารที่ย่อยสลายยากบางตัวได้โดยได้ผลของปฏิกิริยาสารที่ถูกออกซิไดซ์จะมีพิษน้อยลงและสามารถถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีขึ้นแต่มีราคาในการบำบัดสูงมาก

### 2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดซ์ที่มีค่าศักย์รีดอกซ์ 1.78 โวลต์ (Wang C., Hua J. et al.,2008) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารที่ย่อยสลายได้ง่าย และไวต่อแสง โดยอาจใช้สารยับยั้งจำพวกสารฟอสเฟตผสมลงไปเพื่อให้สามารถเก็บได้นานขึ้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีราคาถูก สามารถผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical, •OH) ได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) แต่ความสามารถในการออกซิไดซ์นั้นไม่สามารถออกซิไดซ์สารที่ย่อยสลายยากได้ แต่เมื่อมีการใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยา เช่น เพอร์รัสไอออน (Fe<sup>2+</sup>), เพอร์ริกไอออน (Fe<sup>3+</sup>), คอปเปอร์ไอออน (Cu<sup>2+</sup>) ซึ่งสามารถผลิตสารออกซิไดซ์ที่ให้ค่าศักย์รีดอกซ์สูง 2.80 โวลต์ ซึ่งการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยา นิยมเรียกว่าปฏิกิริยาเฟนต์ัน (Fenton's reagent) ประสิทธิภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ว่าประสิทธิภาพเป็นดังสมการที่ (2.15) (Denga Y. and Englehardt J.,2009)

$$\eta = 2.12\text{COD}_{\text{oxi}} / [\text{H}_2\text{O}_2] \quad (2.15)$$

เมื่อ  $\eta$  หมายถึง ประสิทธิภาพของ [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] ในปฏิกิริยาเฟนต์ัน

COD<sub>oxi</sub> หมายถึง ค่าซีโอดีที่ถูกกำจัดโดยปฏิกิริยาเฟนต์ัน

ข้อดีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ

1. เป็นตัวออกซิแดนซ์ตัวหนึ่งที่ใช้กันทั่วไปในการบำบัดน้ำเสีย
2. มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงซึ่งสามารถย่อยสลายสารประกอบที่เป็นพิษเบื้องต้นก่อนนำไปบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (เช่น ยาฆ่าแมลง สารให้ความเย็น เรซิน และสีย้อม)
3. จัดเก็บได้ง่าย
4. มีความสามารถในการละลายน้ำและช่วยทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำเพิ่มขึ้น
5. ไม่ผลิตส่วนที่เป็นพิษหรือสีเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตาม มีค่าการดำเนินงานที่ต่ำทำให้กระบวนการเป็นที่น่าสนใจ ในการเลือกใช้สารเคมีชนิดใดเป็นตัวออกซิแดนซ์สำหรับการบำบัดน้ำเสียนั้น ต้องคำนึงถึง ชนิดและปริมาณ รวมถึงประสิทธิภาพของสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียนอกจากนั้นยังต้องพิจารณาถึงความสามารถของเทคโนโลยีที่มีอยู่ และความสมเหตุสมผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย

## 2.9 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance oxidation process, AOPs) (Parsons S.,2004)

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงนี้สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 กลไก คือ

### 2.9.1 กระบวนการสร้างอนุมูลอิสระ (Free radical generation)

อนุมูลอิสระที่ใช้ในกระบวนการนี้คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical,  $\bullet\text{OH}$ ) ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงเป็นอันดับสองรองจากฟลูออรีน (ตารางที่ 2.5) โดยทั่วไป ไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\bullet\text{OH}$ ) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงนี้จะไปทำลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ สารที่มีความเป็นพิษ โลหะหนัก และสารที่ย่อยสลายยาก ทำให้ย่อยสลายได้ง่ายขึ้นโดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดคือระดับความเข้มข้นของสารออกซิแดนซ์ (ไฮดรอกซิลเรดิคัล) ที่ใช้และความเข้มข้นของสารที่ถูกออกซิไดซ์ (น้ำมันในน้ำ) โดยสามารถจำแนกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ homogeneous และ heterogeneous ความแตกต่างของทั้งสองลักษณะนี้คือ เป็นระบบเฟสเดียว และเป็นระบบสองเฟส

ตารางที่ 2.5 ความสามารถในการปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารเคมีชนิดต่าง ๆ (Canizares P., Loberto J. et al.,2007)

สารเคมีในปฏิกิริยาออกซิเดชัน	ความสามารถในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (โวลต์)
Fluorine	3.03
Hydroxyl radical	2.80
Atomic oxygen	2.42
Ozone	2.07
Hydrogen peroxide	1.77
Hypobromous acid	1.59
Chloride dioxide	1.50
Hypochlorous acid	1.49
Chlorine	1.36
Bromide	1.09

### 2.9.2 กระบวนการออกซิไดซ์กับสารในน้ำเสีย (Free radical oxidation)

เมื่อเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลขึ้นซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์จะไปสัมผัสกับสารมลพิษในน้ำเสีย จะมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน สารออกซิไดซ์ซึ่งมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนสูง จะค่อยๆ ทำการแตกสลายพันธะ (break down) โดยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนเช่น พลาสติก พลาสติกแข็ง และพันธะคู่จะถูกลดความซับซ้อนของโมเลกุลลง กลายเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายขึ้น จึงส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ จนสุดท้ายได้ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และน้ำ ซึ่งตารางที่ 2.6 แสดงสารประกอบที่สามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยไฮดรอกซิลเรดิคัลได้

ตารางที่ 2.6 สารประกอบที่สามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยไฮดรอกซิลเรดิคัล

สารประกอบ	
กรด	formic, lactic, malic, propionic, tartaric
แอลกอฮอล์	benzyl, tert-butyl, ethanol, ethylene glycol, glycerol, isopropanol, methanol, propandiol
แอลดีไฮด์	acetaldehyde, benzaldehyde, trichloroacetaldehyde
แอโรแมติก	benzene, chlorobenzene, chlorophenol, creosote, dichlorophenol, hydroquinone, p-nitrophenol, phenol, toluene, trichlorophenol, xylene, trinitrotoluene
เอมีน	aniline, cyclic amines, diethylamine, dimethylformamide, EDTA
คีโตน	anthraquinone, diazo, monazo
อีเทอร์	tetrahydrofuran
คีโตน	dihydroxyacetone, methyl ethyl ketone

### 2.9.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) (P. Nidheesh and R. Gandhimathi,2012)

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) คือสารที่ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยไม่สูญหายไป ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาและจะได้กลับคืนมาเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลง ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยามี 2 ประเภทดังนี้

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเฟสเหมือนกับสารตั้งต้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะมีการกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งระบบและสภาพการเคลื่อนที่จะเหมือนกับสารอื่นๆ ในระบบและตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะทำปฏิกิริยาหรือเกิดอัตราการเร่งปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในระบบนั้นๆ

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเฟสแตกต่างกับสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะมีการกระจายไม่สม่ำเสมอและสภาพการเคลื่อนที่จะแตกต่างจากสารอื่นๆ ตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะขึ้นกับพื้นที่ผิวและความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้มักอยู่ในสถานะของแข็งเมื่อนำมาใช้ในปฏิกิริยาเฟนตันออกซิเดชัน

ตารางที่ 2.7 ความแตกต่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียวกันและแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับปฏิกิริยาเฟนตันออกซิเดชัน

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียวกัน ( Homogeneous catalyst)	ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ( Heterogeneous catalyst)
อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็ว	อัตราการเกิดปฏิกิริยาปานกลาง
ยุ่งยากในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยา	ง่ายในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยา
ใช้พีเอชต่ำในการทำปฏิกิริยา (pH 2-3)	ใช้พีเอชสูงขึ้นในการทำปฏิกิริยา (pH 4-6)
ไม่สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่	สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่
เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีเสถียรภาพสูงทำให้ ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาลดลง	
เกิดกากตะกอนของเหล็ก(Iron sludge)	

### 2.9.4. ประเภทของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (AOPs)

ในทางทฤษฎี เราสามารถจำแนกประเภทของ AOPs สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ 1. Homogeneous และ 2. Heterogeneous คือมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโดยกระบวนการต่าง ๆ แสดง (ดังตารางที่ 2.7) (M. Panizza and G. Cerisola,2008)



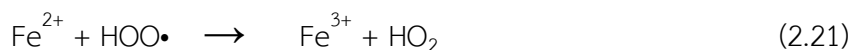
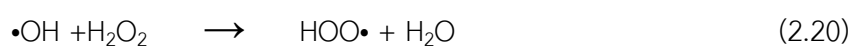
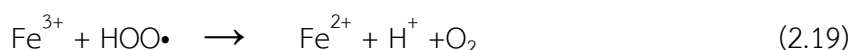
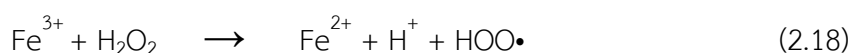
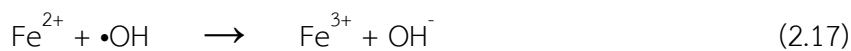
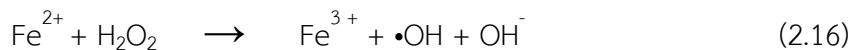
ตารางที่ 2.8 ประเภทของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (AOPs)

ประเภท	
Homogeneous (แบบเนื้อเดียวกัน)	Fenton based processes
	Fenton: $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$
	Fenton like: $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{3+} / \text{m}^{n+}$
	Sono-Fenton: US(Ultrasound)/ $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$
	Photo-Fenton: UV/ $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$
	Electro-Fenton
	Sono-electro-Fenton
	Photo-electro-Fenton
	Sono-photo-Fenton
	$\text{O}_3$ based processes
Homogeneous (แบบเนื้อเดียวกัน)	$\text{O}_3$
	$\text{O}_3 + \text{UV}$
	$\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$
	$\text{O}_3 + \text{UV} + \text{H}_2\text{O}_2$
Heterogeneous (แบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน)	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+} / \text{Fe}^{3+} / \text{m}^{n+}$ -solid
	$\text{TiO}_2 / \text{ZnO} / \text{CdS} + \text{UV}$
	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^0 / \text{Fe}$ (nano-zero valent iron)
	$\text{H}_2\text{O}_2 +$ immobilized nano-zero valent iron

### 2.9.5 ปฏิกริยาเฟนตัน (Fenton Reaction)

ปฏิกริยาเฟนตันเป็นปฏิกริยาที่ถูกค้นพบครั้งแรกโดย H.J.H Fenton ในปี ค.ศ. 1876 จนกระทั่งถึงปี ค.ศ. 1930 ได้มีการศึกษากลไกของปฏิกริยานี้อย่างสมบูรณ์ และนำมาใช้ในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ปฏิกริยาเฟนตันเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation) เกิดขึ้นในสถานะที่เป็นกรด เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว โดยสารประกอบเฟนตันเป็นการผสมกันระหว่าง ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) กับ เฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) โดยเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกริยา ดังสมการที่ (2.16) - (2.22) ผลจากการทำปฏิกริยาก่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\bullet\text{OH}$ ) ซึ่งมีค่าศักย์ออกซิเดชัน (Oxidation potential)

สูง โดยสูงกว่าคลอรีนถึง 200 % และสูงกว่าโอโซน 25 % โดยมีคาร์บอนจากฟลูออรีนเรดิคัล (Fluorine radical) ดังตารางที่ 3.4 โดยปฏิกิริยาเคมีหลักๆสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



โดยสมการทั้งหมดอาจไม่เกิดขึ้นทุกสมการ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยถ้าเฟอร์รัสไอออนมีปริมาณมากเกินไปการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นไปตามสมการที่ (2.16) - (2.17) และถ้าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไปจะเป็นไปตามสมการที่ (2.18) - (2.20) แทน จากที่ได้กล่าวมาสารเคมีเฟนตันในสภาวะกรดจะทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\bullet\text{OH}$ ) สามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์เกือบทั้งหมด ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และออกซิเจน ดังสมการที่ (2.22)

### 2.9.6 ข้อได้เปรียบปฏิกิริยาเฟนตันในการบำบัดน้ำเสียเมื่อเทียบกับกระบวนการออกซิเดชันอื่น

- เหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีราคาถูกและไม่เป็นพิษ
- มีการถ่ายโอนมวลสารอย่างไม่จำกัดเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาแบบ Homogeneous
- ไม่ต้องการแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและออกแบบระบบง่ายกว่าการใช้ระบบแสง UV
- มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำมันความเข้มข้นต่ำที่ปนเปื้อนในน้ำเสียและลด

ปริมาณการใช้สารเคมีในการบำบัด

- ใช้พื้นที่ในการบำบัดน้อยและดำเนินการง่าย

## 2.9.7 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาเฟนตัน

### 1. พีเอช (pH)

จากการศึกษาของ (Wang C., Hua J. et al.,2008) พบว่าช่วงพีเอช 2 - 4 เป็นช่วงพีเอชที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยาเฟนตันและพบว่าค่าประมาณพีเอช 3 จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์รัสไอออนมีสัดส่วนมากกว่าเฟอร์ริกไอออน ก่อให้เกิดการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัลออกมาในปริมาณสูง แต่เมื่อ พีเอชมีค่าสูงกว่า 3 สัดส่วนเฟอร์ริกไอออนจะกลับมามีสัดส่วนสูงกว่าเฟอร์รัสไอออน ส่งผลให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลน้อยลง และเมื่อพีเอชสูงกว่า 7 มีผลให้อิออนของเหล็กตกตะกอน เกิดผลเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์โดยตรง ดังนั้นพีเอชจึงมีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาเฟนตันทุกประเภท

### 2. ปริมาณสารในการทำปฏิกิริยาเฟนตัน (Dosage of Fenton reagent)

ปริมาณสารในการทำปฏิกิริยาเฟนตันต้องมีความเหมาะสมในการดำเนินการทั้งในด้านต้นทุน และประสิทธิภาพการบำบัด โดยเมื่อเพิ่มสัดส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนแต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้มีต้นทุนเพิ่มขึ้นซึ่งต้องพิจารณาถึงการคุ้มทุนอย่างเหมาะสม ซึ่งแนวโน้มนี้เช่นเดียวกับการเพิ่มปริมาณสัดส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่วนแนวโน้มการเพิ่มสัดส่วนของเฟอร์รัสไอออน ถึงแม้ว่าจะเป็นการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ควรมีสัดส่วนที่เหมาะสมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อส่งผลให้ปฏิกิริยาเฟนตันสามารถผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลได้มากเพียงพอในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำ การเพิ่มสัดส่วนเฟอร์รัสไอออนจะทำให้ค่าของแข็งที่ละลายทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้าและตะกอนเพิ่มขึ้น (Gogate P. and Pandit A.B.,2003) ส่วนสัดส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไปจะทำให้เกิดตะกอนลอยจากออกซิเจนหรือการเกิด Scavenger effect นั้นเอง ซึ่งเป็นสาเหตุให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตกค้างอาจไปยับยั้งกระบวนการทางชีวภาพต่อไป

### 3. อุณหภูมิ (Temperature)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเฟนตันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 20-30 องศาเซลเซียส แต่ถ้าอุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียสประสิทธิภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะค่อยๆลดลงเนื่องจากจะมีการเร่งให้เกิดการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นออกซิเจนและน้ำ

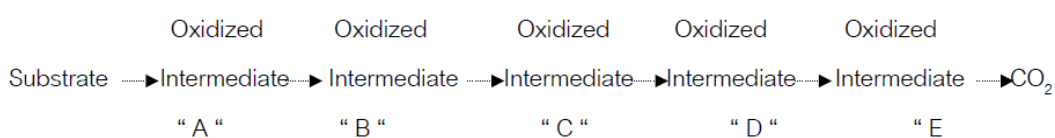
### 4. เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Reaction time)

จากงานวิจัยของ (Morais J. and Zamora P.,2005) พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี เมื่อเวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที มีค่า 46.4 เปอร์เซ็นต์ โดยการบำบัดเพิ่มขึ้นเป็น 60 นาที สามารถเพิ่มประสิทธิภาพขึ้นเป็น 57.7 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่ผลต่อประสิทธิภาพควร

พิจารณาตามความเหมาะสมเพื่อให้ได้การบำบัดที่เหมาะสมที่สุด โดยถ้าในน้ำเสียมีความเข้มข้นมาก หรือมีสารที่มีโครงสร้างซับซ้อนมากในการเกิดปฏิกิริยาอาจจะต้องใช้เวลานาน

### 5. อิทธิพลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Effect of $H_2O_2$ Concentration)

การใช้อนุมูลไฮดรอกซิลในการออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ ซึ่งสามารถนำมาเขียนปฏิกิริยาอย่างคร่าวๆ สำหรับการบำบัดน้ำเสียในแต่ละชนิดได้ดังต่อไปนี้



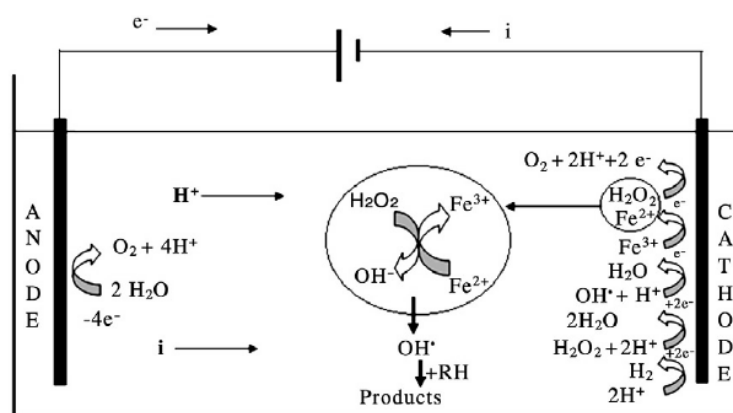
ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยาการใช้อนุมูลไฮดรอกซิลในการออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์

โดยการเปลี่ยนแปลงในแต่ละลำดับเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกันมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเองโดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์นั้นๆ ตัวอย่างเช่นในกรณีของสารประกอบฟีนอลจะมีสารที่ไม่เสถียร (Intermediate) นั่นก็คือ ควิโนน (Quinones) ซึ่งเป็นสารที่ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องเพิ่มปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยปริมาณที่พอเหมาะจึงจะทำให้ปฏิกิริยาจึงจะดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น ซึ่งการบำบัดเบื้องต้นนี้จะช่วยลดความเป็นพิษของสารประกอบอินทรีย์ที่มีความซับซ้อนลงได้

#### 2.10 กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (Electro-Fenton Process)

กระบวนการ Electro-Fenton (EF) เป็นกระบวนการที่ใช้ปฏิกิริยาเฟนตันในกำจัดอนุภาค โดยการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัลไปออกซิไดซ์อนุภาคที่อยู่ในน้ำซึ่งปฏิกิริยาเฟนตันที่เกิดขึ้นจะต้องอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล โดยในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันนั้นเป็นกระบวนการที่นำกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีมาประยุกต์ใช้ร่วมซึ่งส่งผลให้สามารถสร้างเฟอร์รัสไอออนหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้จากขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปและเกิดการกัดกร่อนปล่อยไอออนออกมาในการทำปฏิกิริยาในการทำให้สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะตกตะกอนและถูกออกซิไดซ์ด้วยกระบวนการ Electro-Fenton

### หลักการการทำงานของกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (Electro-Fenton Process)



ภาพที่ 2.9 กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (Electro-Fenton Process) (Nidheesh P.V. and Gandhimathi R.,2012)

การที่อิเล็กโทรไลซิสผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแกรไฟต์โดยขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันและมีออกซิเจนละลายอยู่ผิวหน้าเมื่อทำปฏิกิริยากับ  $(2H^+)$  จะเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในส่วนด้านแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดการสูญเสีย 2 อิเล็กตรอนของน้ำได้ ผลิตภัณฑ์เป็น  $(1/2O_2)$  และ  $(2H^+)$  โดยปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกซิลเรดิคอล  $(OH^\cdot)$  ดังสมการ (2.23) – (2.25) ข้อเสียเปรียบของกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน คือ ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าจะต่ำในสภาวะที่สารละลายเป็นกรดทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง

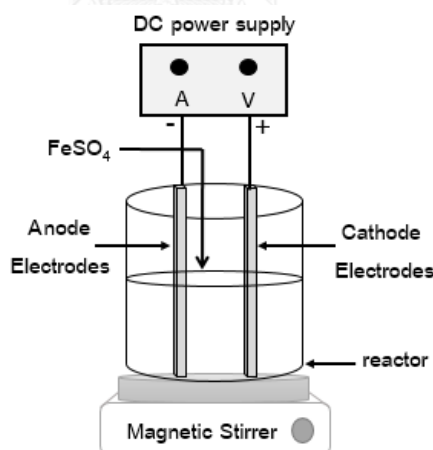


ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน ได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณออกซิเจนในน้ำ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และลักษณะเฉพาะน้ำเสีย เช่น ปริมาณสารที่สามารถเกิดโมเลกุลเชิงซ้อนกับเหล็กได้ดี ความเป็นอ็อกซิไดซิงและสารที่สามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคอล  $(OH^\cdot)$

## 2.11 ประเภทของการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (P. Nidheesh and R. Gandhimathi, 2012)

### 2.11.1 กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการเฟนตัน (Cathodic Fenton Process, EF-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการเฟนตันเป็นกระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าสร้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีการสร้าง H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เกิดจากการรีดักชันออกซิเจนเพื่อให้อิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทด เมื่อออกซิเจนรับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดจะเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังสมการที่ (2.26) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่ไม่ละลายในภาวะที่มีการออกซิเดชันเช่น แสตนเลส คาร์บอนแกรไฟต์ และจะเกิดการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ขั้วแอโนด ดังสมการที่ (2.27) โดยมีการเติมเฟอร์รัสไอออนในรูปของสารเคมีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเฟนตัน ลักษณะของการประยุกต์ใช้กระบวนการไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการเฟนตันประเภท EF- H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพที่ 2.10

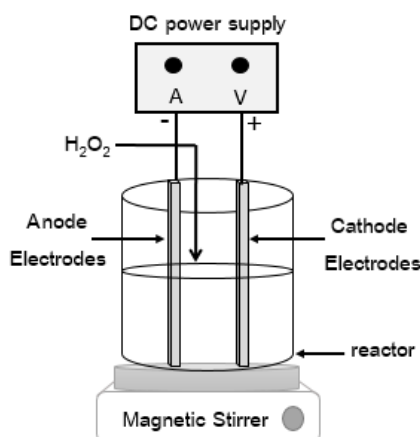


ภาพที่ 2.10 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ของ EF-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

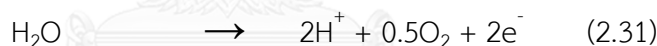
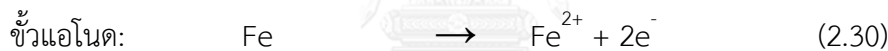
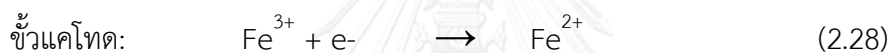
### 2.11.2 กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อผลิตอ็อกซาลิก (Fe<sup>2+</sup>) ในการบวนการเฟนตัน (Anodic Fenton Process, EF-FeOX)

กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการเฟนตันประเภท EF- FeOX เป็นการใช้กระแสไฟฟ้าในการสร้างเฟอร์รัสไอออนผ่านขั้วแอโนดที่ทำจากโลหะประเภทเหล็ก ขณะที่ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดจะเกิดการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ของเฟอร์รัสไอออน และมีการเติมไฮโดรเจน

เปอร์ออกไซด์จากภายนอกระบบซึ่งช่วยในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ ซึ่งลักษณะของการประยุกต์ใช้กระบวนการไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการเฟนตันประเภท EF- FeOX ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพที่ 2.11 และสมการที่ (2.28) – (2.31)

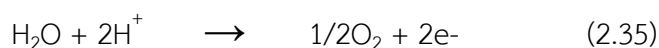
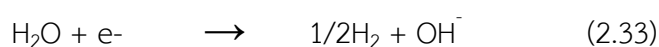


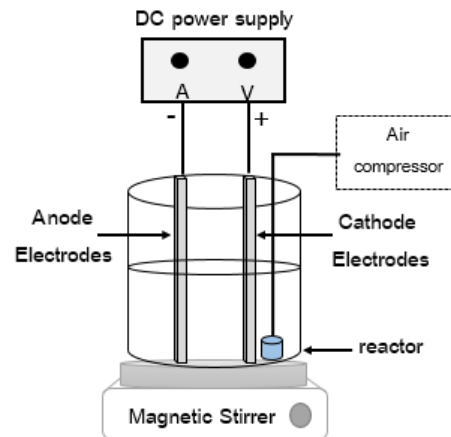
ภาพที่ 2.11 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ของ EF-FeOX



### 2.11.3 กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าในการหมุนเวียนไอออนเหล็ก ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ในกระบวนการเฟนตัน (Fenton sludge Recycling System, E-FSR)

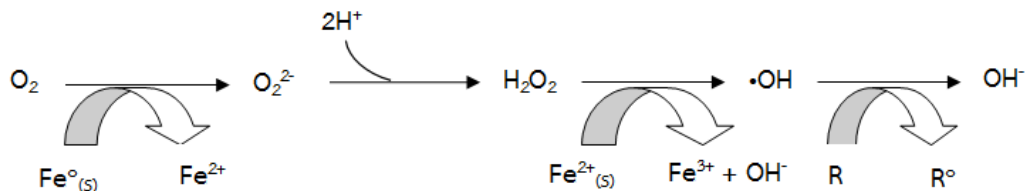
กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับสารประกอบเฟนตันประเภท E-FSR เป็นการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ของเฟอร์รัสไอออนที่ขั้วแคโทด โดยมีปฏิกิริยาดังสมการ (2.32) – (2.33) ขณะที่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดเป็นไปดังสมการที่ (2.34) – (2.35) โดยมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออนจากภายนอกระบบ ซึ่งลักษณะและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปดังภาพที่ 2.12





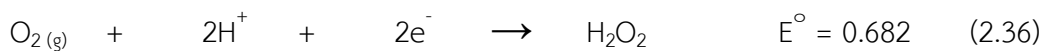
ภาพที่ 2.12 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ของ E-FSR

จากการศึกษาประเภทของกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ผ่านมามีการบูรณาการโดยการผลิตเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า โดยออกแบบระบบใช้ขั้วแคโทดเป็นขั้วผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นผลผลิตที่ได้มาจากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนที่ขั้วแคโทดโดยปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนสามารถเกิดตามวิถี 2 อิเล็กตรอน (2-Electron pathway) (M. Panizza and G. Cerisola, 2008) (ภาพที่ 2.13)



ภาพที่ 2.13 ความสามารถในการเกิดออกซิเจนตามวิถี 2 อิเล็กตรอน

การผลิตเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีโดยใช้ขั้วแคโทดเป็นขั้วผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และใช้แอโนดเป็นขั้วผลิตเฟอร์รัสไอออนผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ดังแสดงในสมการ (2.36) – (2.37)





## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน

**ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ (2552)** ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคเอกกูเลชันและโซโน-เฟนตัน โดยทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กระบวนการอะคูสติคออกซิเดชัน (acoustic oxidation) ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advance oxidation processes) ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (cutting oil wastewater) ตัวแปรทำการศึกษาคือความเข้มข้นน้ำมัน ประสิทธิภาพค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) อัตราการเติมอากาศ และการใช้สารเฟนตัน จากผลการทดลองพบว่า การใช้อะคูสติคออกซิเดชันเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะใช้ในการบำบัดน้ำเสียชนิดนี้ เนื่องจากเกิดจากการปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความคงตัวสูง อย่างไรก็ตามการใช้สารเฟนตันร่วมกับการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงนั้นจะทำให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงถึงร้อยละ 92.3 โดยใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 140 กรัม และสารเฟอร์รัสซัลเฟตปริมาณ 500 มิลลิกรัมของเหล็กต่อลิตรของน้ำเสีย ( $mg/L$  as  $Fe^{2+}$ ) ซึ่งเป็นปริมาณที่สูง แต่สามารถลดปริมาณเพื่อให้ได้มาซึ่งการกำจัดที่เหมาะสมได้ด้วยการใช้สมการจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา (reaction kinetic)

**นุสรุา โรจนวิลาวัลย์ (2554)** ศึกษากระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันทั้งกระบวนการเฟนตัน อิเล็กโตรเฟนตันและโฟโตอิเล็กโตรเฟนตัน ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (Cutting oily-wastewater) ที่มีค่าความเข้มข้น 0.1-1 กรัมต่อลิตร โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาในส่วนของกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ได้แก่ ระยะห่างระหว่างขั้ว ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-เบส ค่าการนำไฟฟ้า ของแข็งละลายน้ำและปริมาณเพอร์รัสอออน จากผลการศึกษาการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าพบว่าสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม ระยะห่างระหว่างขั้ว ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาเก็บมีค่าเท่ากับ 1 – 3 เซนติเมตร 36 - 60 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และ 30 – 60 นาที ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัด 90 % (ค่าความเข้มข้นน้ำมันตัด  $\approx$  0.1 กรัมต่อลิตร) แต่น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วยังไม่ผ่านมาตรฐาน จึงมีการประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการเฟนตัน อิเล็กโตรเฟนตัน และโฟโตอิเล็กโตรเฟนตัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกลไกการออกซิไดซ์อนุภาคน้ำมันที่คงเหลือด้วยไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\cdot OH$ ) โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราส่วนเฟอร์รัสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวล และระยะเวลาในการกักเก็บ พบว่า กระบวนการอิเล็กโตรเฟนตันมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานโดยมีสภาวะการทำงานเหมาะสมคือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราส่วนเฟอร์รัสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:5 – 1:10 โดยมวล ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และ

ระยะเวลาการเก็บกัก 15 – 60 นาที นอกจากนี้ จากการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการร่วมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่สภาวะที่เหมาะสมพบว่า ประสิทธิภาพรวมสูงสุดในการบำบัดน้ำเสียมีค่าประมาณ 99% และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าผ่านตามมาตรฐานที่กำหนด

**นาถ ภูวงค์ผา (2555)** งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยการทดลองแบบที่ละเทโดยศึกษาปัจจัยเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีและซีโอดีจากน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสและระยะเวลาที่เหมาะสมจากผลของการศึกษา พบว่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน คือที่มีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสอ่อนเท่ากับ 15:1 ที่ความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 150 รอบต่อนาที อนุณหภูมิห้อง จากสภาวะที่เหมาะสมนี้สามารถกำจัดสีในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 92.15 ณ เวลาที่เหมาะสมเท่ากับ 60 นาที ในขณะที่การกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 63.90 ณ เวลาที่เหมาะสมเท่ากับ 30 นาที

**สุชนม์ แก้วมาตย์ (2550)** การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการเฟนตันแบบฉายแสงโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางในการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อมผ้าซึ่งมีค่าซีโอดี อยู่ในช่วง 1,987 – 2,195 มิลลิกรัมต่อลิตร มาทำการทดลองเป็นเวลา 2 ชั่วโมงในปฏิกรณ์ 2 ชนิดคือ ท่อพีวีซี และท่อแก้ว ระดับความลึกของน้ำเสีย 2, 4 และ 6 นิ้วและควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิ 7 องศาเซลเซียส จากนั้นศึกษาผลกระทบของปริมาณความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและอุณหภูมิของน้ำเสียผลการทดลองโดยการเติมสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 30 ปริมาตร 30 มิลลิลิตรและสารเฟอร์รัสซัลเฟต 1.08 โมล ต่อ น้ำเสีย 1 ลิตรในปฏิกรณ์ชนิดท่อแก้วซึ่งมีค่าพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ที่ 0.8-1 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร พบว่าสามารถลดค่าซีโอดีของน้ำเสียได้ร้อยละ 87.06 โดยค่าความลึกของน้ำทิ้ง 3 ระดับได้ค่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่เท่ากันในขณะที่การทดลองในสภาวะไม่มีแสง (Dark fenton) สามารถลดค่า ซีโอดีของน้ำเสียได้เพียงร้อยละ 66.29 ซึ่งทำให้ได้แนวทางในการสร้างระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตันที่มีประสิทธิภาพสูงในลำดับต่อไป

**Wang C., Hua J. et al. (2008)** ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีสารสีย้อมด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยมีแกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อัตราการเติมอากาศ ค่าความ

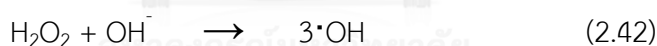
หนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ปริมาณเฟอร์รัสไอออน อุณหภูมิ และค่าความเป็นกรด-เบส ค่าซีโอดี (COD) เริ่มต้นของน้ำเสียที่มีสีขุ่นเท่ากับ 2,942 มิลลิกรัมต่อลิตร ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองคือ แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทดและแพททินัม/ไทเทเนียม (Pt/Ti) เป็นขั้วแอโนด อัตราการเติมอากาศที่ 0.1 – 0.4 ลิตรต่อนาที ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 11 – 80 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ปริมาณเฟอร์รัสไอออน 0 – 20 มิลลิโมล อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 25 – 45 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 1 – 4 โดยขั้วแคโทดที่ทำจากแกรไฟต์จะทำหน้าที่ในการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ออกมาในระบบ โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยเหล็กจนเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\cdot\text{OH}$ ) ออกมาในระบบ เนื่องจากเมื่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยเฟอร์รัสไอออนที่ใส่ไปในระบบจะทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\cdot\text{OH}$ ) เป็นสารออกซิไดซ์ที่แรงและสามารถลดความเป็นพิษของน้ำเสียได้ ผลการทดลองพบว่า อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมคือ 0.3 ลิตรต่อนาที ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 68 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ปริมาณเฟอร์รัสไอออน 20 มิลลิโมล อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้สูงถึงร้อยละ 70 โดยใช้เวลาเดินระบบเพียง 150 นาที

**Rizzo Luigi, Lofrano Giusy et al. (2008)** ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันมะกอกโดยมีการนำโคโคซานมาใช้ในกระบวนการรวมตะกอนร่วมกับกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงทั้งกระบวนการเฟ้นต้นและกระบวนการโฟโตเฟ้นต้นผลการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี 81 % เมื่อผ่านกระบวนการรวมตะกอนและค่าซีโอดีเกือบ 100 % เมื่อผ่านกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง โดยอัตราส่วน  $\text{H}_2\text{O}_2 : \text{FeSO}_4 = 15000:1852$  โดยน้ำหนัก ค่าพีเอชเท่ากับ 3 ซึ่งจากงานวิจัยจะพบว่าการนำกระบวนการรวมตะกอนมาบำบัดร่วมกับกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น

**Eloy Isarain C., Catalina R. et al. (2013)** ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีเมทิลออเรนจ์ (Methylorange, MO) ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟ้นต้นโดยศึกษาความเข้มข้นของน้ำเสียที่ 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้น้ำเสีย 3 ลิตรที่ประกอบด้วย  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0.05 โมลต่อลิตรซึ่งทำหน้าที่เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เดินระบบแบบต่อเนื่องโดยอัตราน้ำเสียเข้า 12 ลิตรต่อนาที ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 7.8 15 และ 31 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ขั้วไฟฟ้าที่ใช้คือ ขั้วไฟฟ้าเพชรที่โด๊ปด้วยโบรอน (boron-doped diamond) ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีเมทิลออเรนจ์ได้ดีที่สุดคือที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 31 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเฟอร์รัสไอออน 0.3 มิลลิโมล โดยประสิทธิภาพการบำบัดสูงถึงร้อยละ 80

โดยสามารถบำบัดได้อย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 10 นาทีแรกและที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 7.8 และ 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถบำบัดได้ 70% และ 60% ตามลำดับ

**Nidheesh P.V., Gandhimathi R. et al. (2014)** ศึกษาเกี่ยวกับโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโรดามีนบี (Rhodamine B) โดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้า ปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่ 2.5-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบส 2.5-4 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้แก่  $\text{Na}_2\text{SO}_4$   $\text{NaCl}$   $\text{Na}_2\text{CO}_3$  และ  $\text{NaHCO}_3$  ใช้ขั้วแกรไฟต์  $25(5 \times 5)$  ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 4 เซนติเมตร ปริมาณน้ำเสียเริ่มต้น 1 ลิตร มีความเข้มข้นของโรดามีนบี 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการเติมอากาศที่บริเวณขั้วแคโทด ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ 0-5 แอมแปร์ จากการทดลองพบว่า ค่าปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสมคือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากถ้าเติมเหล็กมากกว่านี้ ปริมาณเหล็กที่เหลือจะไปจับกับไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\cdot\text{OH}$ ) ที่เกิดขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้อยลง ที่พีเอช 3 สามารถบำบัดได้ดีที่สุดเนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) เกิดขึ้นมากเพราะไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่เสถียรที่ค่าความเป็นกรด-เบสสูงและพบว่าเมื่อเติม  $\text{NaHCO}_3$  2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการละลายของ  $\text{H}_2\text{CO}_3$  ทำให้เกิด ( $\text{OH}^-$ ) ไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียและไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะไปทำปฏิกิริยาไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการที่ 2.41 – 2.42 จึงสามารถสรุปได้ว่า  $\text{NaHCO}_3$  ที่เติมลงไปจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย



**Yavuz Y. (2007)** ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตแอลกอฮอล์ด้วยกระบวนการร่วมกันระหว่างการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-เบส และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน คือความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ซึ่งใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์เท่ากับ 0.3 โมล ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 60 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดค่าซีโอดี (COD) และค่า TOC (Total Organic Carbon) ได้ร้อยละ 92.6 และ 88.7 ตามลำดับ และพบว่ากระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวไม่มีประสิทธิภาพมากพอที่จะกำจัดสารพิษที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้ ดังนั้นจึงต้องทำการ

ทดลองร่วมกับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันจึงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารพิษในน้ำเสียดังกล่าวได้

**Wang C., Chou W. et al. (2010)** ศึกษาการกำจัดค่าซีโอดีจากน้ำเสียดังกล่าวด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยใช้ถ่านกัมมันต์ไฟเบอร์ (Activated carbon fiber) เป็นขั้วแคโทด ออกแบบระบบโดยเติมเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) ในรูปของสารเคมีและทำการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ขั้วแคโทด ใช้แพททินัมเป็นขั้วแอโนด ขนาดของขั้ว กว้าง 7 เซนติเมตร ยาว 9 เซนติเมตรหนา 0.2 เซนติเมตรโดยทำการศึกษา อัตราการเติมอากาศ 50 – 250 ตารางเซนติเมตรต่อนาที ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 0.8 – 4.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าความเป็นกรด-เบส ปริมาณเฟอร์รัสไอออน และอุณหภูมิช่วง 20 – 40 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการทดลองคืออัตราการเติมอากาศเท่ากับ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) เท่ากับ 2 มิลลิโมล โดยที่ภาวะดังกล่าวสามารถลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 75.2 โดยใช้เวลาในการเดินระบบ 240 นาที

**Guangsen X., Yonghong L. et al. (2014)** ศึกษาการสร้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยใช้โพลีอะคลิไนด์ไทรล-คาร์บอน (PAN-CFB) เป็นขั้วแคโทด โดยน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียที่มีฟีนอลปนเปื้อน ขั้วแอโนดทำจาก  $TiO_2/IrO_2$  ขนาด 6\*4 เซนติเมตร ขั้วแคโทดใช้โพลีอะคลิไนด์ไทรล-คาร์บอนซึ่งมีแกนกลางเป็นไทเทเนียม (Ti) อัตราการเติมอากาศ 3 ลิตรต่อนาที น้ำเสียในระบบประกอบด้วย  $Na_2SO_4$  0.03 - 0.5 โมลต่อลิตร ค่ากระแสไฟฟ้า 50 – 300 มิลลิแอมแปร์ ปริมาณเฟอร์รัสไอออน 0.1 – 1 มิลลิโมลต่อลิตร ผลการทดลองพบว่า ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สร้างจากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนตามวิถี 2 อิเล็กตรอน (2-Electron pathway) ได้สูงถึงร้อยละ 96 (Yield) ที่ค่ากรด-เบสเท่ากับ 3 ที่อัตรา 93.3 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจาก 1 ชั่วโมง ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร ปริมาณ  $Na_2SO_4$  ที่เหมาะสมคือ 0.5 โมลต่อลิตร ค่ากระแสไฟฟ้า 300 มิลลิแอมแปร์ ปริมาณเฟอร์รัสไอออน 0.3 มิลลิโมลต่อลิตรโดยใช้เวลาเดินระบบ 240 นาที เนื่องจากถ้าปริมาณเฟอร์รัสไอออนมากเกินไปจะไปจับกับไฮดรอกซิลเรดิคัลในระบบได้ ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอลสูงถึงร้อยละ 86.2

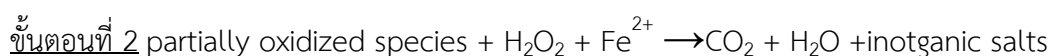
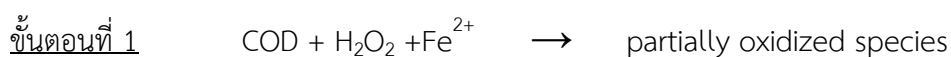
**Banuelos J.A., Ghenymy A.E. et al. (2014)** ศึกษาการกระจายตัวของอากาศเมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ (Granular activated carbon, GAC) เป็นขั้วไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน โดยน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองคือน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีเมทิลออเรนจ์ (Methyl orange) ที่มีความเข้มข้นของสี 97 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตรและประกอบด้วย  $Na_2SO_4$  0.05 โมลต่อลิตรปรับค่า

ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 กระแสไฟฟ้า 50-300 มิลลิแอมแปร์ ปริมาณเพอร์ร็อกซิออน 0.2 0.5 และ 0.8 มิลลิโมลต่อลิตร ขั้วแคโทดที่ใช้คือถ่านกัมมันต์ 0.1 กรัม ขั้วแอโนดที่ใช้คือขั้วไฟฟ้าเพชรที่โดปด้วยโบรอน (boron-doped diamond) พื้นที่ 3 ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร ผลการทดลองพบว่าที่กระแสไฟฟ้า 200 มิลลิแอมแปร์ ปริมาณเพอร์ร็อกซิออน 0.2 มิลลิโมลต่อลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 100 และ 60 ที่ความเข้มข้นของสี 97 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ 120 นาที ประสิทธิภาพส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

**Seo D.C., Lee H.J. et al. (2007)** ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเหล็กที่มีการปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยโดยใช้กระบวนการอัลตราโซนิก (Ultrasonication,US) ร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตันซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงถูกนำมาใช้ ความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้น 12,358 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนโตรเจนทั้งหมด 690 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วน C:N:P เริ่มต้นคือ 3520:6:1 จึงทำให้ยากต่อการใช้กระบวนการทางชีวภาพเนื่องจากอัตราส่วน C:N:P ควรจะเป็น 100:5:1 ในน้ำเสียที่มีค่าคาร์บอนมากกว่า 35 เท่า จากผลการวิจัยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในกาบำบัดสารมลพิษที่ไม่ย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวภาพพบว่าอัตราการใช้ของ  $H_2O_2$  และ  $FeSO_4$  เป็น 10 % และ 3 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และเวลาของอัลตราโซนิกเป็น 30 นาที สารมลพิษที่ไม่ย่อยสลายที่ปนเปื้อนในน้ำเสียมีส่วนประกอบเช่น EDTA และ ไตรเอทานอลามีน (Triethanolamine ,TEA) ในน้ำเสียน้ำมันตัด และทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้กระบวนการเฟนตันในการทดลองขนาดใหญ่ (Pilot plant) โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการบำบัดทั้งสามวิธีที่แตกต่างกันดังนี้เช่น กระบวนการอัลตราโซนิก (Ultrasonication,US) ร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตัน ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ และกระบวนการรวมตะกอน (Coagulation) พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดของกระบวนการเฟนตันดีกว่ากระบวนการอื่นๆโดยอัตราการกำจัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (T-N) และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (T-P) เท่ากับ 98, 93, 75 และ 95 % ตามลำดับ

**Nasr B., Ahmed B. et al. (2004)** ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันมะกอกโดยใช้กระบวนการเฟนตันโดยความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้นค่าซีโอดี 125 กรัมต่อลิตร ค่าบีโอดี ( $BOD_5$ ) 65-70 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 4.9 เมื่อดำเนินการระบบค่าพีเอชจะลดลงอยู่ประมาณเท่ากับ 3 ค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) 5 โมลต่อลิตร ค่าเพอร์ร็อกซิออน ( $Fe^{2+}$ ) 0.4 โมลต่อลิตร อัตราส่วน  $H_2O_2:FeSO_4$  เท่ากับ 5.55 .ใช้เวลาในการเดินระบบ 100 นาที ในช่วง 10-25 นาทีมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วมาก โดยประสิทธิภาพโดยรวมในการกำจัดซีโอดี 86 เปอร์เซ็นต์

Marco S., Lucas A. et al (2009) ศึกษาการกำจัดซีโอดีจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันมะกอก โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ค่าพีเอช อุณหภูมิ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ค่าความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) โดยเป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 (pseudo first order model) โดยน้ำเสียเริ่มต้นมีค่าซีโอดีเท่ากับ 60.5 กรัมต่อลิตร ค่าบีโอดี ( $BOD_5$ ) 10.2 กรัมต่อลิตร ค่าของแข็งแขวนลอย 6.8 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 4.3 ปฏิกิริยาเฟนตันสามารถลดสารอินทรีย์ในน้ำ (ค่าซีโอดี) ได้ตั้งสมการต่อไปนี้



และเมื่อคำนวณตามสมการสารสัมพันธ์ (stoichiometric)  $1 \text{ gCOD} = 1 \text{ g } O_2 = 0.03125 \text{ mol } O_2 = 0.0625 \text{ mol } H_2O_2$  หรือ  $2.125 \text{ g } H_2O_2$  จึงทดลองอัตราส่วน  $H_2O_2$  ต่อ COD เท่ากับ 0.35 1.05 และ 1.75 (ตามสมการเท่ากับ 2.125) พบว่าที่อัตราส่วน  $H_2O_2$  ต่อ COD เท่ากับ 1.75 ให้ประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีสูงที่สุดเท่ากับ 69.4 เปอร์เซ็นต์ ตัวแปรที่ทำการศึกษาเพิ่มเติมคือ อุณหภูมิช่วง 10 – 50 องศาเซลเซียส ค่าพีเอชช่วง 2 – 9 อัตราส่วน  $H_2O_2:Fe^{2+}$  เท่ากับ 7.5:1 และ 15:1 พบว่าอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พีเอชเท่ากับ 3.5 อัตราส่วน  $H_2O_2:Fe^{2+}$  เท่ากับ 15:1 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีได้ดีที่สุดเท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์

Koby et al (2007) ศึกษาการบำบัดน้ำมันที่มาจากกระบวนการตัดกลึงโลหะโดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมการตัดกลึงโลหะในประเทศตุรกี โดยน้ำเสียที่นำมาวิจัยเป็นน้ำเสียที่มากจากกระบวนการหล่อเย็นและการใช้น้ำมันหล่อลื่น ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำ 3 – 60 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าที่ทำจากเหล็กและอะลูมิเนียม ขนาด  $45 \times 53 \times 3$  มิลลิเมตร โดยน้ำเสียเริ่มต้นมีปริมาณซีโอดี 26,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดต่อการลดลงของค่า ซีโอดีและความขุ่น จากการศึกษาพบว่า การเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าขึ้นอยู่กับค่าพีเอช โดยในช่วงภาวะกรดอ่อน (พีเอช < 6) ขั้วอะลูมิเนียมจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ 93 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ช่วงภาวะเป็นกลางระหว่าง 3 – 7 ขั้วเหล็กจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ 92 เปอร์เซ็นต์ โดยมีระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร และระยะเวลาในการบำบัด 25 นาที ขั้วไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 – 60 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ถึงแม้ประสิทธิภาพในการบำบัดจะสูงแต่เนื่องจากน้ำเสียที่มาจากกระบวนการตัดกลึงโลหะจะมีค่าซีโอดีและปริมาณสารอินทรีย์สูงมาก ดังนั้นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วยังคงไม่ผ่านมาตรฐานจึงต้องมีกระบวนการบำบัดขั้นที่สองในการลดปริมาณความเข้มข้นซีโอดีและสารอินทรีย์

## 2.13 สรุปการศึกษาสภาวะต่างๆในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทต่างๆ

ประเภทน้ำเสีย	ขั้วไฟฟ้า (แอโนด-แคโทด)	สภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาทดลอง	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	ประสิทธิภาพในการบำบัด	เอกสารอ้างอิง
O -Chlorophenol	เหล็กกล้าไร้สนิม - แพทย์นัม	- ความเข้มข้นน้ำเสีย 80 มิลลิกรัมต่อลิตร - $[Fe^{2+}] = 0.5$ มิลลิกรัมต่อลิตร - เวลาที่ใช้บำบัด 60 นาที	600 มิลลิแอมแปร์	59.12 %	(Narayanan S., Magesh G. et al.,2003)
4-Nitrophenol	เหล็กกล้าไร้สนิม - Ti/RuO <sub>2</sub> /IrO <sub>2</sub>	- ความเข้มข้นน้ำเสีย 200 มิลลิกรัมต่อลิตร - $[H_2O_2]$ 9.12 มิลลิโมลต่อลิตร $Fe^{2+} / H_2O_2 = 0.050$	1 แอมแปร์	65 %	(Zhang H., Fei C. et al.,2007)
น้ำเสียสีส้ม	แพทย์นัม - คาร์บอนไฟเบอร์	- อัตราการเติมออกซิเจน 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที - พีเอชเท่ากับ 3 - $[Fe^{2+}]$ 2 มิลลิโมลต่อลิตร อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	3.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร	75.2 %	(Wang C., Chou W. et al.,2010)



### 2.13 สรุปการศึกษาสภาวะต่างๆในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทต่างๆ (ต่อ)

ประเภทน้ำเสีย	ขั้วไฟฟ้า (แอโนด-แคโทด)	สภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาทดลอง	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	ประสิทธิภาพในการบำบัด	เอกสารอ้างอิง
น้ำเสียปนเปื้อนสี Acid Red 14	RuO <sub>2</sub> /Ti – คาร์บอนไฟเบอร์	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความเข้มข้นน้ำเสีย 200 มิลลิกรัมต่อลิตร</li> <li>- [Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] 0.05 โมลต่อลิตร</li> <li>- พีเอชเท่ากับ 3</li> <li>- [Fe<sup>2+</sup>] 1 มิลลิโมลต่อลิตร</li> </ul>	0.50 แอมแปร์	73.3 %	(Wang A., Qu J. et al.,2005)
น้ำเสียสีขม	แกรไฟต์ - Pt/Ti (แพททินัม/ไทเทเนียม)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อัตราการเติมออกซิเจน 0.3 ลิตรต่อนาที</li> <li>- [Fe<sup>2+</sup>] 15 มิลลิโมลต่อลิตร</li> <li>- พีเอชเท่ากับ 3</li> </ul>	68 แอมแปร์ต่อตารางเมตร	70 %	(Wang C., Hua J. et al.,2008)
Picloram (น้ำเสียปนเปื้อนสารกำจัดวัชพืช)	คาร์บอน – แพททินัม	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความเข้มข้นน้ำเสีย 0.125 มิลลิโมลต่อลิตร</li> <li>- [Fe<sup>3+</sup>] 0.1 มิลลิโมลต่อลิตร</li> <li>- [Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] 50 มิลลิโมลต่อลิตร</li> <li>- พีเอชเท่ากับ 3</li> </ul>	300 มิลลิแอมแปร์	100 %	(Ozcan A., SahinY. et al.,2008)

2.13 สรุปการศึกษาสภาวะต่างๆในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทต่างๆ (ต่อ)

ประเภทน้ำเสีย	ขั้วไฟฟ้า (แอโนด-แคโทด)	สภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาทดลอง	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	ประสิทธิภาพในการบำบัด	เอกสารอ้างอิง
2,4,6-Trinitrotoluene	แพททินัม - คาร์บอน	- ความเข้มข้นน้ำเสีย 0.2 มิลลิโมลต่อลิตร - $[Fe^{2+}]$ 0.2 มิลลิโมลต่อลิตร	250 มิลลิแอมแปร์	99 %	(Pimentel M., Oturán N. et al.,2008)
2,6-Dimethylaniline	Ti-RuO <sub>2</sub> /IrO <sub>2</sub> - เหล็กกล้าไร้สนิม	- ความเข้มข้นน้ำเสีย 1 มิลลิโมลต่อลิตร - $[Fe^{2+}]$ 1 มิลลิโมลต่อลิตร - $[H_2O_2]$ = 20 มิลลิโมลต่อลิตร - พีเอชเท่ากับ 2	10.6 แอมแปร์ต่อ ตารางเมตร	91 %	(Ting W.P., Lu M.C. et al.,2009)

## 2.13 สรุปการศึกษาสภาวะต่างๆในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทต่างๆ (ต่อ)

กระบวนการ	ประเภทน้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ประสิทธิภาพ	เอกสารอ้างอิง
กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภท E-FSR	น้ำชะขยะ	-เวลาในการกักเก็บ -ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า -ปริมาณกระแสไฟฟ้า -อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์( $H_2O_2$ ) และเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ )	ซีไอดี 79.4%	(Zhang H., Fei C. et al.,2007)
กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภท E-FSR	น้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบ	-ค่าความเป็นกรด-เบส -ค่าแอมโมเนียรวม-ไนโตรเจน-ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส -ค่ากระแสไฟฟ้า -ค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	-แอมโมเนียรวม -ค่าไนโตรเจน 26% -ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส 87% -ซีไอดี 72%	(Atmaca E.,2009)
กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภท E-FSR	อุตสาหกรรมสิ่งทอ	-เดินระบบแบบที่ละเทและระบบต่อเนื่อง -ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน -ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอัตราการไหลวนของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ -ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	-ระบบแบบที่ละเทใช้เวลา 45 นาที ปริมาณน้ำมันและไขมัน 93.9% -ซีไอดี 89.2% ซีไอดี 88.9% -ระบบต่อเนื่องใช้เวลา 60 นาที ปริมาณน้ำมันและไขมัน 92.5% -ซีไอดี 79.6% ซีไอดี 69.8% - $[H_2O_2]=0.5 \text{ mol/l}$	(มารุต ไปรมาณานนท์,2547)

## 2.13 สรุปการศึกษาสภาวะต่างๆในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนต้นประเภทต่างๆ (ต่อ)

กระบวนการ	ประเภทน้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ประสิทธิภาพ	เอกสารอ้างอิง
กระบวนการอิเล็กโทรเฟนต้นประเภท EF-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	น้ำเสียป้อนเป็นสีช้อม	-อัตราการเติมอากาศ -ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า -ค่าความเข้มข้นเพอร์ซอร์ซอออน -อุณหภูมิ -ค่าความเป็นกรด-เบส	-อัตราการเติมอากาศที่ 0.3 ลิตรต่อนาที -ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 68 แอมแปร์ต่อตารางเมตร -ปริมาณเพอร์ซอร์ซอออน 20 มิลลิโมล -อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส -ค่าพีเอช 3 -ซีไอดี 70 % โดยใช้เวลาเดินระบบเพียง 150 นาที	(Wang C., Hua J. et al.,2008)
กระบวนการอิเล็กโทรเฟนต้นประเภท EF-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	น้ำเสียป้อนเป็นสีเมทิลออเรนจ์ (Methylorange, MO)	-ค่าความเข้มข้นของน้ำเสีย -ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า -ซีไอดี -ค่าความเข้มข้นของเพอร์ซอร์ซอออน	-ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 7.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร -ซีไอดี 70 % -ค่าความเข้มข้นเพอร์ซอร์ซอออน (boron-doped diamond) -ซีไอดี 70 %	(Eloy Isarain C., Catalina R. et al.,2013)
กระบวนการอิเล็กโทรเฟนต้นประเภท EF-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	น้ำเสียป้อนเป็นโรดามีนบี (Rhodamine B)	-ค่าความเข้มข้นเพอร์ซอร์ซอออน -ค่าความเป็นกรด-เบส -ค่าความเข้มข้นโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO <sub>3</sub> )	-ค่าความเข้มข้นเพอร์ซอร์ซอออน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร -ค่าพีเอช 3 -NaHCO <sub>3</sub> 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร	(Nidheesh P.V., Gandhimathi R. et al.,2014)

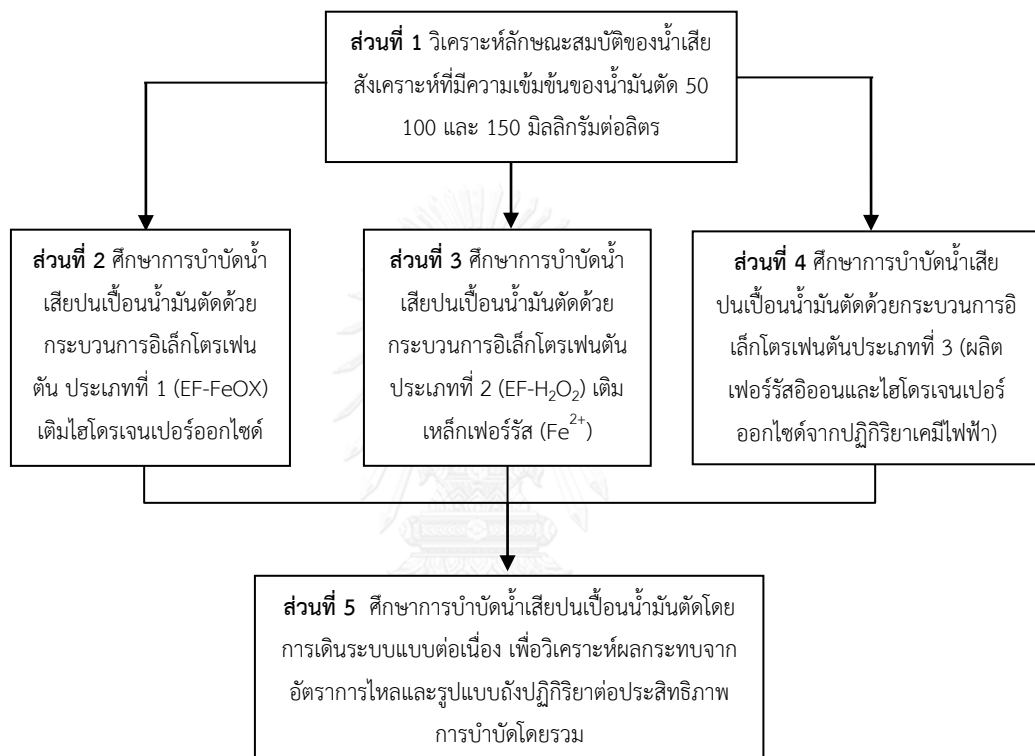
## 2.13 สรุปการศึกษาสภาวะต่างๆในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทต่างๆ (ต่อ)

กระบวนการ	ประเภทน้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ประสิทธิภาพ	เอกสารอ้างอิง
กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภท EF-FeO <sub>x</sub>	น้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตแอลกอฮอล์	-ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) -ความเป็นกรด-เบส -ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า -ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	-ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) 0.3 โมล , ค่าพีเอช 4 -ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 60 มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตร -ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตร -ค่าซีไอดี 92.6 % ค่าพีไอซี 88.7 %	(Yavuz Y.,2007)
กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภท EF-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	น้ำเสียสีขุ่น	- อัตราการเติมอากาศ - ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า - ค่าความเป็นกรด-เบส -ปริมาณเฟอร์รัสไอออน - อุณหภูมิ	- อัตราการเติมอากาศ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที - ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3.2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตร ค่าพีเอช 3 - ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (Fe <sup>2+</sup> ) เท่ากับ 2 มิลลิโมล , ซีไอดี 86.2 %	(Wang C., Chou W. et al.,2010)
กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภท EF-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	น้ำเสียที่มีฟีนอลปนเปื้อน	- ปริมาณ Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - ค่ากระแสไฟฟ้า - ปริมาณเฟอร์รัสไอออน	- ปริมาณ Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.5 โมลต่อลิตร - ค่ากระแสไฟฟ้า 300 มิลลิแอมป์ - ปริมาณเฟอร์รัสไอออน 0.3 มิลลิโมลต่อลิตร	(Guangsen X., Yonghong L. et al.,2014)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นพบว่า กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟนตันมีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยได้นำมาใช้กับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนต่างๆ ซึ่งกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟนตันเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสียหลากหลายรูปแบบและสามารถกำจัดอนุภาคความขุ่น สี และซีโอटीได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยพบว่ากระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟนตันมี 3 ประเภทและได้มีงานวิจัยเกี่ยวข้องกับการบำบัดทั้ง 3 ประเภทแต่ยังไม่มียานวิจัยใดที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้ง 3 ประเภทนี้ จึงได้มีแนวคิดที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการลดปริมาณการใช้สารเคมีและลดค่าใช้จ่ายในการบำบัด อีกทั้งยังไม่ค่อยพบการนำกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟนตันมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันมากนักซึ่งมีบางงานวิจัยที่นำกระบวนการเฟนตันไปใช้ในการบำบัดจึงมีแนวคิดที่จะเปรียบเทียบทั้งกระบวนการเฟนตันและกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟนตันด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาประเภทและความเหมาะสมของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟนตันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด เพื่อลดต้นทุนและนำไปประยุกต์และพัฒนาในการเดินระบบแบบต่อเนื่องและในโรงงานอุตสาหกรรมในอนาคต

### บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนวิธีดำเนินงาน

#### 3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.2.1 วัสดุอุปกรณ์

1. ชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรเฟนตันได้แก่ ปีกเกอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร (แสดงดังภาพที่ 3.2-3.4)
2. ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) ทำจากทำจากเหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิม ขั้วแกรไฟต์ และ ขั้วไททาเนียมมีลักษณะเป็นรูปตัวทีขนาดดังแสดงในภาพที่ 4.3
3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply)

4. เครื่องปั่นกวนน้ำ (Motor stirrer) บริษัท เบคไทย (ประเทศไทย) จำกัด  
 5. Peristaltic pump บริษัท WATSON MARLOW 505S ความต่างศักย์ 100-240 โวลต์ 50/60 เฮิร์ตซ์

6. กล้องจุลทรรศน์ บริษัท Nikon รุ่น YS2-H
7. เครื่องวิเคราะห์ความขุ่น Loviond รุ่น TurbiCheck
8. นาฬิกาจับเวลา บริษัท KADIO รุ่น KD-2015
9. เครื่องวัดค่าพีเอช บริษัท Scientific Promotion รุ่น CG840
10. เครื่อง UV/VIS spectrophotometer

11. ไม้บรรทัด

12. ถังเก็บน้ำพลาสติกขนาด 10 ลิตร

13. อุปกรณ์วัดค่าซีโอดี ดังนี้

- หลอดทดสอบวัดค่าซีโอดี ขนาด 16x150 มม. พร้อมฝาจุกเกลียวทำด้วยเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene, TFE)

- ตู้อบ (Hot air oven) บริษัท Memmert รุ่น 600 สามารถให้ความร้อนอยู่ระหว่าง  $150 \pm 2$  °C

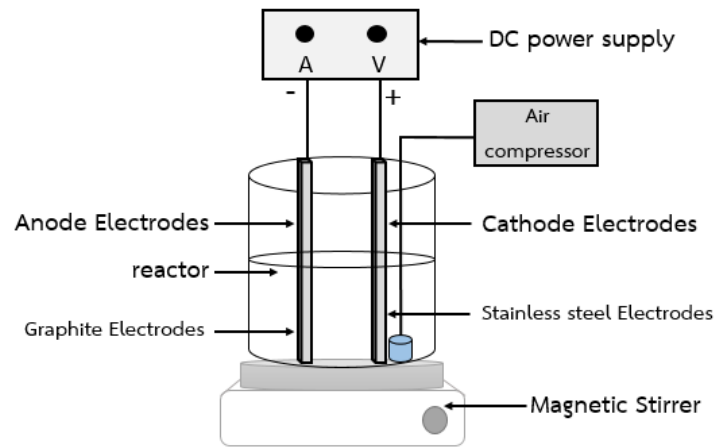
- ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 500 และ 1,000 มิลลิลิตร

- กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 100 และ 1,000 มิลลิลิตร

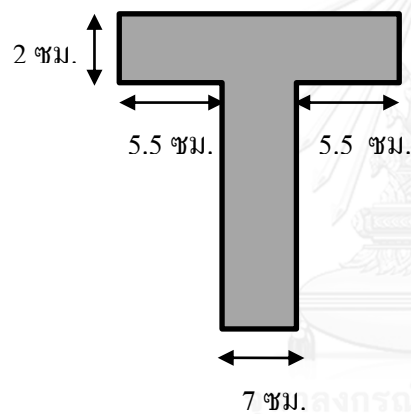
- ปิเปตอัตโนมัติ (Auto Pipet) ขนาด 1 5 และ 10 มิลลิลิตร



การจัดอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

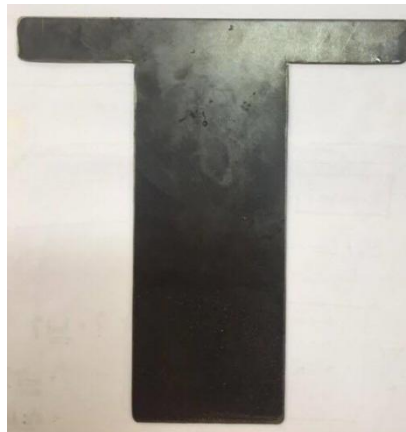


ภาพที่ 3.2 แสดงชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรไลต์ในถังปฏิกรณ์

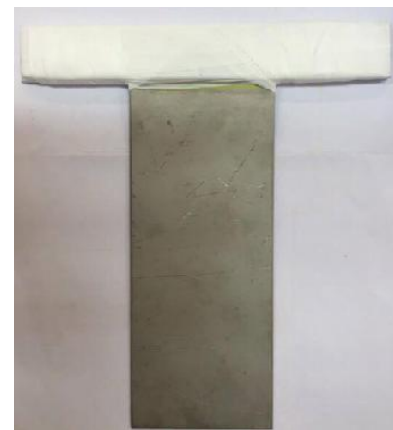


(1)

(2)



(3)



(4)

ภาพที่ 3.3 (1) ขนาดของขั้วที่ใช้ในการทดลอง (2) ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม

(3) ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากเหล็ก (4) ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากไททานเนียม

### 3.2.2 สารเคมี

1. น้ำมันตัด บริษัท Castrol cooledge BI
2. สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเฟนตัน
  - สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ )
  - สารละลายมาตรฐาน Ferrous Ammonium Sulphate บริษัท Carlo Erba
  - สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) บริษัท Qrec
3. สารเคมีที่ใช้ในการหยุดปฏิกิริยาเฟนตัน
  - สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ )
4. สารเคมีที่ใช้ในการวัดปริมาณเหล็ก
  - สารละลายฟีแนนโทรลีน 1,10-phenanthroline ( $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ )
  - กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) บริษัท J.T. Baker
  - สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ ละลาย  $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$
5. สารเคมีที่ใช้ในการวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
  - โพแทสเซียมไททาเนียมออกซาเลต Potassium titanium (IV) oxalate ( $\text{K}_2\text{TiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )
6. สารเคมีที่ใช้วัดค่าซีโอดี
  - สารละลายมาตรฐาน Potassium Dichromate Digestion ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) บริษัท Carlo Erba
  - กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) บริษัท J.T. Baker
  - สารละลายเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ (Ferroun Indicator) บริษัท Carlo Erba
  - ซิลเวอร์ซัลเฟต ( $\text{AgSO}_4$ )
  - เมอร์คิวรีซัลเฟต ( $\text{HgSO}_4$ )

### 3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

ทำการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดของอนุภาคน้ำมัน ค่าความหนืด (Viscosity) และค่าซีโอดี (COD) เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.1 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำมัน	1. น้ำมันตัด
2. ความเข้มข้นของน้ำมันตัด	2. 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ขนาดอนุภาคน้ำมัน	1. เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค
2. คุณภาพน้ำ	2. ค่าซีโอดี, ความขุ่น
3. ปริมาณน้ำมัน	3. ปริมาณน้ำมัน
4. พีเอช	4. พีเอช

#### วิธีการทดลอง

เตรียมน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเตรียมจากน้ำมันตัดยี่ห้อคลอสตรอลที่มีความเข้มข้น 50 100 และ 150 มิลลิกรัมผสมกับน้ำประปา (ใช้ค่านี้เนื่องจากเป็นการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดจากกระบวนการบำบัดขั้นต้นมาแล้ว) ทำการปั่นกวนน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อนำไปใช้สำหรับการทดลองในการศึกษานี้ แบ่งเป็น 5 ส่วน (ดังภาพที่ 3.4)

#### วิธีทำการทดลอง (ตัวอย่างควบคุม)

1. การปรับ pH เพียงอย่างเดียว โดยการนำปิ๊กเกอร์ขนาด 2 ลิตร ใส่ น้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมในน้ำประปา 1 ลิตร ปั่นกวน 125 รอบต่อนาที นาน 5 นาที
2. นำมาปรับ pH เป็น 3 และ 11 ทำการวิเคราะห์ซีโอดี (COD) เริ่มต้น



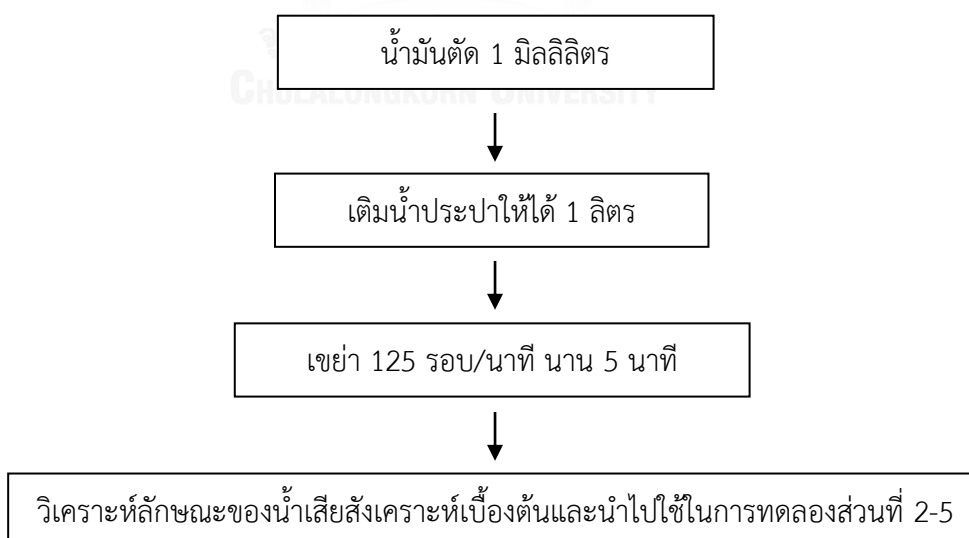
ภาพที่ 3.4 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 ลักษณะสมบัติของน้ำมันตัด (cutting oil); Castrol Cooledge BI ที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อทางเคมี: น้ำมันแร่, สารเพิ่มคุณภาพและสารอิมัลซิไฟเออร์

ส่วนประกอบ: น้ำมันแร่, สารเพิ่มคุณภาพ และสารอิมัลซิไฟเออร์

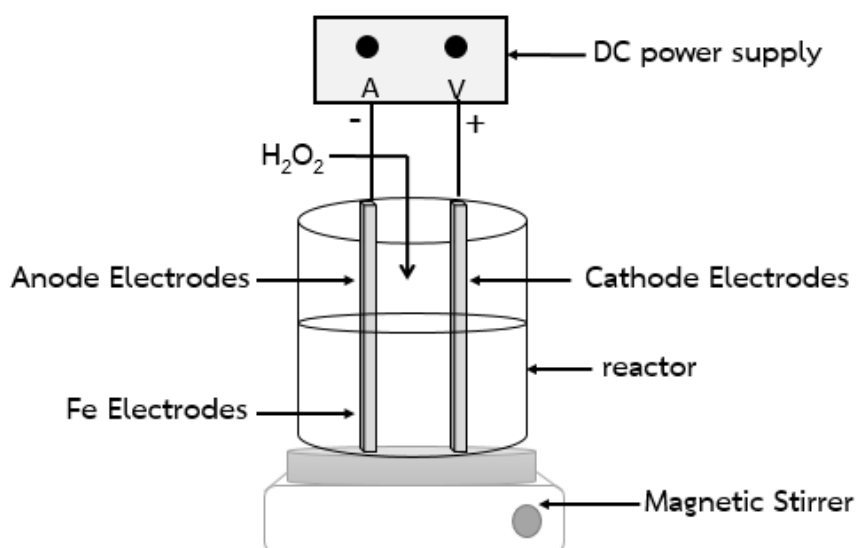
ค่าความหนืด @ 20 °C	0.935
พีเอชของสารละลาย @ 5°C	10
Specific Gravity @ 15°C	0.950
Kinematic Viscosity @ 40 °C	38.45
Flash Point (PMCC), °C	70
Pour Point, °C	-12



ภาพที่ 3.5 แผนผังการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์

### 3.3.2 การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในประเภทที่ 1 (EF-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

โดยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) และขั้วแคโทดที่ใช้คือเหล็กและเหล็กกล้าไร้สนิม ขั้วแอโนดที่ใช้คือเหล็ก ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.35 แอมแปร์ (ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร โดยทำการศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม ที่ 125 250 500 1500 2500 และ 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการปั่นกวนตัวอย่างตลอดเวลาและทำการควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียให้อยู่ในช่วง 3 - 4 โดยตัวแปรในการศึกษาแสดง ดังตารางที่ 3.3 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แสดงชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1 (EF-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1 (EF-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

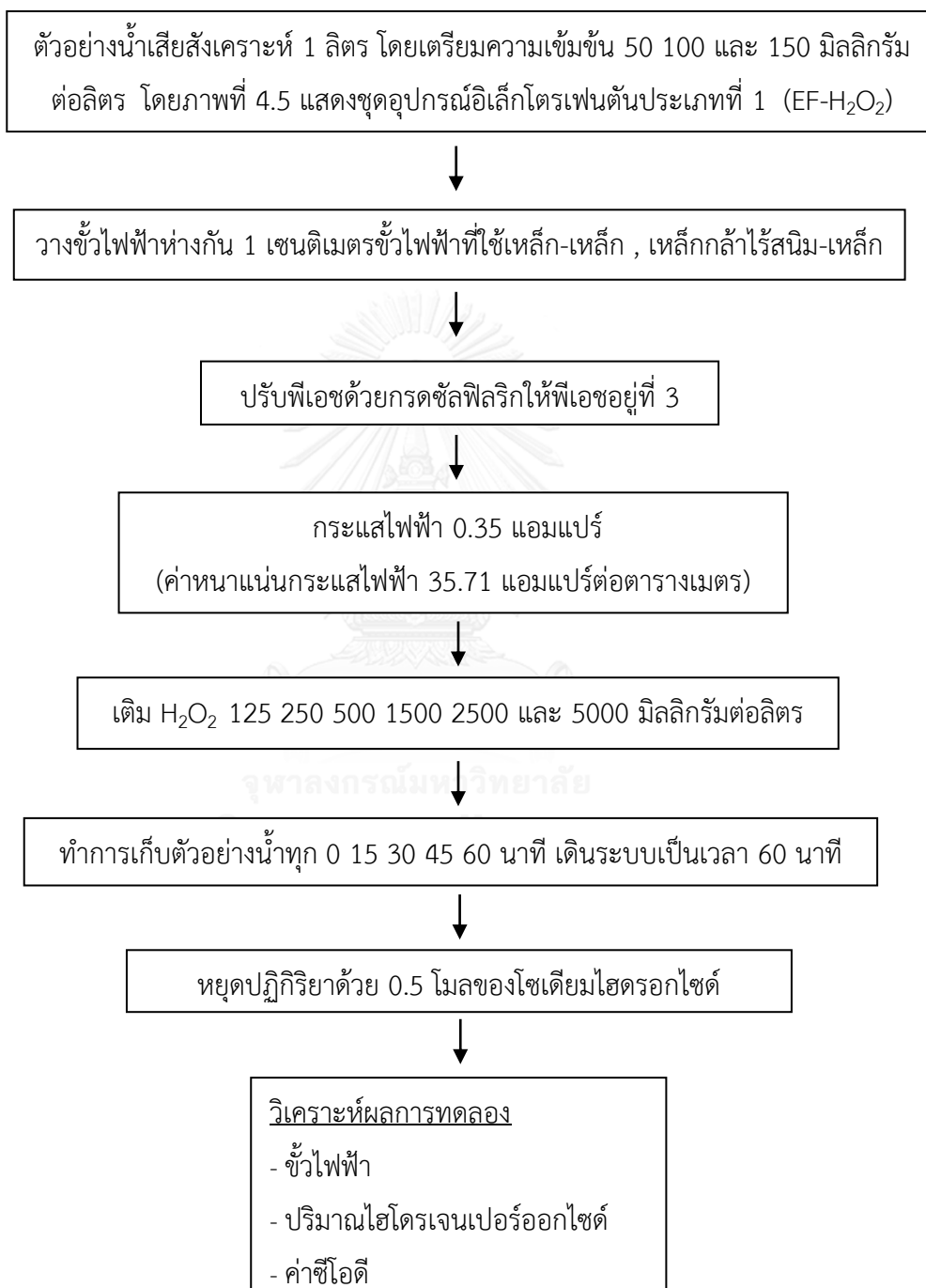
ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง 3. ค่าพีเอชของน้ำเสีย 4. กระแสไฟฟ้า	1. 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร 2. 1 ลิตร 3. 3 – 4 4. 0.35 แอมแปร์
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ปริมาณ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 2. ขั้วไฟฟ้า	1. 125 250 500 1500 2500 และ 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร 2. เหล็ก-เหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิม-เหล็ก
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1.1 ค่าซีไอดี 1.2 ค่าพีเอช 1.3 ปริมาณเหล็กทั้งหมด,เฟอร์รัสไอออน (Fe <sup>2+</sup> )

#### วิธีทำการทดลอง

- จัดเรียงขั้วไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาโดยใช้ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดที่ทำมาจากเหล็ก พื้นที่ทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า 14 x 7 ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร และทำการต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
- นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากการทดลองใน ส่วนที่ 1 ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรมาใส่ในถังปฏิกิริยาจำนวน 1 ลิตร
- เปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ปรับค่ากระแสไฟฟ้าไปที่ 0.35 แอมแปร์ ซึ่งจะให้ได้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
- เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 125 มิลลิกรัมต่อลิตร
- เก็บตัวอย่างน้ำ 20 มิลลิลิตรหยุดปฏิกิริยาด้วย 1 โมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 0 15 30 45 60 นาที เติมน้ำเป็นเวลารวม 60 นาที เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าซีไอดี
- ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 250 500 1500 2500 และ 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
- ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 ปรับเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าโดยขั้วแอโนดทำมาจากเหล็ก เช่นเดิมแต่ขั้วแคโทดเปลี่ยนเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม

9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

10. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองส่วนที่ 2 นี้



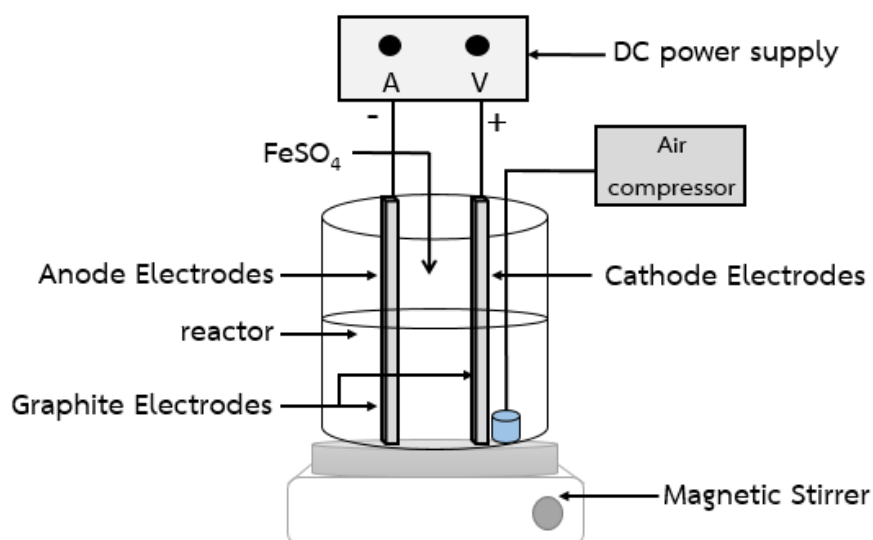
ภาพที่ 3.7 แผนผังการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1 (EF-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองส่วนที่ 2

พารามิเตอร์	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง	
		ทุกครั้ง	ชุดที่เหมาะสม
1.1 ค่าซีไอดี	✓	✓	
1.2 ค่าพีเอช	✓	✓	
1.3 ปริมาณเหล็กทั้งหมด,เฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ )			✓

### 3.3.3 การทดลองส่วนที่ 3 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในประเภทที่ 2 (EF-FeOX)

โดยการเติมเฟอร์รัสซัลเฟต ( $FeSO_4$ ) และขั้วแคโทดและแอโนดที่ใช้คือแกรไฟต์ ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.35 แอมแปร์ (ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร ทำการปั่นกวนตัวอย่างตลอดเวลาและทำการควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียให้อยู่ในช่วง 3 - 4 ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.5 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3.7 - 3.9



ภาพที่ 3.7 แสดงชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 2 (EF-FeOX)



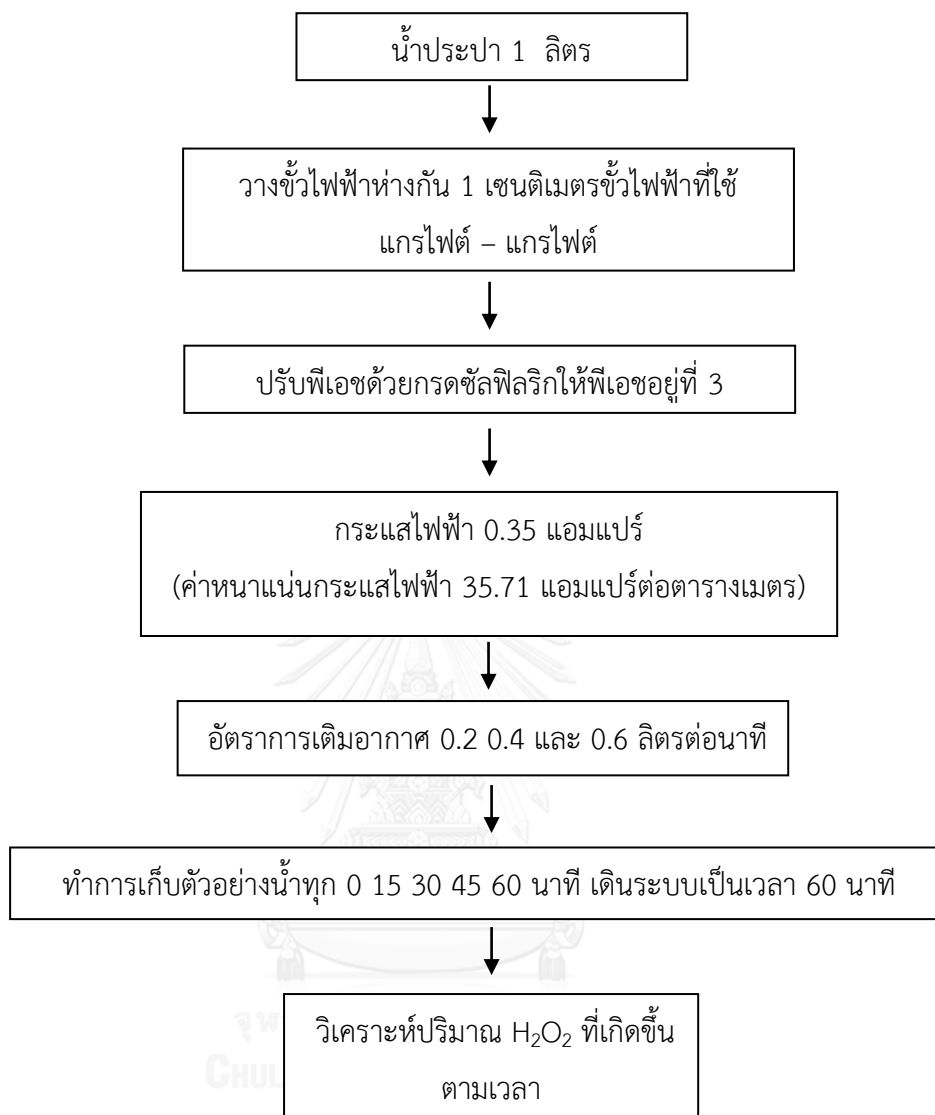
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 2 (EF-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1.1 ค่าซีโอดี 1.2 ค่าพีเอช 1.3 ปริมาณเหล็กทั้งหมด,เฟอร์รัสไอออน (Fe <sup>2+</sup> ) 1.4 วัดปริมาณออกซิเจนในน้ำ (DO)
ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง 3. ค่าพีเอชของน้ำเสีย 4. ชั่วไฟฟ้า 5. กระแสไฟฟ้า	1. 50 100 และ 150 มิลลิลิตรต่อลิตร 2. 1 ลิตร 3. 3 - 4 4. แกรไฟต์ 5. 0.35 แอมแปร์
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ปริมาณเหล็ก 2. ปริมาณการเติมอากาศ	1. 100 200 และ 500 มิลลิลิตรต่อลิตร 2. 0.2 0.4 และ 0.6 ลิตรต่อนาที

### ส่วนที่ 3.1 ทาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

#### วิธีทำการทดลอง

1. จัดเรียงขั้วไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาเติมน้ำประปา 1 ลิตร ใช้ขั้วแอโนดทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม ขั้วแคโทดทำมาจากแกรไฟต์ พื้นที่ทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า 14 x 7 ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร และทำการต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
2. เปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ปรับค่ากระแสไฟฟ้าไปที่ 0.35 แอมแปร์ซึ่งจะทำให้ได้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
3. จัดเตรียมเครื่องเติมอากาศโดยให้หัวตัวอากาศอยู่ใกล้กับขั้วแคโทด ปรับอัตราการเติมอากาศที่ 0.2 ลิตรต่อนาที
4. เก็บตัวอย่างน้ำ 20 มิลลิลิตร ทุก 0 15 30 45 60 นาที เตินระบบเป็นเวลา 60 นาทีเพื่อวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 3.8 แผนผังการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต  $H_2O_2$

### ส่วนที่ 3.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

#### วิธีการทดลอง

- จัดเรียงขั้วไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาโดยใช้ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดที่ได้จากการทดลองส่วนที่ 3.1 พื้นที่ทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า  $14 \times 7$  ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร และทำการต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
- นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากการทดลองในส่วนที่ 1 ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มาใส่ในถังปฏิกิริยาจำนวน 1 ลิตร

3. เปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ปรับค่ากระแสไฟฟ้าไปที่ 0.35 แอมแปร์ซึ่งจะทำให้ได้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
4. จัดเตรียมเครื่องเติมอากาศโดยให้หัวตัวอากาศอยู่ใกล้กับขั้วแคโทด ปรับอัตราการเติมอากาศตามการทดลองส่วนที่ 3.1
5. เติมเฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ ) โดยมีเฟอร์รัสไอออน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
6. เก็บตัวอย่างน้ำ 20 มิลลิลิตรหยุดปฏิกิริยาด้วย 0.5 โมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 0 15 30 45 60 นาที เติมนระบบเป็นเวลา 60 นาทีเพื่อทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดี
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่เติมเฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ ) โดยมีเฟอร์รัสไอออน 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
9. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองส่วนที่ 3 นี้

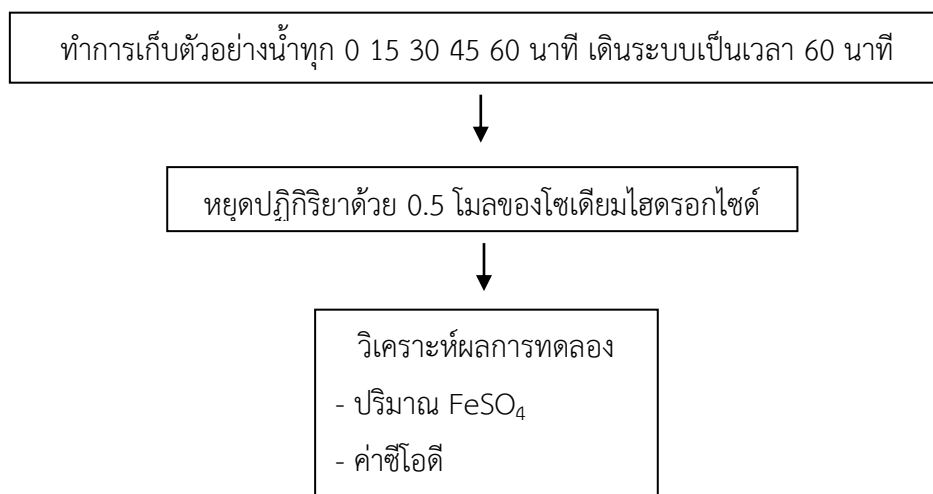
ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ 1 ลิตร โดยเตรียมความเข้มข้น 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยภาพที่ 3.6 แสดงชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 2 ( $\text{EF-H}_2\text{O}_2$ )

วางขั้วไฟฟ้าห่างกัน 1 เซนติเมตรขั้วไฟฟ้าที่ใช้คือ แกรไฟต์  
กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์  
(ค่าหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร)

ปรับพีเอชด้วยกรดซัลฟิวริกให้พีเอชอยู่ที่ 3

อัตราการเติมอากาศ จากการทดลองส่วนที่ 1

เติมปริมาณ  $\text{FeSO}_4$  (โดยมีเฟอร์รัสไอออน 100 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร)



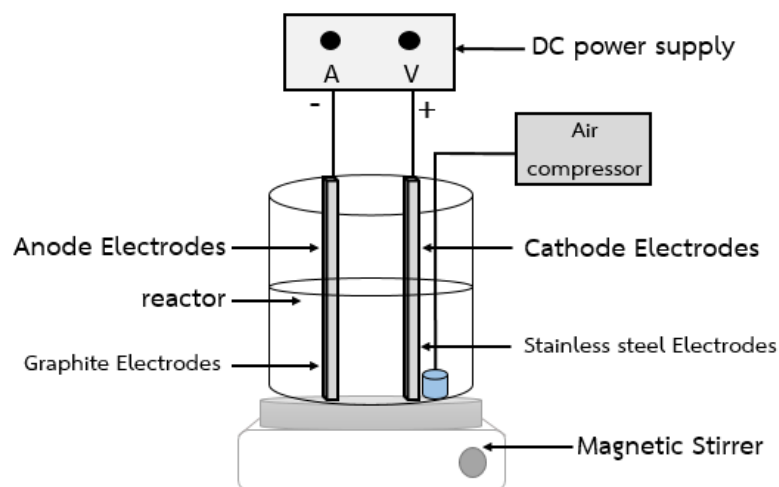
ภาพที่ 3.9 แผนผังการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วย กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 2 (EF-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองส่วนที่ 3

พารามิเตอร์	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง	
		ทุกครั้ง	ชุดที่เหมาะสม
1.1 ค่าซีไอดี	✓	✓	
1.2 ค่าพีเอช	✓	✓	
1.3 ปริมาณเหล็กทั้งหมด,เฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ )			✓
1.4 วัดปริมาณออกซิเจนในน้ำ (DO)			✓

3.3.4 การทดลองส่วนที่ 4 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในประเภทที่ 3 (ผลิตเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า)

ขั้วแคโทดที่ใช้คือแกรไฟต์ ไททาเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม ขั้วแอโนดที่ใช้คือเหล็กและเหล็กกล้าไร้สนิม ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ค่ากระแสไฟฟ้า 0.25 0.35 0.45 และ 0.55 แอมแปร์ (ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 59.5 71.43 และ 107 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร และอัตราการเติมอากาศ 0.2 0.4 และ 0.6 ลิตรต่อนาทีทำการปั่นกวนตัวอย่างตลอดเวลาและทำการควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียให้อยู่ในช่วง 3 - 4 ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.8 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 แสดงชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โทรเฟนตันประเภทที่ 3  
(ผลิตเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า)

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการศึกษากระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรเฟนตันประเภทที่ 3

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง 3. ค่าพีเอชของน้ำเสีย	1. 0.05 0.10 และ 0.15 กรัมต่อลิตร 2. 1 ลิตร 3. 3 - 4
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2. อัตราการเติมอากาศ 3. ชั่วโมง	1. 35.71 59.5 71.43 และ 107 แอมแปร์ต่อตารางเมตร 2. 0.2 0.4 และ 0.6 ลิตรต่อนาที 3. แกรไฟต์-เหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิม-เหล็กกล้าไร้สนิม และไททาเนียม-เหล็ก
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1.1 ค่าซีไอดี 1.2 ค่าพีเอช 1.3 ปริมาณเหล็กทั้งหมด, เฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) 1.4 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )

### วิธีการทดลอง

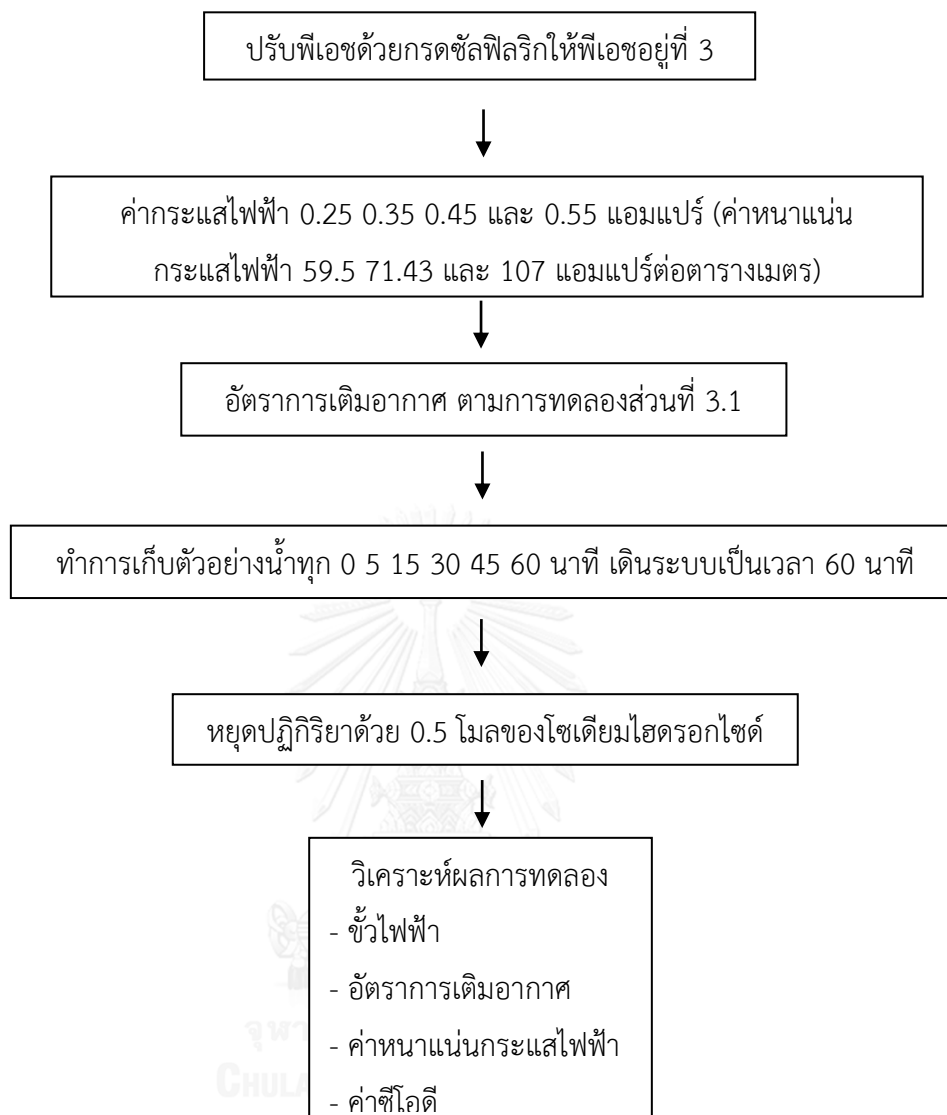
1. จัดเรียงขั้วไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาโดยใช้ขั้วแอโนดทำมาจากเหล็กและขั้วแคโทดที่ได้จากการแกรไฟต์ พื้นที่ทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า  $14 \times 7$  ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร และทำการต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
2. นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากการทดลองใน ส่วนที่ 1 ที่ความเข้มข้น 0.05 กรัมต่อลิตร มาใส่ในถังปฏิกิริยาจำนวน 1 ลิตร
3. เปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ปรับค่ากระแสไฟฟ้าไปที่ 0.6 แอมแปร์ซึ่งจะทำให้ได้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 59.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
4. จัดเตรียมเครื่องเติมอากาศโดยให้หัวอากาศอยู่ใกล้กับขั้วแคโทด ปรับอัตราการเติมอากาศตามการทดลองส่วนที่ 3.1
5. เติมเฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ ) โดยมีเฟอร์รัสไอออน 0.5 กรัมต่อลิตร
6. เก็บตัวอย่างน้ำ 20 มิลลิลิตรหยุดปฏิกิริยาด้วย 0.5 โมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 0 5 15 30 45 60 นาที เติกระบบเป็นเวลา 60 นาทีเพื่อทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดี
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่เติมเฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ ) โดยมีเฟอร์รัสไอออน 1.5 กรัมต่อลิตรตามลำดับ
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 ปรับเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าโดยขั้วแคโทดเปลี่ยนเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม และคาร์บอนตามลำดับ
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 แต่ปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเป็น 71.43 107 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
10. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-9 ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 0.10 0.15 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ
11. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองส่วนที่ 4 นี้

ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ 1 ลิตร โดยเตรียมความเข้มข้น 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยภาพที่ 3.7 แสดงชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3



วางขั้วไฟฟ้าห่างกัน 1 เซนติเมตรขั้วไฟฟ้าที่ใช้แกรไฟต์-เหล็ก ไททานเนียม-เหล็ก และเหล็กกล้าไร้สนิม-เหล็กกล้าไร้สนิม





ภาพที่ 3.11 แผนผังการสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟสที่ 3 (ผลิตเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า)

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองส่วนที่ 4

พารามิเตอร์	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง	
		ทุกครั้ง	ชุดที่เหมาะสม
1.1 ค่าซีไอดี	✓	✓	
1.2 ค่าพีเอช	✓	✓	
1.3 ปริมาณเหล็กทั้งหมด,เพอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ )			✓
1.4 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ )			✓
1.5 วัดปริมาณออกซิเจนในน้ำ (DO)	✓		✓

### 3.3.5 การทดลองส่วนที่ 5 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ศึกษาผลกระทบจากอัตราการไหลน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยการนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดเข้าถังปฏิกรณ์ โดยใช้รูปแบบการเดินระบบบำบัดที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.2 – 3.2.4 มาประยุกต์ใช้ในการทดลองโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง และศึกษาค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมในการเดินระบบ 240 นาที โดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 15 นาที รวมทั้งวัดค่าซีไอดี อัตราการไหลภายในถังปฏิกรณ์ เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบและเดินระบบที่เหมาะสม ตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.10

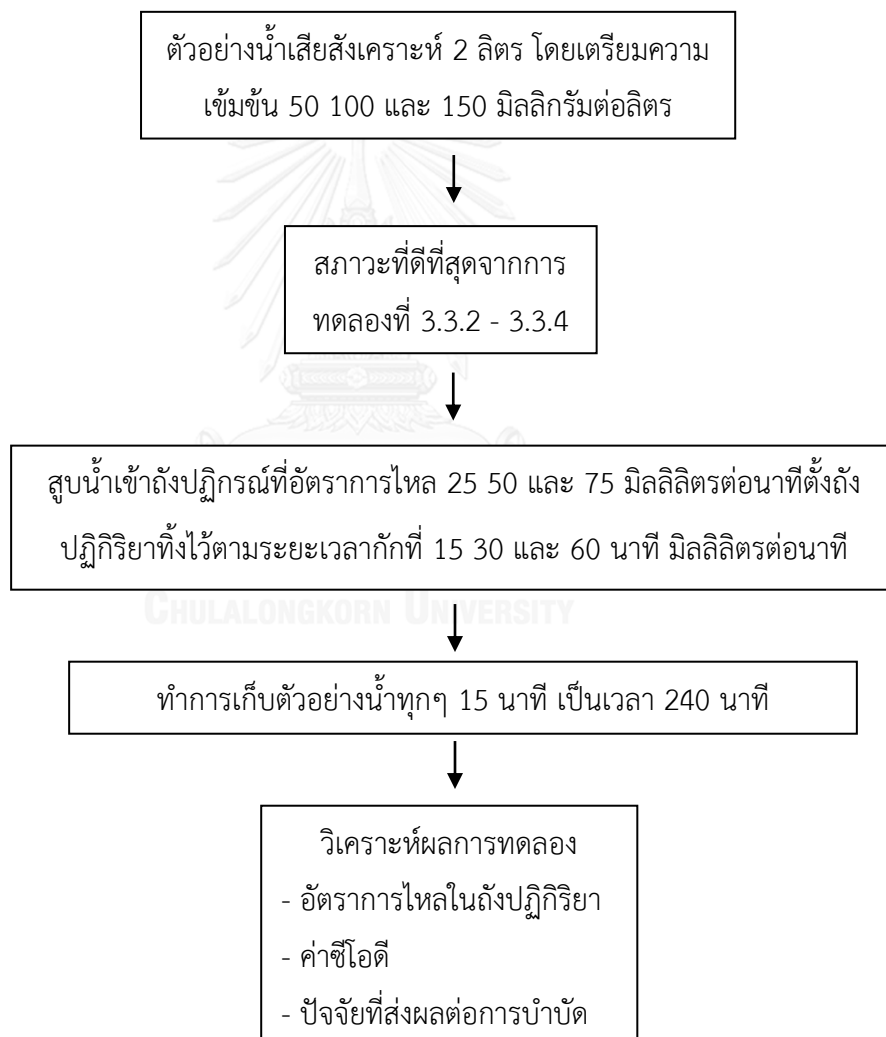
ตารางที่ 3.9 ตัวแปรในการศึกษากระบวนการอเล็กโตรเฟนตันโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1. 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองอเล็กโตรเฟนตันที่ 4.3.2 – 4.3.4	2. 2 ลิตร 3. 3 - 4
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย	1. 0.25 0.5 และ 0.75 มิลลิลิตรต่อนาที มิลลิลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	1.1 ค่าซีไอดี 1.2 ค่าพีเอช



### วิธีทำการทดลอง

1. จัดเรียงขั้วไฟฟ้าในถังปฏิกริยาขนาด 1 ลิตร พื้นที่ทำปฏิกริยาของขั้วไฟฟ้า  $14 \times 7$  ตารางเซนติเมตร (แสดงดังภาพที่ 3.2)
2. นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากการทดลองในส่วนที่ 1 ที่ความเข้มข้น 50 100 และ 150 กรัมต่อลิตรมาใส่ในถังปฏิกริยาจำนวน 2 ลิตร
3. ใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองส่วนที่ 2-4 มาทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกริยา
4. สูบน้ำเข้าถังปฏิกริยาที่อัตราการไหล 25 50 และ 75 มิลลิลิตรต่อนาทีเพื่อศึกษาอัตราการไหลต่อการบำบัดในแต่ละการทดลอง



ภาพที่ 3.12 แผนผังการสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์แบบต่อเนื่อง

### 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.10 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	วิธีวิเคราะห์
ค่าซีโอดี	Dichromate Close Reflux Method (AWWA.)
ปริมาณของน้ำมัน	การสกัดด้วยกรวยแยก (มันลิน, 2540)
ขนาดหยดน้ำมัน (oil droplet)	กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)
ค่าพีเอช	เครื่องวัด pH-meter
ปริมาณเหล็กทั้งหมด,เฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ )	Phenanthroline method (AWWA.)
ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	Potassium titanium (IV) oxalate Method
วัดปริมาณออกซิเจนในน้ำ (DO)	เครื่องวัดออกซิเจนในน้ำ (DO-meter)



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเปรียบเทียบประเภของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยปฏิกิริยาเฟนตันโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 6 ส่วนคือ

- ส่วนที่ 4.1 คือ ศึกษาลักษณะทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดเบื้องต้น
- ส่วนที่ 4.2 คือ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตัน
- ส่วนที่ 4.3 คือ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอเล็กโตรเฟนตัน (ประเภทที่ 1)
- ส่วนที่ 4.4 คือ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอเล็กโตรเฟนตัน (ประเภทที่ 2) และเปรียบเทียบการศึกษาสภาวะที่ดีที่สุดและเหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันกับกระบวนการอเล็กโตรเฟนตัน (ประเภทที่ 1 และ 2)
- ส่วนที่ 4.5 คือ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอเล็กโตรเฟนตัน (ประเภทที่ 3) โดยตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ขั้วไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า (ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า) ปริมาณออกซิเจนในน้ำเริ่มต้น อัตราการเติมอากาศ
- ส่วนที่ 4.6 คือ การวิเคราะห์แนวทางการเดินระบบแบบต่อเนื่องศึกษาผลของอัตราการไหลและสภาวะการทำงานที่เหมาะสมในกระบวนการอเล็กโตรเฟนตัน (ประเภทที่ 3)

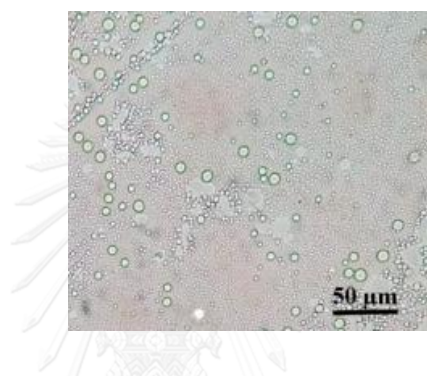
#### 4.1 ศึกษาลักษณะทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดเบื้องต้น

จากตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำน้ำมันตัดมาผสมกับน้ำประปาและนำไปปั่นกวานที่ 120 รอบต่อนาที จะพบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้มีเสถียรภาพสูงมาก ไม่สามารถแยกออกได้ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ เนื่องจากน้ำมันตัดมีอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ดังภาพที่ 4.1 ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กและกระจายทั่วอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งยากต่อการแยกด้วยกระบวนการทางกายภาพทั่วไป

#### ตารางที่ 4.1 แสดงศึกษาลักษณะทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดเบื้องต้น

พารามิเตอร์	ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดเริ่มต้น			ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง
	50	100	150	
COD (mg/l)	100±20	180±60	290±80	120
ค่าความขุ่น (NTU)	128±10	145±10	165±10	50

\*ที่มา ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13ง ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539.



ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายของอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นที่ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ชญานิน พรหมจันทร์, 2554)

ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเลือกปฏิกิริยาเฟ้นต้นมาทำงานร่วมกับกระบวนการไฟฟ้าเคมีซึ่งได้แก่กระบวนการอิเล็กโทรเฟ้นต้นเพื่อที่จะสามารถกำจัดอนุภาคของน้ำมันที่มีเสถียรภาพสูงในน้ำเสียได้ โดยภาพที่ 4.2 (1) คือน้ำมันตัดที่ยังไม่ได้ผสมน้ำประปา และภาพที่ 4.2 (2) น้ำมันตัดที่ผสมน้ำประปาเพื่อเตรียมเป็นน้ำเสียสังเคราะห์



(1)



(2)



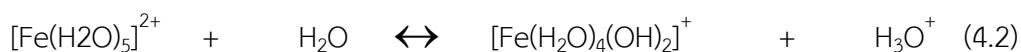
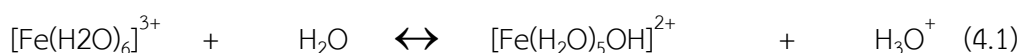
ภาพที่ 4.2 (1) น้ำมันตัดที่ยังไม่ได้ผสมน้ำประปา (2) น้ำมันตัดที่ผสมน้ำประปาเพื่อเตรียมเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ (ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) (3) ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (4) ความเข้มข้นน้ำมัน 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

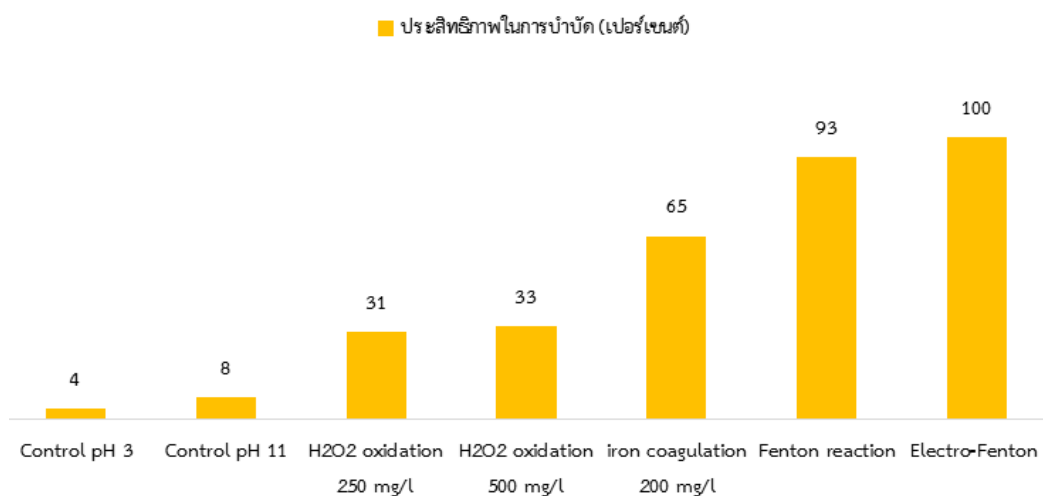
ตารางที่ 4.2 การทดลองควบคุมโดยใช้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

การทดลองควบคุม	Fe <sup>2+</sup> (mg/L)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	ประสิทธิภาพในการบำบัด (%)
Control pH 3	-	-	4
Control pH 11	-	-	8
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> oxidation	-	31.25	24
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> oxidation	-	62.5	33
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> oxidation	-	125	28
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> oxidation	-	250	31
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> oxidation	-	500	33
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> oxidation	-	2500	32
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> oxidation	-	5000	34
iron coagulation pH 3	50	-	58
iron coagulation pH 7		-	64
iron coagulation pH 9		-	72
iron coagulation pH 3	200	-	65
iron coagulation pH 7		-	70
iron coagulation pH 9		-	76

ตารางที่ 4.2 เป็นตารางแสดงผลของการทดลองที่เป็นตัวแปรควบคุมต่างๆ ในกระบวนการเพนตันและกระบวนการอิเล็กโทรเพนตันประเภทที่ 1 2 และ 3 เช่น ปริมาณเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ในระบบที่มีค่าพีเอชที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อการศึกษาสถานะการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด โดยแสดงให้เห็นว่าถ้าปรับค่าพีเอชให้สูงและต่ำจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอได้อย่างมีนัยสำคัญ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อเติมปริมาณที่มากเกินไปจะไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้นแต่จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดคงที่อยู่ในช่วง 28 - 34 % เนื่องจากการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไปในระบบจะส่งผลให้เกิดการรวมตัวระหว่างไฮดรอกซิลเรดิคัลกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กลายเป็นน้ำและออกซิเจนดังสมการ (4.3) - (4.5) ส่งผลให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลในระบบน้อยลงจึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่เพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อมีปริมาณเฟอร์รัสไอออนในระบบจะทำให้เฟอร์รัสไอออนบางส่วนสามารถทำปฏิกิริยากับ  $\text{OH}^-$  ในระบบได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของเฟอร์ริกไฮดรอกโซ (Ferric hydroxo complex) ดังแสดงในสมการที่ (4.1) และ (4.2) และที่ความเป็นกรดเบสประมาณ 3-7 สารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวจะเปลี่ยนรูปเป็น  $[\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_7(\text{OH})_4]^{5+}$  ซึ่งมีสมบัติเป็นสารก่อการจับตกตะกอน (Coagulant) ซึ่งจะเข้าไปจับกับโมเลกุลของน้ำมันในน้ำเสียจึงทำให้เกิดการลดลงของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณเฟอร์รัสไอออนขีดจำกัดของการรวมตะกอนด้วยเหล็กเนื่องจากปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่มากเกินไปจึงทำให้เกิดโอกาสที่จะสัมผัสกันเองมากกว่าสัมผัสและจับโมเลกุลน้ำมันจึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไออยู่ในช่วง 64 - 76 % (อาจรีย์ ประเสริฐศรี ,2557)





ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการศึกษาตั้งแต่การปรับค่าความเป็นกรด-เบส การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การเติมเฟอร์รัสไอออน การใช้กระบวนการเฟนตันซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีเฟอร์รัสไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่แรง และสามารถทำปฏิกิริยากับอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียกล่าวได้ว่ามีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงมีแนวคิดในการศึกษาต่อในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันเพราะว่ามีศักยภาพที่จะสามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้ดีและรวดเร็วได้โดยแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีได้ดังภาพที่ 4.3

#### 4.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

การทดลองจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ 1 ลิตรโดยความเข้มข้นของน้ำมันตัดเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังภาพที่ 4.4 ปรับพีเอชด้วยกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ให้เท่ากับ 3 ปริมาณเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) 50, 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30% hydrogen peroxide) โดยใช้อัตราส่วน  $\text{Fe} : \text{H}_2\text{O}_2$  เท่ากับ 1:2.5, 1:6, 1:10 โดยมวล เก็บตัวอย่างที่ 0.2, 0.7, 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30, และ 60 นาที และมีการแบ่งเติม 1 และ 3 ครั้ง (ที่ 0, 5, 10 นาที) หลังจากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เพื่อหยุดปฏิกิริยา จากนั้นนำไปวัดค่าซีโอดี (COD) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด

ตารางที่ 4.3 แสดงสถานะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเฟนตัน

ความเข้มข้นของ น้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันตัด (mg/L)	สถานะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตัน					
	Fe <sup>2+</sup> (mg/L)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	Fe <sup>2+</sup> :H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	แบ่งเติม Fe <sup>2+</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ตามเวลาที่กำหนด	เวลาที่ใช้ ในการทำ ปฏิกิริยา	ประสิทธิภาพ บำบัด (%)
50	50	300	1:6	1 ครั้ง ที่ 0 นาที	3 นาที	90
100	50	125	1:2.5	1 ครั้ง ที่ 0 นาที	60 นาที	82
				3 ครั้ง ที่ 0,5,10 นาที	30 นาที	93
150	50	125	1:2.5	1 ครั้ง ที่ 0 นาที	60 นาที	84
				3 ครั้ง ที่ 0,5,10 นาที	30 นาที	91



(1)



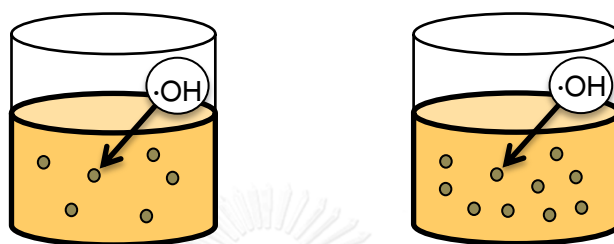
(2)

ภาพที่ 4.4 (1) น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสังเคราะห์ก่อนทำปฏิกิริยา (2) น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดขณะเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดทั้ง 3 ค่า ใช้ปริมาณเหล็กเฟอร์รัส 50, 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดได้ประสิทธิภาพดีและเพียงพอกับความเข้มข้นน้ำเสียทุกค่าความเข้มข้นของน้ำมันตัด โดยที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัด 90 % ใช้เวลาเพียง 3 นาที จากผลที่กล่าวมาข้างต้นแสดงว่าปริมาณน้ำมันในระบบน้อยและ ·OH เป็นสารออกซิไดส์ที่แรงจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการบำบัดอย่างรวดเร็ว(L. Zhou, M. Zhou et al.,2013)



อย่างไรก็ตาม ที่สภาวะความเข้มข้นน้ำมันตัดต่ำ (50 มิลลิกรัมต่อลิตร) พบว่าระบบต้องการปริมาณ  $H_2O_2$  มากกว่าที่ความเข้มข้นน้ำมันตัดสูงกว่า เนื่องจากอนุภาคของน้ำมันมีขนาดเล็กและมีความเสถียรสูงมาก แต่มีจำนวนอนุภาคน้ำมันที่น้อยมาก ซึ่งทำให้ไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\cdot OH$ ) มีโอกาสที่จะทำปฏิกิริยากับอนุภาคน้ำมันได้น้อยกว่าน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงกว่า นอกจากนี้  $\cdot OH$  บางส่วนยังสามารถทำปฏิกิริยากับ  $H_2O_2$  กลายเป็น  $HO_2\cdot$  ดังสมการที่ (4.3) และ  $\cdot OH$  อีกส่วนยังสามารถทำปฏิกิริยากันเองได้กลายเป็นออกซิเจนและน้ำได้ ดังสมการที่ (4.4) และ (4.5)

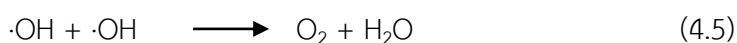
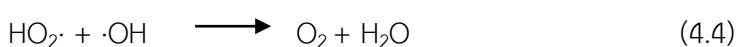
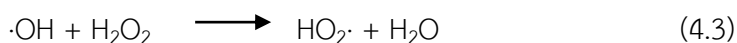


ความเข้มข้นน้ำมัน 50 mg/l

ความเข้มข้นน้ำมัน 100 mg/l

ภาพที่ 4.5 แสดงความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันในถังปฏิกิริยา

ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ระบบแบ่งเติม (Step feeding) โดยประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี 93 % และ 91 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสามารถบำบัดค่าซีโอดีได้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าแบบเติม 1 ครั้ง รวมถึงลดระยะเวลาการบำบัดโดยรวมกว่า 2 เท่า เนื่องจากการเติมเหล็กเฟอร์รัสและ  $H_2O_2$  ลงไปในระบบเพียง 1 ครั้งทำให้เกิดปริมาณสารเคมีที่มากเกินไป (Overload) และสารเคมีบางส่วนทำปฏิกิริยากันเอง เกิดปรากฏการณ์สกาวเวจิง (scavenging effect) ทั้งของเหล็กและ  $H_2O_2$  ดังนั้น โดยสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (4.3) – (4.5)



กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (Electro-Fenton (EF)) เป็นกระบวนการที่ใช้ปฏิกิริยาเฟนตันในกำจัดอนุภาคโดยการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัลไปออกซิไดซ์อนุภาคที่อยู่ในน้ำซึ่งปฏิกิริยาเฟนตันที่เกิดขึ้นจะต้องอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งจากการศึกษาผลงานวิจัยข้างต้นพบว่าปฏิกิริยาเฟนตันมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดดังนั้นจึงได้นำกระบวนการเฟนตันนี้มาประยุกต์กับกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งส่งผลให้สามารถสร้างเฟอร์รัสไอออนหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้จากขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปและเกิดการออกซิเดชันปล่อยไอออนออกมาในการทำ

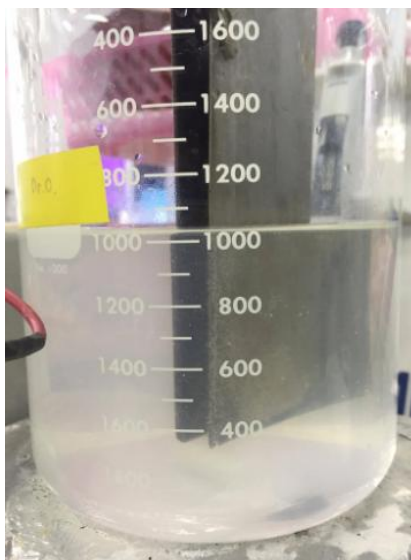
ปฏิกิริยาในการทำให้สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะตกตะกอนและถูกออกซิไดซ์ด้วยกระบวนการนี้ โดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

1. กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อผลิตเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) ในกระบวนการเฟนตัน (EF-FeOX) และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
2. กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการเฟนตัน (EF- $H_2O_2$ ) และเติมเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ )
3. กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าในการหมุนเวียนไอออนเหล็ก ( $Fe^{2+}$ ) ในกระบวนการเฟนตัน (E-FSR) ผลิตทั้งเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ )

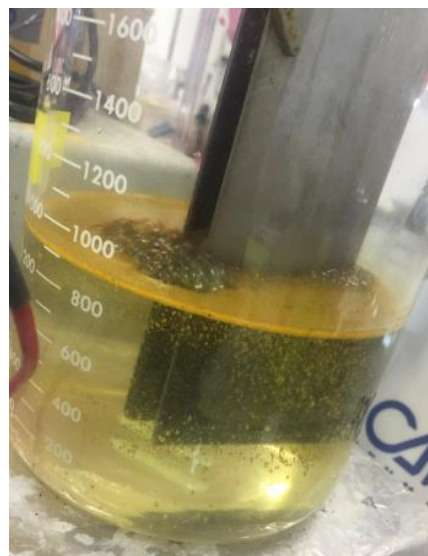
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาต่อในส่วนของกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในแต่ละประเภทเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุด โดยศึกษาจากสภาวะต่างๆที่มีผลต่อการบำบัด เช่น ขั้วไฟฟ้า ความเข้มข้นของน้ำมัน ปริมาณเฟอร์รัสไอออน ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้นต่ำให้ได้คุณภาพที่เหมาะสมต่อการปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ ยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในเรื่องสารเคมีและเวลาที่ใช้ในการทำการบำบัดโดยรวม รวมไปถึงลดปริมาณสารอินทรีย์ย่อยสลายยากในน้ำเสียที่ได้จากการบำบัดให้เหลือน้อยที่สุด

#### 4.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (ประเภทที่ 1)

กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ทำการศึกษาประเภทที่ 1 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้คือ เหล็ก-เหล็กกล้าไร้สนิม (Fe-St) และ เหล็ก-เหล็ก (Fe-Fe) เติม  $H_2O_2$  125, 250, 500, 1500, 2500 และ 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ซึ่งอ้างอิงจาก (นุสรุา โรจน์วิลาวัลย์, 2554) เก็บตัวอย่างที่ 0, 15, 30, 45 และ 60 นาที แสดงดังภาพที่ 4.6



(1)

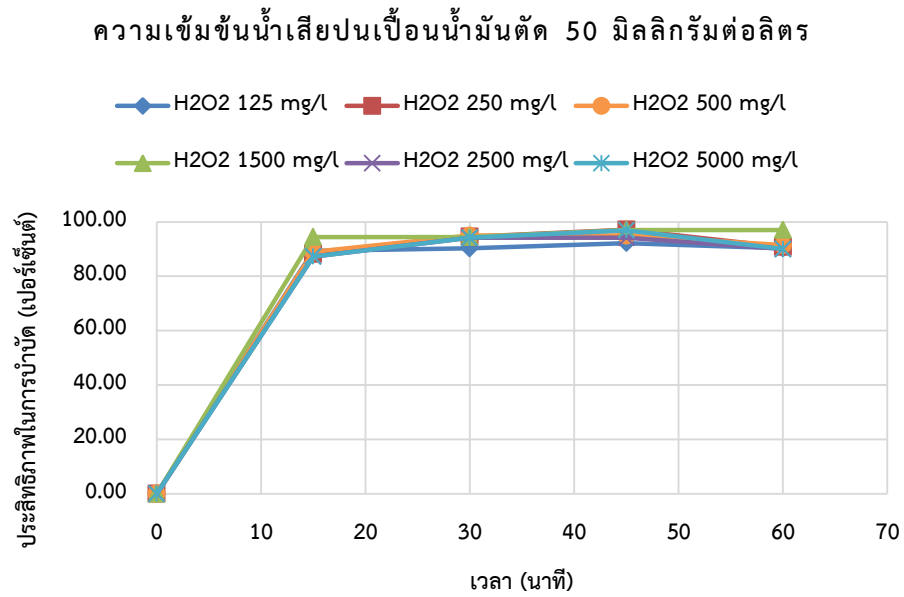


(2)

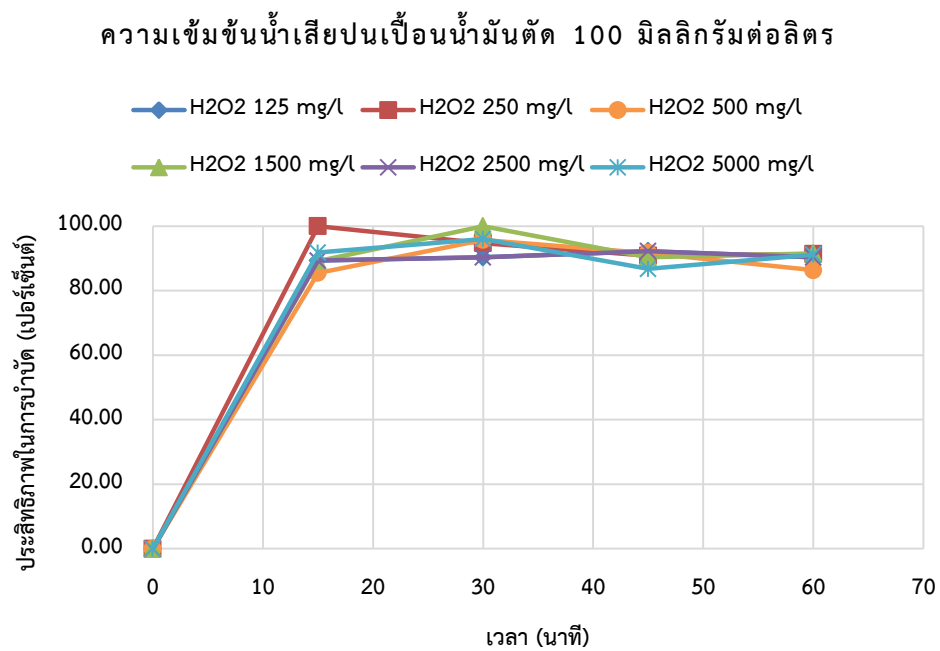
ภาพที่ 4.6 (1) น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการเริ่มบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (2) น้ำเสียสังเคราะห์ขณะบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

#### ส่วนที่ 4.3.1 ศึกษาชีวไฟฟ้าเหล็ก-เหล็กกล้าไร้สนิม (Fe-St)

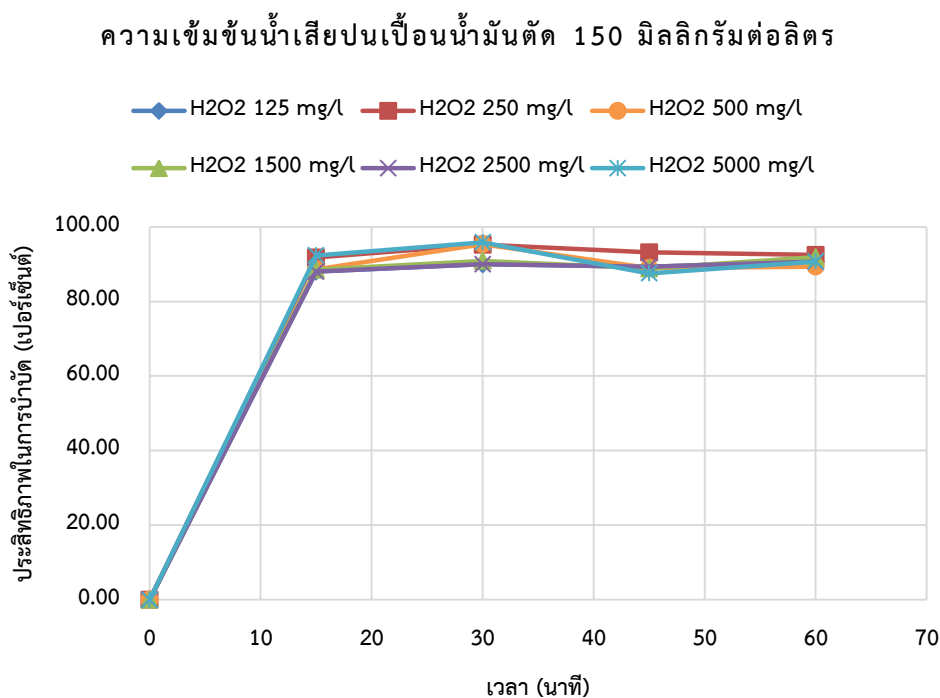
ชีวไฟฟ้าที่ใช้ในงานส่วนนี้คือ เหล็ก-เหล็กกล้าไร้สนิม (Fe-St) ทำการศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกันที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอที โดยได้ทำการศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 125, 250, 500, 1500, 2500 และ 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ได้จากการศึกษาค่าความหนาแน่นที่เหมาะสมจากกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันรูปแบบที่ 3 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที จากภาพที่ 4.7 - 4.9 แสดงค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีโดยเติม  $H_2O_2$  ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 mg/l



ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีโดยเติม  $H_2O_2$  ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 100 mg/l



ภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีโดยเติม  $H_2O_2$  ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 150 mg/l

พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นในช่วง 15 นาทีแรกและคงที่ตลอดการทดลอง โดยในช่วงแรกการทดลองประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากเหตุผลเดียวกันกับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยกระบวนการเฟ้นต้น จะเห็นได้ว่าที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มสูงขึ้นและลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงมากเกินไป เนื่องจากปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นและจะทำปฏิกิริยากับ  $H_2O_2$  ที่เหลืออยู่เรียกว่าปรากฏการณ์สกาเวนเจอร์ (J. Virkutyte and V. Jegatheesan, 2009) ซึ่งคล้ายกับกระบวนการเฟ้นต้นในการทดลองก่อนหน้า ดังนั้นจึงพบว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สามารถบำบัดซีโอดีได้ดีที่สุดที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรคือ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี 97.13 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มสูงขึ้นและลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงมากเกินไป เหตุผลเดียวกับที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงพบว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สามารถบำบัดซีโอดีได้ดีที่สุดคือ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 250

มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี 100 เปอร์เซ็นต์ และที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สามารถบำบัดซีโอดีได้ดีที่สุดคือ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี 97.45 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสูงขึ้นสามารถลดการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ถึง 2 เท่าเนื่องจากปริมาณน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์มีปริมาณมากขึ้นจึงทำให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลในน้ำเสียสามารถสัมผัสและทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น (C. Permchati,2013) แต่อย่างไรก็เห็นได้ว่า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 125 มิลลิกรัมต่อลิตรก็เพียงพอที่จะสามารถบำบัดได้ประสิทธิภาพสูงและน้ำทิ้งสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ ซึ่งตารางที่ 4.4 สรุปปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน

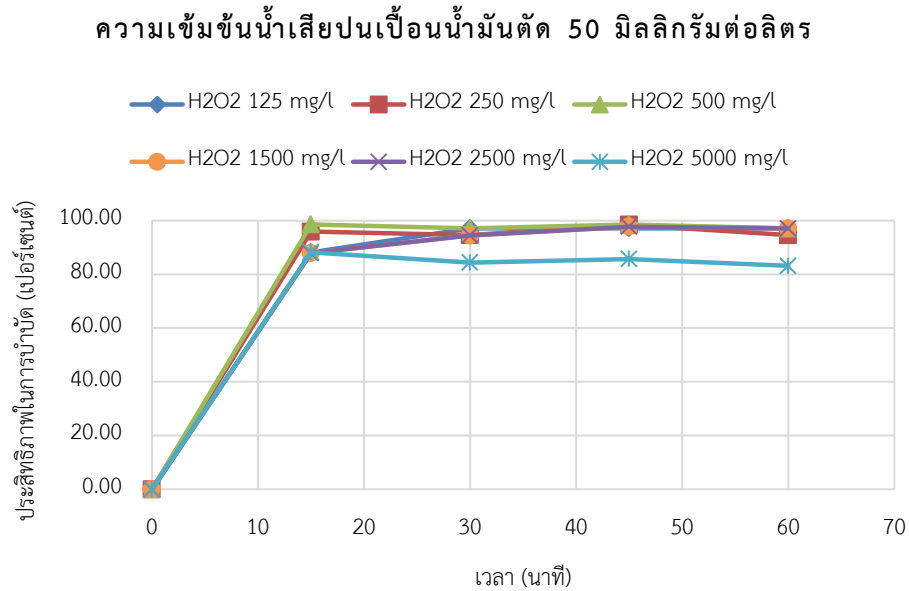
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณ  $H_2O_2$  ที่แตกต่างกัน เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าคือเหล็ก-เหล็กกล้าไร้สนิม (Fe-St)

ปริมาณ $H_2O_2$ (mg/l)	125	250	500	1500	2500	5000
oil 50 mg/l	95.70	97.13	94.97	97.06	94.14	96.90
เวลาในการทำปฏิกิริยา	30	45	30	45	30	45
oil 100 mg/l	98.24	100.00	95.73	100.00	92.23	96.02
เวลาในการทำปฏิกิริยา	60	15	30	30	45	30
oil 150 mg/l	97.45	95.21	95.33	91.89	90.67	95.85
เวลาในการทำปฏิกิริยา	60	30	30	60	60	30

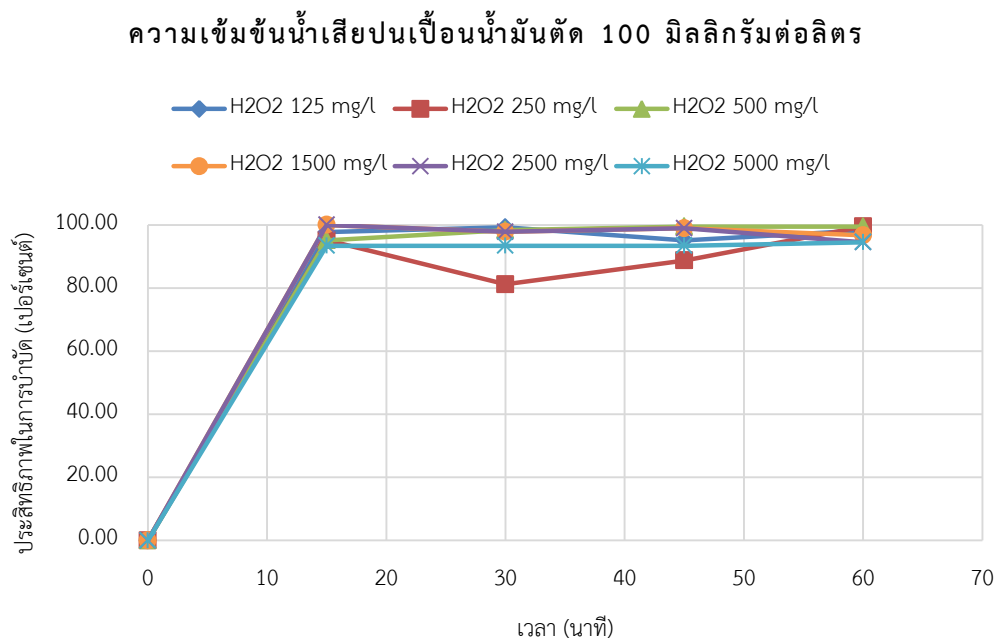
#### ส่วนที่ 4.3.2 ศึกษาขั้วไฟฟ้าเหล็ก-เหล็ก (Fe-Fe)

ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในงานส่วนนี้คือ เหล็ก-เหล็ก (Fe-Fe) ทำการศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกันที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี โดยได้ทำการศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 125, 250, 500, 1500, 2500 และ 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ได้จากการศึกษาหาค่าความหนาแน่นที่เหมาะสมจากกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันรูปแบบที่ 3 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที จาก

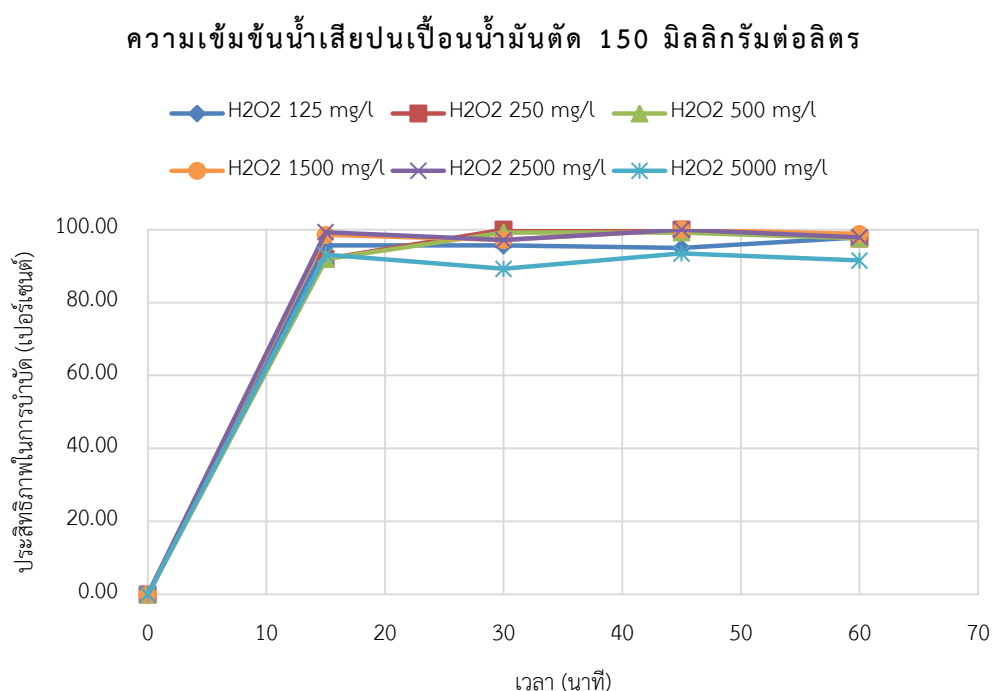
ภาพที่ 4.10 - 4.12 แสดงค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอทีโดยเติม  $H_2O_2$  ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 mg/l



ภาพที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอทีโดยเติม  $H_2O_2$  ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 100 mg/l



ภาพที่ 4.12 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีโดยเติม  $H_2O_2$  ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 150 mg/l

จากภาพที่ 4.10 - 4.12 แสดงค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้น 15 นาทีแรกและคงที่ตลอดการทดลอง โดยในช่วงแรกการทดลองประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากเหตุผลเดียวกันกับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยขี้ไฟฟ้าเหล็ก-เหล็กกล้าไร้สนิม (Fe-St) ในการทดลองส่วนที่ 1 เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มสูงขึ้นและลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงมากเกินไปทุกค่าความเข้มข้นน้ำเสีย เนื่องจากปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นมากเกินไปและเกิดการทำปฏิกิริยากันซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเกิดสกาวนเจอร์ (scavenger) คล้ายกับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันเมื่อใช้ขี้เป็นเหล็ก-เหล็กกล้าไร้สนิม (Fe-St) ในการทดลองก่อนหน้านี้ ดังนั้นจึงพบว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สามารถบำบัดซีโอดีได้ดีที่สุดที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรคือ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี 98.53 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1500 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการทำ



ปฏิกิริยา 15 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี 100 เปอร์เซ็นต์ และที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี 100 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามถ้านำไปใช้ในงานปฏิบัติจริงควรเลือกใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 125 มิลลิกรัมต่อลิตรก็เพียงพอและเป็นการลดค่าใช้จ่ายอีกด้วย จากผลการทดลองจะพบว่าที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสูงขึ้นสามารถลดการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้เนื่องจากปริมาณน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์มีปริมาณมากขึ้นจึงทำให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลในน้ำเสียสามารถสัมผัสและทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นเหตุผลเดียวกับการใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก-เหล็กกล้าไร้สนิม (Fe-St) ในการทดลองส่วนที่ 1 และพบว่าเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก-เหล็ก (Fe-Fe) ปริมาณเฟอร์รัสไอออนและปริมาณเหล็กทั้งหมดตรวจสอบจากการวัดมากกว่าเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นเหล็ก-เหล็กกล้าไร้สนิม (Fe-St) แสดงว่าเมื่อปริมาณเหล็กในระบบมีปริมาณเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาณความต้องการในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นจึงทำให้ต้องใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่าดังผลการทดลอง ดังนั้นตารางที่ 4.5 จึงสรุปปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณ  $H_2O_2$  ที่แตกต่างกัน เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าคือเหล็ก - เหล็ก (Fe-Fe) ที่เวลาแตกต่างกัน

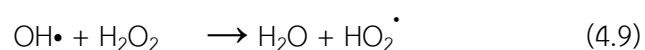
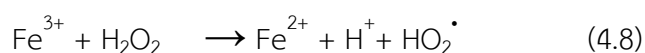
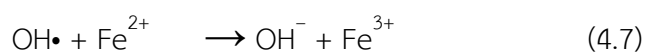
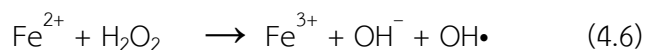
ปริมาณ $H_2O_2$ (mg/l)	125	250	500	1500	2500	5000
oil 50 mg/l	97.14	98.41	98.53	97.71	97.71	88.21
เวลาในการทำปฏิกิริยา	30	45	15	15	45	15
oil 100 mg/l	99.23	99.46	99.46	100.00	100.00	94.50
เวลาในการทำปฏิกิริยา	30	60	45	15	15	60
oil 150 mg/l	97.83	100.00	99.19	100.00	100.00	93.46
เวลาในการทำปฏิกิริยา	60	30	30	45	45	45

ตารางที่ 4.6 แสดงสภาวะที่สามารถบำบัดได้ประสิทธิภาพค่าซีโอดีดีที่สุดในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1 โดยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นเหล็ก-เหล็กกล้าไร้สนิม (Fe-St) และเหล็ก-เหล็ก (Fe-Fe)

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอติที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่แตกต่างกัน

ความเข้มข้นน้ำ เสียปนเปื้อน น้ำมันตัด (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอติ					
	เหล็ก-เหล็กกล้าไร้สนิม (Fe-St)			เหล็ก-เหล็ก (Fe-Fe)		
	Removal (%)	เวลา (นาที)	ปริมาณ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/l)	Removal (%)	เวลา (นาที)	ปริมาณ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/l)
50	97.13	45	250	98.53	15	500
100	100.00	15	250	100.00	15	1500
150	97.45	60	125	100.00	30	250

ซึ่งจากตารางนี้จะเห็นได้เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นเหล็ก-เหล็ก (Fe-Fe) มีความต้องการปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากกว่าเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นเหล็ก-เหล็กกล้าไร้สนิม (Fe-St) เนื่องจากปริมาณเหล็กถูกผลิตจากขั้วแอโนดที่เป็นเหล็กมีปริมาณที่มากกว่าขั้วแอโนดที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าที่เท่ากัน (ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ซึ่งปริมาณเหล็กที่เกิดขึ้นจะไปเร่งปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตั้งสมการปฏิกิริยาเพนตัน (4.4) และเหล็กเฟอร์รัสที่มากเกินพอก็สามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลได้กลายเป็นเหล็กเพอร์ริกตั้งสมการที่ (4.5) และ (4.6) ซึ่งส่งผลให้ต้องใช้สารเคมีในปริมาณที่มากขึ้นที่จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงได้ (A. Jennifer, B. Nuelosa et al., 2014)

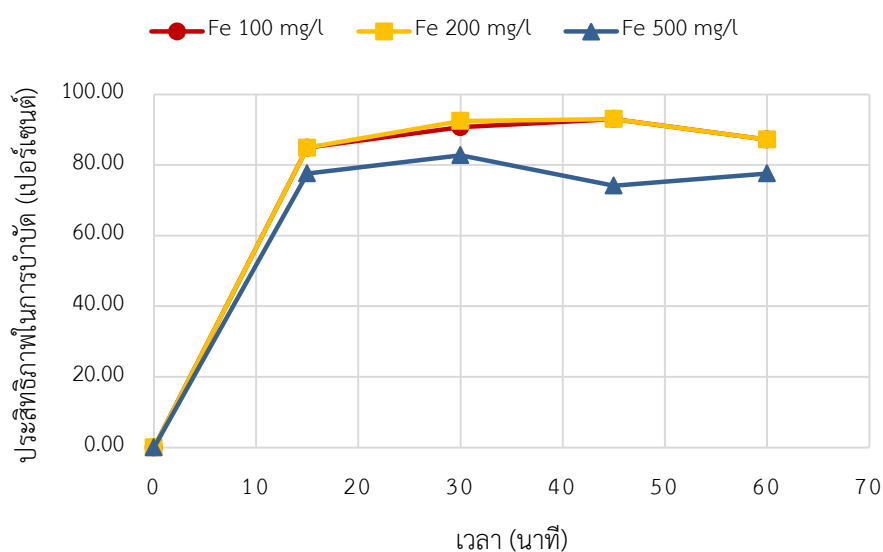


จากผลที่กล่าวมาข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการอิเล็กโทรเพนตันประเภทที่ 1 สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดในช่วงค่าความเข้มข้นของน้ำมันที่ต่ำได้ แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยจำกัดในด้านการควบคุมดูแลในเรื่องการเติมสารเคมีที่มีการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่

มาก เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นเหล็ก-เหล็ก (Fe-Fe) จึงได้สนใจที่จะศึกษาต่อในกระบวนการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในประเภทที่ 2 คือการเติมเหล็กเฟอร์รัสจากภายนอกระบบเป็นแนวทางในการลดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

#### 4.4 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (ประเภทที่ 2)

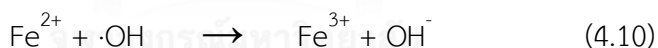
กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ทำการศึกษาประเภทที่ 2 คือขั้วไฟฟ้าที่ใช้แกรไฟต์ -แกรไฟต์ (Gr-Gr) ไม่เติม  $H_2O_2$  กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) มีการเติมเหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) 100 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือมีการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ขั้วแคโทด จะเก็บตัวอย่างที่ 0,15,30,45 และ 60 นาที และผลการทดลองโดยรวมสรุปได้ดังนี้



ภาพที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน 50 100 และ 150 mg/l โดยเติมเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) ที่แตกต่างกัน

การศึกษาปริมาณเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) ที่แตกต่างกันที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี โดยได้ทำการศึกษาปริมาณเติมเหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) 100 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ได้จากการศึกษาหาค่าความหนาแน่นที่เหมาะสมจากกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันรูปแบบที่ 3 โดยระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ได้แก่ แกรไฟต์-แกรไฟต์ (Gr-Gr) จากภาพที่ 4.13 แสดงค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นตามเวลา

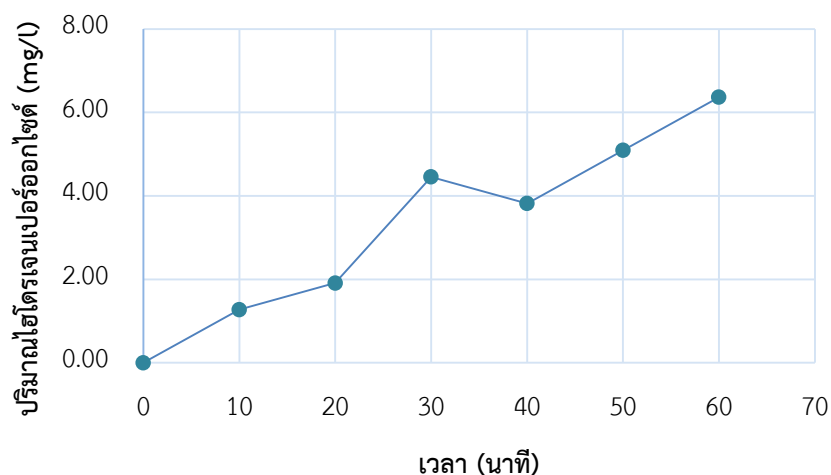
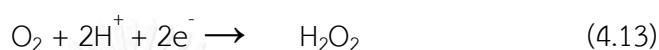
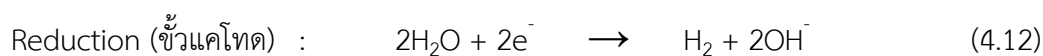
การทดลอง โดยในช่วงแรกการทดลองประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากเหตุผลเดียวกันกับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในประเภทที่ 1 เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นเหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มสูงขึ้นและลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นเหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) สูงมากเกินไปทุกค่าความเข้มข้นน้ำเสีย และพบว่าปริมาณความเข้มข้นเหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) ที่สามารถบำบัดซีโอดีได้ดีที่สุดที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรคือ ปริมาณความเข้มข้นเหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี 93.10 เปอร์เซ็นต์ ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณความเข้มข้นเหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี 99.36 เปอร์เซ็นต์ และค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณความเข้มข้นเหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี 92.75 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองจะพบว่าที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสูงขึ้นไปมีความต้องการใช้ความเข้มข้นของปริมาณเหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) ที่สูงขึ้น เพราะว่าในน้ำมีมลสารอินทรีย์จากน้ำมันจำนวนมากขึ้นซึ่งส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณเหล็กเฟอร์รัสมีมากขึ้นตามไปด้วยดังสมการที่ (4.4) อย่างไรก็ตามปริมาณเหล็กเฟอร์รัสที่มากขึ้นอาจจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (4.10) จึงทำให้อาจสูญเสียปริมาณเหล็กเฟอร์รัสบางส่วนทำให้ไม่เกิดผลดีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดได้อย่างเต็มที่ได้ ซึ่งตารางที่ 4.7 สรุปปริมาณเหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) ที่ใช้และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน



ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) ที่แตกต่างกัน เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าคือแกรไฟต์-แกรไฟต์ (Gr-Gr)

ปริมาณ Fe (mg/l)	100	200	500
oil 50 mg/l	93.02	93.1	92.86
เวลาในการทำปฏิกิริยา	45	30	60
oil 100 mg/l	93.02	93.53	99.36
เวลาในการทำปฏิกิริยา	45	15	15
oil 150 mg/l	82.76	88.64	92.75
เวลาในการทำปฏิกิริยา	30	30	60

การใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าพบว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสโดยที่ขั้วแอโนดจะไม่เกิดการแตกตัวเนื่องจากมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้น้อยจึงไม่มีไอออนของโลหะแต่จะเกิดฟองก๊าซออกซิเจนทดแทน และขั้วแคโทดจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน ดังแสดงในสมการ (4.11) – (4.13) ซึ่งทำให้มีการสร้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ขึ้นในระบบและเมื่อเติมเหล็กเฟอร์รัสลงไปจะไปเร่งปฏิกิริยาไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นให้ได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งจากงานวิจัยของ (C. Wang, W. Chou et al.,2010) พบว่าขั้วแกรไฟต์มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการสร้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงได้นำมาประยุกต์ใช้งาน โดยปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบเป็นไปดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบโดยใช้ขั้วแกรไฟต์-แกรไฟต์โดยไม่เติมเฟอร์รัสไอออน

แสดงให้เห็นว่าในระบบมีการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แต่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่วัดได้อาจจะน้อยกว่าค่าความเป็นจริง เนื่องจากระบบเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วโดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์บางส่วนทำปฏิกิริยากับเหล็กเฟอร์รัสและยังสามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัลดังสมการที่ 4.7 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดซ์ที่แรงและสามารถเปลี่ยนรูปสลายและทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วจึงทำให้ยากต่อการตรวจวัดทั้งหมดได้โดยตรง (เสริมพงศ์ สายรัมย์,2551)

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอไซด์ที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณ  $Fe^{2+}$  100, 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

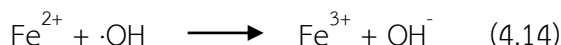
ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันตัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอไซด์		
	แกรไฟต์ - แกรไฟต์ (Gr-Gr)		
	Removal (%)	เวลา (นาที)	ปริมาณ $Fe^{2+}$ (mg/l)
50	93.10	30	200
100	99.36	15	500
150	92.75	60	500

ตารางที่ 4.8 แสดงสถานะที่สามารถบำบัดได้ประสิทธิภาพค่าซีโอไซด์ได้ดีที่สุดในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 2 โดยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นแกรไฟต์ - แกรไฟต์ (Gr-Gr) ดังนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบการศึกษาน้ำเสียที่ดื่มน้ำและเหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตัน กับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (ประเภทที่ 1 และ 2) ดังนี้

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบการศึกษาน้ำเสียที่ดื่มน้ำและเหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันกับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (ประเภทที่ 1 และ 2)

ประเภทที่		50 mg/l	100 mg/l	150 mg/l
	Fenton reaction	90.0 %	93.0 %	91.0 %
1	Electro-Fenton (Fe-St)	98.5 %	100.0 %	100.0 %
2	Electro-Fenton (Gr-Gr)	93.1 %	99.4 %	92.7 %

ตารางที่ 4.9 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอไซด์เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการเฟนตันและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันทั้ง 2 ประเภทซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดโดยรวมที่ความเข้มข้นของน้ำมันตัดทั้ง 3 ค่า ของกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1 สูงกว่ากระบวนการเฟนตันและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 2 เนื่องจากในระบบเกิดปรากฏการณ์สกาเวนเจอร์ (scavenger) โดยมีปริมาณเหล็กเฟอร์รัสที่เติมลงระบบทั้งกระบวนการเฟนตันและกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 2 มากเกินไป เมื่อเทียบกับปริมาณ  $H_2O_2$  จึงทำให้เหล็กเฟอร์รัสไปจับตัวกับไฮดรอกซิลเรดิคัล (-OH) ได้ดังสมการที่ 4.14 ทำให้เกิดเหล็กเฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดโดยรวมไม่ดีเท่าที่ควร



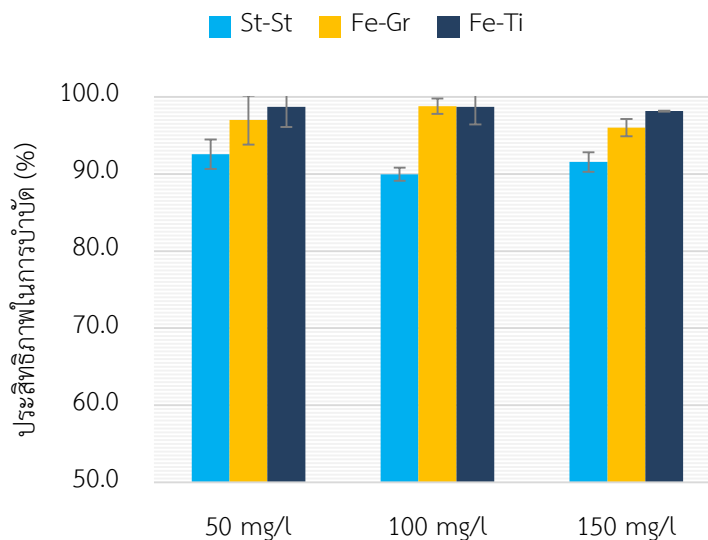
ทำให้ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 โดยข้อดีของกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 คือ สามารถออกแบบระบบได้ง่าย เพราะไม่ต้องเติมสารเคมีจากภายนอก เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบขั้วแอโนดจะผลิตเหล็กเฟอร์รัส ในขณะที่ขั้วแคโทดจะผลิต  $\text{H}_2\text{O}_2$  ซึ่งจะผลิตออกมาในปริมาณที่คงที่เทียบเท่ากับการเติมสารเข้าไปในระบบที่ละน้อยหรือคล้ายกับกระบวนการแบ่งเติม (Step-Feed system) ดังนั้น กระบวนการดังกล่าวจึงช่วยลดการเกิดปรากฏการณ์สภาวะเวนเจอร์ของสารเคมี ซึ่งส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการบำบัด และการลดปริมาณสารเคมีโดยรวม (B. Aji, Y. Yavuz et al.,2012)

#### 4.5 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (ประเภทที่ 3)

กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ทำการศึกษาประเภทที่ 3 คือขั้วไฟฟ้าที่ใช้เหล็กกล้าไร้สนิม-เหล็กกล้าไร้สนิม (St-St) เหล็ก-แกรไฟต์ (Fe-Gr) และ เหล็ก-ไททาเนียม (Fe-Ti) ไม่เติม  $\text{H}_2\text{O}_2$  และเหล็กเฟอร์รัส ( $\text{Fe}^{2+}$ ) จากภายนอก กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือมีการผลิตเหล็กเฟอร์รัสที่ขั้วแอโนด และมีการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ขั้วแคโทด โดยเก็บตัวอย่างที่ 0,15,30,45 และ 60 นาที และผลการทดลองโดยรวมสรุปได้ดังนี้

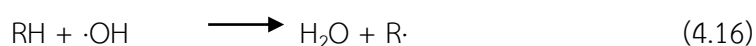
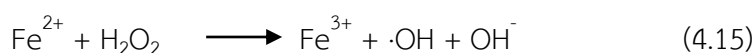
##### 4.5.1 การเปรียบเทียบการใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาหาชนิดของขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 เติกระบบแบบที่ละเท (Batch process) โดยทำการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม-เหล็กกล้าไร้สนิม (St-St), เหล็ก-แกรไฟต์ (Fe-Gr) และเหล็ก-ไททาเนียม (Fe-Ti) โดยใช้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ 1 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยใช้ตัวไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

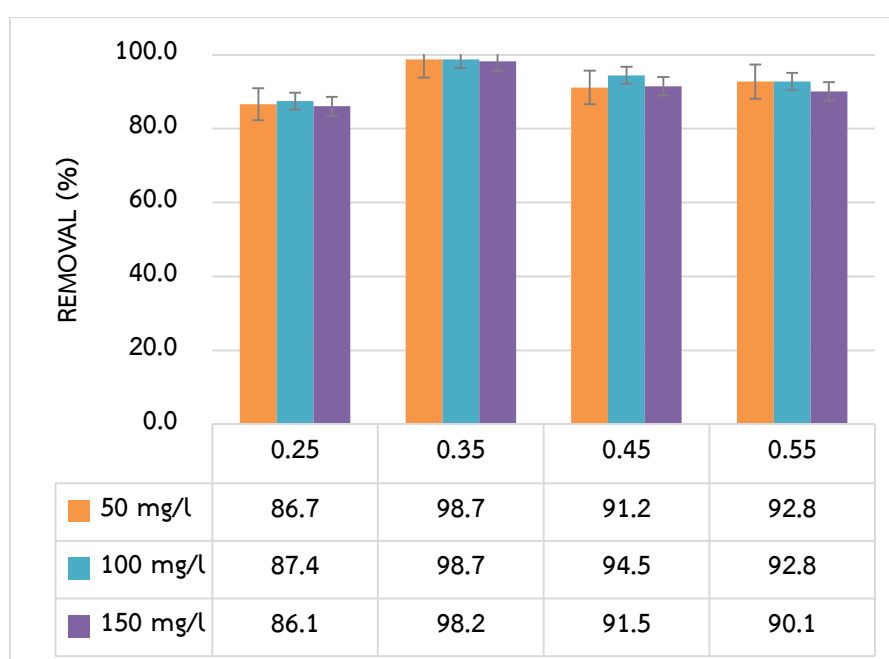
จากภาพที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบการใช้ตัวทั้ง 3 ชนิด โดยตัวเหล็กกล้าไร้สนิม-เหล็กกล้าไร้สนิม (St-St) ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี 92.6 % 90.0 % และ 91.6 % ตามลำดับ ตัวเหล็ก-แกรไฟต์ (Fe-Gr) ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี 97.0 %, 98.8 % และ 96.0 % ตามลำดับ ตัวเหล็ก-ไททาเนียม (Fe-Ti) ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี 98.7 %, 98.7 % และ 98.2 % ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบตัวทั้ง 3 แบบพบว่าตัวเหล็ก-แกรไฟต์ (Fe-Gr) และตัวเหล็ก-ไททาเนียม (Fe-Ti) สามารถให้ประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมสูงกว่าตัวเหล็กกล้าไร้สนิม-เหล็กกล้าไร้สนิม (St-St) เพราะว่ามีปริมาณเหล็กเฟอร์รัสที่ผลิตออกมาได้สัดส่วนที่เหมาะสมกับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ผลิตออกมา ทำให้เกิดการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\cdot\text{OH}$ ) ไปย่อยมลสารในน้ำเสียได้อย่างเหมาะสมดังสมการที่ (4.15) และ (4.16) ทั้งนี้ จากการที่เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นเหล็กกล้าผสมธาตุผสมนิเกิล (Ni), โครเมียม (Cr) ซึ่งทำให้มีเสถียรภาพสูงทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ในกรณีได้นำมาใช้เป็นตัวไฟฟ้า (แอโนด) จึงทำให้ทนต่อการกัดกร่อนมากขึ้น ซึ่งมีผลต่อปริมาณการออกซิไดซ์ของ  $\text{Fe}^{2+}$  ที่ตัวแอโนดในปริมาณที่น้อยลง จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงอีกทางหนึ่งด้วย





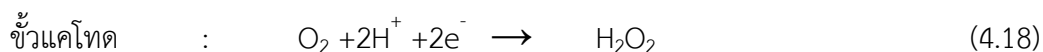
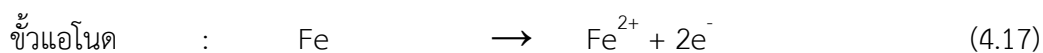
#### 4.5.2 การเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

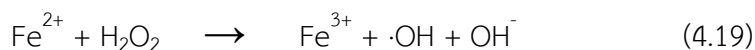
จากผลการทดลองข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเลือกขั้วเหล็ก-ไททาเนียม (Fe-Ti) นำมาทำการศึกษาต่อโดยการใช้กระแสไฟฟ้า 0.25 0.35 0.45 และ 0.55 แอมแปร์ (เท่ากับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25.51 35.71 45.92 และ 56.12 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ) ซึ่งจากงานวิจัย (G. Chen, 2004) จะเห็นได้ว่าช่วงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 11-80 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอทีได้ดี จึงได้เลือกใช้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในช่วงนี้



ภาพที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอทีโดยใช้กระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

ซึ่งการทดลองในส่วนนี้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน ประเภทที่ 3 โดยผลิตเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ขึ้นเองจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี โดยไม่เติมอากาศและเติมอากาศเข้าไปบริเวณด้านล่างของขั้วแคโทดเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนตามวิถี 2-อิเล็กตรอน (2-electron pathway) บนพื้นผิวของขั้วแคโทดได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ดังสมการที่ 4.18 ส่วนขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กได้ผลิตภัณฑ์เป็นเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ดังนั้นเฟนตันรีเอเจนต์ที่เกิดขึ้นในระบบ จะทำปฏิกิริยากันได้เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{OH}\cdot$ ) ดังสมการปฏิกิริยาเฟนตัน (4.17)



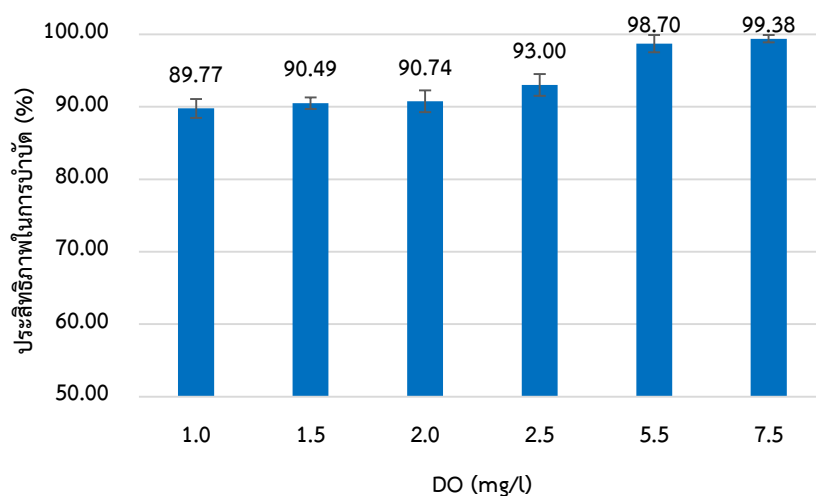


จากภาพที่ 4.16 จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ 0.35 แอมแปร์ ( $CD = 35.71 \text{ A/m}^2$ ) ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดโดยรวม (ทุกความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด) สูงกว่าเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าค่าอื่น เพราะว่ากระแสไฟฟ้าค่านี้สามารถผลิตเหล็กเพอร์ร็อกไซด์และ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ได้ในปริมาณที่เหมาะสมกับความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน โดยที่กระแสไฟฟ้า 0.25 แอมแปร์อาจมีค่าต่ำเกินไปจึงทำให้ปริมาณเหล็กเพอร์ร็อกไซด์ (จากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด) และ  $\text{H}_2\text{O}_2$  (จากปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด) ที่ผลิตขึ้นน้อยเกินไปส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้อยลง ในทางตรงกันข้ามเมื่อให้กระแสไฟฟ้าสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเนื่องจากปริมาณเหล็กเพอร์ร็อกไซด์ถูกผลิตออกมามากเกินไปทำให้เกิดสกาเวนเจอร์ (scavenger) ขึ้นในระบบได้ (ดังสมการที่ 4.14 ที่กล่าวถึงข้างต้น) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้ามากเกินไปนั้น จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงทุกความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาเฟนตันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน จะเห็นได้ว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen, DO) จัดเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิด  $\text{H}_2\text{O}_2$  ในการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\cdot\text{OH}$ ) เพื่อย่อยสลายอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำเสีย โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.16 (Y. Denga and D. James, 2009)

ดังนั้น ในส่วนต่อไปจะได้ศึกษาประเด็นต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่า DO และอัตราไหลของอากาศ (Gas flow rate) ผ่านการเติมอากาศด้วยอุปกรณ์เติมอากาศชนิดฟองอากาศ (Diffuser) ซึ่งจะทำให้สามารถเข้าใจกลไกการทำงานของกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันยิ่งขึ้น รวมถึงส่งผลต่อการออกแบบและการเดินระบบในสภาพการทำงานจริงต่อไป

#### 4.5.3 การวิเคราะห์ผลกระทบจากปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

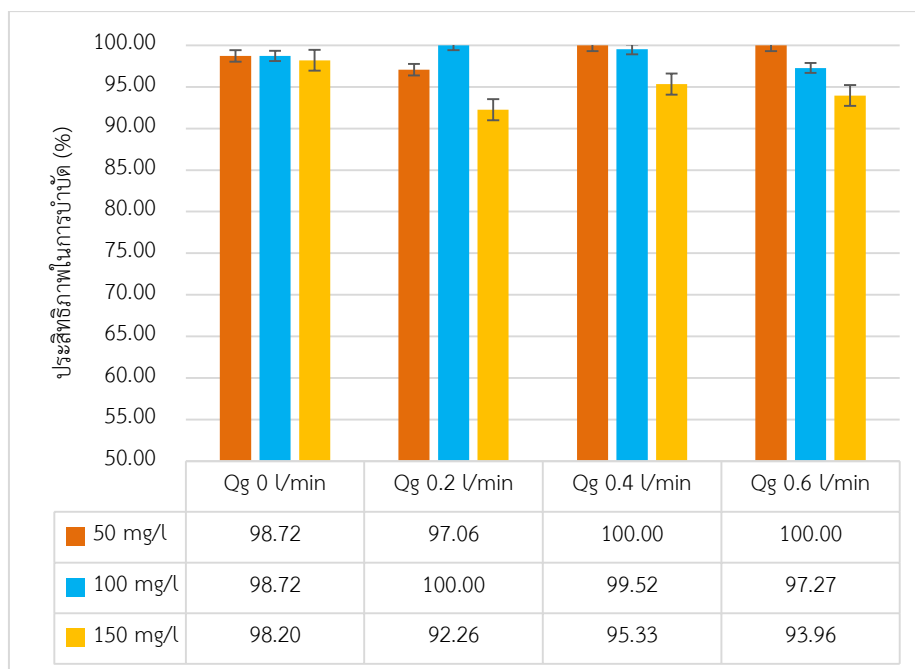
ในงานวิจัยนี้ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดมีค่าออกซิเจนในน้ำ (DO) เริ่มต้นเท่ากับ 5.0-6.0 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงทำให้ต้องการทราบถึงปริมาณออกซิเจนในระบบว่ามีผลอย่างไรต่อการสร้าง  $\text{H}_2\text{O}_2$  และประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวม ในส่วนนี้จึงทำการศึกษาผลกระทบจากปริมาณออกซิเจนละลายน้ำตอนเริ่มต้นปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 4.17 โดยเลือกใช้ขั้วเหล็ก-ไททาเนียม (Fe-Ti) และค่ากระแสไฟฟ้าที่ 0.35 แอมแปร์ ( $CD = 35.71 \text{ A/m}^2$ ) ในการทำการศึกษา



ภาพที่ 4.17 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยศึกษาปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเริ่มต้น (DO)

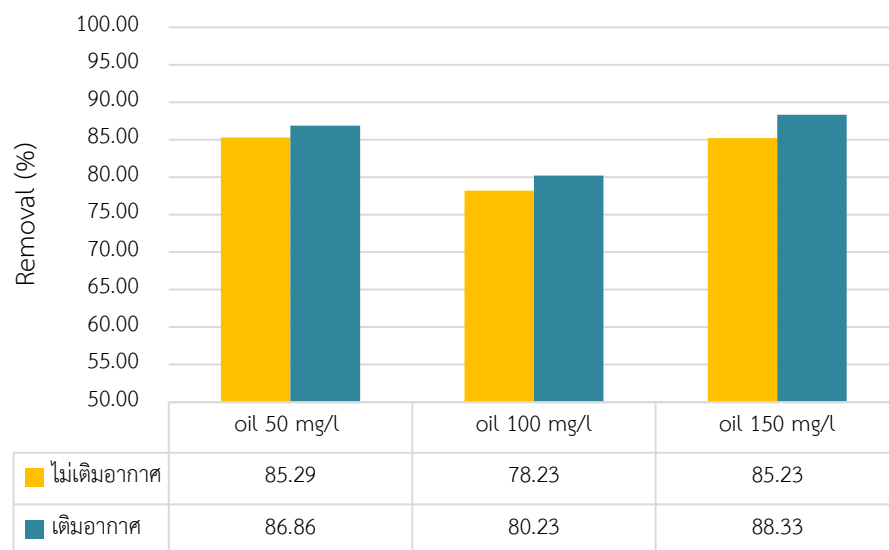
จากภาพที่ 4.17 พบว่าถ้าปริมาณออกซิเจนในน้ำเสียถ้ามีค่าต่ำจะส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโดยที่ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนในน้ำเพิ่มขึ้น จากสมการที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าออกซิเจนบางส่วนจะถูกนำไปใช้ในการสร้าง  $H_2O_2$  ซึ่งถ้าปริมาณออกซิเจนในระบบน้อยเกินไปจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดทำให้น้อยลงอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าที่ค่า DO = 5.5 และ 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตรประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกัน ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากค่ากระแสไฟฟ้า (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า) ที่เลือกใช้ในส่วนนี้ ที่กำหนดสัดส่วนที่เหมาะสมของปริมาณ  $Fe^{2+}$  และ  $H_2O_2$  ในการทำปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการบำบัดค่าซีโอดีด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในรูปแบบที่ 2 ควรมีค่า DO เริ่มต้นของน้ำเสียที่ไม่น้อยกว่า 5.5 mg/l

ในส่วนต่อไปทำการเปรียบเทียบปริมาณอัตราการเติมอากาศ (Gas flow rate, Qg) เพื่อเพิ่มการผลิต  $H_2O_2$  ที่ขั้วโทดโดยอัตราการเติมอากาศที่ทำการศึกษาคือ 0.2 0.4 และ 0.6 ลิตรต่อนาที่ และเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมอากาศ โดยประยุกต์ใช้ขั้วเหล็ก-ไททาเนียม (Fe-Ti) และค่ากระแสไฟฟ้าที่ 0.35 แอมแปร์ ( $CD = 35.71 A/m^2$ ) ในการทำการศึกษ สำหรับผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยศึกษาปริมาณอัตราการเติมอากาศ (Qg) หน่วยเป็น ลิตรต่อนาที (l/min) ที่แตกต่างกัน

จะเห็นว่าอัตราการเติมอากาศมีผลต่อการสร้าง  $H_2O_2$  พบว่าความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มอัตราการเติมอากาศในช่วง 0.4 - 0.6 ลิตรต่อนาที ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเพิ่มขึ้นสูงสุด 100 % ซึ่งสูงกว่าการไม่เติมอากาศ ในขณะที่ความเข้มข้นของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มอัตราการเติมอากาศในช่วง 0.2 ลิตรต่อนาที ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเพิ่มขึ้นสูงสุด 100 % และเมื่อเพิ่มอัตราการเติมอากาศเป็น 0.4-0.6 ลิตรต่อนาที กลับส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีมีค่าลดลง จากผลลัพธ์ข้างต้น กล่าวได้ว่าการเติมอากาศส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้นเพราะเพิ่มปริมาณ  $H_2O_2$  ที่ผลิตขึ้นในระบบ ทำให้เพิ่มโอกาสที่  $\cdot OH$  จะทำปฏิกิริยากับอนุภาคน้ำมันมากขึ้น แต่ในขณะที่อัตราการเติมอากาศสูงไปนั้น จะทำให้เกิดความปั่นป่วน (mixing) รวมถึงเกิดการแยกด้วยกลไกการทำให้ลอย (Flotation) ซึ่งทำให้อนุภาคน้ำมันจำนวนหนึ่งลอยขึ้นที่ผิวหน้า (รบกวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน) ซึ่งสมมติฐานข้างต้นสัมพันธ์กับผลของการเติมอากาศระหว่างปฏิกิริยาอิเล็กโทรเฟนตัน ในกรณีของความเข้มข้นน้ำมันสูงๆ (150 mg/L) ที่มีอนุภาคน้ำมันจำนวนมาก ทำให้เกิดการแยกได้ง่ายและเร็วกว่าโอกาสในการสัมผัสทำปฏิกิริยากับ  $\cdot OH$  ดังนั้น ในการออกแบบและเดินระบบอิเล็กโทรเฟนตันจึงควรสนใจ DO และ Aeration method โดยเฉพาะที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่สูงขึ้น ซึ่งอาจพบได้ในสภาพการทำงานจริงในทางปฏิบัติ (Y. Chu, W.J. Qian et al.,2012)



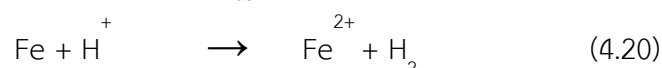
ภาพที่ 4.19 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 mg/l เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 0.25 แอมแปร์

จากภาพที่ 4.19 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยใช้กระแสไฟฟ้า 0.25 แอมแปร์ (ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5.10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) เติมอากาศที่ 0.4 ลิตรต่อนาที และไม่เติมอากาศ เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าต่ำๆ ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีลดลงทุกความเข้มข้นของน้ำมันซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่กระแสไฟฟ้าต่ำๆ (ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5.10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ทำให้ปริมาณเหล็กเฟอร์รัสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ถูกผลิตจากขั้วแอโนดและแคโทดมีปริมาณลดลงตามเวลาจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโดยตรง แสดงว่ากระบวนการบำบัดที่เกิดจากปฏิกิริยาเฟนตันในระบบส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการบำบัดที่ลดลง (L. Zhou, M. Zhou et al., 2013) ทั้งนี้ยังมีการแสดงถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพในการบำบัดเมื่อทำการเติมอากาศและไม่เติมอากาศในระบบพบว่า เมื่อเติมอากาศทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าไม่เติมอากาศ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าในระบบมีการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ขึ้นและถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาเพื่อบำบัดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียโดยประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีที่ดีที่สุดถึง 88.33 % ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 4.5.4 การวิเคราะห์ปริมาณเฟอร์รัสไอออนในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร

จากภาพที่ (4.20)-(4.21) จะพบว่าปริมาณเฟอร์รัสไอออนจะเพิ่มขึ้นตามเวลาและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าปริมาณเฟอร์รัสจะสามารถผลิตได้มากขึ้น เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปส่งผลให้ขั้วอิเล็กโทรดจะถูกกัดกร่อนมากขึ้น โดยในการทำปฏิกิริยาเฟนตัน ต้องควบคุมสภาวะพีเอชของน้ำเสียให้อยู่ในสภาวะ 3 - 4 ซึ่งทำให้น้ำเสียภายในกระบวนการมีสภาวะเป็นกรด จึงส่งผลต่อการกัดกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มมากขึ้น (มันสินและมันรักษ์, 2552) ดังสมการที่ (4.20) ทำให้ปริมาณเฟอร์รัสที่ผลิตออกมาจากขั้วแอโนดโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันมีปริมาณที่ผลิตออกมาได้มากขึ้นและมีปริมาณฟองก๊าซไฮโดรเจนจากปฏิกิริยารีดักชันจากขั้วแคโทดเพิ่มมากขึ้น

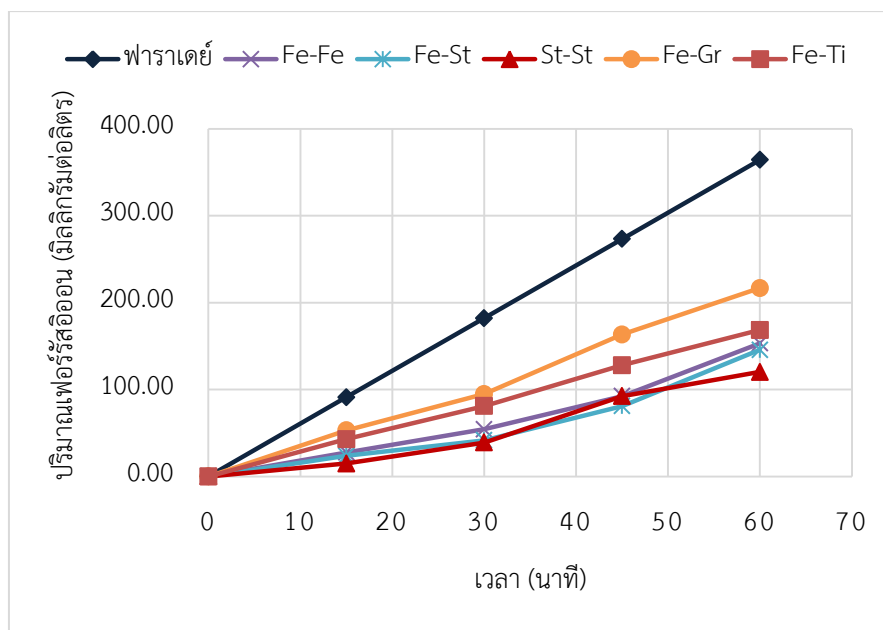


ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณของขั้วโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายจะสามารถอธิบายด้วยกฎฟาราเดย์ ดังต่อไปนี้

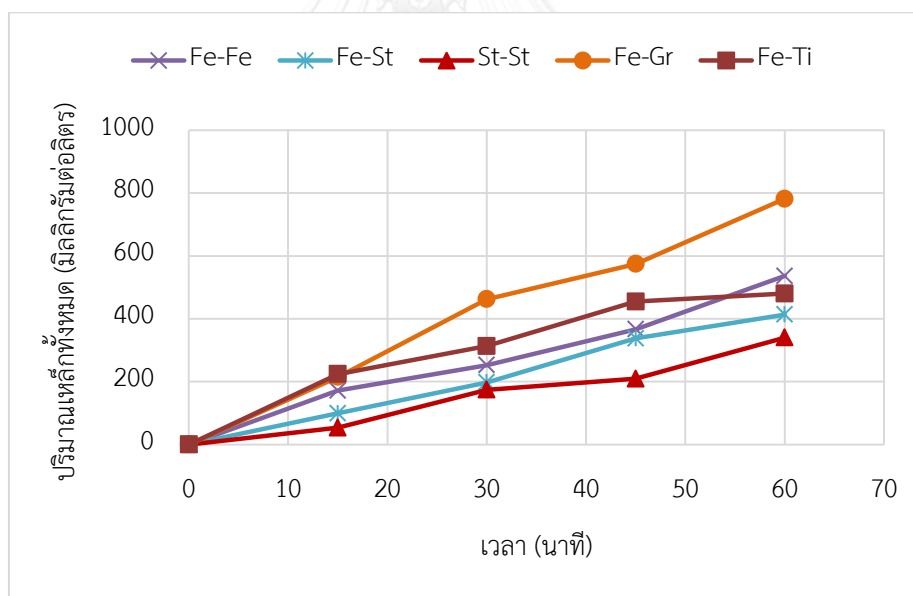
$$W = \frac{I \cdot t \cdot M}{Z \cdot F} \quad (4.21)$$

โดยที่	W	:	ปริมาณโลหะที่ละลายน้ำ	(กรัม)
	I	:	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	(แอมแปร์)
	M	:	น้ำหนักโมเลกุลที่ขั้วแอโนด	(กรัมต่อโมล)
	Z	:	จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์	(ประจุต่อโมล)
	t	:	เวลาที่ใช้	(วินาที)
	F	:	ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487	(แอมแปร์.วินาทีต่อประจุ)

มวลของสารที่คำนวณได้จากกฎฟาราเดย์ คือ มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎีนั้นสามารถคำนวณได้จากกฎฟาราเดย์ จากภาพที่ (4.20) และ (4.21) แสดงปริมาณเฟอร์รัสไอออนและปริมาณเหล็กทั้งหมดในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่ผลิตออกมาของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกันมีปริมาณใกล้เคียงกัน โดยขั้วไฟฟ้าที่เป็นเหล็ก-แกรไฟต์ (Fe-Gr) และ เหล็ก-ไททาเนียม (Fe-Ti) มีแนวโน้มปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่สูงกว่าขั้วชนิดอื่นนั้นก็สอดคล้องต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ดีกว่าการใช้ขั้วชนิดอื่น



ภาพที่ 4.20 ปริมาณเฟอร์รัสไอออนในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1 และ 3 ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร)



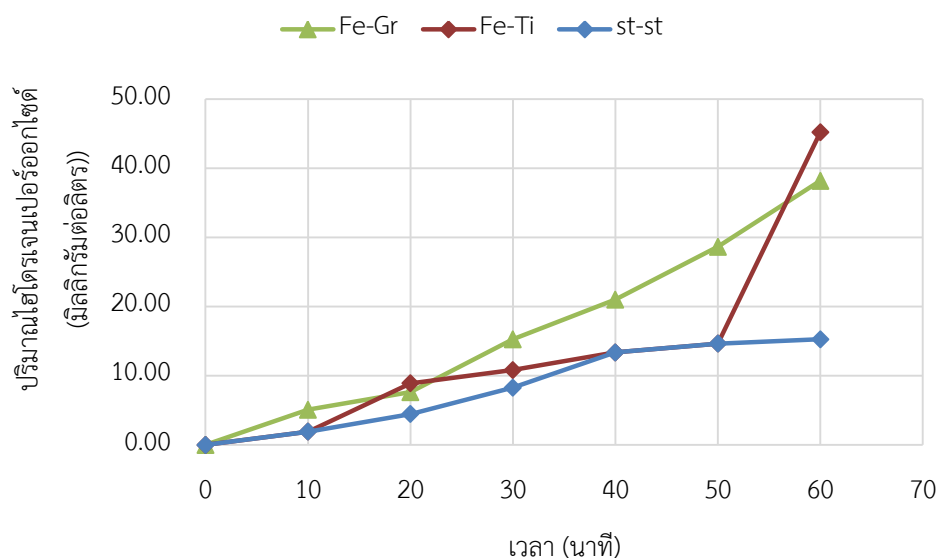
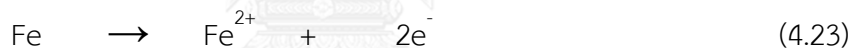
ภาพที่ 4.21 ปริมาณเหล็กทั้งหมดในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1 และ 3 ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร)

กระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ให้แก่ระบบถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนโลหะทั้งหมด ซึ่งในทางปฏิบัติปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบไม่ได้ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด เนื่องจากการสูญเสียไปในการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเป็นแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำเป็นก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนด หรืออาจเกิด

จากความต้านทานต่างๆ เนื่องจากมีตัวออกซิไดซ์หลายชนิดละลายอยู่รวมกันในระบบจึงส่งผลให้ปริมาณเปอร์ร็อกไซด์ที่ได้จากการทดลองมีปริมาณน้อยกว่าที่คำนวณได้จากทางทฤษฎี (กฎฟาราเดย์) เนื่องมาจากปริมาณเปอร์ร็อกไซด์ที่เกิดขึ้นบางส่วนทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นตะกอนฟลูอิดและบางส่วนเกิดกลไกการทำปฏิกิริยาเพนตันเพื่อผลิตไฮดรอกซิลเรดิคอลในการออกซิไดซ์อนุภาคของน้ำมัน จึงทำให้ปริมาณของเปอร์ร็อกไซด์ที่เหลืออยู่ในน้ำมีปริมาณน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี

#### 4.5.5 การวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการอิเล็กโทรเพนตัน

จากการศึกษาประเภทของกระบวนการอิเล็กโทรเพนตันที่ 3 จะพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบคือการผลิตเปอร์ร็อกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า โดยออกแบบระบบใช้ขั้วแคโทดเป็นขั้วผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นผลผลิตที่ได้มาจากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนที่ขั้วแคโทดโดยปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนสามารถเกิดตามวิถี 2 อิเล็กตรอน (2-Electron pathway) (W. Ting, M. Lub et al.,2008) ที่ขั้วแอโนดเป็นขั้วผลิตเปอร์ร็อกไซด์ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ดังแสดงในสมการ (4.22) - (4.23)



ภาพที่ 4.22 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการอิเล็กโทรเพนตันประเภทที่ 3 ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) โดยขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

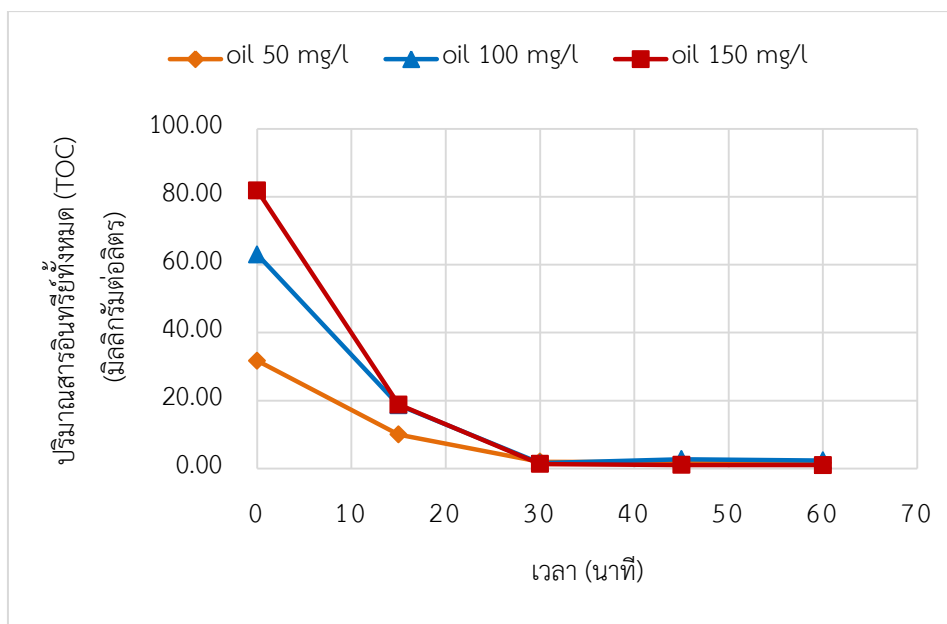


ข้อดีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือมีความสามารถในการละลายน้ำและช่วยทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำเพิ่มขึ้นได้จึงทำให้ไม่ส่งผลต่อการตกค้างในน้ำที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมและไม่ผลิตส่วนที่เป็นพิษหรือสีเพิ่มขึ้นดังนั้นภาพที่ 4.22 จะแสดงปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบที่สามารถตรวจวัดได้ ซึ่งอาจจะไม่ได้เป็นปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทั้งหมดของปฏิกิริยาตามเหตุผลที่ได้กล่าวมาในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 2 เนื่องจากในระบบของกระบวนการเฟนตันจะมีการเกิดปฏิกิริยารวดเร็วเพราะมีสารออกซิไดซ์ที่แรงในระบบเช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไฮดรอกซิลเรดิคัล เป็นต้น ซึ่งมีการเปลี่ยนรูป สลายและทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นค่าที่ตรวจวัดได้จะมีปริมาณที่น้อยกว่าค่าเป็นจริงที่เกิดขึ้นในระบบ ทั้งนี้ยังพบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวกลายเป็นน้ำได้มากกว่าที่จะแตกตัวเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการที่ (4.24) จึงส่งผลต่อปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลในระบบและประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีด้วย



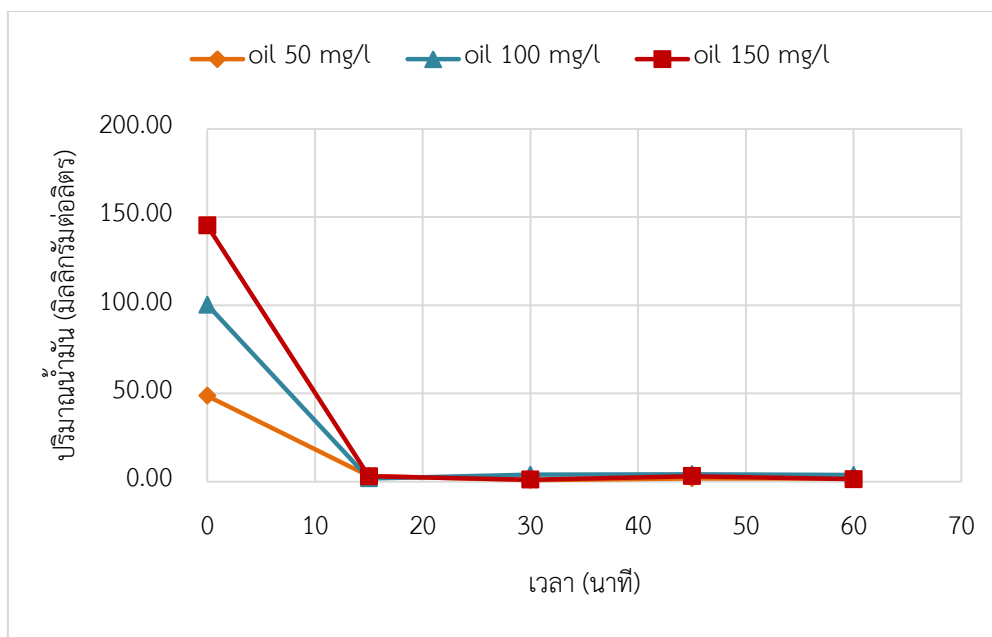
#### 4.5.6 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) และปริมาณน้ำมันในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

จากการทดลองในงานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้นจะพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ควรนำมาศึกษาต่อนั้นก็คือกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 โดยขั้วไฟฟ้าคือเหล็ก-แกรไฟต์ (Fe-Gr) ค่ากระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร อัตราการเติมอากาศ 0.4 ลิตรต่อนาที เติระบบเป็นเวลา 60 นาที ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยรวม 100 % จึงได้การศึกษาดูปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด TOC (Total Organic Carbon) นั้นหมายถึงปริมาณคาร์บอนทั้งหมดที่ประกอบอยู่ในสารอินทรีย์ เราสามารถหาปริมาณคาร์บอนประเภทนี้ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงในภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.23 ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) โดยขั้วไฟฟ้าที่เป็นเหล็ก-แกรไฟต์ (Fe-Gr)

ซึ่งปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำ (TOC) พบว่าที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำ (TOC) เท่ากับ 31.70 63.00 และ 81.89 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ เมื่อทำการเดินระบบพบว่าปริมาณที่ไอซีในช่วง 0-15 นาที เป็นช่วงที่เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว (Reactive phase) หลังจากนั้นเป็นช่วงที่เกิดสภาวะคงที่ (Steady phase) โดยเมื่อเดินระบบหลังจาก 15-60 นาที ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณที่ไอซีที่เหลืออยู่ในระบบมีปริมาณคงที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคน้ำมันในถังปฏิกิริยาเหลืออยู่เพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันที่เหลือโดยทำการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันและไขมัน (Fat oil and grease) อยู่ดังภาพที่ 4.24 และซึ่งสอดคล้องไปในแนวทางเดียวกันกับค่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี

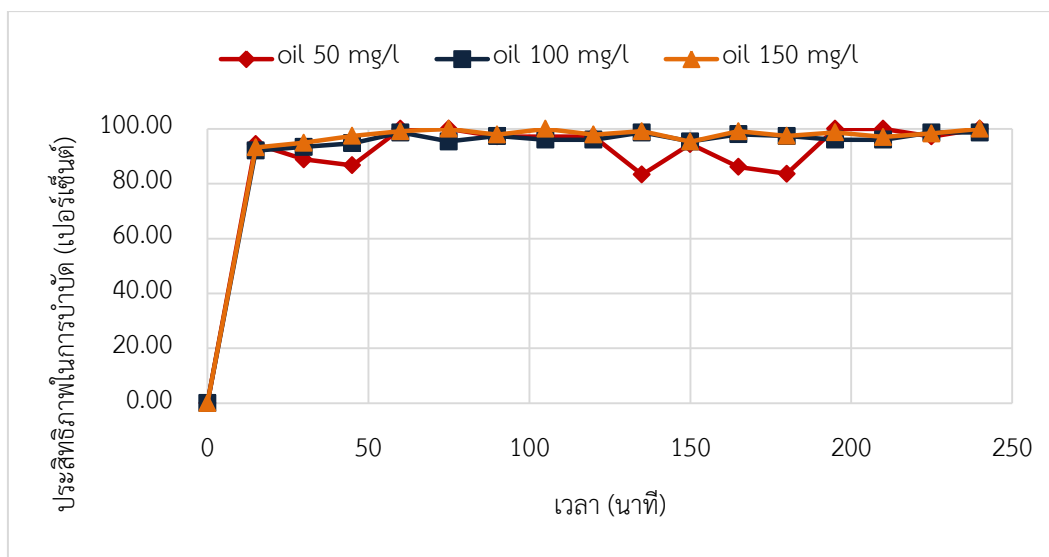


ภาพที่ 4.24 ปริมาณน้ำมันในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) โดยขั้วไฟฟ้าที่เป็นเหล็ก-แกรไฟต์ (Fe-Gr)

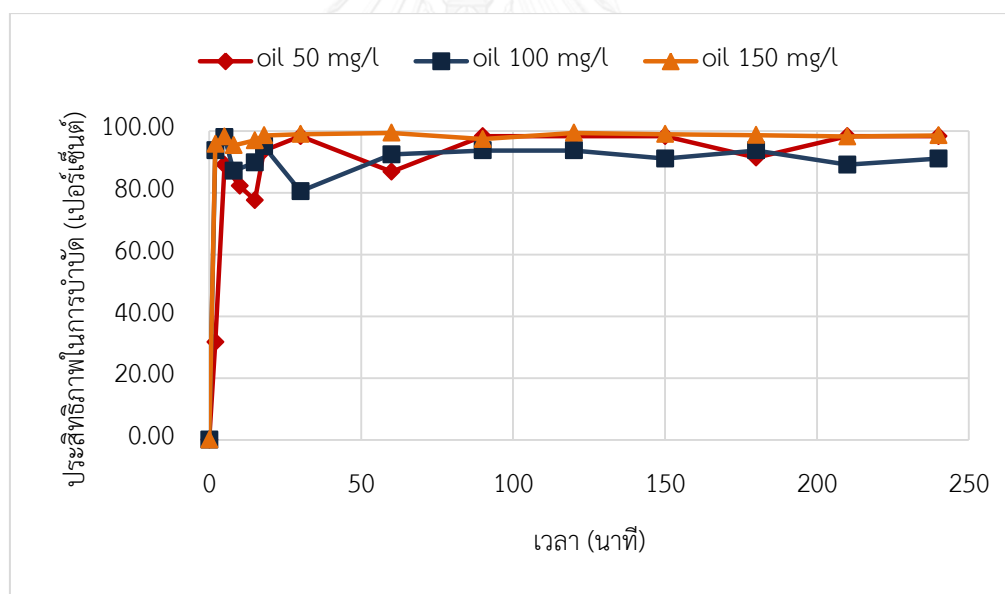
จึงสามารถที่จะสรุปได้ว่ากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้ดีทุกค่าความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียและพบว่าน้ำเสียหลังการบำบัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง

#### 4.6 การวิเคราะห์แนวทางการเดินระบบแบบต่อเนื่องอัตราการไหลและสภาวะการทำงานที่เหมาะสมในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (ประเภทที่ 3)

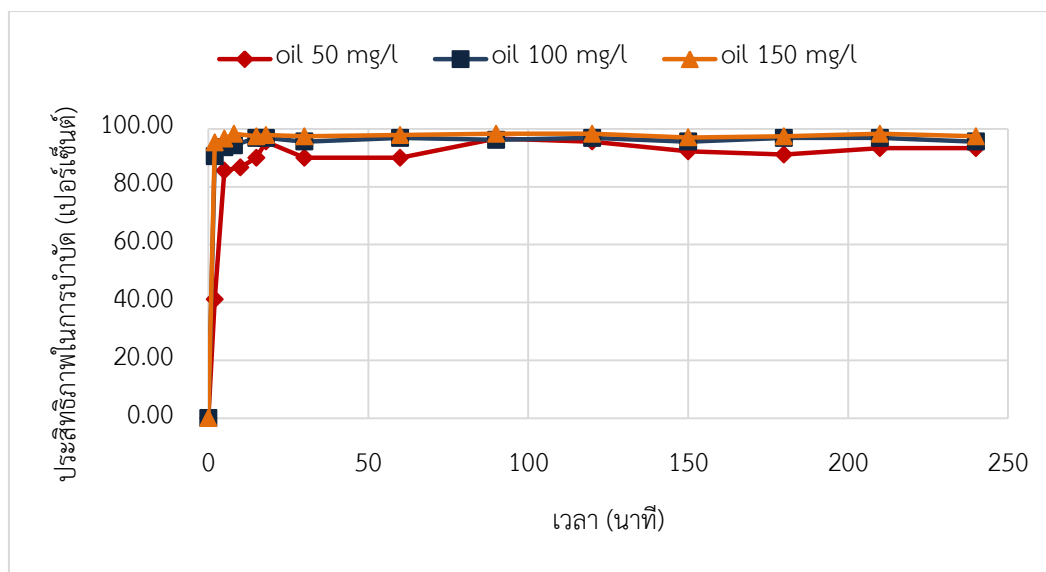
การบำบัดน้ำเสียในระบบสิ่งแวดล้อมจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลของเวลาและอัตราการไหลเพื่อศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์ได้แก่ อัตราการไหล และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยพบว่าการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์มีลักษณะใกล้เคียงกับ CSTR เนื่องจาก รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้น ภายในถังปฏิกรณ์และเกิดการกวนผสมกันจนเป็นเนื้อเดียวกันและ สามารถรับความเข้มข้นสูงๆ ได้ เพราะน้ำเสียความเข้มข้นสูงที่ไหลเข้าสู่ถังปฏิกรณ์จะถูกเจือจางจนทั่วทั้งถังปฏิกรณ์ จากผลการศึกษาระบบการอิเล็กโทรเฟนตันทั้งประเภทที่ 1 2 และ 3 โดยการเดินระบบแบบทีละเท (Batch system) พบว่ากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง และน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าผ่านตามมาตรฐาน ดังนั้น ในส่วนนี้จะนำสภาวะนี้มาประยุกต์ใช้ในการเดินระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง (Continuous system)



ภาพที่ 4.25 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อชั่วโมง ระยะเวลาในการกักเก็บ 40 นาที กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (ประเภที่ 3) ที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.26 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อชั่วโมง ระยะเวลาในการกักเก็บ 20 นาที กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (ประเภที่ 3) ที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.27 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 6 ลิตรต่อชั่วโมง ระยะเวลาในการกักเก็บ 10 นาที กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (ประเภทที่ 3) ที่ค่าความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่แตกต่างกัน

การวิเคราะห์แนวทางการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous system) โดยทำการศึกษาค่าอัตราการไหลของน้ำเสีย 1.5 3 และ 6 ลิตรต่อชั่วโมง (ระยะเวลาในการกักเก็บ 40 20 10 นาที) โดยเลือกสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (ประเภทที่ 3) นั่นก็คือ ขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดคือ เหล็ก-แกรไฟต์ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร อัตราการเติมอากาศ 0.4 ลิตรต่อนาที ค่ากระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) เมื่อทำการเดินระบบโดยใช้ระยะเวลา 240 นาที พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ได้จากการเดินระบบด้วยอัตราการไหลของน้ำเสีย 1.5 3 และ 6 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่าที่ใกล้เคียงกันโดยที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 1.5 ลิตรต่อชั่วโมงประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่สูงที่สุดเท่ากับ 100 % 98.69 % และ 100 % ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 3 ลิตรต่อชั่วโมงประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่สูงที่สุดเท่ากับ 98.28 % 98.01 % และ 99.39 % ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 6 ลิตรต่อชั่วโมงประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่สูงที่สุดเท่ากับ 96.66 % 96.84 % และ 98.29 % ที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดัด 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.25 - 4.27 จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าค่าที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุดในทุกค่าความเข้มข้นของน้ำมันดัดคือ 1.5 ลิตร/ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าที่ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดัด 3 และ 6 ลิตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพในการบำบัดโดยรวมถือว่าใกล้เคียงกันโดยความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันมีจำนวนมากจึงทำให้เกิดการ

สัมผัสกับไฮดรอกซิลเรดิคอลที่เกิดขึ้นในระบบได้ดีทำให้ปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก 0-10 นาที และเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงเวลาต่อมา ซึ่งสอดคล้องกับการเดินระบบแบบทีละเท (Batch proces) เนื่องจากอาจเป็นผลมาจากเวลากักน้ำ (Detention time) ที่สูงกว่ากรณีอื่นๆ ทำให้มีระยะเวลาสัมผัสระหว่างอนุภาคน้ำมันที่ถูกทำปฏิกิริยาในระบบสูงจึงทำให้เกิดการบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพ ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจะลดลงเนื่องจากระยะเวลาในการกักน้ำลดลงหรือระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (อธิบายได้จากเวลากักน้ำ  $(\theta) = (\text{ปริมาตรของน้ำเสีย } (V) \div \text{อัตราการไหลของน้ำเข้า } (Q))$  และบางบริเวณภายในถังปฏิกิริยามีการผสมกันของของเหลวอย่างไม่ทั่วถึง ซึ่งอาจจะทำให้เกิด Dead Zone หรือจุดอับตกค้างอยู่ภายในถังปฏิกิริยาทำให้สูญเสียปริมาตรของถังไปในบางส่วนและเกิดปฏิกิริยาได้ไม่สมบูรณ์ตามที่ออกแบบไว้ เป็นผลให้ค่าความเข้มข้นภายในถังปฏิกิริยาไม่เท่ากันส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงจากการเดินระบบแบบทีละเท (Batch proces) เล็กน้อย

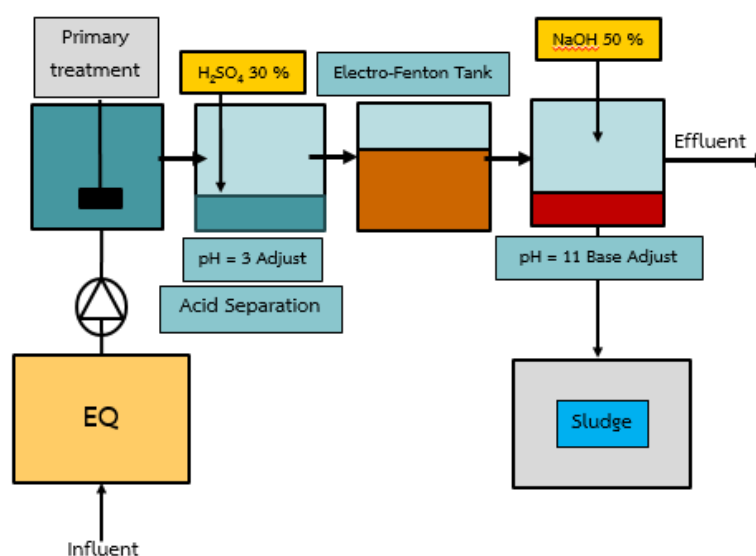
### การออกแบบระบบการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3

จากผลการศึกษาพบว่า ในการออกแบบและเดินระบบบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันที่ค่าความเข้มข้นน้ำมันตัด 50 - 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวแปรสำคัญที่ควรนำมาพิจารณาในการออกแบบระบบคือ ตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำเสียที่เข้าระบบและตัวแปรที่ขึ้นกับพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของขั้วอิเล็กโทรด ได้แก่ ระยะเวลาในการกักเก็บ อัตราการไหลของน้ำเสีย และปริมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการดำเนินระบบ ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน ค่าอัตราส่วนระหว่างเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวล เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดอีกตัวแปรเช่นกัน โดยค่าพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของขั้วอิเล็กโทรดจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของน้ำเสียในเชิงของพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ คือ (Surface area / Volume of wastewater, A / V) จากการศึกษาพบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดคือ 0.196 เมตร<sup>-1</sup> ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบเดินระบบและประยุกต์ใช้ร่วมกับตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยสามารถนำไปออกแบบอัตราน้ำเสียที่ไหลเข้าในระบบในระบบบำบัดจริงและพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดที่จะใช้เพื่อให้สามารถบำบัดได้ประสิทธิภาพสูงสุด เช่น น้ำเสียเข้าระบบ 30 ลูกบาศก์เมตรต่อ 1 วัน พื้นที่ขั้วที่ต้องใช้คือ 0.196 เมตร<sup>-1</sup> \* 30 เมตร<sup>3</sup> = 5.88 ตารางเมตร แสดงว่าต้องใช้ขั้วอิเล็กโทรดพื้นที่ 5.88 ตารางเมตรในการรับอัตราน้ำเสียที่เข้าระบบ 30 ลูกบาศก์เมตรต่อ 1 วัน

ตารางที่ 4.10 ตัวแปรการออกแบบการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดที่ค่าความเข้มข้น 50 - 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตัวแปรการออกแบบ	ค่าการออกแบบ
Surface area / Volume of wastewater (A / V)	0.196 เมตร <sup>-1</sup>
ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Ampere/ Surface area)	35.71 แอมแปร์/ตารางเมตร
ระยะเวลาในการกักเก็บ	10 - 30 นาที

การนำไปประยุกต์ใช้งานจริงจะต้องคำนึงถึงค่าตัวแปรการออกแบบการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดที่ค่าความเข้มข้น 50 - 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันจะเป็นกระบวนการที่นำไปใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นที่ 2 เมื่อผ่านการบำบัดในขั้นตอนที่ 1 (Primary treatment) แล้วจะทำให้ไขมันที่ปนเปื้อนน้ำมันมีความเข้มข้นที่ต่ำลงจนอยู่ในช่วงที่งานวิจัยนี้ทำการศึกษาศึกษาโดยสามารถออกแบบการเดินระบบจริงได้ดังภาพที่ 4.29 ซึ่งหลังจากกระบวนการบำบัดขั้นที่ 1 แล้วน้ำเสียจะต้องผ่านกระบวนการปรับค่าความเป็นกรดเบสก่อนเข้าสู่กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน ซึ่งตัวแปรที่ต้องคำนึงถึงได้แก่ การปรับค่าความเป็นกรดเบสก่อนเข้าถังปฏิกิริยา พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า ปริมาณน้ำเสียที่ต้องบำบัด ระยะเวลาในการบำบัด การปรับค่าความเป็นกรดเบสก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม เป็นต้น



ภาพที่ 4.28 การออกแบบระบบเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบบำบัดน้ำเสียจริง

#### 4.7 ผลการศึกษาค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเพื่อบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอเล็กโทรเฟนตัน

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการต่างๆ น้ำมันตัดเป็นน้ำมันที่มีเสถียรภาพความคงตัวสูงและมีค่าความเข้มข้นสูงก่อให้เกิดเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยในขั้นตอนนี้ จะทำการศึกษาค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดในแต่ละกระบวนการ ทั้งกระบวนการเฟนตันและกระบวนการอเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1 2 และ 3 แสดงดังตารางที่ 4.11 น้ำมันตัดที่นำมาบำบัดมีค่าความเข้มข้นในช่วง 50 - 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยนำมาบำบัดด้วยกระบวนการอเล็กโทรเฟนตันเพื่อสามารถที่จะนำไปใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจริงได้จึงทำการประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ร่วมกับกระบวนการอเล็กโทรเฟนตันโดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องเพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียจริงได้

ตารางที่ 4.11 ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบแบบที่ละเทเมื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันและกระบวนการอเล็กโทรเฟนตันประเภทต่างๆ

กระบวนการ	ค่าความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร	ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี (%) โดยรวม
กระบวนการเฟนตัน	50-150	5	93 %
กระบวนการอเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1	50-150	15.75	100 %
กระบวนการอเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 2	50-150	12.52	99.36 %
กระบวนการอเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3	50-150	8.02	100 %

จากตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการต่างๆ โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างกระบวนการเฟนตันและกระบวนการอเล็กโทรเฟนตันซึ่งเป็นการบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 50-150 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ากระบวนการเฟนตันเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำที่สุด คือ 5 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร แต่น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ต่ำกว่ากระบวนการอเล็กโทรเฟนตันและมีการใช้สารเคมีที่มากกว่า เราจึงนำกระบวนการอเล็กโทรเฟนตันมาใช้ในการบำบัดเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ซึ่งกระบวนการอเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 เป็นกระบวนการที่เลือกใช้



งานวิจัยนี้และมีประสิทธิภาพเหมาะสมที่สุดและสูงถึง 100 % เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบน้อยกว่ากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทอื่นๆ คือ 8.02 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 จึงเป็นกระบวนการที่น่าสนใจในการศึกษาต่อในการบำบัดน้ำเสียจริงได้ต่อไปในอนาคต



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปงานวิจัย

จากงานวิจัยนี้ทำการศึกษการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทต่างๆ โดยทำการเปรียบเทียบกับกระบวนการเฟนตันซึ่งศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดของกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันได้แก่ ประเภทของกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (รูปแบบของการบำบัด) ชนิดขั้วไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า (ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า) อัตราการเติมอากาศ เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษการอัตราการไหลในการเดินระบบแบบต่อเนื่องของกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 5.1 แสดงสถานะที่ดีที่สุดของการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1 2 และ 3

ความเข้มข้น น้ำเสีย ปนเปื้อน น้ำมัน (mg/l)	สถานะที่ดีที่สุดในการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน				
	ประเภทที่	ขั้วไฟฟ้า	เติมสารเคมี	อัตราการเติม อากาศ (Qg) (l/min)	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
50	1	Fe-St	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 250 mg/l	-	97.13
	2	Gr-Gr	Fe <sup>2+</sup> 100 mg/l	-	93.10
	3	Fe-Ti	-	0.4	100
100	1	Fe-St	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 250 mg/l	-	100
	2	Gr-Gr	Fe <sup>2+</sup> 150 mg/l	-	99.36
	3	Fe-Ti	-	0.2	100
150	1	Fe-St	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 125 mg/l	-	97.45
	2	Gr-Gr	Fe <sup>2+</sup> 150 mg/l	-	92.75
	3	Fe-Ti	-	0	98.20

จากตารางข้างต้นจะเห็นได้ว่า กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 สามารถบำบัดได้ดีกว่ากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 1 และ 2 ทุกค่าความเข้มข้นของน้ำมัน เมื่อใช้ขั้วไททาเนียมเป็นขั้วแคโทดสามารถบำบัดได้ประสิทธิภาพดีที่สุดโดยรวม 100 % ดีกว่าแกรไฟต์และเหล็กกล้า

ไร้สนิมในทุกความเข้มข้นของน้ำมัน เนื่องจากทำไทเทเนียมเป็นโลหะทรานซิชันมีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง แข็งและเหนียว จึงสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดีในระหว่างเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส แต่ข้อเสียคือไทเทเนียมมีราคาสูง หาซื้อได้ยาก นอกจากนี้ ในทางปฏิบัติควรคำนึงถึงความคุ้มทุนในการลงทุนและต้นทุนในการบำบัดอาจจะเลือกใช้ขั้วแกรไฟต์ในการบำบัดเนื่องจากประหยัดกว่าและให้ประสิทธิภาพในการบำบัดใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ปริมาณออกซิเจนเริ่มต้นในน้ำเสียก่อนเริ่มการบำบัดก็มีความสำคัญเนื่องจากส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด โดยควรให้ออกซิเจนเริ่มต้นมากกว่า 5.5 mg/l และควรเติมอากาศให้เหมาะสมกับค่าความเข้มข้นของน้ำมัน โดยเฉพาะการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีความเข้มข้นสูง

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วอิเล็กโทรดเนื่องจากมีราคาประหยัดกว่าไททานเนียมและให้ประสิทธิภาพโดยรวมใกล้เคียงกัน โดยเดินระบบที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการเติมอากาศ 0.4 ลิตรต่อนาที พบว่าอัตราการไหลของน้ำเข้ามีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ระหว่างการเดินระบบ โดยที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยรวมสูงถึง 100 % และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง เนื่องจากระยะเวลาที่น้ำภายในถังน้อยลง และทำให้เวลาในการทำปฏิกิริยาลดลงด้วย จากที่กล่าวมาข้างต้นสรุปงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันเป็นทางเลือกที่ดีทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยควรศึกษาเพิ่มเติมในการเดินระบบแบบต่อเนื่องหรือการนำไปประยุกต์ใช้ในน้ำเสียจริงได้ต่อไป

แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดซีโอดี (COD) จึงทำให้เกิดความแตกต่างกันระหว่างประสิทธิภาพเล็กน้อย จึงทำให้ผลที่เกิดขึ้นจากประสิทธิภาพในการบำบัด (1-2 %) ไม่แตกต่างกันเท่าที่ควรทั้งนี้ เนื่องจากน้ำเสียสังเคราะห์เตรียมมาจากน้ำมัน ซึ่งน้ำมันจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน (error) ขึ้นในระบบง่ายมาก ซึ่งบางครั้งน้ำมันบางส่วนก็สามารถที่จะจับรวมตัวกันได้ด้วยและจากผลการทดลอง พบว่าในระบบเกิดปฏิกิริยา Coagulation ของเฟอร์รัสไอออนรวมตัวกับปฏิกิริยาเฟนตัน โดยเกิด Coagulation ประมาณ 60 % จากชุดควบคุมและปฏิกิริยาเฟนตันในระบบ 30-40 % จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดได้ 90-100 %

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในอนาคตควรมีการนำกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันไปประยุกต์ใช้ ดังนี้

1. ศึกษาขั้วอิเล็กโทรดชนิดอื่นๆ และเพิ่มจำนวนขั้วอิเล็กโทรดที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดได้

2. ทำการทดลองในระบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยการรับปริมาณน้ำเสียที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดจริง ซึ่งในระบบงานจริงควรระมัดระวังในองค์ประกอบของน้ำเสียจริงที่จะนำมาใช้ในการบำบัดด้วย
3. ใช้บำบัดกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่เกิดขึ้นจริงหรือน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันชนิดอื่นๆเช่น น้ำมันเครื่อง น้ำมันปาล์ม ไขมันและน้ำมันจากกระบวนการชะล้าง เป็นต้น
4. น้ำมันไม่ค่อยเสถียรจึงทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนได้ง่ายจากการวัดต่างๆที่เกิดขึ้นต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ



## รายการอ้างอิง

Aji, B., et al. (2012). "Electrocoagulation of heavy metals containing model wastewater using monopolar iron electrodes." Separation and Purification Technology **86**: 248–254.

Aurelle Y. (1985). Treatment of oil-containing wastewater. Bangkok: Chulalongkorn.

Banuelos J.A., et al. (2014). "Study of an Air Diffusion Activated Carbon Packed Electrode for an Electro-Fenton Wastewater Treatment." Electrochimica Acta **140**: 412–418.

Battaler, H., Lamaallam, S., Lachaise, J., Graciaa, A., Dicharry, C. (2004). "Cutting fluid emulsions produced by dilution of a cutting fluid concentrate containing a cationic/nonionic surfactant mixture." Journal of Material Processing Technology **152**: 215-220.

Canizares P., et al. (2007). "Advance oxidation process for the treatment of olive-oil mill wastewater." Chemosphere **67(4)**: 832-838.

Chen, G. (2004). "Electrochemical technologies in wastewater treatment." Separation and Purification Technology **38**: 11–41.

Chu, Y., et al. (2012). "A dual-cathode electro-Fenton oxidation coupled with anodic oxidation system used for 4-nitrophenol degradation." Journal of Hazardous Materials **199– 200**: 179– 185.

Coca J. and Gutierrez G. (2011). "Treatment of oily wastewater." Water Purification and Management **10.1007/978-90-481-9775-0**.

Denga, Y. and D. James (2009). "Kinetics and oxidative mechanism for H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-enhanced iron-mediated aeration (IMA) treatment of recalcitrant organic compounds in mature landfill leachate." Journal of Hazardous Materials **169**: 370–375.

Denga Y. and Englehardt J. (2009). "Kinetics and oxidative mechanism for H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-enhanced iron-mediated aeration (IMA) treatment of recalcitrant organic compounds in mature landfill leachate." Journal of Hazardous Materials **169**: 370–375.

Eloy Isarain C., et al. (2013). "On-site Hydrogen Peroxide Production at Pilot Flow Plant: Application to Electro-Fenton Process." Int. J. Electrochem. Sci., **8**: 3084 - 3094.

Gogate P. and Pandit A.B. (2003). "A review of imperative technologies for wastewater treatment I : oxidation technologies at ambient conditions." Advances in Environmental Research **8**: 501–551.

Guangsen X., et al. (2014). "Electrogeneration of hydrogen peroxide for electro-Fenton via oxygen reduction using polyacrylonitrile-based carbon fiber brush cathode." Electrochimica Acta **158**: 390–396.

Iannelli R., et al. (2015). "Electrokinetic remediation of metal-polluted marine sediments: experimental investigation for plant design." Electrochimica Acta **140**.

Jennifer, A., et al. (2014). "Study of an Air Diffusion Activated Carbon Packed Electrode for an Electro-Fenton Wastewater Treatment." Electrochimica Acta **140**: 412–418.

Luigi, R., et al. (2008). "Pre-treatment of olive mill wastewater by chitosan coagulation and advanced oxidation processes." Separation and Purification Technology **63**: 648–653.

Morais J. and Zamora P. (2005). "Use of advanced oxidation processes to improve the biodegradability of mature landfill leachates." Journal of Hazardous Materials **B123**: 181–186.

Nidheesh, P. and R. Gandhimathi (2012). "Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: An overview." Desalination **299**: 1–15.

Nidheesh P.V. and Gandhimathi R. (2012). "Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: An overview." Desalination **299**: 1–15.

Nidheesh P.V., et al. (2014). "NaHCO<sub>3</sub> enhanced Rhodamine B removal from aqueous solution by graphite–graphite electro Fenton system." Separation and Purification Technology **132**: 568–576.

Painmanakul, P., et al. (2013). "Treatment of Cutting Oily-Wastewater by Sono Fenton Process: Experimental Approach and Combined Process." World Academy of Science, Engineering and Technology **7**(12).

Panizza, M. and G. Cerisola (2008). "Electrochemical generation of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in low ionic strength media on gas diffusion cathode fed with air." Electrochimica Acta **54**: 876–878.

Parsons S. (2004). Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. London UK, IWA publishing.

Permchati, C. 2013. Cutting oil wastewater treatment by fenton and fenton like processes. master of engineering program, Environmental engineering Chulalongkorn university.

Seo D.C., et al. (2007). "Treatment of non-biodegradable cutting oil wastewater by ultrasonication-Fenton oxidation process." Water Science & Technology **55**: 251–259.

Sun, M., et al. (2015). "Optimization and control of Electro-Fenton process by pH inflection points: A case of treating acrylic fiber manufacturing wastewater." Chemical Engineering Journal **269**: 399–407.

Ting, W., et al. (2008). "The reactor design and comparison of Fenton, electro-Fenton and photoelectro-Fenton processes for mineralization of benzene sulfonic acid (BSA)." Journal of Hazardous Materials **156**: 421–427.

Virkutyte, J. and V. Jegatheesan (2009). "Electro-Fenton, hydrogenotrophic and Fe<sup>2+</sup> ions mediated TOC and nitrate removal from aquaculture system: Different experimental strategies." Bioresource Technology **100**: 2189–2197.

Wang, C., et al. (2010). "COD removal from real dyeing wastewater by electro-Fenton technology using an activated carbon fiber cathode." Desalination **253**: 129–134.

Wang, C., et al. (2008). "Removal of color from real dyeing wastewater by Electro-Fenton technology using a three-dimensional graphite cathode." Journal of Hazardous Materials **152**: 601–606.

Wang C., et al. (2010). "COD removal from real dyeing wastewater by electro-Fenton technology using an activated carbon fiber cathode." Desalination **253**: 129-134.

Wang C., et al. (2008). "Removal of color from real dyeing wastewater by Electro-Fenton technology using a three-dimensional graphite cathode." Journal of Hazardous Materials **152**: 601–606.

Water Quality Division Aquifer Protection Program. (1996). BADCT Guidance document for Pretreatment with oil/water separators draft **Arizona**: Arizona Department of Environmental Quality.



Yavuz, Y. (2007). "EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater." Separation and Purification Technology **53** 135–140.

Yavuz Y. (2007). "EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater." Separation and Purification Technology **132**(53): 135–140.

Zhang, X., et al. (2008). "A nitrogen functionalized carbon nanotube cathode for highly efficient electrocatalytic generation of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in Electro-Fenton system." Separation and Purification Technology **64**: 116–123.

Zhou, L., et al. (2013). "Electro-Fenton degradation of p-nitrophenol using the anodized graphite felts." Chemical Engineering Journal **233**: 185–192.

เฉลิมสินสุวรรณ, ธ. 2552. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและโซโนเฟนตัน. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต,การจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทบวงมหาวิทยาลัย (2528). เคมีเล่ม 2. คณะอนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ สาขาเคมี ตามโครงการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ระดับมหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร อักษรเจริญทัศน์.

นาถ ภูวงศ์ผา (2555). "การกำจัดสีและซีไอทีในน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน." หลักสูตรเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ฉบับที่ 4: 1272-1284.

นุสรุา โรจน์วิลาวัลย์ 2554. การบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

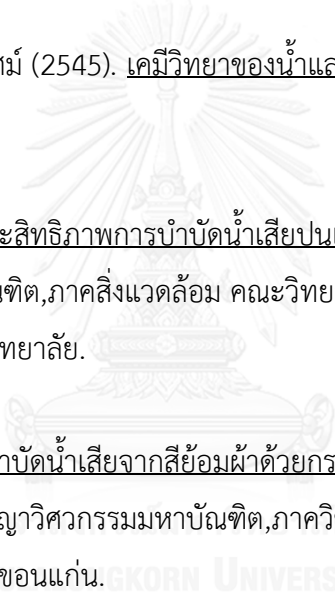
ประเสริฐศรี, อ. 2557. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟนตันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต,การจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พรหมจันทร์, ช. 2554. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการทำให้ลอยภายในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มงคลเนาวรัตน์, จ. 2557. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า: ลักษณะถังปฏิกริยาและความเข้มข้นน้ำมัน. วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต,การจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มันรัช และ มันสิน ตันฑุลเวศม์ (2545). เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สายรัมย์, เ. 2551. การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนอะดีนาลีนด้วยกระบวนการเพนตันไฟฟ้า. วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต,ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุชนม์ แก้วมาตย์ 2550. การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการเพนตันแบบฉายแสงโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต,ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 

อภิรดี สุนทรภา 2549. การนำกลับตีบจากน้ำเสียโดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีและวิธีทางไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



### ภาคผนวก ก.1 การหาปริมาณซีโอดี Chemical Oxygen Demand (COD)

(Close –reflux titrimetric method based on Standard methods, APHA,1992)

ค่าซีโอดีเป็นการวัดปริมาณออกซิเจนที่นำไปใช้ในการสลายสารอินทรีย์ที่มีในตัวอย่างน้ำได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีก็เพื่อวัดปริมาณความสกปรกของน้ำเสียจากบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม การวิเคราะห์ซีโอดีใช้เวลาสั้นประมาณ 3 ชั่วโมง จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถแก้ไขได้ทันทีที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น และสามารถนำค่าไปประมาณค่าบีโอดีของตัวอย่างได้เมื่อหาอัตราส่วนบีโอดีต่อ ซีโอดีของน้ำเสียชนิดนั้นได้

#### วิธีหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS

เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 5 มิลลิลิตรลงในหลอดย่อยสลายและเติม  $K_2Cr_2O_7$  0.1 N 3 มิลลิลิตร.  $H_2SO_4$  7 มิลลิลิตร. แล้วเติมเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ 1 - 2 หยดและไทเทรตด้วยสารละลาย FAS

#### วิธีวิเคราะห์ปริมาณซีโอดี

เตรียมน้ำตัวอย่างใส่หลอดย่อยสลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 5 มิลลิลิตร. เติม  $K_2Cr_2O_7$  0.1N 3 มิลลิลิตร.  $H_2SO_4$  7 มิลลิลิตร. แล้วเติมเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ 1 - 2 หยด และไทเทรตด้วยสารละลาย 0.1 N FAS จนกระทั่งสีเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง ทำแบลงค์ทุกครั้งโดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างและทำการวิเคราะห์เหมือนน้ำตัวอย่าง

#### การคำนวณ

การหาความเข้มข้นของสารละลาย FAS =  $\frac{\text{ปริมาตรของ } 0.1 \text{ N } K_2Cr_2O_7 \text{ มล.} \times 0.1}{\text{ปริมาตร FAS ที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร.)}}$

#### การหาปริมาณซีโอดี

ซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร). =  $\frac{(A - B) \times N \times 8,000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร.)}}$

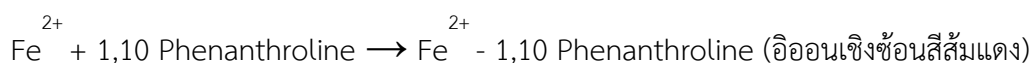
เมื่อ

A = มล. ของ FAS ที่ใช้ไทเทรตแบลงค์

B = มล. ของ FAS ที่ใช้ไทเทรตน้ำตัวอย่าง N = นอร์มัลลิตี ของ FAS

**ภาคผนวก ก.2 การหาปริมาณ เฟอร์รัสไอออน ด้วยวิธีฟีแนนโทโรลีน (Standard methods, APHA,1992)**

เหล็กเฟอร์รัสจะทำปฏิกิริยารวมกับ 1,10 ฟีแนนโทโรลีน ที่พีเอชประมาณ 3.2 – 3.3 ด้วยการเติม สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ เกิดเป็นอออนเชิงซ้อน (Complex ion) ที่มีสีแดงส้มตามสมการ (4.1) ความเข้มข้นของสีจะขึ้นอยู่กับปริมาณเฟอร์รัสที่ละลายในน้ำ ซึ่งเป็นตามกฎของเบียร์



สารเคมี

1. สารละลายฟีแนนโทโรลีน 1,10-phenanthroline ( $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) 0.1 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ซึ่งต้องเติมกรด HCl 2 หยด
2. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ ละลาย  $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$  250 กรัม ในน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร. เติมกรด glacial acetic ลงไป 700 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณเฟอร์รัสไอออน

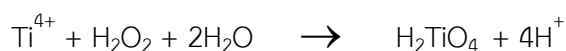
1. เตรียมน้ำตัวอย่างใส่ขวดวัดปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 50 มิลลิลิตร. ทำการเติมกรด HCl เพื่อปรับสภาพพีเอช โดยเติม HCl 2 มิลลิลิตร. ต่อน้ำตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร.
2. ทำการเติมสารละลายฟีแนนโทโรลีน 20 มิลลิลิตร และ แอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ 10 มิลลิลิตร. ลงในตัวอย่าง จากนั้นทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร. ตั้งทิ้งไว้ในที่ปราศจากแสง 5 - 10 นาที
3. นำตัวอย่างไปทำการวัดค่าด้วย เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ค่าความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ใช้น้ำกลั่นแทนแบลนด์
4. ทำกราฟมาตรฐานโดยเตรียมอนุกรมของสารละลายเหล็กให้มีความเข้มข้น 10 20 40 80 และ 100 ไมโครกรัม โดยเปิดสารละลายมาตรฐานเหล็กที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิลิตร. = 10 ไมโครกรัม แล้วทำการเตรียมตามขั้นตอนที่ 1 - 3 พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นเหล็กเป็นไมโครกรัมกับค่า Absorbance

การคำนวณ

$$\text{เหล็กเฟอร์รัส (มิลลิกรัม/ลิตร)} = \frac{\text{ไมโครกรัมเหล็กที่อ่านจากกราฟ}}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง (มล.)}}$$

### ภาคผนวก ก.3 การหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีไททาเนียมออกซาลेट

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไททาเนียมออกซาลेट (Potassium titanium oxalate) ในสารละลายที่มีสถานะเป็นกรดได้เป็นสารสีเหลืองอมส้ม นั่นก็คือ  $\text{TiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}_2$  ซึ่งแสดงในสมการดังนี้



#### สารเคมี

1. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไททาเนียมออกซาลेट โดยกรดซัลฟูริก 272 มิลลิลิตร น้ำ DI 300 มิลลิลิตร และใส่โพแทสเซียมไททาเนียมออกซาลेट 35.4 กรัม จากนั้นเติมน้ำ DI ให้ปริมาตรเป็น 1 ลิตร

#### วิธีทำวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

- นำขวด Flask ใส่ น้ำ DI ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่สารละลายโพแทสเซียมออกซาลेट 5 มิลลิลิตร ต่อตัวอย่างที่ทำกรวัด 1 มิลลิลิตร
- ตั้งทิ้งไว้ 10-30 นาที ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 400 นาโนเมตร

#### ภาคผนวก ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยการสกัดด้วยกรวยแยก

##### สารเคมี

1. เฮกเซน (n-hexan)
2. โซเดียมซัลเฟตปราศจากน้ำC ในรูปผลึก (sodium sulfate anhydrous)

##### วิธีการวิเคราะห์

1. เทน้ำตัวอย่างลงในกรวยแยก ล้างภาชนะที่ใส่ตัวอย่างน้ำด้วยเฮกเซน 30 มิลลิลิตร แล้วเทใส่กรวยแยก ปิดฝาและเขย่าอย่างแรง 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้สารผสมแยกชั้นนั้นเฮกเซนจะอยู่บนตัวอย่างน้ำจะอยู่ด้านล่าง
2. ถ่ายชั้นตัวอย่างน้ำไว้ในปิเกตอร์ที่สะอาดเพื่อนำมาสกัดซ้ำอีกครั้งหนึ่งถ่ายชั้นเฮกเซนซึ่งมีไขมันและน้ำมันละลายอยู่หลังการสกัดเก็บไว้ในฟลาสหรือขวดก้นกลมซึ่งทำให้แห้งและมีน้ำหนักคงที่ซึ่งได้ชั่งไว้แล้วสมมติมีน้ำหนัก A กรัม
3. นำตัวอย่างน้ำที่เก็บจากข้อ 2 กลับมาสกัดอีกครั้งด้วยเฮกเซน 15-20 มิลลิกรัม สกัดด้วยวิธีเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้น ทำหลายๆครั้งจนน้ำมันและไขมันถูกสกัดออกจากตัวอย่างน้ำทั้งหมด
4. นำฟลาสที่มีเฮกเซนไขมันและน้ำมันที่ได้จากการสกัดมาระเหยเฮกเซนออกบนเครื่องอังไอน้ำจนแห้งปราศจากความชื้นแล้วนำมาทำให้เย็นในโถทำแห้งประมาณ 30 นาที แล้วชั่งสมมติน้ำหนักที่ชั่งได้เป็น B กรัม

##### การคำนวณ

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





ภาคผนวก ข ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในประเภทที่ 1

ตารางที่ ข.1 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการเฟนตัน  
ที่ค่าความเข้มข้นน้ำมันที่แตกต่างกัน

ความเข้มข้น น้ำเสีย ปนเปื้อน น้ำมัน (mg/l)	Fe <sup>2+</sup> (mg/l)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/l)	อัตราส่วน F/H	ค่าซีโอดี เริ่มต้น (mg/l)	ค่าซีโอดีสุดท้าย (30 นาที) (mg/l)	ประสิทธิภาพ ในการบำบัดซี โอดี (เปอร์เซ็นต์)
50	50	125	1:2.5	290.065	34.8078	88
		300	1:6	304.832	30.4832	90
		500	1:10	300.41	90.123	70
	200	500	1:2.5	295.23	115.1397	61
		1200	1:6	299.214	44.8821	85
		2000	1:10	309.216	9.27648	97
	500	1250	1:2.5	295.2	153.504	48
		3000	1:6	302609	54469.62	82
		5000	1:10	305.697	70.31031	77
100	50	125	1:2.5	217.45	39.141	82
		300	1:6	198.693	47.68632	76
		500	1:10	210.345	58.8966	72
	200	500	1:2.5	205.186	6.15558	97
		1200	1:6	213.854	25.66248	88
		2000	1:10	198.562	49.6405	75

	500	1250	1:2.5	199.129	49.78225	75
		3000	1:6	210.068	33.61088	84
		5000	1:10	219.52	13.1712	94
150	50	125	1:2.5	198.693	31.79088	84
		300	1:6	213.027	53.25675	75
		500	1:10	208.314	83.3256	60
	200	500	1:2.5	199.972	3.99944	98
		1200	1:6	197.932	29.6898	85
		2000	1:10	212.542	36.13214	83
	500	1250	1:2.5	209.431	62.8293	70
		3000	1:6	200.528	18.04752	91
		5000	1:10	215.852	32.3778	85

ตารางที่ ข.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอโอทีของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการเฟนตันที่ค่าความเข้มข้นน้ำมันที่แตกต่างกัน

ความเข้มข้นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน (mg/L)	Fe <sup>2+</sup> (mg/L)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	อัตราการเติมสารเคมี	ค่าซีไอโอทีเริ่มต้น (mg/L)	ค่าซีไอโอทีสุดท้าย (30 นาที) (mg/L)	ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอโอที (เปอร์เซ็นต์)
100	50	125	Fe <sup>2+</sup> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เติม 1 ครั้ง (ที่เวลา 0 และ 10 นาที)	210	38	82
			Fe <sup>2+</sup> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เติม 2 ครั้ง (ที่เวลา 0 และ 10 นาที)	227	32	86
			Fe <sup>2+</sup> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เติม 3 ครั้ง (ที่เวลา 0 5 10 นาที)	219	15	93
			Fe <sup>2+</sup> เติม 1 ครั้ง (ที่เวลา 0 นาที) H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เติม 2 ครั้ง (ที่เวลา 0 และ 5 นาที)	223	36	84
150	50	125	Fe <sup>2+</sup> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เติม 1 ครั้ง (ที่เวลา 0 และ 10 นาที)	295	47.2	84
			Fe <sup>2+</sup> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เติม 2 ครั้ง (ที่เวลา 0 และ 10 นาที)	300	33	89
			Fe <sup>2+</sup> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เติม 3 ครั้ง (ที่เวลา 0 5 10 นาที)	305	27	91
			Fe <sup>2+</sup> เติม 1 ครั้ง (ที่เวลา 0 นาที) H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เติม 2 ครั้ง (ที่เวลา 0 และ 5 นาที)	309	62	80

ตารางที่ ข. 3 การทดลองควบคุมโดยใช้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

การทดลองควบคุม	Fe <sup>2+</sup> (mg/l)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/l)	ประสิทธิภาพในการบำบัด (%)
Control pH 3	-	-	4
Control pH 11	-	-	8
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> oxidation	-	31.25	24
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> oxidation	-	62.5	33
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> oxidation	-	125	28
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> oxidation	-	250	31
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> oxidation	-	500	33
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> oxidation	-	2500	32
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> oxidation	-	5000	34
iron coagulation pH 3	50	-	58
iron coagulation pH 7		-	64
iron coagulation pH 9		-	72
iron coagulation pH 3	200	-	65
iron coagulation pH 7		-	70
iron coagulation pH 9		-	76



ภาคผนวก ค

บันทึกผลการทดลอง กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟร้นประเภทที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**ภาคผนวก ค ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในประเภทที่ 1**

ตารางที่ ค.1 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือ เหล็กกล้าไร้สนิม เดิมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	oil 50 mg/l	Removal (%)	oil 100 mg/l	Removal (%)	oil 150 mg/l	Removal (%)
0	196.42	0.00	284.29	0.00	391.43	0.00
15	13.66	93.05	6.43	97.74	15.71	95.99
30	8.46	95.69	17.86	93.72	14.29	96.35
45	11.06	94.37	13.57	95.23	15.71	95.99
60	13.66	93.05	5.00	98.24	10	97.45

ตารางที่ ค.2 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือ เหล็กกล้าไร้สนิม เดิมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	oil 50 mg/l	Removal (%)	oil 100 mg/l	Removal (%)	oil 150 mg/l	Removal (%)
0	194.75	0.00	257.98	0.00	362.17	0.00
15	22.95	54.07	0.00	100.00	29.77	91.78
30	10.54	75.69	13.64	94.71	17.36	95.21
45	5.58	21.66	23.57	90.86	24.81	93.15
60	17.98	100.00	22.33	91.34	27.29	92.46

ตารางที่ ค.3 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือ เหล็กกล้าไร้สนิม เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	oil 50 mg/l	Removal (%)	oil 100 mg/l	Removal (%)	oil 150 mg/l	Removal (%)
0	209.61	0.00	290.23	0.00	372.09	0.00
15	22.95	89.05	42.17	85.47	42.17	88.67
30	10.54	94.97	12.40	95.73	17.36	95.33
45	10.54	94.97	24.19	91.67	40.93	89.00
60	17.98	91.42	39.69	86.32	39.69	89.33

ตารางที่ ค.4 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือ เหล็กกล้าไร้สนิม เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1500 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	oil 50 mg/l	Removal (%)	oil 100 mg/l	Removal (%)	oil 150 mg/l	Removal (%)
0	189.77	0.00	205.89	0.00	367.13	0.00
15	10.54	94.45	22.33	89.15	42.17	88.51
30	10.54	94.45	0.00	100.00	33.49	90.88
45	5.58	97.06	19.84	90.36	40.93	88.85
60	5.58	97.06	17.36	91.57	29.77	91.89

ตารางที่ ค. 5การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือ เหล็กกล้าไร้สนิม เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2500 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	oil 50 mg/l	Removal (%)	oil 100 mg/l	Removal (%)	oil 150 mg/l	Removal (%)
0	179.84	0.00	263.68	0.00	384	0.00
15	22.95	87.24	28.16	89.32	46.08	88.00
30	10.54	94.14	25.60	90.29	38.4	90.00
45	10.54	94.14	20.48	92.23	40.96	89.33
60	17.98	90.00	25.60	90.29	35.84	90.67



ตารางที่ ค.6 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือ เหล็กกล้าไร้สนิม เดิมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	oil 50 mg/l	Removal (%)	oil 100 mg/l	Removal (%)	oil 150 mg/l	Removal (%)
0	179.84	0.00	289.28	0.00	308.48	0.00
15	22.95	87.24	23.68	91.81	23.68	92.32
30	10.54	94.14	11.52	96.02	3.84	95.85
45	5.58	96.90	38.40	86.73	38.40	87.55
60	17.98	90.00	25.60	91.15	25.60	91.70

ตารางที่ ค.7 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือ เหล็ก เดิมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	oil 50 mg/l	Removal (%)	oil 100 mg/l	Removal (%)	oil 150 mg/l	Removal (%)
0	204.23	0.00	278.57	0.00	394.29	0.00
15	24.07	88.21	6.43	97.69	17.14	95.65
30	5.85	97.14	2.14	99.23	17.14	95.65
45	5.85	97.14	13.57	95.13	20	94.93
60	5.85	97.14	5.00	98.21	8.57	97.83

ตารางที่ ค.8 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือ เหล็ก เดิมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	oil 50 mg/l	Removal (%)	oil 100 mg/l	Removal (%)	oil 150 mg/l	Removal (%)
0	204.23	0.00	265.71	0.00	354.29	0.00
15	8.46	95.86	12.86	95.16	28.57	91.94
30	11.06	94.58	50.00	81.18	0.00	100.00
45	3.25	98.41	30.00	88.71	0.00	100.00
60	11.06	94.58	1.43	99.46	8.57	97.58

ตารางที่ ค.9 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือ เหล็ก เดิม  
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	oil 50 mg/l	Removal (%)	oil 100 mg/l	Removal (%)	oil 150 mg/l	Removal (%)
0	178.36	0.00	245.33	0.00	330.67	0.00
15	2.62	98.53	12.00	95.11	26.67	91.93
30	5.25	97.06	4.00	98.37	2.67	99.19
45	2.62	98.53	1.33	99.46	2.67	99.19
60	5.25	97.06	1.33	99.46	8.00	97.58

ตารางที่ ค.10 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือ เหล็ก เดิม  
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1500 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	oil 50 mg/l	Removal (%)	oil 100 mg/l	Removal (%)	oil 150 mg/l	Removal (%)
0	199.02	0.00	236.75	0.00	541.14	0.00
15	24.07	87.91	0.00	100.00	7.80	98.56
30	11.06	94.44	5.20	97.80	15.61	97.12
45	4.55	97.71	2.60	98.90	0.00	100.00
60	5.85	97.06	7.80	96.71	6.50	98.80

ตารางที่ ค.11 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือ เหล็ก เดิม  
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2500 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

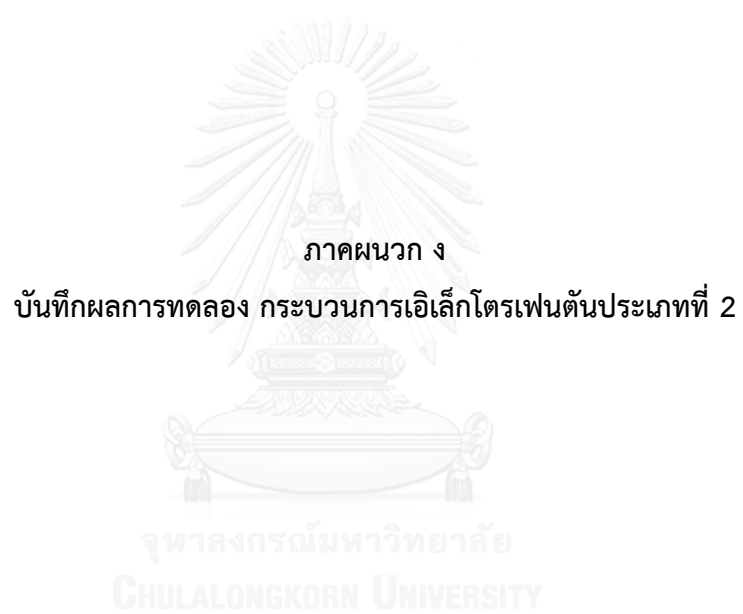
เวลา (นาที)	oil 50 mg/l	Removal (%)	oil 100 mg/l	Removal (%)	oil 150 mg/l	Removal (%)
0	199.02	0.00	236.75	0.00	364.23	0.00
15	24.07	87.91	0.00	100.00	2.60	99.29
30	11.06	94.44	5.20	97.80	10.41	97.14
45	4.55	97.71	2.60	98.90	0.00	100.00
60	5.85	97.06	13.01	94.50	7.80	97.86

ตารางที่ ค.12 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือ เหล็ก เดิม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	oil 50 mg/l	Removal (%)	oil 100 mg/l	Removal (%)	oil 150 mg/l	Removal (%)
0	204.23	0.00	236.75	0.00	338.21	0.00
15	24.07	88.21	15.61	93.41	23.41	93.08
30	31.87	84.40	15.61	93.41	36.42	89.23
45	29.27	85.67	15.61	93.41	22.11	93.46
60	34.47	83.12	13.01	94.50	28.62	91.54

ตารางที่ ค.13 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือ เหล็ก เดิม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ อัตราการเติมอากาศ 0.4 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	oil 50 mg/l	Removal (%)	oil 100 mg/l	Removal (%)	oil 150 mg/l	Removal (%)
0	204.23	0.00	294.29	0.00	428.57	0.00
15	13.66	93.31	4.29	98.54	8.57	98.00
30	11.06	94.58	1.43	99.51	34.29	92.00
45	8.46	95.86	12.86	95.63	0.00	100.00
60	3.25	98.41	11.43	96.12	8.57	98.00



**ภาคผนวก ง ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในประเภทที่ 2**

ตารางที่ ง.1 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือแกรไฟต์ ขั้วแคโทดคือ แกรไฟต์ เดิมเหล็กเฟอร์รัส 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	oil 50 mg/l	Removal (%)	oil 100 mg/l	Removal (%)	oil 150 mg/l	Removal (%)
0	225.57	0.00	304.26	0.00	367.21	0.00
15	34.1	84.88	23.61	92.24	36.72	90.00
30	20.98	90.70	20.98	93.10	27.54	92.50
45	15.74	93.02	34.10	88.79	35.41	90.36
60	28.85	87.21	34.10	88.79	26.23	92.86

ตารางที่ ง.2 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือแกรไฟต์ ขั้วแคโทดคือ แกรไฟต์ เดิมเหล็กเฟอร์รัส 200 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	oil 50 mg/l	Removal (%)	oil 100 mg/l	Removal (%)	oil 150 mg/l	Removal (%)
0	215.00	0.00	290.00	0.00	390.00	0.00
15	32.50	84.88	18.75	93.53	2.50	99.36
30	16.25	92.44	32.50	88.79	25.00	93.59
45	15.00	93.02	32.50	88.79	18.75	95.19
60	27.50	87.21	25.00	91.38	22.50	94.23

ตารางที่ ง.3 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือแกรไฟต์ ขั้วแคโทดคือ แกรไฟต์ เดิมเหล็กเฟอร์รัส 500 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	oil 50 mg/l	Removal (%)	oil 100 mg/l	Removal (%)	oil 150 mg/l	Removal (%)
0	145.00	0.00	220.00	0.00	345.00	0.00
15	32.50	77.59	32.50	85.23	35.00	89.86
30	25.00	82.76	25.00	88.64	32.50	90.58
45	37.50	74.14	30.00	86.36	52.50	84.78
60	32.50	77.59	31.25	85.80	25.00	92.75



**ภาคผนวก จ.1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันในประเภทที่ 3**

ตารางที่ จ.1 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็กกล้าไร้สนิม ขั้วแคโทดคือเหล็กกล้าไร้สนิม กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	95.38	0.00	181.98	0.00	488.13	0.00
15	16.83	82.35	49.63	72.73	140.27	71.26
30	15.43	83.82	35.57	80.45	103.80	78.74
45	11.22	88.24	35.57	80.45	61.72	87.36
60	8.42	91.18	22.33	87.73	50.50	89.66

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	134.66	0.00	295.96	0.00	413.79	0.00
15	37.22	72.36	69.43	76.54	178.84	56.78
30	8.27	93.86	35.77	87.91	35.77	91.36
45	16.54	87.71	23.14	92.18	61.02	85.25
60	12.41	90.79	39.98	86.49	27.35	93.39

ตารางที่ จ.2 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือแกรไฟต์ กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	106.04	0.00	181.98	0.00	302.98	0.00
15	5.89	82.35	49.63	72.73	39.56	86.94
30	2.52	83.82	20.32	88.83	31.14	89.72
45	5.89	88.24	5.36	97.05	39.56	86.94
60	12.62	91.18	6.78	96.27	16.83	94.44

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	228.86	0.00	390.16	0.00	347.42	0.00
15	66.18	71.08	28.95	92.58	12.41	96.43
30	8.27	96.39	18.61	95.23	8.27	97.62
45	24.82	89.16	12.41	96.82	8.27	97.62
60	12.41	94.58	2.07	99.47	28.95	91.67



ตารางที่ จ.3 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือไททาเนียม กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาท)	ความเข้มข้น น้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ประสิทธิภาพ ในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้น น้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้น น้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	160.00	0.00	297.42	0.00	325.47	0.00
15	28.00	82.50	61.75	79.24	14.05	95.68
30	9.33	94.17	1.43	99.52	5.64	98.27
45	14.67	90.83	8.44	97.16	5.64	98.27
60	0.00	100.00	36.50	87.73	8.44	97.41

เวลา (นาท)	ความเข้มข้น น้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ประสิทธิภาพ ในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้น น้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้น น้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	104.00	0.00	198.53	0.00	441.17	0.00
15	8.00	92.31	4.14	97.92	66.18	85.00
30	16.00	84.62	16.54	91.67	8.27	98.13
45	2.67	97.44	12.41	93.75	24.82	94.38
60	29.33	71.79	4.14	97.92	12.41	97.19

ตารางที่ จ.4 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยใช้ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดที่แตกต่างกันหาค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ขั้วไฟฟ้า ที่ใช้	ความ เข้มข้น น้ำมัน 50 มิลลิกรัม ต่อลิตร	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ความเข้มข้น น้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ความเข้มข้น น้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
St-St	92.6	1.91	90.0	3.18	91.6	2.62
Fe-Gr	97.0	0.85	98.8	0.99	96.0	2.26
Fe-Ti	98.7	1.28	98.7	1.13	98.2	0.07



**การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟนตันประเภทที่ 3**

ตารางที่ จ.5 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือไททาเนียม กระแสไฟฟ้า 0.25 แอมแปร์

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	181.13	211.61	0.00	0.00
15	34.72	38.71	80.83	81.71
30	19.62	41.29	89.17	80.49
45	40.75	33.55	77.50	84.15
60	58.87	36.13	67.50	82.93

ตารางที่ จ.6 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือไททาเนียม กระแสไฟฟ้า 0.25 แอมแปร์

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	264.02	360.68	0.00	0.00
15	49.5	66	81.25	81.70
30	39.35	36.81	85.10	89.79
45	72.35	49.5	72.60	86.28
60	67.27	59.66	74.52	83.46

ตารางที่ จ.7 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้  
 ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือไททาเนียม กระแสไฟฟ้า 0.25 แอมแปร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นน้ำมัน 150 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ความเข้มข้นน้ำมัน 150 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	375.72	347.12	0.00	0.00
15	66.01	35.25	82.43	89.85
30	83.78	39.32	77.70	88.67
45	66.64	35.25	82.26	89.85
60	85.3	48.81	77.30	85.94

ตารางที่ จ.8 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ขั้วแอโนด  
 คือเหล็ก ขั้วแคโทดคือไททาเนียม กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	160.00	104.00	0.00	0.00
15	28.00	8.00	82.50	92.31
30	9.33	16.00	94.17	84.62
45	14.67	2.67	90.83	97.43
60	0.00	14.67	100.00	85.89

ตารางที่ จ. 9 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้  
 ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือไททาเนียม กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	264.02	360.68	0.00	0.00
15	49.5	66	81.25	81.70
30	39.35	36.81	85.10	89.79
45	72.35	49.5	72.60	86.28
60	67.27	59.66	74.52	83.46

ตารางที่ จ.10 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้  
 ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือไททาเนียม กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นน้ำมัน 150 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ความเข้มข้นน้ำมัน 150 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	375.72	347.12	0.00	0.00
15	66.01	35.25	82.43	89.85
30	83.78	39.32	77.70	88.67
45	66.64	35.25	82.26	89.85
60	85.3	48.81	77.30	85.94

ตารางที่ จ.11 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้  
 ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือไททาเนียม กระแสไฟฟ้า 0.45 แอมแปร์

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	178.11	135.85	0.00	0.00
15	19.62	33.21	88.98	75.55
30	28.68	25.66	83.90	81.11
45	19.62	30.19	88.98	77.78
60	37.74	9.06	78.81	93.33

ตารางที่ จ.12 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้  
 ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือไททาเนียม กระแสไฟฟ้า 0.45 แอมแปร์

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	178.11	135.85	0.00	0.00
15	19.62	33.21	88.98	75.55
30	28.68	25.66	83.90	81.11
45	19.62	30.19	88.98	77.78
60	37.74	9.06	78.81	93.33

ตารางที่ จ.13 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้  
 ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือไททาเนียม กระแสไฟฟ้า 0.45 แอมแปร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	335.28	401.36	0.00	0.00
15	54.12	32.54	83.86	91.89
30	43.56	43.39	87.01	89.19
45	87	51.53	74.05	87.16
60	67.32	16.27	79.92	95.95

ตารางที่ จ.14 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้  
 ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือไททาเนียม กระแสไฟฟ้า 0.55 แอมแปร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	152.32	151.86	0.00	0.00
15	27.93	48.81	81.66	67.86
30	20.31	16.95	86.67	88.84
45	20.31	27.12	86.67	82.14
60	5.08	39.32	96.66	74.11

ตารางที่ จ.15 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้  
 ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือไททาเนียม กระแสไฟฟ้า 0.55 แอมแปร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	364.32	294.19	0.00	0.00
15	73.92	36.13	79.71	87.72
30	62.04	38.71	82.97	86.84
45	23.76	23.23	93.48	92.10
60	46.2	25.81	87.32	91.23

ตารางที่ จ.16 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้  
 ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือไททาเนียม กระแสไฟฟ้า 0.55 แอมแปร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	413.8	390.15	0.00	0.00
15	60.93	51.53	85.28	86.79
30	132.01	33.9	68.10	91.31
45	62.2	36.61	84.97	90.62
60	53.31	27.12	87.12	93.05



ตารางที่ จ.17 การวิเคราะห์ผลกระทบจากปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO) เริ่มต้นในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟนตันโดยน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาท)	ออกซิเจน ละลายน้ำ DO 1.0 mg/l	ประสิทธิภาพ พในการ บำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ออกซิเจน ละลายน้ำ DO 1.5 mg/l	ประสิทธิภาพ พในการ บำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ออกซิเจน ละลายน้ำ (DO 2.0 mg/l	ประสิทธิภาพ พในการ บำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	111.70	0.00	360.49	0.00	137.09	0.00
15	22.85	79.55	53.31	85.21	20.31	85.19
30	11.42	89.77	55.85	84.51	12.69	90.74
45	22.85	79.55	34.27	90.49	38.08	72.22
60	11.42	89.77	41.89	88.38	20.31	85.19

เวลา	ออกซิเจน ละลายน้ำ (DO 2.5 mg/l	ประสิทธิภาพ พในการ บำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ออกซิเจน ละลายน้ำ (DO 5.5 mg/l	ประสิทธิภาพ พในการ บำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ออกซิเจน ละลายน้ำ (DO 7.5 mg/l	ประสิทธิภาพ พในการ บำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	269.63	0.00	297.42	0.00	409.66	0.00
15	112.59	58.24	61.75	79.24	2.54	99.38
30	57.78	78.57	1.43	99.52	12.69	96.90
45	51.85	80.77	8.44	97.16	12.69	96.90
60	36.30	86.54	36.50	87.73	22.85	94.42

**ศึกษาปริมาณอัตราการเติมอากาศ ( $Q_g$ ) หน่วยเป็นลิตรต่อนาที ที่แตกต่างกันในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟนตัน**

ตารางที่ จ.18 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือไททาเนียม กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ อัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกัน

เวลา (นาท)	อัตราการ เติมอากาศ 0.2 l/min	ประสิทธิภาพ พในการ บำบัด (เปอร์เซ็นต์)	อัตราการ เติมอากาศ 0.4 l/min	ประสิทธิภาพ พในการ บำบัด (เปอร์เซ็นต์)	อัตราการ เติมอากาศ 0.6 l/min	ประสิทธิภาพ พในการ บำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	86.71	0.00	258.94	0.00	142.16	0.00
15	2.54	97.07	17.77	93.14	0.00	100.00
30	27.93	67.79	24.12	90.69	27.92	80.36
45	38.08	56.08	0.00	100.00	17.77	87.50
60	25.39	70.72	30.46	88.24	7.61	94.65

ตารางที่ จ.19 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือไททาเนียม กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ อัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกัน

เวลา	อัตราการ เติมอากาศ 0.2 l/min	ประสิทธิภาพ พในการ บำบัด (เปอร์เซ็นต์)	อัตราการ เติมอากาศ 0.4 l/min	ประสิทธิภาพ พในการ บำบัด (เปอร์เซ็นต์)	อัตราการ เติมอากาศ 0.6 l/min	ประสิทธิภาพ พในการ บำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	487.95	0.00	271.95	0.00	293.33	0.00
15	70.64	85.52	15.97	94.13	8.00	97.27
30	65.31	86.62	1.31	99.52	18.00	93.86
45	0.00	100.00	16.64	93.88	16.00	94.55
60	10.64	97.82	3.97	98.54	8.00	97.27

ตารางที่ จ. 20 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้หัวแอนโอดคือเหล็ก  
หัวแคโทดคือไททาเนียม กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ อัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกัน

เวลา	อัตราการ เติมอากาศ 0.2 l/min	ประสิทธิภาพ พในการ บำบัด (เปอร์เซ็นต์)	อัตราการ เติมอากาศ 0.4 l/min	ประสิทธิภาพ ในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	อัตราการ เติมอากาศ 0.6 l/min	ประสิทธิภาพ พในการ บำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	393.49	0.00	380.80	0.00	378.26	0.00
15	49.50	87.42	17.77	95.33	43.16	88.59
30	45.70	88.39	53.31	86.00	33.00	91.28
45	34.27	91.29	59.02	84.50	22.85	93.96
60	30.46	92.26	58.39	84.67	45.70	87.92

**การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กทั้งหมดและปริมาณเฟอร์รัสไอออนในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน**

ตารางที่ จ.21 ปริมาณเหล็กทั้งหมดและปริมาณเฟอร์รัสไอออนในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันเมื่อใช้  
ขั้วแอโนดคือเหล็กกล้าไร้สนิม ขั้วแคโทดคือเหล็กกล้าไร้สนิม กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา(นาท)	ปริมาณเหล็กทั้งหมด	ปริมาณเฟอร์รัสไอออน
0	0.00	0.00
15	53.56	14.98
30	173.93	39.09
45	209.44	92.39
60	340.03	120.31

ตารางที่ จ.22 ปริมาณเหล็กทั้งหมดและปริมาณเฟอร์รัสไอออนในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันเมื่อใช้  
ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือแกรไฟต์ กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา(นาท)	ปริมาณเหล็กทั้งหมด	ปริมาณเฟอร์รัสไอออน
0	0.00	0.00
15	215.05	53.05
30	462.21	94.93
45	574.55	163.46
60	781.58	216.77

ตารางที่ จ.23 ปริมาณเหล็กทั้งหมดและปริมาณเฟอร์รัสไอออนในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันเมื่อใช้  
ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือไททานเนียม กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา(นาท)	ปริมาณเหล็กทั้งหมด	ปริมาณเฟอร์รัสไอออน
0	0.00	0.00
15	224.22	42.90
30	312.95	80.97
45	454.64	127.93
60	480.09	168.54

ตารางที่ จ. 24 ปริมาณเหล็กทั้งหมดและปริมาณเฟอร์รัสไอออนในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันเมื่อใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือเหล็ก กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา(นาทื)	ปริมาณเหล็กทั้งหมด	ปริมาณเฟอร์รัสไอออน
0	0.00	0.00
15	171.72	27.67
30	252.77	54.32
45	366.71	92.39
60	536.03	153.31

ตารางที่ จ. 25 ปริมาณเหล็กทั้งหมดและปริมาณเฟอร์รัสไอออนในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันเมื่อใช้ขั้วแอโนดคือเหล็ก ขั้วแคโทดคือเหล็กกล้าไร้สนิม กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์

เวลา(นาทื)	ปริมาณเหล็กทั้งหมด	ปริมาณเฟอร์รัสไอออน
0	0.00	0.00
15	99.26	23.86
30	197.77	41.63
45	337.77	80.97
60	413.32	145.69

ตารางที่ จ.26 การวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันเมื่อใช้ขั้วที่แตกต่างกัน

เวลา (นาทื)	st-st	Fe-Gr	Fe-Ti	Fe-st	Gr-Gr
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	1.91	5.09	1.91	1.91	1.27
20	4.45	7.64	8.91	7.64	1.91
30	8.27	15.27	10.82	9.55	4.45
40	13.36	21.00	13.36	13.36	3.82
50	14.64	28.64	14.64	14.64	5.09
60	15.27	38.18	45.18	31.82	6.36

ตารางที่ จ.27 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) และปริมาณน้ำมันในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ที่ความเข้มข้นน้ำมัน 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้น น้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	TC	IC	TC – IC	ปริมาณสารอินทรีย์ ทั้งหมด (TOC) (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	12.29	5.95	6.34	31.70
15	34.75	29.76	4.99	9.98
30	38.85	36.88	1.97	1.97
45	34.76	32.87	1.89	1.89
60	32.86	31.24	1.62	1.62

ความเข้มข้น น้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	TC	IC	TC – IC	ปริมาณสารอินทรีย์ ทั้งหมด (TOC) (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	15.87	3.27	12.60	63.00
15	38.85	29.54	9.31	18.62
30	34.50	32.88	1.62	1.62
45	34.50	31.76	2.74	2.74
60	34.90	32.54	2.36	2.36

ความเข้มข้นน้ำมัน 150 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	TC	IC	TC – IC	ปริมาณสารอินทรีย์ ทั้งหมด (TOC) (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	18.53	2.15	16.38	81.89
15	34.50	25.10	9.40	18.80
30	32.89	31.56	1.33	1.33
45	33.78	32.76	1.02	1.02
60	28.90	27.89	1.01	1.01

ตารางที่ จ.28 ปริมาณน้ำมันในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันประเภทที่ 3 ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) โดยขั้วไฟฟ้าที่เป็นเหล็ก-แกรไฟต์ (Fe-Gr)

เวลา(นาที)	ความเข้มข้นน้ำมัน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	ความเข้มข้นน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	ความเข้มข้นน้ำมัน 150 มิลลิกรัมต่อลิตร
0	48.67	100.27	145.20
15	3.14	1.80	3.03
30	0.93	3.87	1.10
45	1.83	4.17	3.13
60	1.70	3.70	1.40



ภาคผนวก ฉ  
บันทึกผลการทดลอง กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟ้นต้นประเภทที่ 3 โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



**การวิเคราะห์แนวทางการเดินระบบแบบต่อเนื่องอัตราการไหลและสภาวะการทำงานที่เหมาะสม  
ในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟนตัน (ประเภทที่ 3)**

ตารางที่ ฉ.1 ขั้วไฟฟ้าแอนโนดและแคโทดคือ เหล็ก ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร อัตราการเติมอากาศ 0.4 ลิตรต่อนาที ค่ากระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) เมื่อทำการเดินระบบโดยใช้ระยะเวลา 240 นาที อัตราการไหลของน้ำเสีย 1.5 ลิตรต่อชั่วโมง

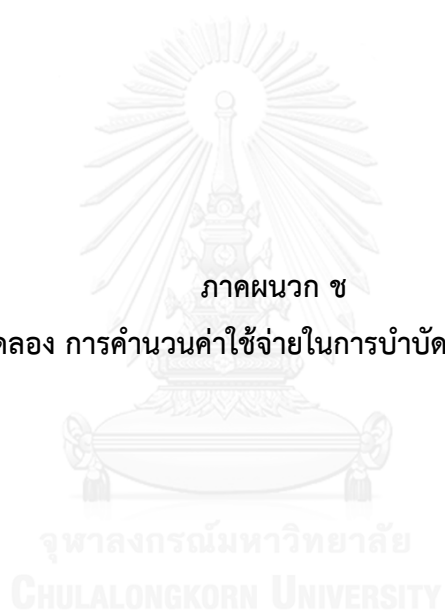
เวลา (นาที)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ประสิทธิภาพ ในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ประสิทธิภาพ ในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	94.43	0.00	199.34	0.00	309.51	0.00
15	5.25	94.44	15.74	92.10	20.98	93.22
30	10.49	88.89	13.11	93.42	15.74	94.91
45	12.56	86.70	10.49	94.74	7.87	97.46
60	0.00	100.00	2.62	98.69	2.62	99.15
75	0.00	100.00	9.18	95.39	0.00	100.00
90	2.62	97.23	5.25	97.37	6.56	97.88
105	2.62	97.23	7.87	96.05	0.00	100.00
120	2.62	97.23	7.87	96.05	6.56	97.88
135	15.74	83.33	2.62	98.69	2.62	99.15
150	5.24	94.45	9.18	95.39	14.43	95.34
165	13.11	86.12	3.93	98.03	2.62	99.15
180	15.46	83.63	5.25	97.37	7.87	97.46
195	0.00	100.00	7.87	96.05	3.93	98.73
210	0.00	100.00	7.87	96.05	9.18	97.03
225	2.62	97.23	2.62	98.69	5.25	98.30
240	0.00	100.00	2.62	98.69	0.00	100.00

ตารางที่ ฉ.2 ขั้วไฟฟ้าแอนโนดและแคโทดคือ เหล็ก ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร อัตราการเติมอากาศ 0.4 ลิตรต่อนาที ค่ากระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) เมื่อทำการเดินระบบโดยใช้ระยะเวลา 240 นาที อัตราการไหลของน้ำเสีย 3 ลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ประสิทธิภาพ ในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ประสิทธิภาพใน การบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ประสิทธิภาพ ในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	117.97	0.00	204.75	0.00	334.92	0.00
2	80.68	31.61	12.88	93.71	14.24	95.75
5	12.88	89.08	4.07	98.01	6.10	98.18
10	21.02	82.18	26.44	87.09	15.59	95.35
15	26.44	77.59	21.02	89.73	10.17	96.96
18	7.46	93.68	10.17	95.03	4.75	98.58
30	2.03	98.28	40.00	80.46	3.39	98.99
60	15.59	86.78	15.59	92.39	2.03	99.39
90	2.03	98.28	12.88	93.71	8.81	97.37
120	2.03	98.28	12.88	93.71	2.03	99.39
150	2.03	98.28	18.31	91.06	3.39	98.99
180	10.17	91.38	12.88	93.71	4.47	98.67
210	2.03	98.28	22.37	89.07	6.10	98.18
240	2.03	98.28	18.31	91.06	4.75	98.58

ตารางที่ ๓.3 ขั้วไฟฟ้าแอนโนดและแคโทดคือ เหล็ก ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร อัตราการเติมอากาศ 0.4 ลิตรต่อนาที ค่ากระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ (ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) เมื่อทำการเดินระบบโดยใช้ระยะเวลา 240 นาที อัตราการไหลของน้ำเสีย 6 ลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ประสิทธิภาพ ในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ประสิทธิภาพ ในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ประสิทธิภาพ ในการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
0	122.03	0.00	214.24	0.00	317.29	0.00
2	71.86	41.11	20.34	90.51	14.92	95.30
5	17.63	85.55	13.56	93.67	10.85	96.58
10	16.27	86.67	12.20	94.31	5.42	98.29
15	12.20	90.00	6.78	96.84	8.14	97.43
18	5.42	95.56	6.78	96.84	6.78	97.86
30	12.20	90.00	9.49	95.57	8.14	97.43
60	12.20	90.00	6.78	96.84	6.78	97.86
90	4.07	96.66	8.14	96.20	5.42	98.29
120	5.42	95.56	6.78	96.84	5.42	98.29
150	9.50	92.22	9.50	95.57	9.50	97.01
180	10.85	91.11	6.78	96.84	8.14	97.43
210	8.14	93.33	6.78	96.84	5.42	98.29
240	8.14	93.33	9.50	95.57	8.14	97.43



ภาคผนวก ข

บันทึกผลการทดลอง การคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### ฉ.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายของกระบวนการฟenton โดยการเดินระบบแบบทีละเท

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตรโดยมีปริมาตรน้ำเสีย 1 ลิตร โดยใช้ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ ) 0.05 กรัมต่อลิตร และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 0.125 กรัมต่อลิตร (0.38 มิลลิลิตรต่อลิตร)

- ราคาสารเคมีเฟอร์รัสซัลเฟต = 0.05 กรัม  $\times$  0.025 บาทต่อกรัม  
= 0.0125 บาท ต่อ น้ำเสีย 1 ลิตร  
= 1.25 บาทต่อ น้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
- ราคาสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ = 0.125 กรัม  $\times$  0.030 บาทต่อกรัม  
= 0.00375 บาทต่อ น้ำเสีย 1 ลิตร  
= 3.75 บาทต่อ น้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ค่าใช้จ่าย} &= 1.25 + 3.75 \\ &= 5 \text{ บาทต่อ น้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

### ฉ.2 การคำนวณค่าใช้จ่ายของกระบวนการอิเล็กโทรฟenton ประเภทที่ 1 โดยการเดินระบบแบบทีละเท

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตรโดยมีปริมาตรน้ำเสีย 1 ลิตร โดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 8 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ เป็นเวลา 30 นาที

$$\begin{aligned} \text{- พลังงานที่ใช้} &= VIt/1000v = (8 \times 0.35 \times (30/60)) / (1000 \times (1/1000)) \\ &= 1.4 \text{ กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานที่ใช้} \times \text{ค่ายูนิตต่อหน่วย} \times \text{ภาษีร้อยละ 7} \\ &= 1.4 \times 2.3488 \times 1.07 \\ &= 3.52 \text{ บาท} \end{aligned}$$

- ราคาขั้วเหล็ก 5 บาท/กิโลกรัม (น้ำหนักขั้วหายไป 0.85 กรัม ต่อ 1 ลิตร = 900 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$$\begin{aligned} \text{- ค่าขั้วไฟฟ้า} &= 0.85 \times 5 = 4.25 \text{ บาท} \\ \text{- ราคาสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์} &= 0.250 \text{ กรัม} \times 0.030 \text{ บาทต่อกรัม} \\ &= 0.0075 \text{ บาทต่อ น้ำเสีย 1 ลิตร} \\ &= 7.5 \text{ บาทต่อ น้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ค่าใช้จ่าย} &= 3.52 + 4.25 + 7.5 \\ &= 15.27 \text{ บาทต่อ น้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

### ฉ.3 การคำนวณค่าใช้จ่ายของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟนตันประเภทที่ 2 โดยการเดินระบบแบบบที ละเท

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตรโดยมีปริมาตรน้ำเสีย 1 ลิตร โดยใช้  
ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 8 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ เป็นเวลา 30 นาที

$$\begin{aligned} \text{- พลังงานที่ใช้} &= VIt/1000v &= (8 \times 0.35 \times (30/60)) / (1000 \times (1/1000)) \\ & &= 1.4 \text{ กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานที่ใช้} \times \text{ค่ายูนิตต่อหน่วย} \times \text{ภาษีร้อยละ 7} \\ &= 1.4 \times 2.3488 \times 1.07 \\ &= 3.52 \text{ บาท} \end{aligned}$$

- ราคาขี้แกรไฟต์ 8 บาท/กิโลกรัม (น้ำหนักขี้แกรหายไป 0.5 กรัม ต่อ 1 ลิตร = 500 กรัมต่อลูกบาศก์  
เมตร)

$$\text{- ค่าขี้แกรไฟต์} = 0.5 \times 8 = 4 \text{ บาท}$$

$$\begin{aligned} \text{- ราคาสารเคมีเฟอร์รัสซัลเฟต} &= 0.200 \text{ กรัม} \times 0.025 \text{ บาทต่อกรัม} \\ &= 0.005 \text{ บาท ต่อ น้ำเสีย 1 ลิตร} \\ &= 5 \text{ บาทต่อ น้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ค่าใช้จ่าย} &= 3.52 + 4 + 5 \\ &= 12.52 \text{ บาทต่อ น้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

### ฉ.4 การคำนวณค่าใช้จ่ายของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟนตันประเภทที่ 3 โดยการเดินระบบแบบบที ละเท

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัม/ลิตรโดยมีปริมาตรน้ำเสีย 1 ลิตร โดยใช้  
ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 8 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.35 แอมแปร์ เป็นเวลา 30 นาที

$$\begin{aligned} \text{- พลังงานที่ใช้} &= VIt/1000v &= (8 \times 0.35 \times (30/60)) / (1000 \times (1/1000)) \\ & &= 1.4 \text{ กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานที่ใช้} \times \text{ค่ายูนิตต่อหน่วย} \times \text{ภาษีร้อยละ 7} \\ &= 1.4 \times 2.3488 \times 1.07 \\ &= 3.52 \text{ บาท} \end{aligned}$$

- ราคาขี้เหล็ก 5 บาท/กิโลกรัม (น้ำหนักขี้เหล็กหายไป 0.9 กรัม ต่อ 1 ลิตร = 900 กรัมต่อ  
ลูกบาศก์เมตร)

$$\text{- ค่าขี้เหล็ก} = 0.9 \times 5 = 4.5 \text{ บาท}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าใช้จ่าย} = 3.52 + 4.5 = 8.02 \text{ บาทต่อ น้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร}$$

### ฉ.5 การคำนวณค่าใช้จ่ายของกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดย peristaltic pump เป็นระยะเวลา 240 นาที โดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 35.71 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พลังงานป้อนที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน = 0.020 กิโลวัตต์

$$\begin{aligned} \text{พลังงานที่ใช้เครื่อง power supply} &= VIt/1000v \\ &= (8 \times 0.35 \times (240/60)) / (1000 \times (1/1000)) \\ &= 11.2 \text{ กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานที่ใช้} \times \text{ค่ายูนิตต่อหน่วย} \times \text{ภาษีร้อยละ 7} \\ &= 11.2 \times 2.3488 \times 1.07 \\ &= 28.2 \text{ บาท} \end{aligned}$$

- ราคาขี้เหล็ก 5 บาทต่อกิโลกรัม (น้ำหนักขี้เหล็กหายไป 1.2 กรัมต่อ 1 ลิตร = 1,200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$$\text{- ค่าขี้เหล็ก} = 1.2 \times 5 = 6 \text{ บาท}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ค่าใช้จ่าย} &= 28.2 + 6 \\ &= 34.2 \text{ บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ชนารัตน์ สุทธะนันท์ เกิดเมื่อวันที่ 2 เมษายน 2532 สถานที่เกิด จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาจุลชีววิทยา ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2555 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2556

### การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

ชนารัตน์ สุทธะนันท์, อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ และ พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล “การวิเคราะห์การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตันในด้านประเภทกระบวนการและความเข้มข้นน้ำมัน” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 15 รหัสบทความ 11R1-10 วันที่ 11-13 พฤษภาคม 2559 ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพมหานคร จัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย