

การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน



นางสาวชนัญญา เพิ่มชาติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.

CUTTING OIL WASTEWATER TREATMENT BY FENTON AND FENTON-LIKE PROCESSES

Miss Chanunya Permchati

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเพน
	ตันและเพนตันเสมือน
โดย	นางสาวชนัญญา เพิ่มชาติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภู่งามเสริฐ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.อัจฉริยา สุริยะวงศ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ธนากร เมธาธรรม)

ขัญญา เพิ่มชาติ : การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตัน และเฟนตันเสมือน. (CUTTING OIL WASTEWATER TREATMENT BY FENTON AND FENTON-LIKE PROCESSES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ, 106 หน้า.

น้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดเกิดจากการใช้น้ำมันตัดในการหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างใบมีดและชิ้นงานในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนโลหะ ซึ่งในน้ำมันตัดมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์จึงทำให้ต้องมีการบำบัดก่อนจึงจะสามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้ ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ และเฟนตันแบบเนื้อผสมโดยใช้ไอรอนโมลิบเดต ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันตัด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่าในกระบวนการเฟนตันเมื่อใช้ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการควบคุมพีเอชที่ 3 พบว่าอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 1:2.5 มีประสิทธิภาพบำบัดซีโอดีสูงสุดคือ 81% จากนั้นได้ทำการศึกษากระบวนการเฟนตันแบบแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยแบ่งเติมเป็น 2 ครั้ง และพบว่าเมื่อเปรียบเทียบผลการบำบัดกับผลของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวด้วยวิธีการทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ(ระดับความเชื่อมั่น95%) ส่วนในกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียว เมื่อใช้ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตรพบว่าอัตราส่วนเฟอร์ริกไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 1:2.5 มีประสิทธิภาพบำบัดซีโอดีสูงสุดคือ 79% และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีระหว่างกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวพบว่าประสิทธิภาพไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ(ระดับความเชื่อมั่น 95%) นอกจากนี้ยังมีการสังเคราะห์ไอรอนโมลิบเดตขึ้นมาเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันแบบเนื้อผสม โดยใช้ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ควบคุมพีเอชที่ 4 จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนเฟอร์ริกไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 1:10 มีประสิทธิภาพบำบัดซีโอดีสูงสุดคือ 58% ดังนั้นจากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวมีประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกัน แต่กระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อผสมโดยใช้ไอรอนโมลิบเดตมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ต่ำกว่า ซึ่งอาจปรับปรุงได้โดยการเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดหรือเพิ่มปริมาณไอรอนโมลิบเดต

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยพระคุณของอาจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะและถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอน ตลอดจนสนับสนุนทุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล อาจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงศ์ และ ดร. ธนากร เมธาธรรม ที่ได้ให้เกียรติและสละเวลาเพื่อสอบวิทยานิพนธ์นี้ รวมถึงให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์และชี้แนะข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือของห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิต

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำและให้ความรู้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่ช่วย สนับสนุน ส่งเสริมและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดแก่ผู้วิจัย จนทำให้การศึกษาครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ตามที่ตั้งใจ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญภาพ.....	ข
สารบัญภาพ.....	ค
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 รูปแบบของน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำ.....	3
2.2 น้ำมันตัด (Cutting oil).....	4
2.3 ประเภทน้ำมันตัด.....	5
2.4 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน.....	6
2.5 กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมี (Chemical oxidation).....	8
2.6 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes, AOPs).....	9
2.7 ปฏิกิริยาเฟนต์ัน (Fenton Reaction).....	11
2.8 กระบวนการเฟนต์ันเสมือน (Fenton-like Reaction).....	14
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
- ปริมาณ Magnetite.....	22
2.10 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย.....	23
3.1 แผนการทดลอง.....	23
3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	23

3.3. วิธีดำเนินงานวิจัย .....	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	36
4.1 ศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของน้ำมันตัด.....	36
4.2 การศึกษาคุณลักษณะของไอออนโมลิบดีต .....	37
4.2.1 วิเคราะห์รูปร่างลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	38
4.2.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไอออนโมลิบดีตด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS).....	38
4.2.3 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไอออนโมลิบดีตด้วยเครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD).....	39
4.3 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการเฟนตัน ....	40
4.3.1 การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเมื่อใช้เฟอร์รัสไอออน 500 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	41
4.3.2 ศึกษาปริมาณเหล็กต่างๆที่คงเหลือในระบบสำหรับกระบวนการเฟนตัน .....	45
4.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าที่ไอซีในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตัน .....	46
4.4 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันแบบแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ .....	47
4.5 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบสารเนื้อเดียวโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา .....	50
4.5.1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดในกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวโดยวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยซีไอดี .....	50
4.5.2 ศึกษาปริมาณเหล็กต่างๆที่คงเหลือในระบบของกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวเมื่อเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	53
4.5.3 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าที่ไอซีในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียว .....	54
4.6 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยไอออนโมลิบดีต .....	55
4.7 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน.....	59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	61



5.1 สรุปผลการวิจัย.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	62
รายการอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์.....	70
ภาคผนวก ข บันทึกผลการทดลองกระบวนการเฟนตัน.....	79
ภาคผนวก ค บันทึกผลการทดลองกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	90
ภาคผนวก ง บันทึกผลการทดลองกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อผสมโดยใช้ไอออนโมลิบดีตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	99
ภาคผนวก จ การทดลองความแตกต่างกันทางสถิติ.....	100
ภาคผนวก ฉ การคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัด.....	104
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	106

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2. 1 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง.....	10
ตารางที่ 2. 2 กลไกการเกิดปฏิกิริยากระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน .....	10
ตารางที่ 2. 3 ความสามารถในการปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารเคมีชนิดต่างๆ .....	11
ตารางที่ 2. 4 สรุปปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน .....	14
ตารางที่ 2. 5 ผลปริมาณสารเคมีและประสิทธิภาพการบำบัด .....	18
ตารางที่ 2. 6 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการต่างๆ .....	20
ตารางที่ 3. 1 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์ .....	24
ตารางที่ 3. 2 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน.....	25
ตารางที่ 3. 3 ตัวแปรในการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต .....	27
ตารางที่ 3. 4 ตัวแปรในการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยใช้สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ .....	29
ตารางที่ 3. 5 ตัวแปรในการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยใช้ไฮรอนโมลิบเดต .....	31
ตารางที่ 3. 6 สรุปจำนวนการทดลอง .....	34
ตารางที่ 4. 1 ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ .....	36
ตารางที่ 4. 2 องค์ประกอบและปริมาณธาตุต่างๆของไฮรอนโมลิบเดต.....	39
ตารางที่ 4. 3 แสดงผลเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน .....	59
ตารางที่ 4. 4 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอื่นๆ..	59

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2. 1	การทำงานของสารลดแรงตึงผิวในสภาวะน้ำมันที่อยู่ในน้ำ และน้ำในน้ำมัน.....	4
ภาพที่ 3. 1	แผนผังการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ .....	25
ภาพที่ 3. 2	แผนผังการสังเคราะห์ไอรอนโมลิบเดต .....	26
ภาพที่ 3. 3	แผนผังการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต .....	28
ภาพที่ 3. 4	แผนผังการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยใช้สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ .....	30
ภาพที่ 3. 5	แผนผังการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยใช้ไอรอนโมลิบเดต .....	32
ภาพที่ 3. 6	แผนผังการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟตแบบแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	33
ภาพที่ 4. 1	ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ .....	37
ภาพที่ 4. 2	ลักษณะไอรอนโมลิบเดตที่สังเคราะห์ได้.....	38
ภาพที่ 4. 3	ภาพถ่ายไอรอนโมลิบเดตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	38
ภาพที่ 4. 4	เส้นสเปกตรัม EDS ของไอรอนโมลิบเดต .....	39
ภาพที่ 4. 5	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกไอรอนโมลิบเดตด้วยXRD.....	40
ภาพที่ 4. 6	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่มีอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่แตกต่างกันเมื่อใช้เฟอร์รัสไอออน 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการเฟนตัน (ก) ที่เวลา 0-60 นาที (ข) ที่เวลา 0-20 นาที.....	42
ภาพที่ 4. 7	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่มีอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่แตกต่างกันเมื่อใช้เฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการเฟนตันแบบเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียว (ก) ที่เวลา 0-60 นาที (ข) ที่เวลา 0-20 นาที.....	43
ภาพที่ 4. 8	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของชุดควบคุมการทดลองในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	44
ภาพที่ 4. 9	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในกระบวนการเฟนตันเมื่อเติมเฟอร์รัสไอออน 500 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	45
ภาพที่ 4. 10	แสดงปริมาณไอออนเหล็กในช่วงเวลาต่างๆในกระบวนการเฟนตันเมื่อเติมเฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือ 1:2.5.....	46

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 4. 11 ประสิทธิภาพการบำบัดที่ไอซีที่มีอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2.5 โดยมวลเมื่อใช้เฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการเฟนตัน.....	47
ภาพที่ 4. 12 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่มีอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมวลที่แตกต่างกันเมื่อใช้เฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการเฟนตันแบบแบ่งเติม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ก) ที่เวลา 0-45 นาที (ข) ที่เวลา 0-20 นาที.....	48
ภาพที่ 4. 13 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่เทียบกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวกับแบ่งเติม เมื่อใช้เฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการเฟนตัน.....	49
ภาพที่ 4. 14 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่มีอัตราส่วนเฟอร์ริกไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมวลที่แตกต่างกันเมื่อใช้เฟอร์ริกไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบ เนื้อเดียว (ก) ที่เวลา 0-60 นาที (ข) ที่เวลา 0-20 นาที.....	51
ภาพที่ 4. 15 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของชุดควบคุมการทดลองในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียว.....	52
ภาพที่ 4. 16 เปรียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีด้วยกระบวนการเฟนตันและกระบวนการเฟนตันเสมือน เมื่อใช้ไอออนเหล็ก(เฟอร์รัสและเฟอร์ริกไอออน) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	53
ภาพที่ 4. 17 แสดงปริมาณไอออนเหล็กในช่วงเวลาต่างๆในกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวที่ใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	54
ภาพที่ 4. 18 ประสิทธิภาพการบำบัดที่ไอซีที่มีอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมวลที่แตกต่างกันเมื่อใช้เฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการเฟนตัน.....	55
ภาพที่ 4. 19 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่มีอัตราส่วนเฟอร์ริกไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมวลที่แตกต่างกันเมื่อใช้เฟอร์ริกไอออน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบ เนื้อผสม.....	56
ภาพที่ 4. 20 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีด้วยกระบวนการเฟนตัน (เฟอร์รัสซัลเฟต) กระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียว (เฟอร์ริกคลอไรด์) และ กระบวนการเฟนตันแบบเนื้อผสม (ไฮรอนโมลิบเดต).....	58

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการเติบโตทางด้านอุตสาหกรรมอย่างมาก เช่นเดียวกับกับอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนโลหะ โดยในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนโลหะจะมีการตัดกลึงโลหะเพื่อให้ได้รูปทรงตามลักษณะที่ต้องการ ทำให้เกิดการเสียดสีระหว่างใบมีดกับโลหะทำให้เกิดความร้อนและส่งผลให้ใบมีดเกิดการสึกหรอ ดังนั้นจึงมีการใช้น้ำมันตัดโลหะเพื่อการหล่อลื่นและช่วยระบายความร้อนระหว่างชิ้นงานและใบมีด (ประเสริฐ เทียนนิมิตร, 2532) เมื่อน้ำมันตัดที่ใช้แล้วจะสูญเสียสมบัติเดิมไป ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนน้ำมันตัดโลหะทิ้ง น้ำมันตัดโลหะที่ผ่านการใช้แล้วมีสารอินทรีย์สูงซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากน้ำทิ้งจะมีประจุของสารลดแรงตึงผิวสูงและสารอินทรีย์อื่นๆ (Bataller, Lamaallam, Lachaise, Graciaa, & Dicharry, 2004) ทำให้ต้องมีการบำบัดก่อนที่จะมีการปล่อยทิ้ง เทคนิคที่ใช้ในการบำบัดมีหลายวิธี เช่นการบำบัดด้วยวิธีเคมี การบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ การปรับเสถียรภาพ อัลตราฟิเลเตรชัน นาโนฟิเลเตรชัน กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยไฟฟ้าและเฟนตัน และเฟนตันเสมือน (Bensadok, Benammar, Lapicque, & Nezzal, 2008) ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน (Fenton-like) ซึ่งวิธีนี้เป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance Oxidation Process, AOPs) โดยสร้างตัวออกซิไดซ์คือไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\bullet\text{OH}$ ) จากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ในสถานะที่เป็นกรด ที่อุณหภูมิและความดันปกติ นอกจากนี้เฟอร์รัสไอออนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Pignatello และคณะ, 2006) ในการทดลองการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันนั้น ปัจจัยที่ส่งผลในการบำบัดคือ อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเฟอร์รัสไอออน (นุสรา โรจนวิลาวัลย์, 2554) กล่าวคือ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไปจะกระบวนการบำบัดทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง ดังนั้นจึงควรที่จะเลือกเติมปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสัดส่วนที่เหมาะสม นอกจากนี้การแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังอาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด (ธนากร เมธาธรรม, 2554) เนื่องจากกระบวนการเฟนตันต้องดำเนินการที่พีเอชต่ำ ทำให้ต้องมีการปรับสภาพของสารละลายให้เป็นกรดก่อนจึงเริ่มทำปฏิกิริยาทำให้สิ้นเปลืองสารเคมี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจกระบวนการเฟนตันเสมือน โดย เฟนตันเสมือนนี้มีแบ่งได้ 2 แบบคือ สารเนื้อเดียว (Homogeneous) และ สารเนื้อผสม (Heterogeneous) (Yap, Gan, & Ng, 2011) ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำเอาแนวคิดการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือนทั้งแบบสารเนื้อเดียว (Homogeneous) โดยสารที่ใช้ศึกษา คือ เฟอร์ริกคลอไรด์ และสารเนื้อผสม (Heterogeneous) ที่ศึกษา คือ ไอรอนโมลิบเดตมาใช้ นอกจากนี้ยังจะมีการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสารประกอบเฟอร์รัสไอออนที่ใช้และการศึกษาผลของประเภทหรือลักษณะของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยเปรียบเทียบกับกรณีเดียวกับการแบ่งเติม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพการบำบัดและผลของรูปแบบการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในรูปแบบเติมครั้งเดียวและการแบ่งเติม (Step feed) สำหรับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน (Fenton-like)

1.2.3 ศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อการเดินระบบด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือนในรูปแบบถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีขอบเขตของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.3.1 งานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ โดยผสมน้ำมันตัดสังเคราะห์กับน้ำประปาให้มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.3.2 งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือนโดยใช้สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์สำหรับกระบวนการแบบสารเนื้อเดียว (Homogeneous) และใช้สารไอรอนโมลิบเดตสังเคราะห์สำหรับกระบวนการแบบสารเนื้อผสม (Heterogeneous)

1.3.3 งานวิจัยนี้สังเคราะห์ไอรอนโมลิบเดตแล้วจึงศึกษาคุณลักษณะของไอรอนโมลิบเดต

1.3.4 งานวิจัยนี้ศึกษาผลของรูปแบบการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเทโดยทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวและแบบแบ่งเติม 2 ครั้ง

1.3.5 งานวิจัยนี้ดำเนินปฏิกิริยาที่สภาวะอุณหภูมิห้อง และควบคุมพีเอช

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด

1.4.2 เพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดและลดการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้การแบ่งเติม

1.4.3 ทดแทนการใช้เฟอร์รัสไอออนด้วยสารประกอบเหล็กในรูปแบบอื่น

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

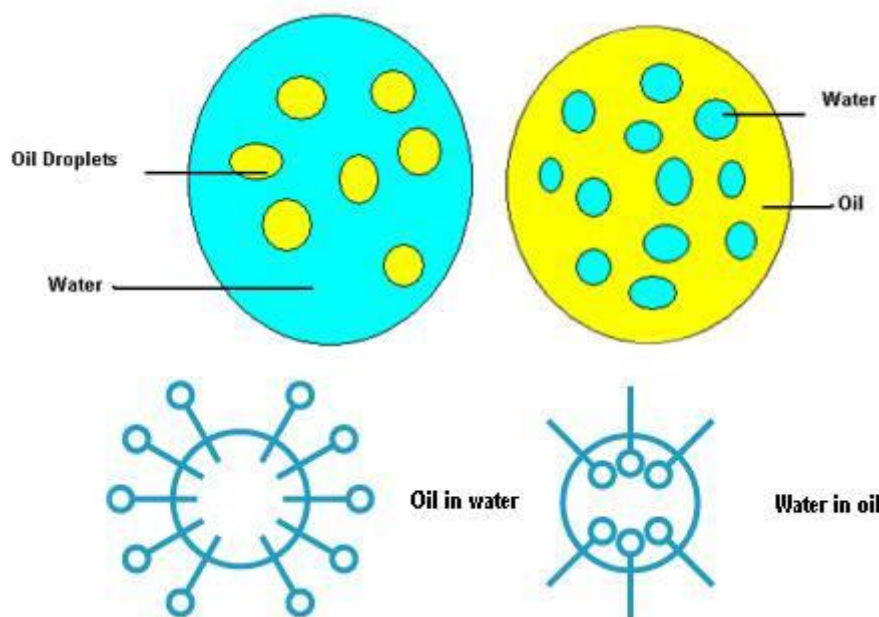
#### 2.1 รูปแบบของน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำ (มันรักรัษ ตัณกุลเวศม์ & มันสิน ตัณกุลเวศม์, 2545)

น้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำสามารถแบ่งออกได้ 4 ประเภท คือ

น้ำมันละลายน้ำ โดยทั่วไปมักคิดว่าน้ำมันไม่ละลายน้ำ แต่ในความจริงแล้วน้ำมันสามารถละลายน้ำได้ ความสามารถในการละลายน้ำขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติประจำตัวของน้ำมัน เช่น ไฮโดรคาร์บอนที่ระเหยง่าย (มักมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ) มักจะละลายน้ำได้ดี

น้ำมันที่อยู่ในรูปของอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว น้ำมันอยู่ในรูปอิมัลชันที่อยู่ในอนุภาคขนาดเล็กคล้ายคอลลอยด์ ดังนั้นจึงเห็นเป็นความขุ่นของน้ำ น้ำมันละลายน้ำหรือลอยน้ำอาจกลายเป็นอิมัลชันได้เมื่อถูกกระทำด้วยแรงภายนอก เช่น ถูกบดอัด เป็นต้น ขนาดของเม็ดน้ำมันมีตั้งแต่เล็กกว่า 20 ไมครอนจนถึงขนาดใหญ่กว่า 100 ไมครอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของไฮโดรคาร์บอน ไฮโดรคาร์บอนที่มีแรงตึงผิวสูงจะมีขนาดใหญ่ ส่วนเม็ดน้ำมันขนาดเล็กจะเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีแรงตึงผิวต่ำ ในกระบวนการกลั่นจะพบทั้งน้ำมันอิสระและน้ำมันอิมัลชัน ยกตัวอย่างเช่น ในกระบวนการกำจัดสารละลายเกลือแร่ออกจากน้ำมันดิบ จะต้องล้างน้ำมันดิบออกด้วยน้ำ (ประมาณ 5% ของน้ำมัน)และมีการกวนผสมกัน เป็นผลทำให้เกิดอิมัลชันในน้ำที่ใช้ล้าง น้ำเสียที่เกิดขึ้นจึงมีน้ำมันอิมัลชันที่ต้องกำจัดทิ้ง การกำจัดน้ำมันอิมัลชันออกจากน้ำเสียสามารถกระทำได้หลายได้ด้วยวิธีที่คล้ายกับการกำจัดตะกอนแขวนลอยหรือคอลลอยด์ เช่น การตกตะกอนที่ใช้หรือไม่ใช้สารโคแอกกูแลนต์ เป็นต้น

น้ำมันที่อยู่ในรูปของอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว เม็ดน้ำมันอิมัลชันชนิดนี้มีความคงตัวมาก ทำให้แยกออกจากน้ำเสียได้ยาก สาเหตุที่ทำให้มีอิมัลชันชนิดนี้มีความคงตัวมากคือ สารลดแรงตึงผิวทำให้เม็ดน้ำมันมีประจุชนิดเดียวกัน (อาจจะเป็น + หรือ - ก็ได้) และลดแรงตึงผิวของเม็ดน้ำมัน ทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กมาก (มักเล็กกว่า 20 ไมครอน) รูปที่ 2.1 อธิบายความคงตัวของเม็ดน้ำมันที่เกิดจากสารลดแรงตึงผิวมักเป็นโมเลกุลโพลาร์ขนาดใหญ่ ส่วนหนึ่งของโมเลกุลละลายได้ดีในน้ำ และอีกส่วนหนึ่งละลายได้ในน้ำมัน จากรูปจะเห็นว่าส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวจุ่มอยู่ในเม็ดน้ำมัน และมีส่วนหัวอยู่ในน้ำ ส่วนที่ละลายในน้ำมักเป็นกลุ่มคาร์บอเนต ( $\text{COO}^- \text{Na}^+$ ) กลุ่มซัลเฟต ( $\text{SO}_4^- \text{Na}^+$ ) กลุ่มไฮดรอกซิล ( $\text{OH}^-$ ) หรือกลุ่มซัลโฟเนต ( $\text{SO}_3^- \text{Na}^+$ )



ภาพที่ 2. 1 การทำงานของสารลดแรงตึงผิวในสถานะน้ำมันที่อยู่ในน้ำ และน้ำในน้ำมัน (Brown, 2010)

น้ำมันที่ลอยอยู่เหนือน้ำ น้ำมันส่วนใหญ่มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ จึงเป็นเรื่องปกติที่จะพบว่าน้ำมันลอยอยู่เหนือน้ำเป็นฝ้าหรือฟิล์ม ซึ่งขวางกั้นการถ่ายเทออกซิเจนหรือบั้งแสง น้ำมันปริมาณเล็กน้อยก็สามารถสร้างฟิล์มปิดพื้นที่ผิวน้ำได้อย่างมากมาย

## 2.2 น้ำมันตัด (Cutting oil) (ประเสริฐ เทียนนิมิตร, ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์, & ปานเพชร ชินนทร, 2532)

น้ำมันตัดเป็นน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการตัด กลึง เจียนและเจาะโลหะ เพื่อให้ได้ลักษณะรูปร่างตามที่ต้องการ ในขณะที่ทำการตัด กลึง เจียน และเจาะ จะเกิดความร้อนที่สูงมากโดยอาจสูงถึง 700 °C น้ำมันตัดสามารถแบ่งหน้าที่ได้ดังต่อไปนี้

1. เป็นสารหล่อลื่นในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนโลหะทำหน้าที่ช่วยลดแรงเสียดทาน ที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างใบมีดกับชิ้นโลหะ รวมทั้งเศษโลหะที่เคลื่อนที่ผ่านหน้าใบมีด การตัดกลึงใช้กำลังน้อยลง ลดการสึกหรอของใบมีด ช่วยป้องกันการเกิดปัญหาการหลอมติดของเศษโลหะที่บริเวณปลายใบมีด (Built Up Edge, BUE)

2. เป็นสารหล่อเย็นช่วยระบายความร้อนที่คมตัด และ ชื้นงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเสียดทานของการขึ้นรูปหรือการตัดเฉือนโลหะ เพื่อไม่ให้ใบมีดสูญเสียความอ่อนตัวอันเนื่องมาจากความ



ร้อน ป้องกันปัญหาการเกิด BUE ทำให้ทำงานตัดกลึงชิ้นงานได้เร็ว ชิ้นงานได้ขนาดและคุณภาพตามที่ต้องการ

2. เป็นสารหล่อเย็นช่วยระบายความร้อนที่คมตัด และ ชิ้นงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเสียดทานของการขึ้นรูปหรือการตัดเฉือนโลหะ เพื่อไม่ให้ใบมีดสูญเสียความอ่อนตัวอันเนื่องมาจากความร้อน ป้องกันปัญหาการเกิด BUE ทำให้ทำงานตัดกลึงชิ้นงานได้เร็ว ชิ้นงานได้ขนาดและคุณภาพตามที่ต้องการ

3. ช่วยไล่เศษโลหะที่เกิดจากการตัดเฉือนให้ออกจากชิ้นงาน

4. ป้องกันสนิม น้ำมันตัดทำหน้าที่ป้องกันสนิมให้กับชิ้นโลหะที่ถูกตัดเฉือนใหม่ ซึ่งโดยปกติแล้วผิวของโลหะส่วนนี้มักไวในการเกิดสนิม

### 2.3 ประเภทน้ำมันตัด (ประเสริฐ เทียนนิมิตร et al., 2532)

น้ำมันตัดสามารถแบ่งได้ 4 ประเภท คือ

1. น้ำมันตัดชนิดน้ำมันล้วน (Straight Oil) น้ำมันชนิดนี้เป็นน้ำมันแร่เกิดจากการสกัดน้ำมันดิบ (Crude Oil) แบบลำดับส่วน โดยน้ำมันดิบเป็นองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ อาจจะมีสารเพิ่มคุณภาพ (additive) หรือไม่ก็ได้

2. น้ำมันตัดชนิดผสมน้ำ (Soluble Oils) คือของผสมชนิดน้ำมันผสมน้ำ ซึ่งอยู่ในรูปที่มีน้ำมันอยู่น้อยกว่าน้ำ (oil in water) โดยจะมีการเติมสารเคมีบางอย่างลงในน้ำมันเพื่อให้สามารถรวมตัวกับน้ำได้ในรูปของสารผสม และจะทำให้มีหยดน้ำมันเล็กๆกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำที่ใช้ผสม โดยหยดน้ำมันเหล่านี้จะผลัดกันเองตลอดเวลาไม่ให้รวมตัวกันเป็นหยดหรือกลุ่มก้อนใหญ่ๆ เกิดการแยกตัวเป็นชั้น โดยชั้นของน้ำมันซึ่งเบาว่าจะลอยอยู่เหนือชั้นน้ำ สารเคมีพวกนี้เราเรียกรวมๆว่า อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifiers) ในน้ำมันตัดชนิดผสมน้ำอาจมีสารเคมีชนิดอื่นผสมปนอยู่นอกเหนือจากอิมัลซิไฟเออร์อยู่ก็ได้ เช่น

- สารทำความสะอาด (wetting agents) สารนี้จะช่วยให้หยดน้ำมันเล็กๆในงานตัดโลหะ สามารถยึดเกาะกับผิวของชิ้นงานได้ดีขึ้น และเป็นการป้องกันสนิมให้กับชิ้นงาน

- สารเพิ่มคุณภาพในการรับแรงกดสูง (Extreme pressure additives) สารนี้จะช่วยรับแรงเสียดสีระหว่างใบมีด หรือหินตัดกับชิ้นงาน ทำให้ได้ชิ้นงานที่ราบเรียบ และใบมีดมีอายุการใช้งานนานขึ้น

- สารป้องกันการกัดกร่อน (corrosion inhibitor)

ข้อดีของน้ำมันตัดชนิดผสมน้ำคือเป็นการรวบรวมคุณสมบัติที่ดีของน้ำมันและน้ำเข้าไว้ด้วยกัน เนื่องจากน้ำมันมีคุณสมบัติในการระบายความร้อนที่ดีและราคาถูก แต่ไม่มีคุณสมบัติในการหล่อลื่นและการเคลือบผิวโลหะเพื่อป้องกันสนิม ส่วนน้ำมันมีราคาแพง

3. น้ำมันตัดจากผลิตภัณฑ์สารสังเคราะห์ (Synthetics) น้ำมันตัดกลุ่มนี้เป็นผลิตภัณฑ์สังเคราะห์ที่บริษัทผู้ผลิตพยายามคิดค้นเพื่อให้เกิดผลดีต่อการใช้งานมากที่สุด ในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด จนไม่อาจกล่าวได้ว่าคุณสมบัติทั่วไปเป็นอย่างไร ดังนั้นน้ำมันตัดโลหะที่เหมาะสมกับงานประเภทหนึ่งอาจจะไม่เหมาะสมกับงานอีกประเภทหนึ่ง น้ำมันตัดกลุ่มนี้เมื่อผสมน้ำแล้วอาจได้สารละลายที่มีลักษณะใส (clear type solution) หรือของผสมในลักษณะขุ่น (emulsion type solution) ก็ได้ แต่ส่วนใหญ่พบในลักษณะขุ่นมากกว่า ข้อดีของน้ำมันตัดประเภทนี้คือ ผสมน้ำได้ดีและง่าย ของผสมที่ได้จะคงตัวมาก ไม่เกิดการแยกตัวเป็นชั้นออกจากน้ำได้โดยง่าย ข้อเสียคืออาจเป็นอันตรายต่อผิวหนังได้

4. น้ำมันตัดจากผลิตภัณฑ์สารกึ่งสังเคราะห์ (Semi-synthetics) เป็นน้ำมันปิโตรเลียมที่แตกตัวเป็นโมเลกุลเล็กๆเป็นส่วนผสม มีลักษณะโปร่งแสงอาจจะขุ่นบ้างเล็กน้อยส่วนมากใช้ในการตอบสนองความร้อน Semi-synthetics ต่างจากสารละลายแท้ๆ ตรงที่เมื่อน้ำมันหล่อเย็นมีความร้อนสูงโมเลกุลของน้ำมันที่กระจายตัวอยู่มีแนวโน้มที่จะแยกตัวออกจากน้ำ มาเกาะกับมีดตัด (cutting tools) จึงทำให้มีคุณสมบัติในการหล่อลื่นที่ดี เมื่อส่วนผสมนี้เย็นลงน้ำมันก็จะแตกตัวอีกครั้ง (บริษัทออยเชิร์ฟจำกัด, 2010)

ในงานวิจัยนี้เลือกสังเคราะห์น้ำมันตัดชนิดผสมน้ำ เนื่องจากน้ำมันตัดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำมันตัดชนิดนี้มีความคงตัวสูงและยากต่อการบำบัด

## 2.4 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

### 1. กระบวนการทางชีวภาพ (Biological processes)

คือกระบวนการที่สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่จะต้องผ่านการบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการถูกย่อยสลายทางชีวภาพ เช่น ระบบ Activated Sludge, Tricking filter เป็นต้น (สุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์, 2552)

### 2. กระบวนการทางเคมี (Chemical method) (นุสรา โรจนวิลาวัลย์, 2554)

เป็นกระบวนการที่มีการเติมสารเคมีลงในน้ำเสียที่ต้องการบำบัด เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันหรือเพื่อทำลายโครงสร้างจนสามารถแยกน้ำมันออกมาได้ นิยมใช้อย่างมากในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน เช่น การใช้สารลดแรงตึงผิว หรือการเติมดีมัลซิฟายเออร์ทำให้เกิดการทำลายสภาพอิมัลชัน (Demulsification) ซึ่งประกอบด้วย การกวนเร็ว (Rapid mixing) เมื่อเติมสารเคมีเพื่อลดประจุที่ผิวของอนุภาคน้ำมันซึ่งจะช่วยเพิ่มโอกาสในการชน การจับตัวกันเป็นฟล็อก (Flocculation) และอนุภาคน้ำมันสามารถรวมตัวกันและลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำด้านบน (Flotation)

3. กระบวนการทางกายภาพเคมี (Physico-chemical method) (นุสรา โรจนวิลาวัลย์, 2554) เป็นการแยกอนุภาคน้ำมัน โดยกระบวนการทางเคมีได้แก่

- การดูดซับ (Adsorption) สามารถกำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทรวมถึงน้ำมันที่ละลายน้ำได้ แต่มีค่าใช้จ่ายสูงและต้องมีการเปลี่ยนคาร์บอนเมื่อเกิดการอุดตัน ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับการดำเนินการแบบ Full scale เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ (Activate carbon) ที่เป็นการเปลี่ยนน้ำมันที่ปนเปื้อนในรูปของเหลวให้ถูกดูดซับอยู่บนผิวของแข็ง

- การใช้อุปกรณ์โคเอสเชอร์ (Coalescer) สามารถใช้กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทยกเว้นน้ำมันที่สามารถละลายน้ำได้ ปัญหาที่พบในการใช้อุปกรณ์โคเอสเชอร์คือเกิดการอุดตันได้ง่าย ทำให้ต้องมีการบำบัดข้างต้นมาก่อน โดยจะเพิ่มโอกาสสัมผัสและรวมตัวกันของอนุภาคอิมัลชันขนาดเล็กขณะที่ผ่านตัวกลาง เพื่อให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น

- การกรอง (Filtration) สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย รวมทั้งกำจัดน้ำมันอิสระ อิมัลชัน และน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำ ข้อเสียคือต้องทำการล้างย้อน (Backwash) หากมีการอุดตันตัวกลางที่นิยมใช้ในการกรอง ได้แก่ ทราย anthracite เป็นต้น

- การทำให้ลอย (Flotation) เป็นวิธีการกำจัดน้ำมันและไขมันที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นๆ จึงทำให้เป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยหลักการของกระบวนการนี้คือ ทำให้น้ำมันหรือไขมันซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยขึ้นโดยอาศัยแรงลอยตัวขึ้นของฟองอากาศพองน้ำมันและไขมันให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ข้อดีของวิธีการนี้คือ สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย กำจัดน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำและอิมัลชัน นอกจากนี้ยังสามารถรับ Shock load ได้มาก ตัวอย่างของการทำให้ลอย ได้แก่

Dissolved Air Flootation (DAF) มีหลักการคือการเป่าอากาศลงในน้ำเสียภายใต้ความดันสูงจนกระทั่งอากาศละลายน้ำเกินจุดอิ่มตัว จากนั้นปล่อยให้เข้าสู่สถานะความดันบรรยากาศ อากาศส่วนเกินก็จะแยกออกจากน้ำเป็นฟองเล็กๆ และพาตะกอนขึ้นสู่ผิวน้ำ

Induced Air Flootation (IAF) เป็นการเติมอากาศหรือเป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรงที่ความดันบรรยากาศ ทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถนำพาตะกอนต่างๆลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ แต่ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งและไขมันต่ำกว่าระบบ DAF

Vacuum Flootation การเป่าอากาศลงในน้ำเสียจนถึงจุดอิ่มตัวมี 2 วิธีคือ เป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรงหรือปล่อยให้อากาศเข้าไปในเครื่องสูบน้ำเอง ระบบนี้จะใช้ถังปิดสุญญากาศซึ่งจะเก็บน้ำที่ถูกเป่าอากาศลงไปจนถึงจุดอิ่มตัว ควบคุมการเปิดปิดด้วยวาล์ว อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำจะแยกออกมาในลักษณะของฟองอากาศเล็กๆ พาตะกอนต่างๆ ในน้ำเสยลอยขึ้นสู่ผิวน้ำในลักษณะ สกิม (Scum) แต่วิธีการซับซ้อนทำให้ไม่เป็นที่นิยม

- การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane processes) เช่น Reverse Osmosis, Ultrafiltration เป็นต้นใช้กำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำแต่ทำให้เกิดการอุดตันได้ง่ายและอายุใช้งานจำกัด จึงต้องมีการบำบัดข้างต้นก่อน ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับการดำเนินการแบบ Full scale

- การใช้ความร้อน (Thermal process) อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดน้ำมัน ซึ่งถ้าอุณหภูมิของน้ำมันในน้ำสูงขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันจะลดลงทำให้น้ำมันสามารถลอยขึ้นมาที่ผิวได้ง่าย ทำให้กำจัดน้ำมันออกจากน้ำได้ง่ายยิ่งขึ้น

#### 4. กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electro-Chemistry/Electrostatic processes)

เป็นการเพิ่มความสามารถในการทำลายเสถียรภาพและการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น (Coagulation) และการแยกสารโดยทำให้ลอยขึ้น (Flotation) ด้วยไฟฟ้า โดยผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้า โดยการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด แต่จะไม่ขึ้นกับปริมาณและขนาดของขั้วไฟฟ้า ข้อดีของระบบนี้คือ ประสิทธิภาพสูง ควบคุมง่าย และระบบบำบัดมีขนาดเล็ก

## 2.5 กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมี (Chemical oxidation) (มารุต โปราณานนท์, 2549)

กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมีเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยใช้สารเคมีในการออกซิไดซ์สารประกอบต่างๆ ในน้ำเสีย โดยจุดประสงค์ของกระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมีได้แก่

1. การกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ ที่มีความเข้มข้นต่ำในน้ำบาดาล
2. การบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง แต่มีปริมาณน้อย เพื่อลดความเป็นพิษ
3. การบำบัดน้ำเสียที่ย่อยสลายได้ยาก ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ให้สามารถถูกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น เพื่อส่งเข้ากระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพต่อไปได้
4. เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เพราะหากใช้กระบวนการบำบัดด้วยชีวภาพอย่างเดียว อาจทำให้ใช้เวลานานในการลดสารอินทรีย์ให้ได้ตามข้อกำหนด

การเกิดออกซิเดชันทางเคมี คือการเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียอิเล็กตรอนของอะตอม ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีนี้จึงเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสภาพของมลสารที่อยู่ในน้ำจากมลสารประเภทมีพิษมากไปเป็นมลสารประเภทมีพิษน้อยหรือไม่มีพิษ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ยังสามารถถูกย่อยสลายทางชีวภาพหรือถูกกำจัดโดยการดูดซับได้ดีขึ้นด้วย

ในกระบวนการออกซิเดชันทางเคมีจะพบว่ากลไกของปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีของสารอินทรีย์ โมเลกุลจะแตกออกเป็นโครงสร้างที่เล็กกลง และเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนจะสูงขึ้น โดยการเกิดออกซิเดชันทางเคมีจะขึ้นกับปริมาณสารอินทรีย์ที่สามารถออกซิไดซ์ได้ อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวออกซิไดซ์และสารอินทรีย์ และสภาวะทางเคมี ได้แก่ พีเอช (Marco, Esplugas, & Saum, 1997)

ในการเลือกใช้สารเคมีในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการออกซิเดชันจะมีข้อจำกัดในเรื่องของค่าใช้จ่ายสารเคมี ดังนั้นจึงมีข้อกำหนดในการเลือกตัวออกซิไดซ์ที่เหมาะสม (Jorgensen, 1979) คือ

1. ลักษณะน้ำเสียที่ต้องการกำจัดสารพิษ
2. ประสิทธิภาพการบำบัดต้องสูง
3. ราคาของสารเคมีต่ำ

สารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการออกซิเดชันทางเคมี มีดังนี้ (มารุต โปราณานนท์, 2549)

1. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (*Hydrogen peroxide, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>*) เป็นตัวออกซิเดนต์ที่มีประโยชน์อย่างมาก สามารถใช้โดยตรงหรือใช้กับตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนมากจะใช้ร่วมกับเฟอร์รัสซัลเฟต (Ferrous sulphate) หรือเกลือของเหล็กอื่นๆ เรียกว่า กระบวนการเฟนตัน ข้อดีโดยทั่วไปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีดังนี้

1. เป็นตัวออกซิแดนท์ที่ใช้กันทั่วไปในการบำบัดน้ำเสีย
2. มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง
3. จัดเก็บได้ง่าย
4. มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี
5. ไม่เกิดส่วนที่เป็นพิษหรือสีจากปฏิกิริยา

2. คลอรีน (Chlorine) เป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีที่ใช้ในการทำน้ำให้บริสุทธิ์ เนื่องจากคลอรีนจะไปทำลายจุลชีพ ข้อดีของคลอรีนคือ มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง มีราคาถูก และสามารถเติมคลอรีนลงไปในระบบได้ง่าย

3. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate) เป็นตัวออกซิแดนท์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำในทศวรรษที่ผ่านมา โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสามารถเติมลงไปในระบบได้ในรูปของแข็งหรือในรูปของสารละลาย ข้อดีของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตคือมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาสูง สามารถทำงานในช่วงพีเอชที่กว้าง แต่มีข้อเสียคือ มีราคาแพง และเกิดการตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ตลอดกระบวนการออกซิไดซ์ ทำให้ต้องมีการแยกตะกอนโดยการทำให้ใส (Clarifying) หรือการกรอง (Filtration) ซึ่งจะทำให้เกิดค่าใช้จ่ายสูงขึ้น

4. ออกซิเจน (Oxygen) โดยปกติการทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบอินทรีย์กับออกซิเจนจะไม่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความดันปกติ แต่มักจะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและความดันสูง ออกซิเจนเป็นตัวออกซิแดนท์ที่มีความแรงปานกลางต้องการการลงทุนสูงในการติดตั้ง

5. โอโซน (Ozone) ในระยะแรกมีการนำโอโซนไปใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและไวรัสโดยประสิทธิภาพในการทำลายมากกว่าคลอรีน 600-3,000 เท่า นอกจากนี้โอโซนไม่มีผลกับค่าพีเอช ต่อมามีการปรับใช้กับน้ำเสีย เช่น การกำจัดสี ในปัจจุบันยังไม่มีการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียมากนัก เนื่องจากมีราคาแพง

## 2.6 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes, AOPs)

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเป็นกระบวนการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล ที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงและสามารถออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว โดยไฮดรอกซิลเรดิคัลนี้อาจเกิดได้จากปฏิกิริยาเคมีที่ใช้แสงหรือไม่ใช้แสงก็ได้ ไฮดรอกซิลเรดิคัลจะไปทำหน้าที่ย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูปของมลพิษของสารอินทรีย์ เพื่อให้เกิดเป็นอนุมูลของสารอินทรีย์ที่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์โมเลกุลอื่นๆ ทำให้สารอินทรีย์เปลี่ยนโครงสร้างและมีขนาดเล็กลง ทำให้มีความเป็นพิษลดลง และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Feng, Hu, Yue, Zhu, & Lu, 2003)

โดยทั่วไปกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงจะเกิดที่อุณหภูมิและความดันปกติ ซึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงสามารถเกิดได้จากการทำปฏิกิริยา ozone, ozone/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/ozone, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>, Fenton's processes, and photocatalysis นอกจากนี้ยังมีตัวออกซิแดนท์ที่นิยมใช้ในกระบวนการนี้ อาทิเช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) หรือโอโซน (O<sub>3</sub>) โดยจะมีตัวเร่งปฏิกิริยาหรือไม่ก็ได้หรือใช้ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV)

ตัวอย่างการใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในงานต่างๆมีดังต่อไปนี้ (เจษฎา ถาวรศักดิ์, 2547)

1. ใช้กำจัดสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษซึ่งปนเปื้อนอยู่ในน้ำใต้ดิน
2. ใช้เป็นระบบบำบัดขั้นต้น (Pre-treatment) ก่อนเข้าสู่บำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ
3. ใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีสารพิษที่ขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์ เช่น ไซยาไนด์ และสารประกอบของโลหะหนัก เป็นต้น
4. ใช้เป็นระบบบำบัดน้ำขั้นสุดท้าย หลังจากกระบวนการบำบัดทางชีวภาพเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษหลงเหลืออยู่
5. ใช้ร่วมกับระบบบำบัดอื่นๆ

ตารางที่ 2. 1 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (เจษฎา ถาวรศักดิ์, 2547)

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ไม่ทำให้เกิดสลัดจ์ตกค้าง จึงไม่ต้องกำจัดสลัดจ์	1. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานค่อนข้างสูง
2. สารมลพิษอินทรีย์จะถูกออกซิไดซ์ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ	

ตารางที่ 2. 2 กลไกการเกิดปฏิกิริยากระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ, 2552)

กระบวนการ	กลไกเกิดปฏิกิริยา	แหล่งอ้างอิง
Ozone/Hydrogen peroxide	$H_2O_2 + 2O_3 \rightarrow 2OH\cdot + 3O_2$	(Zhou & Smith, 2002)
Hydrogen peroxide/UV	$H_2O_2 \xrightarrow{h\nu} 2OH\cdot$	(Zhou & Smith, 2002)
Fenton Chemistry	$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + OH\cdot + HO^-$ $Fe^{3+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{2+} + OOH\cdot + H^+$	(Dai, Qi, Zhao, & Zhang, 2008)
Photocatalysis	$Ti_2O_2 \xrightarrow{h\nu} h_{Ti}^+ + e_{Ti}^-$ $h_{Ti}^+ + H_2O \rightarrow OH_{Ti}\cdot + H^+$ $e_{Ti}^- + O_2 \rightarrow O_2(\pi^-)$ $O_2(\pi^-) + e_{Ti}^- \rightarrow O_2^{2-}$ $O_2^{2-} + H^+ \rightarrow HO_2$	(Zhou & Smith, 2002)
Electro-Fenton	$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + OH\cdot + HO^-$ $Fe^{3+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{2+} + OOH\cdot + H^+$ $Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$ $O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O_2$	(Jiang, Pétrier, & David Waite, 2002)

## 2.7 ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton Reaction)

ปฏิกิริยาเฟนตันจัดเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง ปฏิกิริยาเฟนตันค้นพบโดย H.j. Fenton ในปี 1984 ต่อมา Haber-Weiss ได้เสนอกลไกที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเฟนตันที่ทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH•) เป็นตัวออกซิแดนท์ที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง

ปฏิกิริยาเฟนตันคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) โดยมีเฟอร์รัสไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อสร้างไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH•) ซึ่งมีค่าศักย์ออกซิเดชัน (Oxidation potential) สูง โดยสูงกว่าคลอรีนและโอโซน แต่มีค่าศักย์สูงรองจากฟลูออรีนเท่านั้น ดังตารางที่ 3.3 ทำให้มีการนำเฟนตันไปใช้ในการบำบัดอย่างกว้างขวาง (ปฐมพานันทากุล, 2549)

ตารางที่ 2. 3 ความสามารถในการปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารเคมีชนิดต่างๆ (Rodriguez, 2003)

สารเคมีในปฏิกิริยาออกซิเดชัน	ความสามารถในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (โวลต์)
Fluorine	3.03
Hydroxyl radical	2.80
Atomic oxygen	2.42
Ozone	2.07
Hydrogen peroxide	1.77
Permanganate	1.67
Hypobromous acid	1.59
Chloride dioxide	1.5
Hypochlorous acid	1.49
Hypoiodous acid	1.45
Chlorine	1.36
Bromide	1.09

กลไกปฏิกิริยาเฟนตัน (Neyens & Baeyens, 2003)

สมการแสดงการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันแสดงดังนี้



เฟอร์รัสไอออน (Ferrous ion, Fe<sup>2+</sup>) เป็นตัวเริ่มต้นและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH•) ที่ทำปฏิกิริยาสมบูรณ์กับสารละลาย



นอกจากนี้ เฟอร์ริกไอออน (Ferric ion,  $\text{Fe}^{3+}$ ) อาจจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )

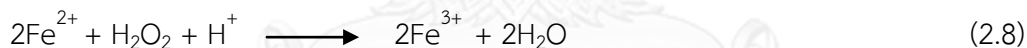


จากสมการที่ (2.3) และ (2.4) ปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์ริกไอออนเรียกว่า เฟนตันเสมือน (Fenton-like)



จากสมการที่ (2.7) พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{OH}\cdot$ ) ได้ ดังนั้นจะเกิดสมการที่ (2.1) ได้อีก ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ดังนั้นปฏิกิริยารวมของปฏิกิริยาเฟนตันคือ



จากสมการที่ (2.8) จะเห็นว่า  $\text{H}^+$  มีความสำคัญต่อการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กล่าวคือในการศึกษาปฏิกิริยาเฟนตันสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยา คือ สภาวะที่เป็นกรด ทั้งนี้สมการทั้งหมดไม่ได้เกิดขึ้นทุกสมการ แต่จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อ

- เฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะเกิดสมการที่ (2.1) และ (2.2)
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถ้ามีปริมาณมากเกินไป ในสภาวะที่เป็นกรดการเกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.3) และ (2.6) จะไม่เกิดขึ้น แต่จะเกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.1), (2.5) และ (2.7) แทน

ปฏิกิริยาเฟนตันกับสารอินทรีย์ (มารุต โปราณนท์, 2549)

ไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{OH}\cdot$ ) มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่รุนแรง สามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ (R) ได้ โดยไฮดรอกซิลแรดิคัล จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลของสารอินทรีย์ ดังปฏิกิริยา

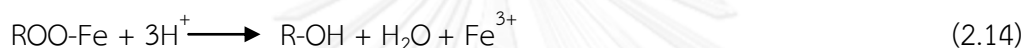




อนุมูลอิสระของสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะเกิดทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างรวดเร็วดังปฏิกิริยา



$R-OO^{\cdot}$  และ  $R-O^{\cdot}$  ไม่เสถียรจึงเกิดปฏิกิริยากับไอออนของเหล็กและโปรตอนดังปฏิกิริยา



ซึ่ง  $R-OH$  และ  $R-OOH$  จะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของ  $OH^{\cdot}$  ต่อไปจนได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

#### ข้อดีของปฏิกิริยาเฟนตัน

1. เหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีราคาถูกและไม่เป็นพิษ
2. มีการถ่ายโอนมวลสารไม่จำกัด เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาแบบ Homogeneous
3. ไม่ต้องการแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและออกแบบระบบง่ายกว่าการใช้ระบบแสง UV

#### ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาเฟนตัน (มณฑา ประดิษฐ์ชา, 2550)

1. พีเอช พบว่าพีเอชที่เหมาะสม ต่อการทำปฏิกิริยาเฟนตันคือประมาณ 3 ได้กล่าวนอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นไม่เสถียรจะเกิดการแตกตัวได้ง่ายที่ค่าพีเอชมากกว่า 10 ขึ้นไป

2. อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันสูงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมากถึง 40–50 องศาเซลเซียส จะทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยามีประสิทธิภาพลดลง กล่าวคือ ที่อุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะแตกตัวเป็นน้ำและออกซิเจนโดยทั่วไปปฏิกิริยาเฟนตันมักจะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 20-40 องศาเซลเซียส

3. สัดส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเหล็กที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันอยู่ในช่วงระหว่าง 1:5 ถึง 1: 25 ทั้งนี้อัตราส่วนที่แน่นอนจะขึ้นกับสารมลพิษ (ปฐมพร นันทกากุล, 2549)

4. ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นปัจจัยที่สำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในการสลายสารมลพิษ กล่าวคือ การสลายสารมลพิษจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณไฮโดรเจน

เปอร์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไปส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาจะไปรบกวนการวิเคราะห์ซีไอดี ทำให้ค่าซีไอดีที่ได้มีค่ามากเกินไปจริง (ปฐมพร นันทากุล, 2549)

## 2.8 กระบวนการเฟนตันเสมือน (Fenton-like Reaction)

เฟนตันเสมือน (Fenton-like) คือปฏิกิริยาการเฟนตันที่ไม่ใช้ เฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) เป็นตัวเร่งโดยอาจเป็นปฏิกิริยาเนื้อเดียวกัน (Homogeneous catalysts) หรือเป็นปฏิกิริยาเนื้อผสมก็ได้ โดยปกติใช้  $\text{Fe}^{3+}$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเหล็กออกไซด์ได้แก่ goethite ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), hematite ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) and ferrihydrite ( $\alpha\text{-Fe}_{10}\text{O}_{15}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) หรือโลหะทรานซิชัน เช่น  $\text{Cu(I)}$   $\text{Cr(II)}$  และ  $\text{Ti(II)}$  ที่สามารถทำปฏิกิริยากับ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ได้ (Yap et al., 2011)

กลไกปฏิกิริยาเฟนตันเสมือน (Hasan, Abdul Aziz, & Daud, 2012)

กลไกในปฏิกิริยาเฟนตันเสมือนจะใช้เฟอร์ริกไอออน (Ferric ions,  $\text{Fe}^{3+}$ ) จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ซึ่งจะเกิดเป็นวัฏจักรในการสร้างไฮดรอกซิลแรดิคัลเช่นเดียวกับปฏิกิริยาเฟนตัน ดังสมการ



เฟอร์ริกไอออนมีราคาถูกกว่า เฟอร์รัสไอออนทำให้เฟนตันเสมือนจึงเป็นกระบวนการน่าสนใจในการนำมาใช้โดยปฏิกิริยาทั้งสองมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน (Fu, Wang, & Tang, 2010)

ตารางที่ 2. 4 สรุปปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน

กระบวนการ	ตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยา	แหล่งที่มา
เฟนตัน (Fenton reaction) ( $\text{Fe}^{2+} / \text{H}_2\text{O}_2$ )	- พีเอช - อุณหภูมิ - ชนิดของสารมลพิษ (pollutant) - อัตราส่วนระหว่าง $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2$ - ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารมลพิษ	(มณฑา ประดิษฐ์ข้า, 2550)
เฟนตันเสมือน (Fenton-like reaction) ( $\text{Fe}^{3+} / \text{H}_2\text{O}_2$ )	- พีเอช - อัตราส่วนระหว่าง $\text{Fe}^{3+} : \text{H}_2\text{O}_2$	(Kiril Mert, Yonar, Yalili Kiliç, & Kestioğlu, 2010)

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด

Bensadok และคณะ 2008 ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ปนเปื้อนน้ำมันแร่ชนิด B22 ด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าโดยใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าเป็นการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นและประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการเมมเบรน โดยทำการเดินระบบแบบที่ละเทในถังปฏิกรณ์ขนาด  $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  มีตัวแปรที่ทำการศึกษา ซีโอดี, ความขุ่น, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า, ค่าพีเอชเริ่มต้น และความเข้มข้นของน้ำมัน ซึ่งได้ผลการศึกษาคือ ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าความเข้มข้นของน้ำมันจะลดลง โดยจะใช้อะลูมิเนียม 10 มิลลิกรัมกรัมต่อน้ำมัน 1 กรัม ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 6-7 สามารถบำบัดซีโอดีและความขุ่นได้ 92 และ 99% ตามลำดับ แม้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดโดยการรวมตะกอนทางไฟฟ้าจะมีค่าสูงแต่ยังไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำจึงทำการบำบัดด้วยกระบวนการเมมเบรนเป็นขั้นต่อไป (Bensadok et al., 2008)

มิ่งขวัญ บุตรวงศ์ (2543) ได้ทำการศึกษการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำมันตัดกลึงโลหะด้วยวิธีไบโอรีมีเดชันในดิน ได้ทำการศึกษา 3 ชุด ชุดแรกศึกษาปริมาณน้ำมันที่เหมาะสมโดยใช้ปริมาณน้ำมันที่ 2% 4% 6% และ 8% ผลการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำมันที่เหมาะสมในการย่อยสลายคือ 6% มีค่าพีเอชประมาณ 7.02 จำนวนจุลินทรีย์ในดินเพิ่มมากขึ้นกว่าปริมาณน้ำมันในช่วงอื่น ทำให้สามารถเกิดการย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนทั้งหมดในวันที่ 63 ได้ 46.15% และย่อยสลายอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนได้ 86.42 % ในชุดที่สอง เป็นการศึกษาเปรียบเทียบการบำบัดน้ำทิ้งน้ำมันตัดกลึงโลหะโดยธรรมชาติกับการบำบัดแบบไบโอรีมีเดชันในดิน 3 ชนิด คือ ดินนา ดินสวน และดินปนเปื้อนน้ำมัน(ปริมาณน้ำมันตัดกลึงโลหะ 6%) ผลการศึกษาพบว่า ดินนาที่มีการเติมปุ๋ยยูเรียที่มีค่า C/N 27.34 สามารถย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนทั้งหมดสูงสุด 52.45% และย่อยสลายอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนได้ 94.07 % ในวันที่ 49 ของการทดลอง โดยการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนให้กองดินจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนให้สูงขึ้นและเพิ่มอัตราการย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนที่มีโซ่ยาวเพิ่มขึ้น ชุดที่3เป็นการศึกษาความสามารถในการรองรับปริมาณไฮโดรคาร์บอนของกองดิน เมื่อค่า C/N ของกองดินเป็น 27:1 โดยใช้ปริมาณน้ำมันที่ 10% 12% และ 15% วิเคราะห์พีเอช จำนวนจุลินทรีย์ในดินปริมาณของไฮโดรคาร์บอน พบว่าตัวอย่างดิน ที่มีปริมาณน้ำมัน 10% มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงสุด โดยสามารถย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนทั้งหมดสูงสุด 42.67% และย่อยสลายอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนได้ 90.86 % ในวันที่ 105 โดยตัวอย่างดินที่มีปริมาณน้ำมันต่ำมีแนวโน้มย่อยสลายได้เร็วกว่าตัวอย่างดินที่มีปริมาณน้ำมันสูงขึ้น (มิ่งขวัญ บุตรวงศ์, 2543)

วุฒิวัติ หล่อตระกูล (2552) ได้ทำการศึกษากระบวนการโคเอเลสเซนซ์สำหรับการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นในน้ำเสียโดยเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเคลือบผิวด้วยวิธีการจุ่มในสารประกอบซิลิกาและเฮกซะเมทิลไดซิลาเซน (HMDS) เพื่อเพิ่มให้เส้นใยมีความไม่ชอบน้ำมากยิ่งขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษปริมาณน้ำมันในน้ำเสียจากค่าซีโอดี และขนาดของอนุภาคน้ำมันด้วยกล้องจุลทรรศน์ จากผลการทดลองพบว่าเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยที่ปรับปรุงพื้นผิวมีสมบัติความไม่ชอบน้ำต่างกัน โดยมีขนาดมุมสัมผัสของหยดน้ำมันในน้ำเท่ากับ 72.68 และ

19.01 องศาตามลำดับ เมื่อทำการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าค่าซีโอดีที่ผ่านชั้นตัวกลางความสูง 5-20 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 95.28-98.43 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5-25 ลิตรต่อชั่วโมงมีค่าลดลง มีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ระหว่างร้อยละ 24-68 ส่วนในเส้นใยสแตนเลสจะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 27-72 (วุฒิวดี หล่อตระกูล, 2552)

## 2. กระบวนการเพนตัน (Fenton Processes)

Jagadevan และคณะ 2011 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด ใช้เพนตัน ร่วมกับการบำบัดทางชีวภาพออกซิเดชัน (Fenton-biological oxidation) ของน้ำมันตัด โดยใช้สถิติ ในการคำนวณปริมาณสารเพนตัน (ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเฟอร์รัสไอออน) ที่เหมาะสมเพื่อให้มีความเข้มข้นของสารน้อยที่สุด ใช้ a five-level-two-variable central composite experimental design ผลการทดลองพบว่า ที่พีเอช 3 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 14.9 มิลลิโมล เฟอร์รัสไอออน 5.56 มิลลิโมล อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที ค่าซีโอดีและทีโอซีลดลงเหลือ 64.73% และ 55.33% ตามลำดับ จากนั้นนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดข้างต้นแล้วไปบำบัดต่อด้วย กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ โดยสามารถลดซีโอดีได้ 92% และทีโอซี (TOC) 86% โดยใช้การ บำบัดทั้งสองขั้นตอน (Jagadevan, Dobson, & Thompson, 2011)

Lucas และ Peres (2009) ศึกษาการกำจัดซีโอดีจากน้ำเสียโรงงานน้ำมันมะกอก ด้วยกระบวนการเพนตัน ซึ่งได้ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท โดย ศึกษาจากผลกระทบภายใต้สภาพการทำงานที่แตกต่างกันได้แก่ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ และเฟอร์รัสไอออน อุณหภูมิ พีเอชเริ่มต้น โดยค่าโออาร์พี (ORP) พีเอช และค่าออกซิเจน ละลายน้ำ (DO) สามารถอ่านค่าได้แบบออนไลน์ ผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชเริ่มต้นคือ 3.5 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วน  $H_2O_2 : Fe^{2+}$  คือ 15 และอัตราส่วนน้ำหนัก  $H_2O_2/COD = 1.75$  ทำให้ สามารถลดซีโอดีได้ 70% ส่วนการศึกษาด้านจลนพลศาสตร์ (Kinetic) โดยใช้รูปแบบปฏิกิริยาอันดับ ที่ 1 เสมือน (pseudo-first-order model) ในการทดลองแสดงถึงอุณหภูมิที่แตกต่างกันสามารถ คำนวณได้ด้วยสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) และพลังงานก่อกัมมันต์ ( $E_a$ ) สำหรับ pseudo-first-order model คือ 28.2 kJ/mol (Lucas & Peres, 2009)

ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ (2552) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วย กระบวนการโคแอกกูเลชันและโซโน-เพนตัน มีค่าซีโอดีเริ่มต้น 3,500-26,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของคลื่นความถี่เหนือเสียง อุณหภูมิของปฏิกิริยา ความเข้มข้น ของน้ำมัน การเพิ่มประสิทธิภาพการออกซิไดซ์ด้วยการเติมสารออกซิแดนซ์ชนิดอื่น เช่น ไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ การเติมอากาศ และการใช้เพนตัน ผลการศึกษาพบว่าการใช้อัตราขบวนการในการ ออกซิเดชันเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำมัน ตัดมีขนาดเล็กและมีค่าความคงตัวสูง การใช้สารเพนตันร่วมกับการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงจะทำให้ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงถึง 92.3% โดยใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 140 กรัม และสารเฟอร์รัสซัลเฟต ปริมาณ 500 มิลลิกรัมของเหล็กต่อน้ำเสีย (ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ, 2552)

นุสรา โรจน์วิลาวัลย์ (2554) ศึกษากระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและ กระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน ได้แก่ เพนตัน อิเล็กโตรเพนตันและโฟโตอิเล็กโตรเพนตัน ในการ บำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ส่วนของ

กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว และ พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัด (พีเอช ของแข็งละลายน้ำ และปริมาณเพอร์ริส ไอออน) ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ คือระยะห่างระหว่างขั้ว 1-3 เซนติเมตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 30-60 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และระยะเวลาเก็บ 30-60 นาที โดยมีประสิทธิภาพการบำบัด 90 % (ค่าความเข้มข้นน้ำมันตัดประมาณ 0.1 กรัมต่อลิตร) แต่น้ำ ที่ผ่านการบำบัดแล้วยังไม่ผ่านมาตรฐานจึงมีการประยุกต์ร่วมกับกระบวนการเฟนตันและอิเล็กโตร เฟนตัน โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราส่วนเพอร์ริสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวล และระยะเวลาในการกักเก็บ พบว่า กระบวนการอิเล็กโตรเฟนตันมีสภาวะการทำงานที่เหมาะสมคือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 71.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราส่วนเพอร์ริสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือ 1:5 – 1:10 โดยมวล และระยะเวลาการเก็บกัก 15-60 นาที จากนั้นจึงทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่องด้วยการประยุกต์ใช้ กระบวนการรวมตะกอนไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตันในสภาวะที่เหมาะสมพบว่า ประสิทธิภาพรวมสูงสุดในการบำบัดน้ำเสียคือ 99% และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าผ่านค่ามาตรฐาน (นุสรวิลาวัลย์, 2554)

วุฒิ วิพันธ์พงษ์ (2540) ศึกษาการใช้สารเคมีเฟนตันในการกำจัดสีและสารอินทรีย์ใน น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 0, 200, 500, 800 และ 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วนโดยโมลระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับ เหล็กที่ 5:1, 10:1 และ 20:1 เวลาทำปฏิกิริยาที่ 60, 120 และ 180 นาที น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองมี 4 โทนสีคือ โทนสีดำ โทนสีม่วง โทนสีแดง และโทนสีน้ำตาลอ่อน ซึ่งได้เตรียมค่าซีไอดีประมาณ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากันทุกโทนสี ผลการทดลองพบว่า เมื่อให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วน 5:1 ในการบำบัดน้ำเสียโทนสีดำ, โทนสีแดง, โทนสีน้ำตาลอ่อน และ อัตราส่วน 10:1 สำหรับการบำบัดน้ำเสียโทนสีม่วง สามารถกำจัดซีไอดีได้สูงกว่า 80% โดยใช้เวลาใน การทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง (วุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2540)

### 3. กระบวนการเฟนตันเหมือน แบบเนื้อเดียว (Homogeneous fenton-like)

Hodaifa และคณะ 2013 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำมัน มะกอกด้วยกระบวนการเฟนตันเหมือนในถังปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องที่ pilot plant ปัจจุบันที่มีผลต่อการ เดินระบบ เช่น พีเอช เวลา ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณเพอร์ริค รวมไปถึงอัตราส่วน ความเข้มข้น  $\text{FeCl}_3$  ต่อ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ผลการทดลองพบว่า ในขั้นตอนเริ่มต้นปฏิกิริยาเฟนตันเข้าสู่ steady state ภายใน 3 ชั่วโมง อัตราส่วนความเข้มข้น  $\text{FeCl}_3$  ต่อ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.026-0.058 w/w ที่ความเข้มข้นเพอร์ริคไอออน 0.35- 0.40 กรัมต่อลิตร พีเอช 3 ที่อุณหภูมิห้อง ค่าซีไอดีในขั้น สุดท้ายของน้ำทิ้งอยู่ประมาณ 129  $\text{mg O}_2 / \text{L}$  (ความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้นเท่ากับ 4017  $\text{mg O}_2 / \text{L}$ ) และความเข้มข้นของฟีนอลทั้งหมดประมาณ 0.5  $\text{mg} / \text{L}$  (ความเข้มข้นฟีนอลทั้งหมดเริ่มต้นเท่ากับ 66.2  $\text{mg} / \text{L}$ ) ตามลำดับ สุดท้ายน้ำที่ผ่านการบำบัดก็สามารถนำไปใช้ในการชลประทานหรือทิ้ง โดยตรงในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน (Hodaifa, Ochando-Pulido, Rodríguez-Vives, & Martínez-Ferez, 2013)

Kiril และคณะ 2010 ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันมะกอกโดย ทำ การบำบัดขั้นต้นก่อนด้วยกระบวนการทางกายภาพเคมีด้วยเทคนิค แอซิด แคร็กกิง (Acid cracking) โคแอกกูเรชัน-ฟล็อกกูเลชัน และเฟนตันและเฟนตันเสมือน ผลการทดลองการบำบัด ขั้นต้นด้วยเทคนิค acid cracking และ coagulation–flocculation ก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดด้วย ระบบเอเอส พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมากกว่า 67% และฟีนอลมากกว่า 72% ส่วน กระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมากกว่า 80% และฟีนอล มากกว่า 85% เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดีและฟีนอลของกระบวนการเฟนตันและเฟน ตันเสมือนมีค่าสูงกว่าจึงสนใจเทคนิคนี้ โดยทำการศึกษาดูแปรต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดีและฟีนอลโดยใช้กระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน (Kiril Mert et al., 2010) ได้ผลการ ทดลองดังตาราง

ตารางที่ 2. 5 ผลปริมาณสารเคมีและประสิทธิภาพการบำบัด

ผลการวิจัย	pH	สารเคมี	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	ประสิทธิภาพ บำบัดCOD	ประสิทธิภาพ บำบัด ฟีนอล
Fenton	3	Fe <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 3000 mg/L(10.74mM )	3500 mg/L(100mM)	81%	86%
Fenton-like	3	FeCl <sub>3</sub> 2500 mg/L (8.93mM)	3000 mg/L (90mM)	88%	91%

Nieto และคณะ 2011 ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจาก กระบวนการสกัดน้ำมันมะกอกด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยสารเคมีได้แสดงการย่อยสลายสารอินทรีย์ อย่างมีประสิทธิภาพด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือน โดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยากับ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้ถึงปฏิกรณ์แบบที่ละเท ที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 281-285 เคลวิน พี เอช 3.0 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 กรัมต่อลิตร อัตราส่วนเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือ 0.04 สามารถบำบัดซีโอดีและฟีนอลได้ 92.6 % และ 99.8 % ตามลำดับ จลนพลศาสตร์ (kinetic) สามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาลำดับที่1 ที่มี 2 ขั้นตอน โดย kinetic parameters ที่อุณหภูมิห้องและที่พีเอชเท่ากับ 3 สามารถคำนวณได้ในช่วงอุณหภูมิ 278-313 เคลวิน ช่วงอุณหภูมิที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 303 เคลวิน โดยในการทดลองนี้จะศึกษาอุณหภูมิที่ แตกต่างกันสามารถคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (E<sub>a</sub>) ได้ 8.7 kJ mol<sup>-1</sup> ในสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) (Nieto, Hodaifa, Rodríguez, Giménez, & Ochando, 2011)

Üstün และคณะ 2010 (Üstün, Solmaz, Morsünbül, & Azak, 2010) ศึกษา การสลายตัวและ mineralization ของ 3-indole butyric acid (IBA)ซึ่งเป็นส่วนประกอบในยาฆ่า

แมลง ในสารละลายด้วยเพนตันและเพนตันเสมือน โดยศึกษาที่ตัวแปรต่างๆ พีเอช ความเข้มข้นของเพอร์รัสและเพอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$  และ  $\text{Fe}^{3+}$ ) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลการทดลองพบว่า การกำจัดซีไอดีที่ได้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ อัตราส่วน  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$  เป็น 0.2 mM/0.6mM และอัตราส่วน  $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2$  เป็น 0.2 mM/1.0mM ที่พีเอช 3 ในกระบวนการเพนตันและเพนตันเสมือนตามลำดับ ความเข้มข้น IBA คือ 0.5 mM การย่อยสลายของ IBA และ Mineralization เป็น จลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 เสมือน (pseudo first-order kinetics) ในขณะที่การลดลงของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเพอร์รัสและเพอร์ริกไอออนเป็นจลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ (Zero-order kinetic) โดยที่ทั้งสองระบบอยู่ในการทดลอง การสลายตัวของ IBA 97% ผ่านระบบทั้งสอง ในช่วงแรกจะเกิดปฏิกิริยาเพนตันสร้างไฮดรอกซิลแรดิคัล เกิดการย่อยสลายอย่างช้าๆภายในกระบวนการเพนตันเสมือนในกระบวนการเพนตัน ในกระบวนการเพนตันเสมือนเฟสเริ่มต้นจะใช้เวลานานกว่าเพนตันเนื่องจากขั้นตอนการสร้างไฮดรอกซิลแรดิคัลที่อัตราต่ำ อย่างไรก็ตามการสลาย IBA เท่ากับ 98% (Üstün, Solmaz, Morsünbül, & Azak, 2010)

#### 4. กระบวนการเพนตันเสมือน แบบสารเนื้อผสม (Heterogeneous fenton-like)

Niu และคณะ 2011 ศึกษาการกำจัด sulfathiazole ด้วย Humic acid coated  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetic nanoparticles ( $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{HA}$ ) โดย  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{HA}$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สร้างไฮดรอกซิลแรดิคัลได้เมื่อมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาทำปฏิกิริยา การสลาย sulfathiazole ขึ้นกับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลาย อัตราของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของ  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{HA} : \text{H}_2\text{O}_2$  เมื่อสารละลายมี  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{HA}$  3 g/ L และมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.39M sulfathiazole สลายตัวภายในเวลา 1 ชั่วโมง และปริมาณ ทีโอซีถูกกำจัดมากกว่า 90% ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ซัลเฟต คาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจน (Niu et al., 2011)

Tian และคณะ 2011 ได้ศึกษาการสังเคราะห์ไอรอนโมลิบเดต (Iron molybdate) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อผสมในเพนตันเสมือนเพื่อใช้ย่อยสลาย Acid Orange II (AOII) ผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีประสิทธิภาพสูงในการย่อยสลาย Acid Orange II ที่พีเอชเป็นกลาง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 6.7 ประสิทธิภาพการย่อยสลาย Acid Orange II 94.1% ภายในเวลา 60 นาที นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับผลกระทบเล็กน้อยถ้าทำปฏิกิริยาพีเอชในช่วงกว้าง 3.0-9.0 การใช้ไอรอนโมลิบเดตสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพที่ต่ำของเพนตันที่พีเอชเป็นกลางและเบสได้ โดยพบที่ไอรอนโมลิบเดตมีปริมาณเหล็กหลุดออกมาน้อยเนื่องจากมีโครงสร้างโมเลกุลที่ดี มีความเสถียร และไม่สูญเสียความสามารถการทำงานหลังจากใช้วนซ้ำมาแล้ว 5 ครั้ง (S. H. Tian, Tu, Chen, Chen, & Xiong, 2011)

Zhang และคณะ 2012 ได้ศึกษาการใช้เพนตันเสมือนชนิดเนื้อผสม (heterogeneous Fenton-like) โดยใช้เถ้าลอยที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดไนตริก (nitric-acid-activated fly ash, AFA) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัด พารา-ไนโตรฟินอล (p-nitrophenol, p-NP) จากน้ำ ทั้งนี้สมบัติทางกายภาพเคมีของ AFA ดีกว่า เถ้าลอยดิบ (Raw fly ash, RFA) ภายใต้สภาวะการทดลองที่ พีเอช ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 83.3-333 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ AFA 5.0-20 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 298-348 เคลวิน อัตราการกำจัดพารา-ไนโตรฟินอลเพิ่มขึ้นเมื่อ

เพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณ AFA และอุณหภูมิ โดยมีอัตราการกำจัดมากที่สุด 98% ที่พีเอช เมื่อปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 166.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ AFA 10 กรัมต่อลิตร และอุณหภูมิ 298 เคลวิน (A. Zhang, Wang, Zhou, Jiang, & Liu, 2012)

Aravindhan และคณะ 2006 ศึกษาการกำจัดฟีนอลด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเพนตันเสมือนแบบเนื้อผสม (Heterogenous photo electro Fenton-like) โดยใช้อนุภาคนาโนเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (nano-zero valent iron) โดยมีความเข้มข้นของฟีนอลและพีเอชเริ่มต้นที่ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 6.2 พบว่าปริมาณอนุภาคนาโนเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 0.5 กรัมต่อลิตร 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 12 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ด้านจลนพลศาสตร์ (kinetic) สามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาลำดับที่ 1 แบบเสมือน (Aravindhan, Fathima, Rao, & Nair, 2006)

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ที่กล่าวมาในขั้นต้นสามารถนำมาเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเพนตันและเพนตันเสมือนได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2. 6 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการต่างๆ

กระบวนการ	ประเภทน้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ผลการศึกษา	แหล่งที่มา
เพนตัน	น้ำมันตัด	- ปริมาณ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ - ปริมาณเฟอร์รัสไอออน - พีเอช - ประสิทธิภาพในการบำบัด	- ปริมาณ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 140 g/l - ปริมาณเฟอร์รัสไอออน 500 mg/l - พีเอช 1.7 - ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี 91.3%	(ชนันท์ เฉลิมสิน สุวรรณ, 2552)
	น้ำมันตัด	- อัตราส่วนเฟอร์รัสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $Fe^{2+} : H_2O_2$ ) - ระยะเวลาในการกักเก็บ - พีเอช - ประสิทธิภาพในการบำบัด	- อัตราส่วนเฟอร์รัสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม 1:5 และ 1:10 - เวลาในการกักเก็บ 60 นาที - พีเอช 3 - ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีมากกว่า 80%	(นุสรรา โรจน์วิลาวัลย์, 2554)
	น้ำมันตัด	- พีเอช - อุณหภูมิ	- พีเอช 3 - อุณหภูมิ 20 องศา	(Jagadevan et al.,



กระบวนการ	ประเภท น้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ผลการศึกษา	แหล่งที่มา
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์</li> <li>- ปริมาณเฟอร์รัสไอออน</li> <li>- ประสิทธิภาพในการบำบัด</li> </ul>	เซลเซียส <ul style="list-style-type: none"> <li>- ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 14.9 mM</li> <li>- ปริมาณเฟอร์รัสไอออน 5.56 mM</li> <li>- ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี 64.73% และทีโอซี 55.33%</li> </ul>	2011)
เพนตัน	โรงงาน ฟอกย้อม	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อัตราส่วนเฟอร์รัสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (<math>Fe^{2+} : H_2O_2</math>)</li> <li>- เวลาในการทำปฏิกิริยา</li> <li>- ประสิทธิภาพในการบำบัด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อัตราส่วนเฟอร์รัสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม 1:5 และ 1:10</li> <li>- เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที</li> <li>- ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีมากกว่า 80%</li> </ul>	(วุฒิ วิพันธ์ พงษ์, 2540)
เพนตันเสมือน แบบเนื้อเดียว	น้ำมัน มะกอก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- พีเอช</li> <li>- ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์</li> <li>- ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์</li> <li>- ประสิทธิภาพในการบำบัด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- พีเอช 3</li> <li>- ปริมาณปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ 2500 mg/l (8.93 mM)</li> <li>- ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3000 mg/l (90 mM)</li> <li>- ประสิทธิภาพในการบำบัด 88%</li> </ul>	(Kiril Mert et al., 2010)
	น้ำมัน มะกอก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อัตราส่วนเฟอร์ริกต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (<math>Fe^{3+} : H_2O_2</math>)</li> <li>- พีเอช</li> <li>- อุณหภูมิ</li> <li>- ประสิทธิภาพในการบำบัด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อัตราส่วนเฟอร์ริกต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ 0.04</li> <li>- พีเอช 3</li> <li>- อุณหภูมิ 303 เคลวิน</li> <li>- ประสิทธิภาพในการบำบัด 92.6%</li> </ul>	(Nieto et al., 2011)

กระบวนการ	ประเภท น้ำเสีย	ตัวแปรที่ศึกษา	ผลการศึกษา	แหล่งที่มา
เฟนตันเสมือน แบบเนื้อผสม	Acid orange II (AOII)	- พีเอช - ปริมาณไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ - ปริมาณไอรอนโมลิบ เดต - เวลาในการทำ ปฏิกิริยา - ประสิทธิภาพในการ บำบัด	- พีเอช 6.7 - ปริมาณไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ 18 mM - ปริมาณไอรอนโมลิบ เดต 1.4 g/l - เวลาในการทำ ปฏิกิริยา 60 นาที - ประสิทธิภาพในการ บำบัด 94.1%	(S. H. Tian et al., 2011)
เฟนตันเสมือน แบบเนื้อผสม	Sulfona mides	- พีเอช - ปริมาณไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ - ปริมาณ Magnetite - เวลาในการทำ ปฏิกิริยา - ประสิทธิภาพในการ บำบัด	- พีเอช 5.5 - ปริมาณไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ 0.93 M - ปริมาณ Magnetite 3 g/l - เวลาในการทำ ปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง - ประสิทธิภาพในการ บำบัดที่โอซีมากกว่า 90 %	(Niu et al., 2011)

## 2.10 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษามาพบว่าน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดที่เกิดจากการใช้น้ำมันตัดโลหะเพื่อเป็นสารหล่อลื่นและหล่อเย็นในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนโลหะ น้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์สูงทำให้เป็นมลพิษทำให้ต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งจากหลายๆงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการเฟนตันเสมือนทั้งแบบเนื้อเดียว (เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) และแบบเนื้อผสม (ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) สามารถบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารมลพิษในรูปแบบต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มักไม่พบงานวิจัยที่ทำการศึกษากการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดมากนัก และจากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษามาพบว่ากระบวนการเฟนตันเสมือนทั้งแบบเนื้อเดียว (เฟอร์ริกคลอไรด์) มีราคาถูกกว่าเฟอร์รัสซัลเฟตที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตัน นอกจากนี้ในกระบวนการเฟนตันเสมือน (ไอรอนโมลิบเดต) ยังสามารถทำปฏิกิริยาได้ที่สภาวะพีเอชกลางๆ และยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาและเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือนโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ และไอรอนโมลิบเดตแทนเฟอร์รัส

## บทที่ 3

### แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แผนการทดลอง

การวิจัยนี้ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนคือ

##### 3.1.1 การเตรียมการทดลอง

3.1.1.1 ศึกษาสมบัติทั่วไปของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด

3.1.1.2 สังเคราะห์ไอรอนโมลิบเดต

3.1.1.3 ศึกษาคุณลักษณะของไอรอนโมลิบเดต

3.1.2 การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดแบบเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวโดยเดินระบบแบบทีละเทคด้วย 2 เทคนิคดังนี้

3.1.2.1 กระบวนการเฟนตัน โดยใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต

3.1.2.2 กระบวนการเฟนตันเสมือน โดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์และไอรอนโมลิบเดต

3.1.3 การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดแบบแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยเดินระบบแบบทีละเทคด้วย กระบวนการเฟนตันโดยใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต

#### 3.2. วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.2.1 วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องวัดค่าพีเอช (Seven Easy, METTLER TOLEDO)

2. เครื่องปั่นกวนน้ำ บริษัท เบคไทย (ประเทศไทย) จำกัดรุ่น IKA

3. เครื่องมือวิเคราะห์ความขุ่น Loviond รุ่น TurbiCheck

4. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) (Genesys 10

UVScanning, Single cell holder, Thermo Fisher Scientific, USA)

5. นาฬิกาจับเวลา

6. อุปกรณ์วัดค่าซีไอดี

- หลอดทดสอบวัดค่าซีไอดี ขนาด 25 ×150 มม. พร้อมฝาจุกเกลียวทำด้วยเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene ,TFE)

- ตู้อบ (Hot air oven)

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

- กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 200, 500 และ 1,000 มิลลิลิตร

- ไมโครปิเปต (Micro Pipet) ขนาด 1, 5 และ 10 มิลลิลิตร

7. เครื่องวัดทีโอซี (Shimadzu รุ่น TOC Tcvh serial H51304300493H2)

8. เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)

9. เครื่องวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffractometer, XRD)

(Model D8 Advance, Bruker AXS)

10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด Scanning Electron Microscope with EDS (SEM-EDS) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 และ Link ISIS Series 300
11. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)

### 3.2.2 สารเคมี

1. น้ำมันตัด บริษัท Castrol cooledge BI
2. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid,  $H_2SO_4$ ) ยี่ห้อ Qrec
3. เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride,  $FeCl_3$ ) ยี่ห้อ Ajax
4. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ยี่ห้อ Ajax
5. สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต ( $FeSO_4$ ) ยี่ห้อ Ajax
6. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $NH_4OH$ ) ยี่ห้อ Panreac
7. สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต ( $(NH_4)_6MoO_{24} \cdot H_2O$ ) ยี่ห้อ Ajax
8. เมอร์คิวรีซัลเฟต ยี่ห้อ Qrec
9. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ยี่ห้อ Qrec
10. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ยี่ห้อ Ajax
11. สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $KMnO_4$ ) ยี่ห้อ Ajax
12. สารละลายมาตรฐาน Potassium Dichromate Didestion ยี่ห้อ Ajax
13. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ละลาย ( $NH_4C_2H_3O_2$ ) ยี่ห้อ Ajax
14. สารละลายมาตรฐาน Ferrous Ammonium Sulphate ยี่ห้อ Ajax
15. กรดอะซิติก (Glacial acetic,  $CH_3COOH$ ) ยี่ห้อ Qrec
16. สารละลายไอรอนไนเตรต (Iron nitrate) ยี่ห้อ Ajax
17. สารละลายฟีนแอนโธรีน 1,10-phenanthroline ( $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$ ) ยี่ห้อ Ajax

### 3.3. วิธีดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3. 1 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เครื่องมือ / วิธีวิเคราะห์
ค่าพีเอช	เครื่องวัด pH-meter
ความขุ่น	เครื่องวัดความขุ่น
ค่าซีโอดี	Dichromate Close Reflux Method (AWWA 508 A.)*
ค่าทีโอซี	Total Organic Carbon Analyzer
ปริมาณ $Fe^{2+}$ และ $Fe^{3+}$ **	Phenanthroline method (AWWA.)
โครงสร้างผลึก	Powder X-ray diffraction (XRD)

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เครื่องมือ / วิธีวิเคราะห์
ขนาดของอนุภาคและลักษณะพื้นผิวและปริมาณธาตุ	Scanning Electron Microscope with EDS (SEM-EDS)

\*วิธีการวิเคราะห์แสดงดังภาคผนวก ก

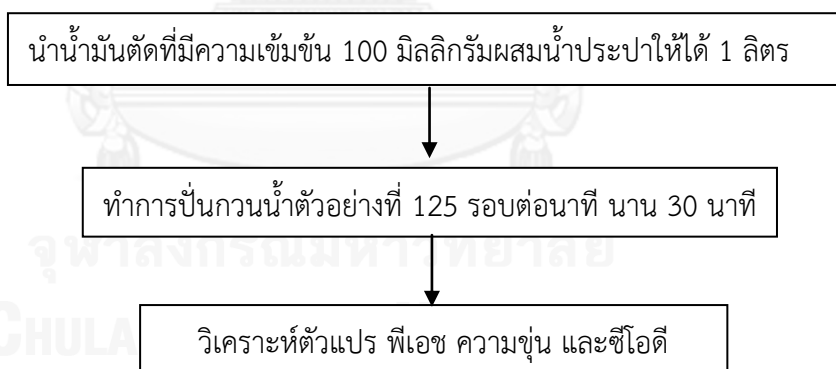
\*\* ปริมาณเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) สามารถหาค่าได้จากการคำนวณ

### การทดลองที่ 3.3.1 วิเคราะห์สมบัติน้ำเสียจากน้ำมันตัด

ตารางที่ 3. 2 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ 2. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1. น้ำประปา 2. 100 มิลลิกรัม/ลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง	1.1. ค่าซีโอดี 1.2. ค่าความขุ่น 1.3. ค่าพีเอช

\* ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

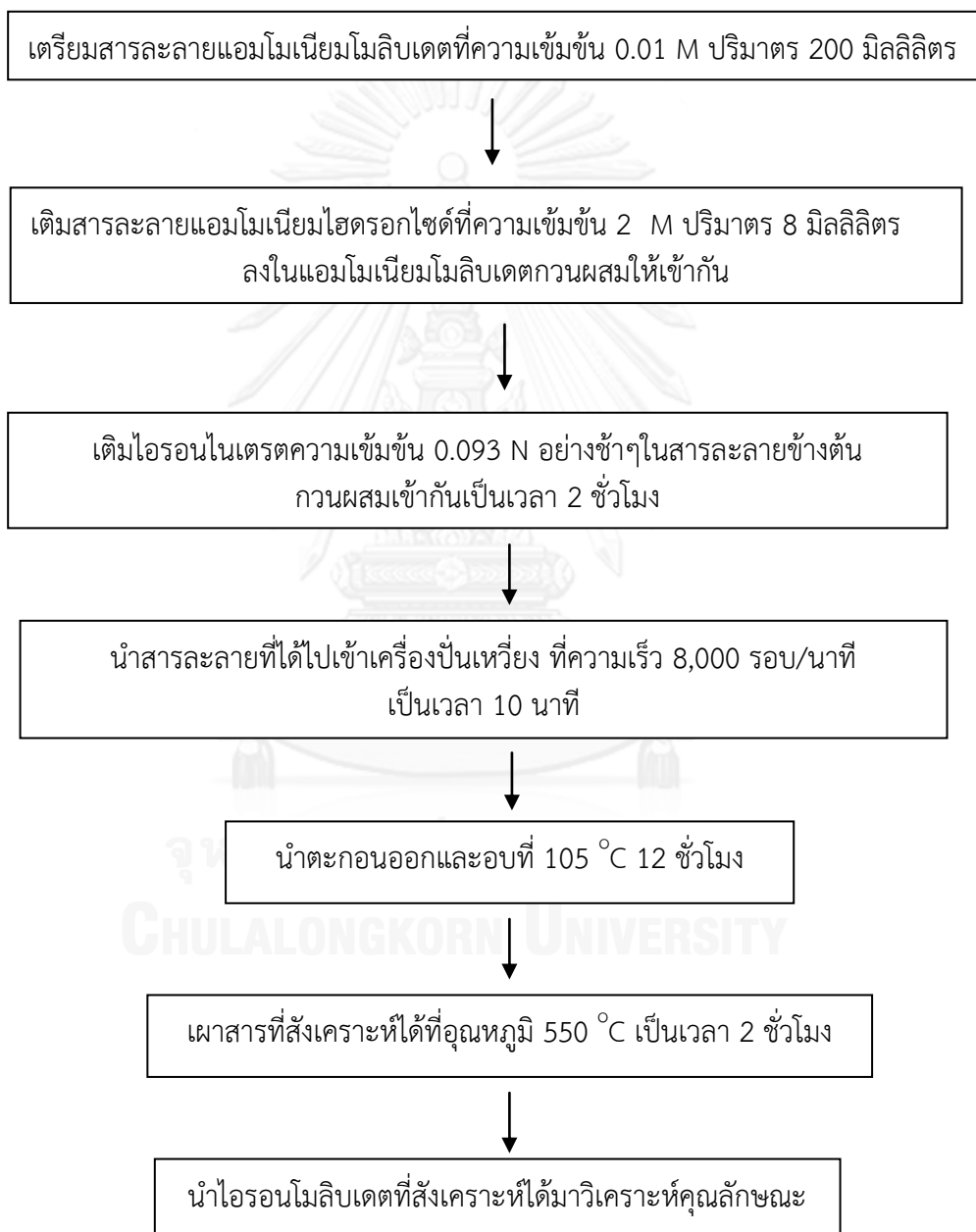


ภาพที่ 3. 1 แผนผังการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ (ธนนท์ เกลิมสินสุวรรณ, 2552)

### การทดลองที่ 3.3.2 สังเคราะห์ไอรอนโมลิบเดต (S. H. Tian et al., 2011)

การสังเคราะห์ไอรอนโมลิบเดตมีขั้นตอนคือขั้นแรกเตรียมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดตที่ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 8 มิลลิลิตรกวนผสมให้เข้ากันต่อมาจึงค่อยๆเติมไอรอนไนเตรดความ

เข้มข้น 0.093 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตรอย่างช้าๆในสารละลายข้างต้น กวนผสมเข้ากันเป็นเวลา 2 ชั่วโมงได้สารเนื้อผสมสีน้ำตาล จะได้จากนั้นนำสารเนื้อผสมที่ได้ไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาทีแล้วจึงนำส่วนที่เป็นตะกอนออกแล้วจึงนำไปอบต่อที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำตะกอนที่ได้ไปเผาต่อที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3. 2 แผนผังการสังเคราะห์ไอรอนโมลิบเดต

การทดลองที่ 3.3.3 ศึกษาคุณลักษณะของไอรอนโมลิบเดต

การทดลองที่ 3.3.3.1 วิเคราะห์รูปร่างลักษณะและปริมาณธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด Scanning Electron Microscope with EDS (SEM-EDS) ทำการส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 3.3.3.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไอรอนโมลิบเดตด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) ทำการส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

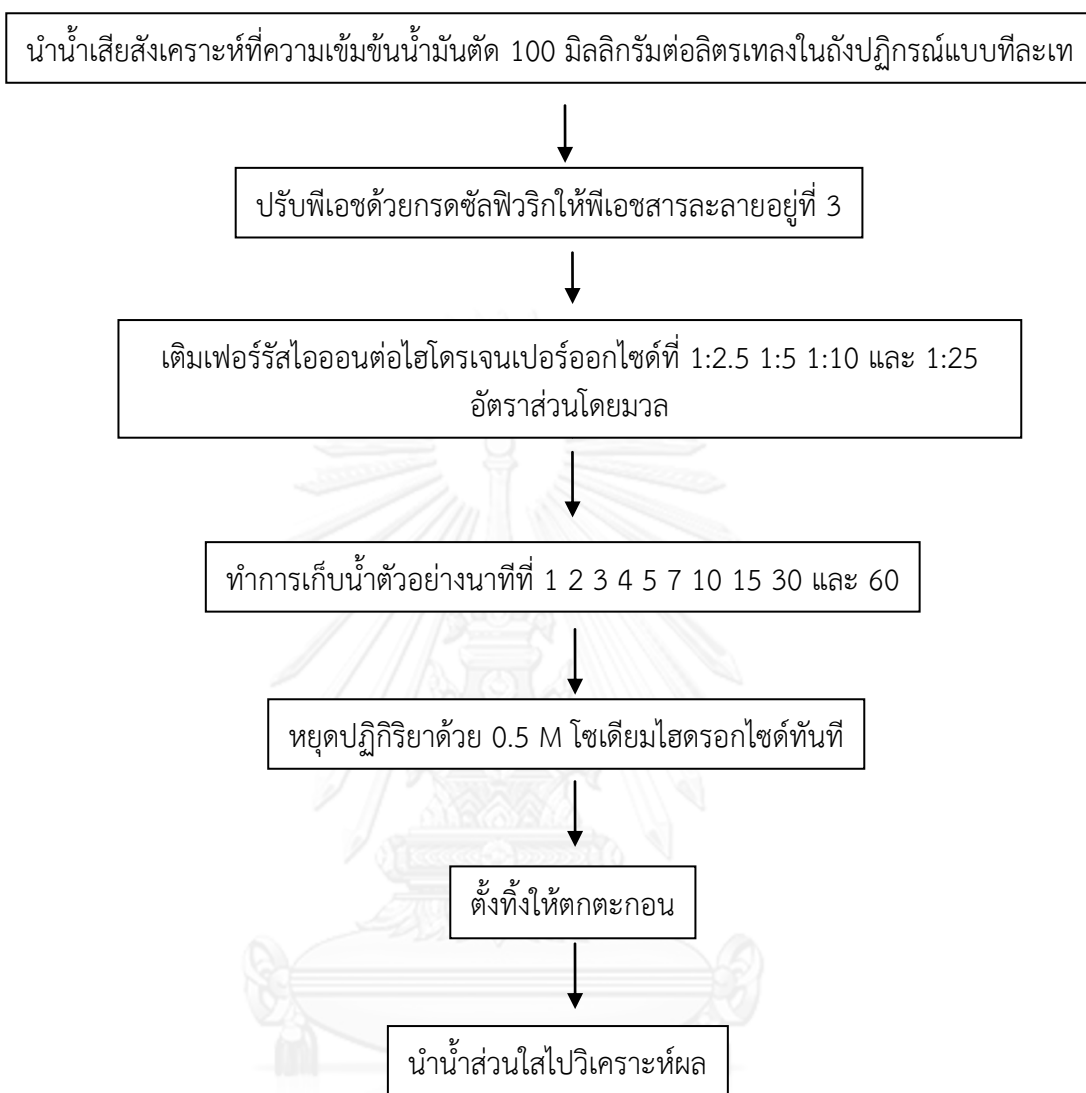
การทดลองที่ 3.3.3.3 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไอรอนโมลิบเดตที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffractometer, XRD) ทำการส่งวิเคราะห์ที่ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 3.3.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดแบบเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวโดยเดินระบบแบบทีละเท

การทดลองที่ 3.3.4.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต

ตารางที่ 3. 3 ตัวแปรในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง 3. ค่าพีเอชของน้ำเสีย	1. 100 มิลลิกรัม/ลิตร 2. 1 ลิตร 3. $3 \pm 0.2$
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ปริมาณเฟอร์รัสไอออน 2. ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	1. 500 และ 50 มิลลิกรัม 2. 1:2.5 1:5 1:10 และ 1:25 (นุสรา โรจน์วิลาวัลย์, 2554)
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง	1.1. ค่าซีโอดี 1.2. ค่าความขุ่น 1.3. ค่าพีเอช 1.4. ปริมาณเหล็กละลาย ( $Fe$ , $Fe^{2+}$ และ $Fe^{3+}$ )



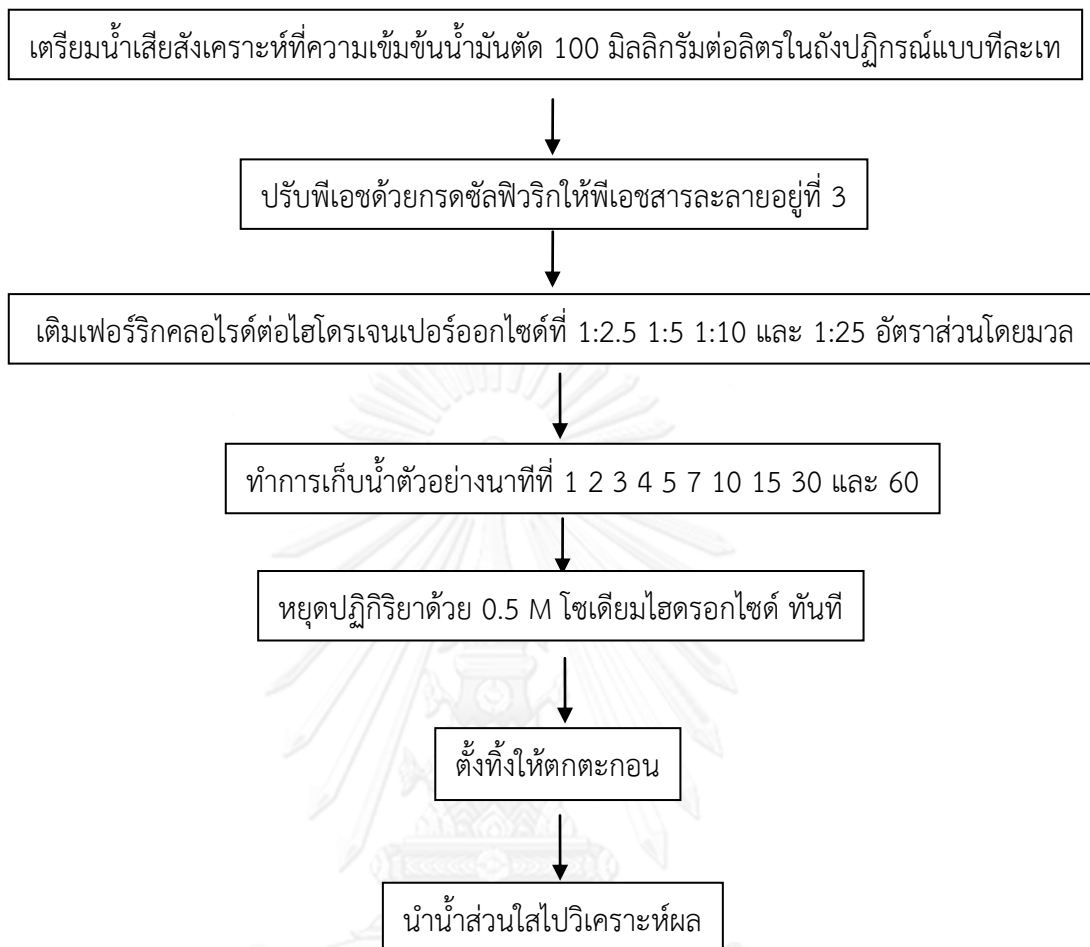
ภาพที่ 3. 3 แผนผังการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟ้นต้นโดยใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต



การทดลองที่ 3.3.4.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน  
ตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยใช้สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์

ตารางที่ 3. 4 ตัวแปรในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วย  
กระบวนการเฟนตันเสมือนโดยใช้สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ความเข้มข้นของน้ำมัน</li> <li>2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง</li> <li>3. ค่าพีเอชของน้ำเสีย</li> <li>4. ปริมาณเฟอร์ริกไอออน</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 100 มิลลิกรัม/ลิตร</li> <li>2. 1 ลิตร</li> <li>3. <math>3 \pm 0.2</math></li> <li>4. 50 มิลลิกรัมต่อลิตร</li> </ol>
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 1:2.5 1:5 1:10 และ 1:25 (โดยมวล)</li> </ol>
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.1. ค่าซีไอดี</li> <li>1.2. ค่าความขุ่น</li> <li>1.3. ค่าพีเอช</li> <li>1.4. ปริมาณเหล็กละลาย (<math>\text{Fe}</math>, <math>\text{Fe}^{2+}</math> และ <math>\text{Fe}^{3+}</math>)</li> </ol>

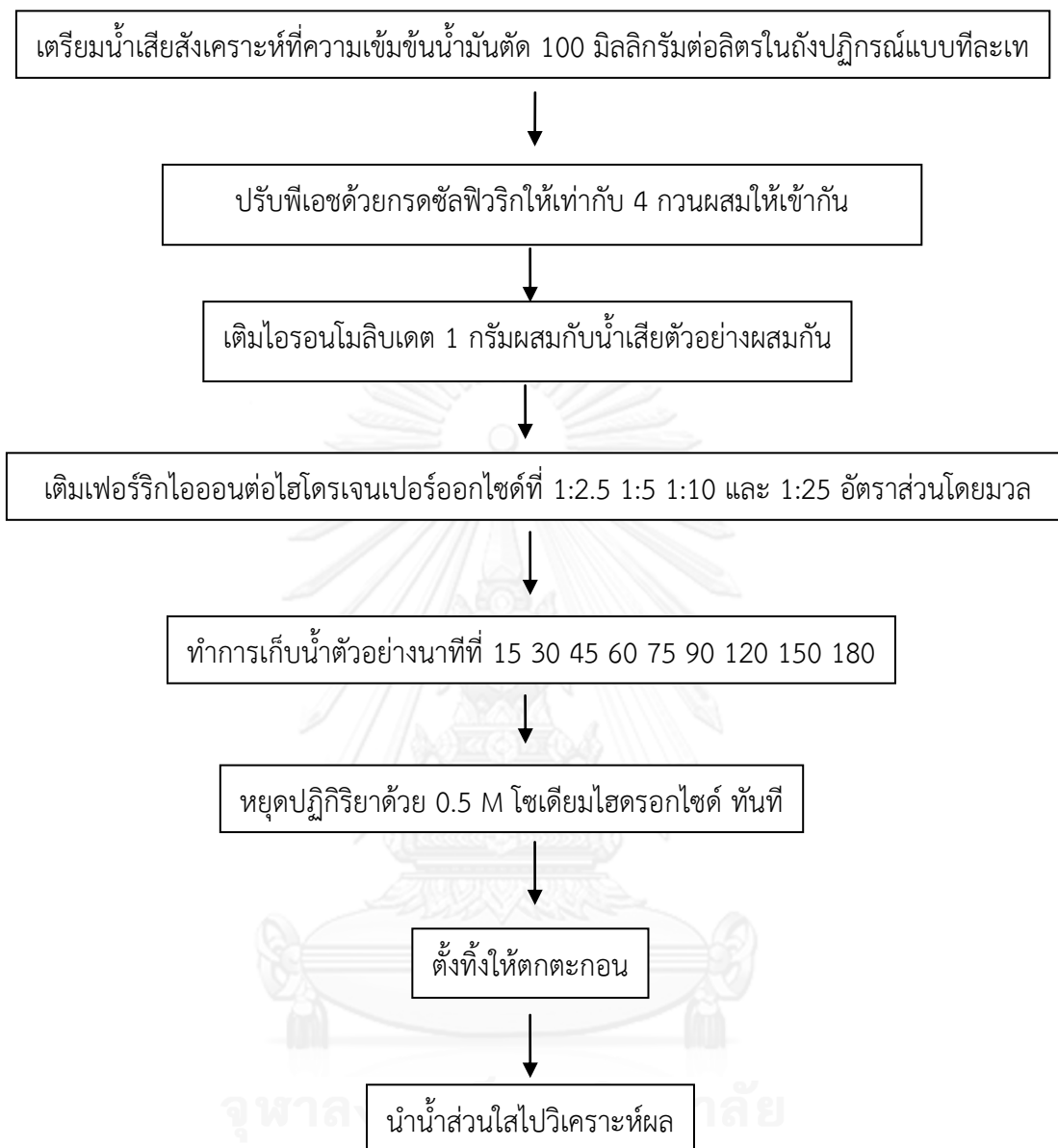


ภาพที่ 3. 4 แผนผังการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการฟentonเสมือนโดยใช้สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์

การทดลองที่ 3.3.4.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน  
ตัดด้วยกระบวนการเฟ้นต้นเสมือนโดยใช้ไอรอนโมลิบเดต

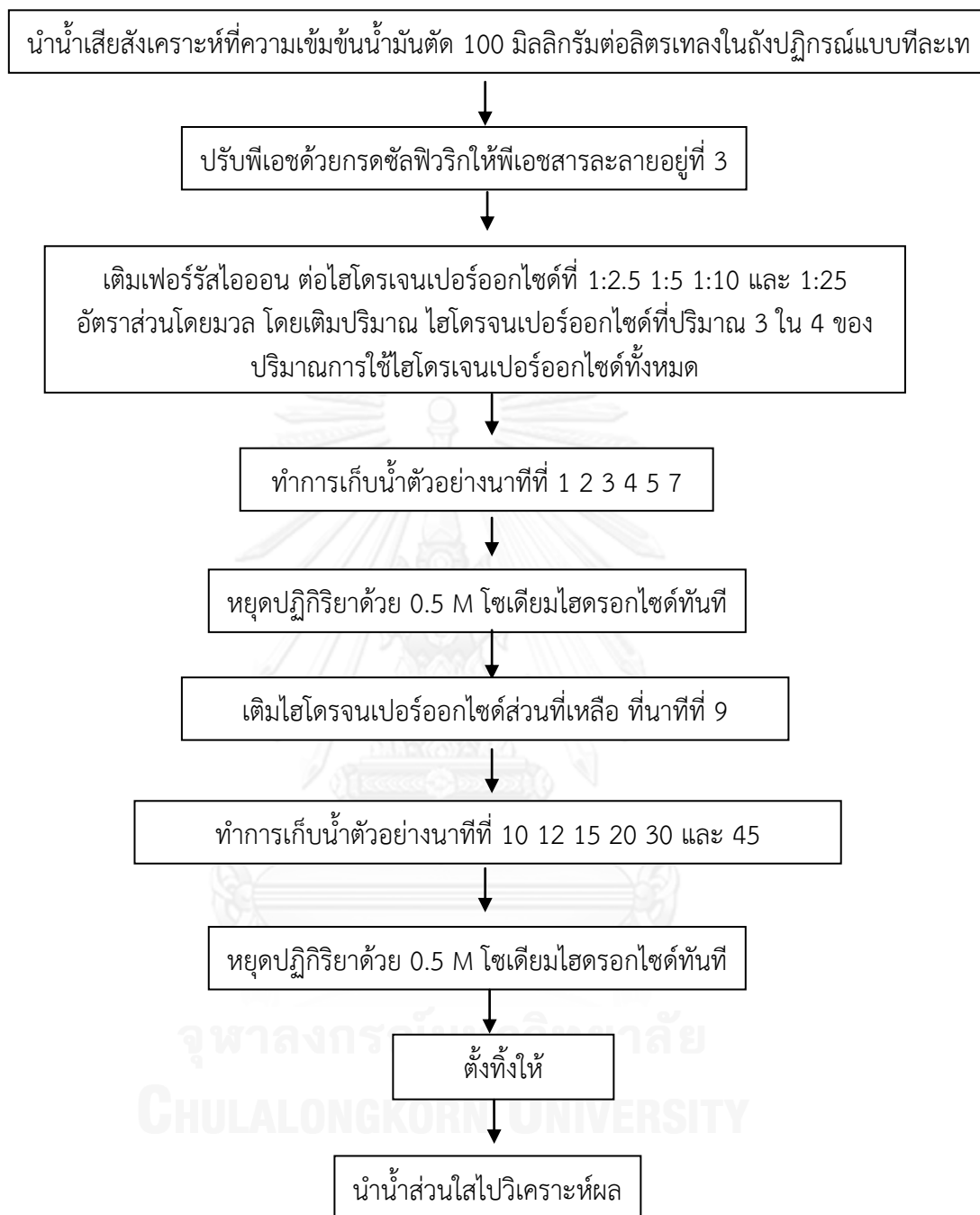
ตารางที่ 3. 5 ตัวแปรในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วย  
กระบวนการเฟ้นต้นเสมือนโดยใช้ไอรอนโมลิบเดต

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของน้ำมัน 2. ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง 3. ค่าพีเอชของน้ำเสีย 4. ปริมาณไอรอนโมลิบเดต	1. 100 มิลลิกรัม/ลิตร 2. 1 ลิตร 3. $4 \pm 0.2$ 4. 1 g
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	1. 1:2.5 1:5 1:10 และ 1:25
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้ง	1. ค่าซีไอดี 2. ค่าความขุ่น 3. ค่าพีเอช 4. ปริมาณเหล็กละลาย (Fe, Fe <sup>2+</sup> และ Fe <sup>3+</sup> )



ภาพที่ 3. 5 แผนผังการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟ้นต้นเสมือนโดยใช้ไอรอนโมลิบเดต

การทดลองที่ 3.3.5 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดแบบแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยเดินระบบแบบที่ละเท โดยการทดลองนี้จะทำการทดลองคล้ายกับการทดลองที่ 3.3.4.1 แต่มีความแตกต่างคือจะทำการแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยจะเลือกใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมในการแบ่งเติม ดังนี้



ภาพที่ 3. 6 แผนผังการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟ้นตันโดยใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟตแบบแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ตารางที่ 3. 6 สรุปจำนวนการทดลอง

อันดับ	การทดลอง	จำนวน (ครั้ง)	รวม จำนวน ครั้ง
1	วิเคราะห์สมบัติน้ำเสียจากน้ำมันตัด	3	3
2	สังเคราะห์ไอรอนโมลิบเดต	10	10
3	ศึกษาคุณลักษณะของไอรอนโมลิบเดต 3.1 วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD 3.2 วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)	1 1	2
4	ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด แบบเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวด้วยกระบวนการเฟนตัน โดยใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต 4.1 วิเคราะห์ซีไอดี ความขุ่น พีเอช 4.2 วิเคราะห์ปริมาณเหล็ก ( $Fe^{2+}$ และ $Fe^{3+}$ ) 4.3 วิเคราะห์ทีโอซี	4 4×3=12 1 1	14
5	ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด แบบเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวด้วยกระบวนการเฟนตัน เสมือนโดยใช้สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ 5.1 วิเคราะห์ซีไอดี ทีโอซี ความขุ่น พีเอช 5.2 วิเคราะห์ปริมาณเหล็ก ( $Fe^{2+}$ และ $Fe^{3+}$ ) 5.3 วิเคราะห์ทีโอซี	4 4×3= 12 1 1	14
6	ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด แบบเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวด้วยกระบวนการเฟนตัน เสมือนโดยใช้ไอรอนโมลิบเดต 6.1 วิเคราะห์ซีไอดี ความขุ่น พีเอช	4 4×3= 12	12
7	ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด แบบแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวด้วยกระบวนการเฟน ตันโดยใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต 7.1 วิเคราะห์ซีไอดี ความขุ่น พีเอช	4 4×3=12	12
11	รวมจำนวนการทดลองทั้งหมด		67

การทดลองที่ 3.3.6 เปรียบเทียบผลการทดลองด้วยวิธีทางสถิติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Microsoft Excel ในการเปรียบเทียบชุดข้อมูลว่าข้อมูลทั้งสองชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยใช้วิธีวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) แบบการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One-Way Analysis of Variance, ONE-WAY ANOVA)

หลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวนคือการทดสอบสมมติฐานระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากรที่มากกว่า 2 กลุ่มขึ้นไป โดยเป็นการทดสอบแบบรวบยอดว่าค่าเฉลี่ยของประชากรทุกกลุ่มที่นำมาทดสอบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ สาเหตุที่ทำให้ข้อมูลมีความแตกต่างกันนั้น อาจมีเพียงปัจจัยเดียวหรือหลายปัจจัยก็ได้และแต่ละปัจจัยอาจมีหลายค่าหรือหลายระดับก็ได้ โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (นพพร ณะชัยขันธุ์, 2555)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวมุ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1. ตั้งสมมติฐาน

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

$H_1$  : มีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 2 ค่าไม่เท่ากัน

2. กำหนดระดับนัยสำคัญ  $\alpha$

3. กำหนดค่าสถิติที่ใช้ในการทดสอบ

4. สร้างบริเวณปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  (หรือบริเวณวิกฤต)

5. คำนวณค่าสถิติ โดยคำนวณค่าต่อไปนี้

- ผลบวกกำลังสองรวมทั้งหมด (sum of squares for total)
- ผลบวกกำลังสองระหว่างกลุ่ม (sum of squares for between groups)
- ผลบวกกำลังสองภายในกลุ่ม (sum of squares for within groups)

6. สรุปผลการทดลอง ในกรณีที่ใช้โปรแกรม excel ให้พิจารณาจากค่า P-Value โดยจะปฏิเสธ  $H_0$  ถ้า  $P\text{-Value} < \alpha$

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟ้นต้น และกระบวนการเฟ้นต้นเสมือน โดยในกระบวนการเฟ้นต้นได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงครั้งเดียวกับการแบ่งเติมปริมาณไฮโดรเจนส่วนกระบวนการเฟ้นต้นเสมือนได้มีการเลือกใช้เฟอร์ริกคลอไรด์และไอรอนโมลิบเดตมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟ้นต้นเสมือน ทั้งนี้ตัวไอรอนโมลิบเดตที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะต้องทำการสังเคราะห์ขึ้นมาและต้องมีการทดสอบสมบัติเบื้องต้น เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (XRD) ก่อน

#### 4.1 ศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของน้ำมันตัด

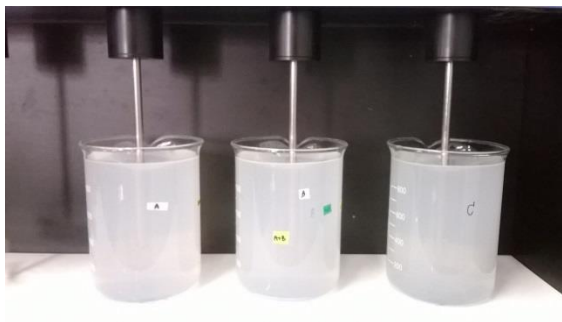
ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้น้ำเสียสังเคราะห์ โดยเตรียมจากน้ำเสียสังเคราะห์น้ำมันตัด Castrol Cooledge BI ความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการปั่นกวน น้ำตัวอย่างที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที (ธนนท์ เฉลิมสินสุวรรณ, 2552) ทั้งนี้จะพบว่าน้ำมันตัดเมื่อผสมกับน้ำประปาจะเกิดอิมัลชันที่มีความคงตัว ทำให้ยากต่อการบำบัด ด้วยเหตุนี้เองทำให้ต้องมีการศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนที่จะมีการทดลองในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4. 1 ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์

สมบัติ	น้ำมันตัดความเข้มข้น 0.1กรัม/ลิตร	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง*
ซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	208±23	≤ 120
พีเอช	7.94±0.1	5.5-9.0
ความขุ่น	139±11	ไม่ได้กำหนด

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





ภาพที่ 4. 1 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์

โดยปกติมีการใช้น้ำมันตัด Castrol Cooledge BI เพื่อระบายความร้อนในกระบวนการตัดกลึงโลหะ ซึ่งในขั้นตอนการในงานใช้งานจะมีการนำน้ำมันตัดมาละลายกับน้ำก่อนการใช้งาน ทั้งนี้ในขั้นตอนการเตรียมน้ำมันตัดไม่จำเป็นต้องมีการเติมสารลดแรงตึงผิว เนื่องจากน้ำมันตัด Castrol cooledge BI มีส่วนประกอบของสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) น้ำมันแร่ (Mineral oil) และ สารเพิ่มคุณภาพ (Additive) อยู่แล้ว เช่น โซเดียมซัลโฟเนต (Sodium sulphonate) ไอโซไตรเดคคานอน (Isotridecanol) เอ็น,เอ็น-เมทิลีน บิสมอร์ฟิน (N,N - methylene bismorpholine) เอมีน (amides) tall oil fatty, เอ็น,เอ็น – บิส ไฮดรอกซีเอทิล (N,N-bis(hydroxyethyl) และโพลีอัลคิลีน ไกลคอล อีเทอร์ (Polyalkylene glycol ethers) (Castrol, 2557) ในการใช้งานของน้ำมันตัดจะมีการเวียนใช้ซ้ำจนกระทั่งความเข้มข้นของน้ำมันตัดเหลือเพียง 0.1 กรัมต่อลิตรจึงเลิกใช้งาน และนำน้ำมันตัดที่ผ่านการใช้งานแล้วเข้าสู่การบำบัด โดยทำการแยกตะกอนโลหะออก (ชญาสินี พรหมจันทร์, 2554) วิธีการแยกตะกอนโลหะสามารถทำได้โดยการกรองเนื่องจากของแข็งแขวนลอยส่งผลต่อการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

#### 4.2 การศึกษาคุณลักษณะของไอออนโมลิบเดต

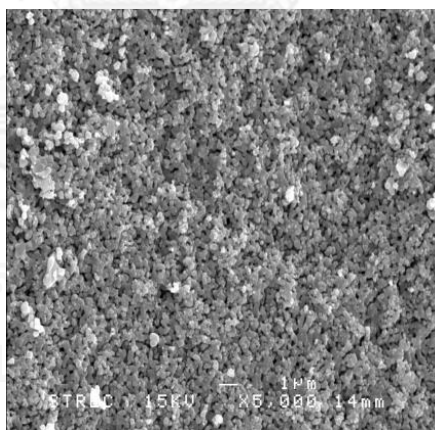
จากการสังเคราะห์ไอออนโมลิบเดตได้ใช้วิธีการของ (S. H. Tian et al., 2011) ได้สารสีเหลืองอมเขียวดังภาพที่ 4.2 และนำไอออนโมลิบเดตที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพต่างๆ โดยวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังนี้



ภาพที่ 4. 2 ลักษณะไอออนโมลิบเดตที่สังเคราะห์ได้

#### 4.2.1 วิเคราะห์รูปร่างลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของไอออนโมลิบเดตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด Scanning Electron Microscope with EDS (SEM-EDS) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 และ Link ISIS Series 300 แสดงในภาพที่ 4.3 ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่ามีลักษณะเป็นเม็ดกลมๆ เรียงซ้อนกันซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับการสังเคราะห์ไอออนโมลิบเดตของ Peng และคณะ (Peng, Gao, Yang, & Sun, 2008) แต่ทั้งนี้รายละเอียดของภาพอาจจะไม่ละเอียดเท่ากับของ Peng และคณะ เนื่องจากประสิทธิภาพกำลังขยายที่ใช้มีขนาดต่ำเกินไปเมื่อเทียบกับ ไอออนโมลิบเดตนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 500 นาโนเมตร



ภาพที่ 4. 3 ภาพถ่ายไอออนโมลิบเดตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

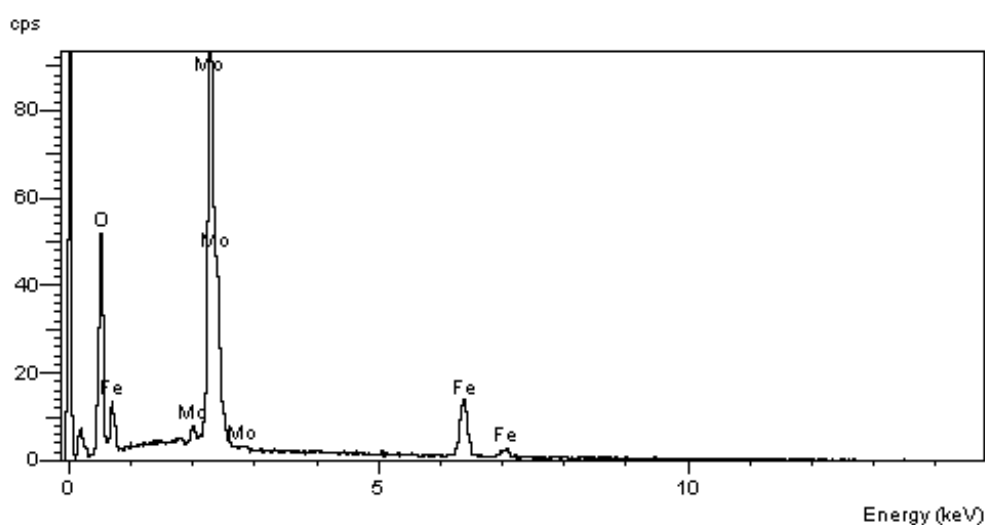
#### 4.2.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไอออนโมลิบเดตด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

จากการวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบของไอออนโมลิบเดต (Iron molybdate,  $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$ ) ที่สังเคราะห์มาได้นั้นซึ่งได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.4 ซึ่งเส้นสเปกตรัมสอดคล้องกับ

การทดลองของ Zhang และคณะ ซึ่งจะปรากฏพีคหลักๆ คือ เหล็ก (Fe) โมลิบดีนัม (MO) และ ออกซิเจน (O) (L. Zhang, Cao, Ma, Chen, & Xueb, 2010) นอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์ ปริมาณของธาตุต่างๆที่พบในไอรอนโมลิบเดตส่วนผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 เมื่อนำปริมาณธาตุที่ วิเคราะห์ได้มาคำนวณหาอัตราส่วนโมลิบดินัมต่อเหล็ก (Mo : Fe) ได้ผลเท่ากับ 1.5 ซึ่งมีความ สอดคล้องกันกับงานวิจัยของ Tian และคณะ(S. H. Tian et al., 2011)

ตารางที่ 4. 2 องค์ประกอบและปริมาณธาตุต่างๆของไอรอนโมลิบเดต

ธาตุ	% ธาตุ
O	82.54%
Fe	7.01%
Mo	10.45%
Total	100%

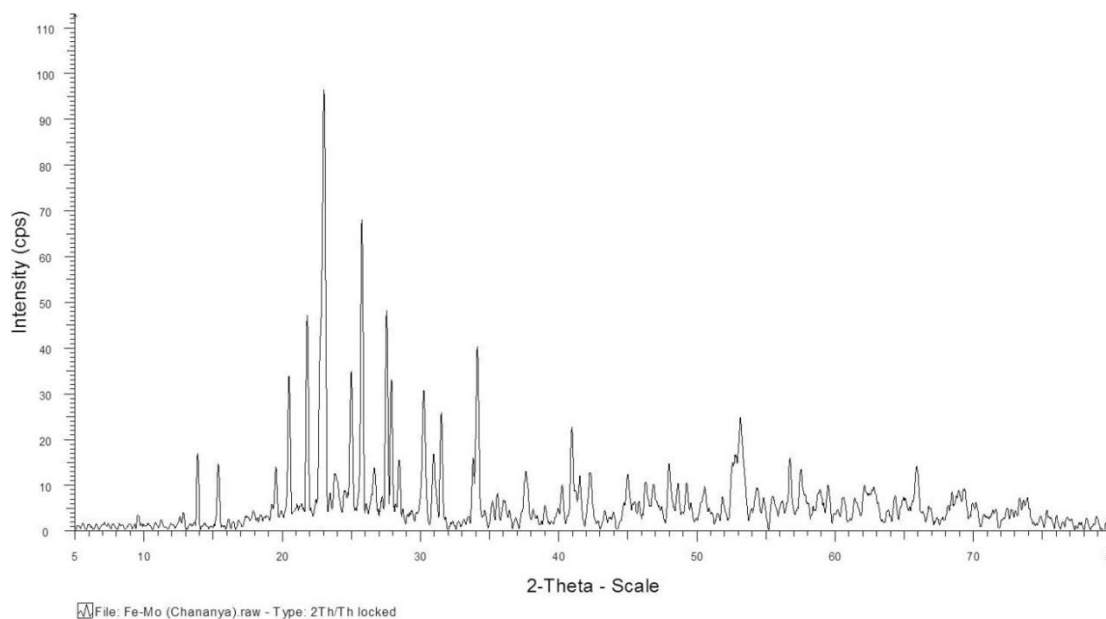


ภาพที่ 4. 4 เส้นสเปกตรัม EDS ของไอรอนโมลิบเดต

#### 4.2.3 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไอรอนโมลิบเดตด้วยเครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD)

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของไอรอนโมลิบเดตที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) รุ่น Model D8 Advance ของบริษัท Bruker AXS ด้วยหลอดรังสีเอกซ์  $\text{CuK}\alpha$  ความยาวคลื่น 1.5406 ความต่างศักย์ไฟฟ้า 40 กิโลวัตต์ กระแสไฟฟ้า 30 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.5 ซึ่งเมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปเทียบกับ Patterns อ้างอิงโดยมี JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เป็นผู้รวบรวม (สุธรรม ศรีหล่ม

ล็ก, 2554) จากผลการทดลองพบว่าพบที่  $2\theta$  ที่  $19.4^\circ$   $20.4^\circ$   $21.7^\circ$   $22.9^\circ$   $23.6^\circ$   $24.9^\circ$   $25.7^\circ$   $27.5^\circ$   $27.8^\circ$   $30.2^\circ$  และ  $34.1^\circ$  ในระนาบ  $(2\ 0\ 0)$   $(0\ 1\ 2)$   $(1\ 1\ 2)$   $(1\ 2\ 0)$   $(2\ 1\ 4)$   $(1\ 1\ 4)$   $(2\ 2\ 0)$   $(2\ 1\ 2)$   $(1\ 2\ 2)$   $(1\ 0\ 5)$ ,  $(2\ 2\ 4)$ ,  $(5\ 0\ 3)$ ,  $(2\ 2\ 2)$ ,  $(0\ 2\ 4)$ ,  $(0\ 3\ 2)$  และ  $(1\ 1\ 6)$  ซึ่งสอดคล้องกับ JCPDS No. 35-0183 ไอรอนโมลิบเดต (Iron molybdate,  $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$ ) มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ มอโนคลินิก (Monoclinic) (S. Tian et al., 2013; S. H. Tian et al., 2011)

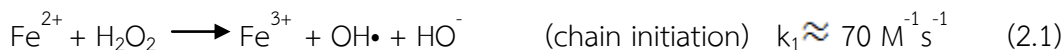


ภาพที่ 4. 5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกไอรอนโมลิบเดตด้วยXRD

จากการทดสอบคุณลักษณะของไอรอนโมลิบเดตจึงอาจสรุปได้ว่าสารสังเคราะห์ขึ้นมาคือไอรอนโมลิบเดตโดยพิจารณาจากโครงสร้างผลึกที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน โดยพบว่าค่า  $2\theta$  ที่ปรากฏเมื่อเทียบกับ JCPDS No. 35-0183 ที่เป็นต้นแบบของไอรอนโมลิบเดตที่มีโครงสร้างผลึกอยู่ในรูปแบบมอโนคลินิกและเมื่อศึกษาปริมาณธาตุต่างของไอรอนโมลิบเดตพบว่า อัตราส่วนโมลิตินัมต่อเหล็ก (MO : Fe) มีค่าเท่ากับ 1.5 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tian และคณะ ที่ได้ทำการสังเคราะห์ไอรอนโมลิบเดตและเมื่อวิเคราะห์อัตราส่วนโมลิตินัมกับเหล็กมีค่า 1.5 เหมือนกัน (S. H. Tian et al., 2011)

#### 4.3 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการเฟนตัน

กระบวนการเฟนตันคือการทำปฏิกิริยากันระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออนซึ่งทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH•) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง ไฮดรอกซิลแรดิคัลนี้จะไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ ได้ดังสมการ (2.1) (Neyens & Baeyens, 2003)



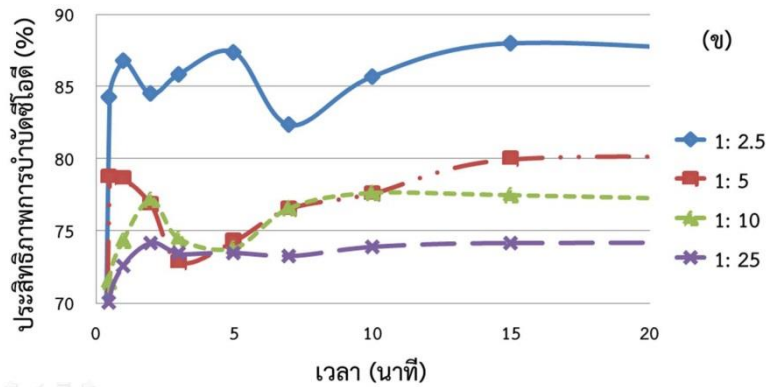
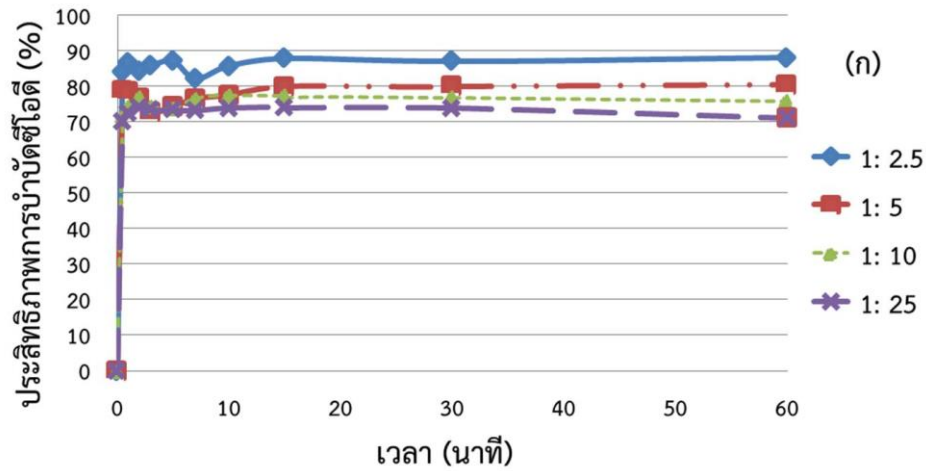
วิธีในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการเฟนตัน ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ การใช้เฟอร์รัสไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากอยากจะทราบว่าถ้าต้องการใช้ปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่แตกต่างกันแต่อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลมีค่าเท่ากันประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจะมีลักษณะเป็นอย่างไร

#### 4.3.1 การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเมื่อใช้เฟอร์รัสไอออน 500 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการทดลองเมื่อนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นน้ำมันตัดเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการสังเคราะห์โดยอ้างอิงจากความเข้มข้นของน้ำมันตัดที่เลิกใช้งานก่อนเข้าสู่ระบบการบำบัด (ชฎานิน พรหมจันทร์, 2554) ทำการควบคุมพีเอชที่ 3 เติมความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการศึกษาค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วง 2.5 -25 กรัมต่อลิตร และศึกษาอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่ 1:2.5 1:5 1:10 และ 1:25 ทำการเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาต่างๆ วิเคราะห์ซีโอดี ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.6 และ ภาคผนวก ข.1 โดยอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่ 1:2.5 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุดคือ 86% จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงเรื่อยๆตามปริมาณอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นดังนี้ ที่อัตราส่วน 1:5 1:10 และ 1:25 มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด คือ 78% 76% และ 73% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไปจะเกิดปฏิกิริยาการขัดขวางออกซิเดชัน ดังสมการ (4.1) ถึง (4.3) (Bautista, Mohedano, Gilarranz, Casas, & Rodriguez, 2007)



จากสมการที่ (4.1) พบว่าการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไป จะทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลืออยู่ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{OH}\cdot$ ) ที่เกิดขึ้นทำให้ได้อนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{HO}_2\cdot$ ) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ต่ำกว่าไฮดรอกซิลแรดิคัล นอกจากนี้อนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{HO}_2\cdot$ ) ยังสามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิล ดังสมการที่ (4.2) และสุดท้ายไฮดรอกซิลแรดิคัลยังสามารถทำปฏิกิริยากันเองได้ ดังสมการที่ (4.3) ด้วยเหตุนี้จึงอาจทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง

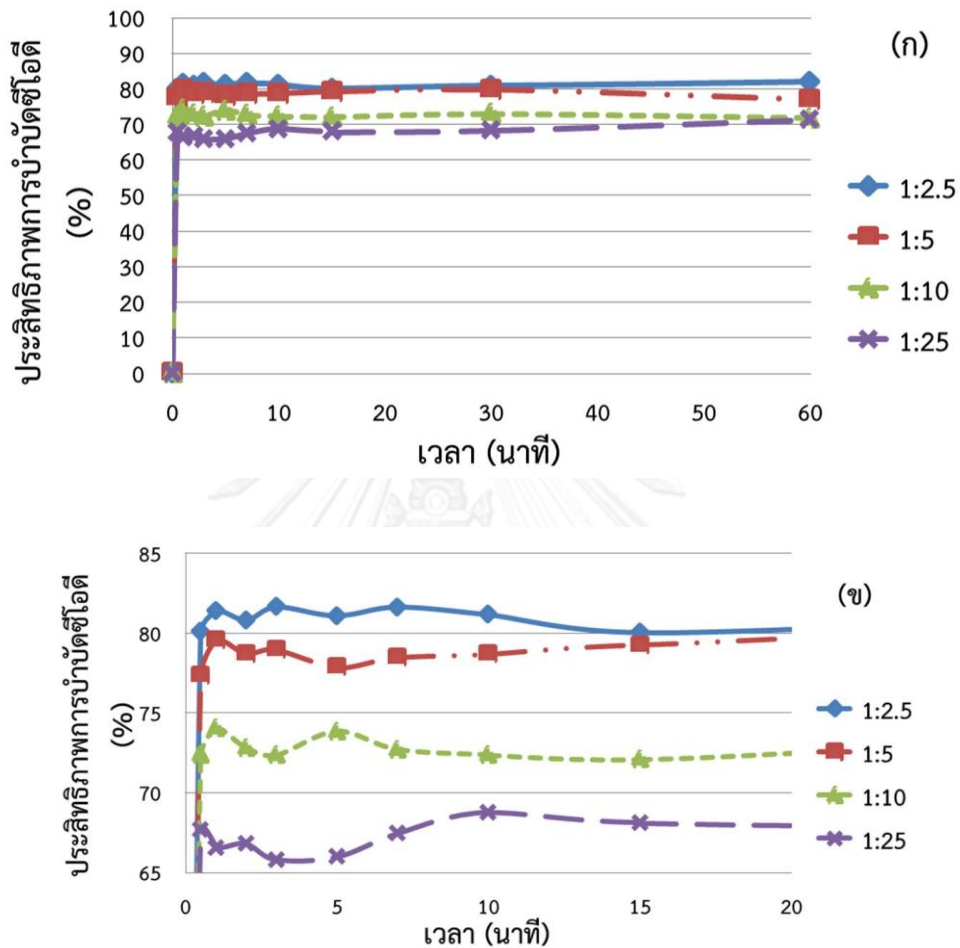


ภาพที่ 4. 6 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่มีอัตราส่วนเปอร์ร็อกไซด์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่แตกต่างกันเมื่อใช้เปอร์ร็อกไซด์ไฮโดรเจน 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการเฟ้นต้น (ก) ที่เวลา 0-60 นาที (ข) ที่เวลา 0-20 นาที

เพื่อเป็นการลดการใช้สารเคมี จึงทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นเปอร์ร็อกไซด์ไฮโดรเจนเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นน้ำมันตัดเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการควบคุมพีเอชที่ 3 เช่นเดิม และเติมความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในช่วง 125-1,250 มิลลิกรัมต่อลิตรตามอัตราส่วนเปอร์ร็อกไซด์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่ 1:2.5 1:5 1:10 และ 1:25 จากนั้นเก็บตัวอย่างตามช่วงเวลาข้างต้น ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.7 ซึ่งพบว่าอัตราส่วนเปอร์ร็อกไซด์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่ 1:2.5 และ 1:5 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีที่สุดคือ 80% ส่วนอัตราส่วน 1:10 และ 1:25 มีประสิทธิภาพในการบำบัดประมาณ 70% เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไปจะเกิดปฏิกิริยาการขัดขวางออกซิเดชันทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง (Kallel, Belaid, Mechichi, Ksibi, & Elleuch, 2009)

นอกจากนี้ความเข้มข้นของเปอร์ร็อกไซด์ไฮโดรเจนที่ต่ำ ปฏิกิริยาจะสร้างไฮดรอกซิลแรดิคัลมากกว่าอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{HO}_2\bullet$ ) (Kumar, Prasad, Mishra, & Chand, 2008) ในขณะที่ความ

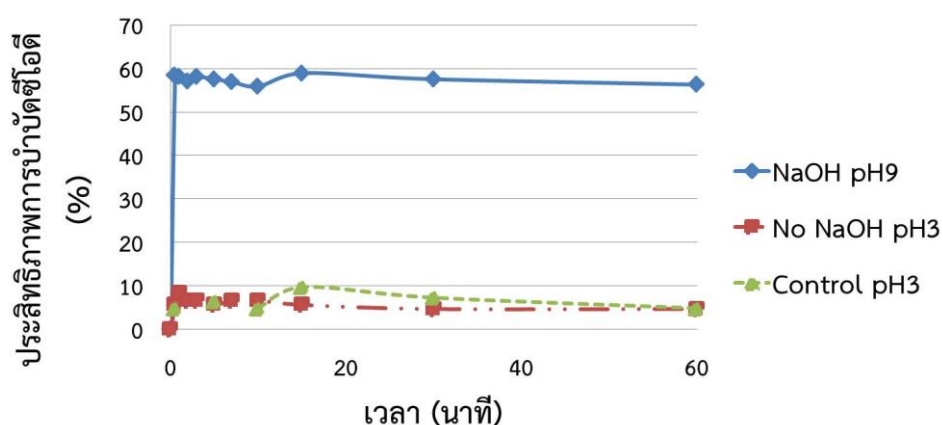
เข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนที่สูงเกินไปเร่งให้เกิดการสลายของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สร้างอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{HO}_2\bullet$ ) ซึ่งเป็นตัวกำหนดอัตราของการเกิดปฏิกิริยา (Aravindhan et al., 2006)



ภาพที่ 4. 7 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอติที่มีอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่แตกต่างกันเมื่อใช้เฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการเฟนตันแบบเต็มไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียว (ก) ที่เวลา 0-60 นาที (ข) ที่เวลา 0-20 นาที

เมื่อทำการศึกษาชุดควบคุมการทดลองในกระบวนการเฟนตันได้ทำการทดลองโดยนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นน้ำมันตัดเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการปรับพีเอชให้เท่ากับ 3 จากนั้นจึงเติมเฟอร์รัสไอออนความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาต่างๆ โดยในการทดลองนี้ทำการศึกษา 2 แบบ คือ มีการเติมและไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยซีโอติ ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.8 และภาคผนวก ข.1 โดยจากผลการทดลองพบว่าเมื่อไม่มีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างพบว่าไม่มีการบำบัดซีโอติในน้ำเสียน้ำมันตัดสังเคราะห์ แต่ถ้าหากในขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง

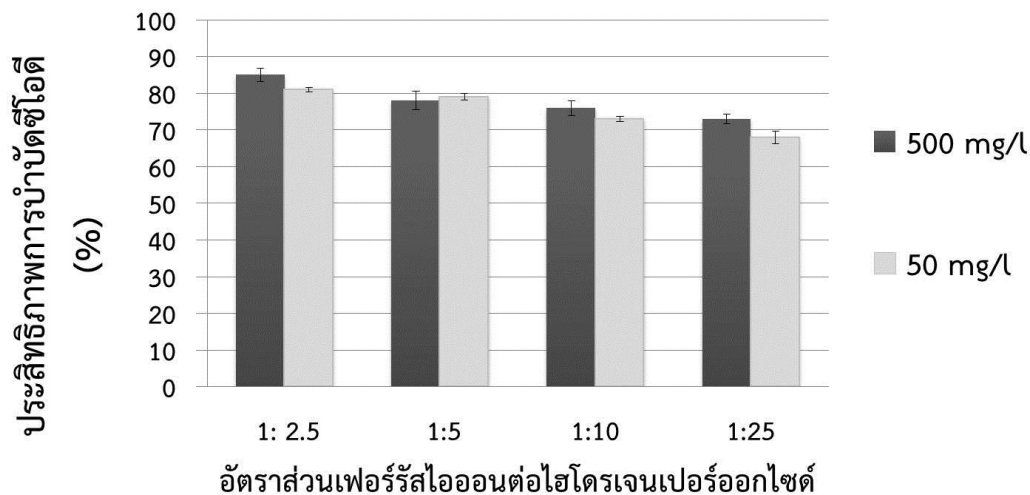
มีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับพีเอชให้เป็นต่างจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีมีค่าประมาณ 57% ทั้งนี้มาจากเฟอร์รัสไอออนที่เติมลงไปมีการเปลี่ยนรูปไปและตกตะกอนลงมาเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) (Selcuk, 2005) ทำให้น้ำมันถูกจับแล้วตกตะกอนลงมาพร้อมเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาเรื่องพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีหรือไม่โดยการนำน้ำเสียน้ำมันตัดสังเคราะห์มาปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 3 แล้ว ทำการเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาต่างๆพบว่า การปรับพีเอชไม่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี



ภาพที่ 4. 8 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของชุดควบคุมการทดลองในระบบการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

จากผลการทดลองในชุดควบคุมการทดลองทำให้ทราบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดในระบบการเฟนตันเป็นประสิทธิภาพการบำบัดรวมที่เกิดจากกระบวนการเฟนตันและกระบวนการฟล็อกกูเลชัน ทั้งนี้จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีด้วยกระบวนการเฟนตันที่เกิดขึ้นอย่างน้อยที่สุดคือ 20%





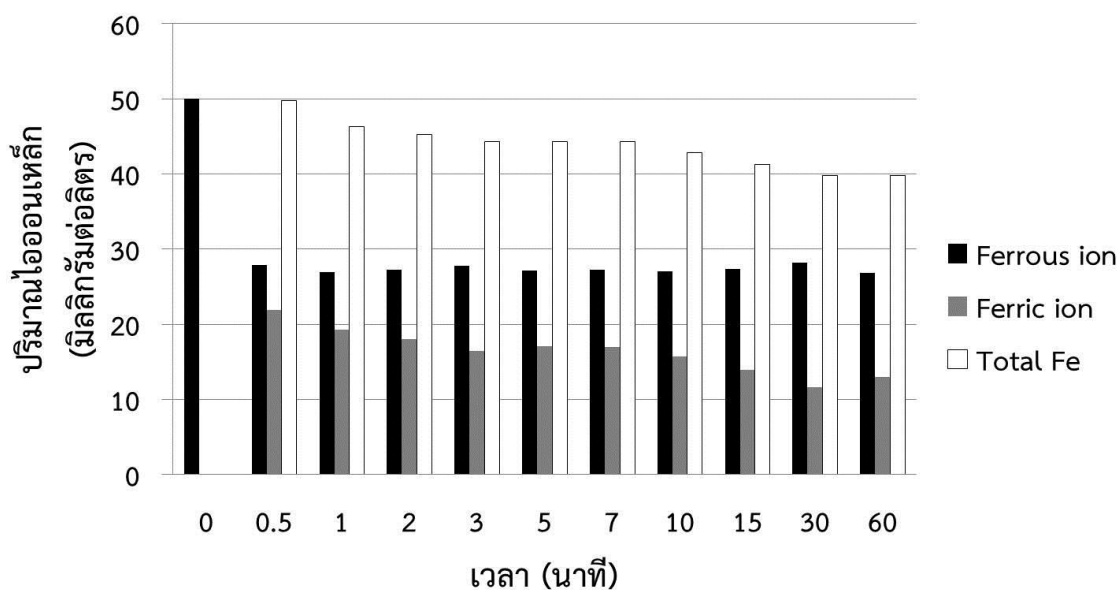
ภาพที่ 4. 9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในกระบวนการเฟนตันเมื่อเติมเฟอร์รัสไอออน 500 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเมื่อเติมเฟอร์รัสไอออน 500 มิลลิกรัมมีประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าเมื่อเติมเฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบโดยใช้วิธีการทางสถิติเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันตัดเมื่อเติมปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่ 500 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัมที่อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่ 1:2.5 1:5 1:10 และ 1:25 พบว่าการเติมเฟอร์รัสไอออน 500 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ระดับความเชื่อมั่น 95%) ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณเฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมในการทดลองขั้นต่อไป เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้สารเคมี ลดปริมาณของแข็งละลายน้ำที่อาจเพิ่มขึ้นจากการเติมสารเคมีและลดการเกิดตะกอนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาเฟนตัน ทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนเหล็กที่เกิดขึ้นด้วย (Lucas & Peres, 2009)

#### 4.3.2 ศึกษาปริมาณเหล็กต่างๆที่คงเหลือในระบบสำหรับกระบวนการเฟนตัน

ในศึกษาปริมาณชนิดของไอออนเหล็กที่ทำปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันในสถานะที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีสูงสุดคือที่ พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม และ อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1:2.5 โดยวิเคราะห์ปริมาณเฟอร์รัสและเฟอร์ริกไอออนด้วยวิธีฟิเนนโทรลีน ดังภาคผนวก ก.2 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.10 และภาคผนวกข.2 โดยจากผลการทดลองพบว่าเฟอร์รัสไอออนสามารถเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปเฟอร์ริกไอออนได้ ซึ่งเกิดจากกลไกในการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันดังสมการที่ (2.1) (Neyens & Baeyens, 2003) และเมื่อเวลาผ่านไปครั้งหน้าที่ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนลดลงเหลือประมาณ 28 มิลลิกรัมต่อลิตร และเกิดการสร้างเฟอร์ริก

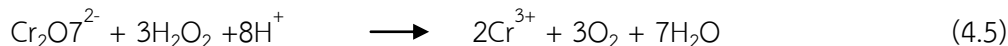
ไอออนประมาณ 22 มิลลิกรัมต่อลิตร และหลังจากนั้นความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนก็คงที่ตลอดการทดลอง ส่วนความเข้มข้นของเฟอร์ริกไอออนมีความเข้มข้นที่ลดลงและคงที่ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดีโดยพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าสูงตั้งแต่ช่วงแรกและคงที่ไปเรื่อยจนจบการทดลอง



ภาพที่ 4. 10 แสดงปริมาณไอออนเหล็กที่ช่วงเวลาต่างๆในกระบวนการเฟนตันเมื่อเติมเฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือ 1:2.5

#### 4.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอซีในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการเฟนตันมีผลต่อการวิเคราะห์สารอินทรีย์ในรูปของซีไอดี โดยทำให้ค่าซีไอดีของตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการรบกวนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับโพแทสเซียมไดโครเมต (Heredia & Lopez, 2004; Kang, Cho, & Hwang, 1999) ดังสมการ (4.4) และ (4.5)

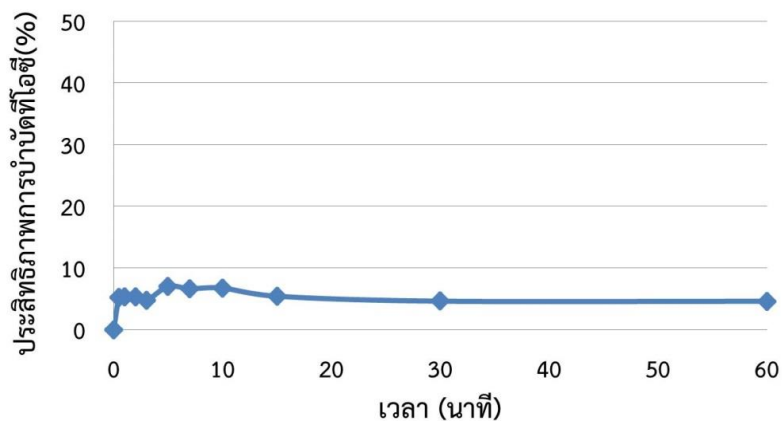


ดังนั้นจึงทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอซีในน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตัน โดยทำการศึกษาในสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีสูงสุดคือที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม และ อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1:2.5 ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังภาพที่ 4.11 พบว่าประสิทธิภาพในการ

บำบัดที่โอซีจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและหลังจากนั้นจะคงที่เรื่อยๆไปจนจบการทดลอง (60 นาที) ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดที่โอซีที่ได้มีแนวโน้มสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี

แต่ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพบำบัดด้วยที่โอซีจะไม่ชัดเจนเท่าซีโอดี อาจเนื่องมาจากการตัวอย่างน้ำเสียมีปริมาณที่โอซีเริ่มต้นที่ค่อนข้างต่ำทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงได้มากนัก นอกจากนี้ในการส่งวิเคราะห์ตัวอย่างที่โอซี ตัวอย่างอาจไม่ได้ถูกวิเคราะห์โดยทันที เนื่องจากพบว่า ถ้าทิ้งตัวอย่างน้ำผสมน้ำมันตัดไว้เป็นระยะเวลามากกว่า 1 สัปดาห์ น้ำมันตัดจะเริ่มไม่เป็นอิมัลชัน และสามารถสังเกตเห็นการรวมตัวกันของน้ำมันตัดเป็นก้อนสีขาวขนาดเล็กลอยอยู่ในน้ำตัวอย่าง ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในวัดที่โอซีของตัวอย่างน้ำเสียน้ำมันตัดเริ่มต้นได้

นอกจากนี้ส่วนประกอบของน้ำมันตัดยังมีสารเพิ่มคุณภาพและอิมัลซิฟายเออร์ ซึ่งสารเหล่านี้ อาจมีปริมาณสารอนินทรีย์มากกว่าสารอินทรีย์ได้ ดังนั้นจึงอาจทำให้เมธีวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยที่โอซีไม่เห็นประสิทธิภาพการบำบัดที่ชัดเจน

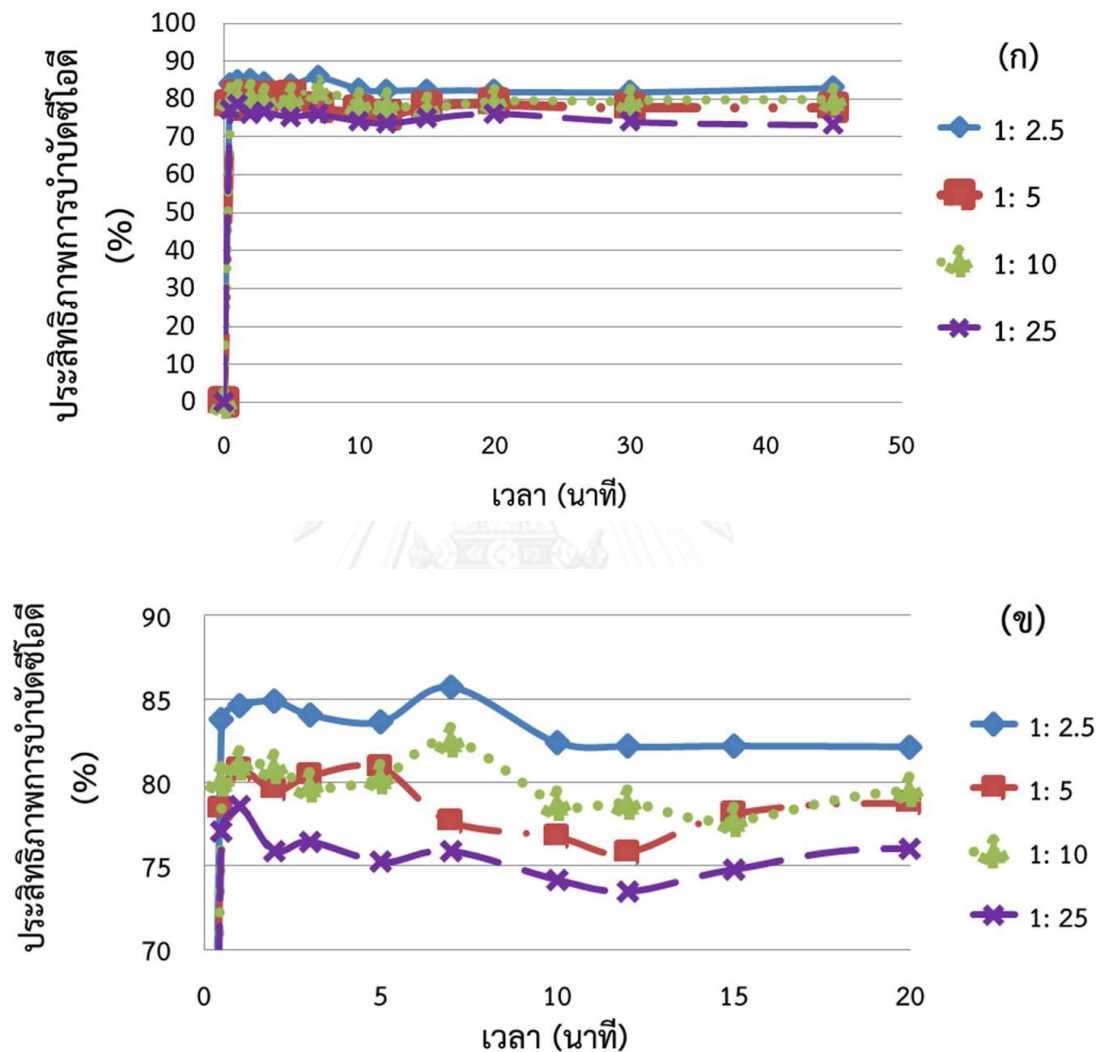


ภาพที่ 4. 11 ประสิทธิภาพการบำบัดที่โอซีที่มีอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2.5 โดยมวลเมื่อใช้เฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการเฟนตัน

#### 4.4 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันแบบแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

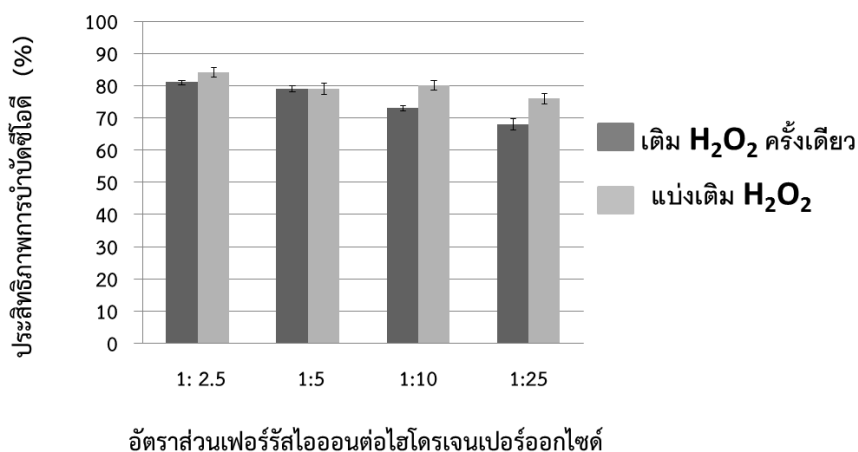
เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไปในตอนต้นของปฏิกิริยาอิเล็กโตรเฟนตันจะทำให้ประสิทธิภาพของการบำบัดลดลง การแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงอาจจะทำให้การเกิดปฏิกิริยามีประสิทธิภาพดีขึ้น (ธนากร เมธาธรรม, 2554) ดังนั้นในงานนี้จึงทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นน้ำมันตัดเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตรแต่ในการทดลองนี้จะแบ่งปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้จริงเป็น 4 ส่วน โดยในตอนเริ่มต้นจะเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 ส่วน และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อีก 1 ส่วนที่เหลือเมื่อถึงนาทีที่ 9 โดยศึกษาอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่ 1:2.5 1:5 1:10 และ 1:25 ทำการเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาต่างๆ วิเคราะห์ซีโอดีในตัวอย่าง ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.12

สาเหตุที่แบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ออกเป็น 3 ส่วนในช่วงแรก และ เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อีก 1 ส่วนที่เหลือ เนื่องจากเมื่อทำการแบ่งการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แบบครั้งๆโดยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วงท้ายพบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไปทำให้ไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี



ภาพที่ 4. 12 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีที่มีอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมวลที่แตกต่างกันเมื่อใช้เฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการเฟ้นต้นแบบแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ก) ที่เวลา 0-45 นาที (ข) ที่เวลา 0-20 นาที

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอติระหว่างการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวกับการแบ่งเติมได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.13 พบว่าผลการทดลองโดยการแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเพียงเล็กน้อยที่อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวล 1:10 และ 1:25 ที่อัตราส่วน 1:10 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นจากเดิม 73% เป็น 80% และที่อัตราส่วน 1:25 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นจากเดิม 68% เป็น 76% อาจจะเป็นเนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วน 1:10 และ 1:25 มีปริมาณมากเกินไปทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่วนเกินทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคัลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง (Bautista et al., 2007), ดังนั้นเมื่อทำการลดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในตอนต้นของปฏิกิริยาเฟ้นต้นจึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น แต่ในขณะที่อัตราส่วน 1:2.5 และ 1:5 ไม่มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นอาจเป็นผลจากที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้มีความเหมาะสม ซึ่งจากรูปที่ 4.12 จะพบว่าปฏิกิริยาเฟ้นต้นเกิดขึ้นรวดเร็วมากโดยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ตั้งแต่ช่วงเวลา 0.5 นาที หลังจากเริ่มปฏิกิริยาทำให้เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วงหลังจึงไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้มากกว่าช่วงต้น



ภาพที่ 4. 13 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอติเทียบกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวกับการแบ่งเติม เมื่อใช้เฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการเฟ้นต้น

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลโดยวิธีทางสถิติการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวและการแบ่งเติมที่อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่ 1:2.5 1:5 1:10 และ 1:25 พบว่าการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวและการแบ่งเติมไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ระดับความเชื่อมั่น 95%) เนื่องจากกระบวนการเฟ้นต้นมีใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นสารเคมีที่มีราคาแพงกว่าเฟอร์ริกคลอไรด์อาจใช้ในกระบวนการเฟ้นต้นเสมือนแบบเนื้อเดียว (Kiril Mert et al., 2010) ดังนั้นจึงทำให้งานวิจัยนี้สนใจกระบวนการเฟ้นต้นเสมือนแบบเนื้อเดียวในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี (Nieto et al., 2011)

#### 4.5 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบสารเนื้อเดียวโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

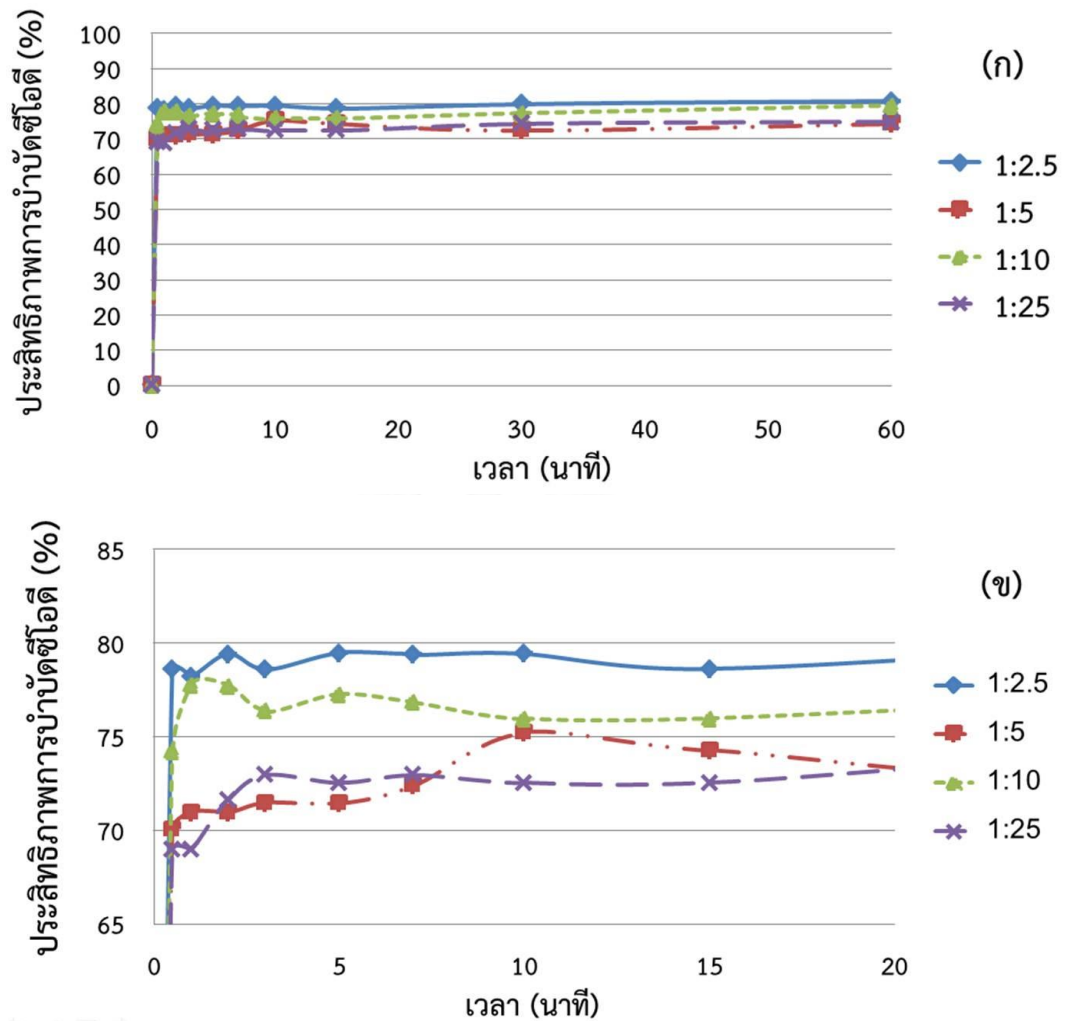
##### 4.5.1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดในกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวโดยวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยซีโอดี

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ กระบวนการเฟนตันเสมือนแบบสารเนื้อเดียว (Homogeneous Fenton-like reaction) โดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และ กระบวนการเฟนตันเสมือนแบบสารเนื้อผสม (Heterogeneous Fenton-like reaction) ซึ่งใช้ไฮดรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเฟนตันเสมือนคือเฟอร์ริกไอออน (Ferric ions,  $Fe^{3+}$ ) จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide,  $H_2O_2$ ) ซึ่งจะเกิดเป็นวัฏจักรในการสร้างไฮดรอกซิลแรดิคัลเช่นเดียวกับปฏิกิริยาเฟนตัน (Gallard & De Laat, 2000) กลไกการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันเสมือนแสดงได้ดังสมการที่ (2.17) (2.18) และ (2.1)



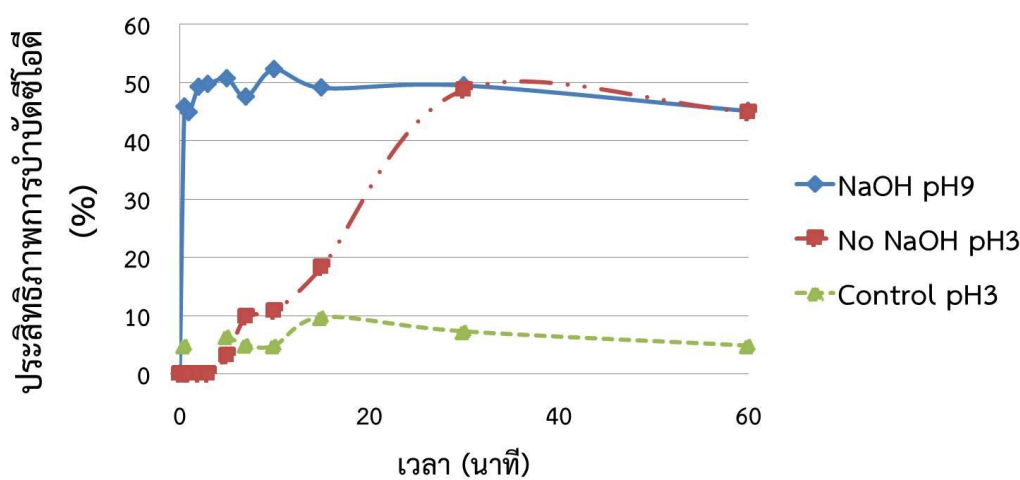
ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเฟอร์ริกไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบสารเนื้อเดียวโดยเลือกใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจากการทดลองนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของน้ำมันตัด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยควบคุมพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 3 เติมความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการศึกษาคความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วง 125 – 1,250 มิลลิกรัมต่อลิตร และศึกษาอัตราส่วนเฟอร์ริกไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่ 1:2.5 1:5 1:10 และ 1:25 ทำการเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาต่างๆ วิเคราะห์ซีโอดี ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.14 และภาคผนวก ค.1 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีมีค่าใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนโดยมีประสิทธิภาพบำบัดมากกว่า 70%



ภาพที่ 4. 14 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่มีอัตราส่วนเฟอริกไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมวลที่ต่างกันเมื่อใช้เฟอริกไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการเฟ้นต้นเสมือนแบบเนื้อเดียว (ก) ที่เวลา 0-60 นาที (ข) ที่เวลา 0-20 นาที

เมื่อทำการศึกษาชุดควบคุมในกระบวนการเฟ้นต้นเสมือนแบบเนื้อเดียวโดยนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นน้ำมันตัดเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการปรับพีเอชให้เท่ากับ 3 จากนั้นจึงเติมเฟอริกไอออนความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาต่างๆ โดยในการทดลองนี้ทำการศึกษา 2 แบบ คือ มีการเติมและไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยซีโอดี ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.15 และภาคผนวก ค.1 โดยจากผลการทดลองพบว่าเมื่อไม่มีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างพบว่าไม่มีการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียน้ำมันตัดสังเคราะห์ในช่วงแรก แต่จะมีเริ่มการบำบัดซีโอดีเมื่อเวลา 30 นาทีเป็นต้นไป ทั้งนี้เนื่องมาจากในกระบวนการเฟ้นต้นเสมือนแบบเนื้อเดียวที่ใช้เฟอริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีคุณสมบัติเป็นโคแอกกูแลนท์จึงทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันเกิดขึ้นโดยพบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีประมาณ 50%

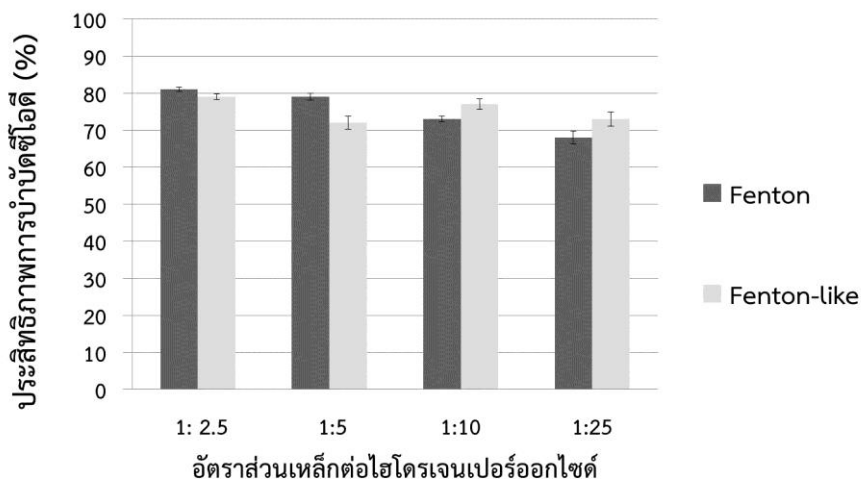
แต่ถ้าหากในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างมีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับพีเอชให้เป็นต่าง จะส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีตั้งแต่ช่วงเริ่มการทดลองโดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีประมาณ 50% เนื่องจากเฟอร์ริกไอออนที่เติมลงไปมีการตกตะกอนลงมาเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) (Selcuk, 2005) นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาเรื่องพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีหรือไม่โดยการนำน้ำเสียน้ำมันตัดสังเคราะห์มาปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 3 แล้ว ทำการเก็บตัวอย่างที่ช่วงเวลาต่างๆพบว่า การปรับพีเอชไม่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี



ภาพที่ 4. 15 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของชุดควบคุมการทดลองในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียว

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน ดังภาพที่ 4.16 พบว่ากระบวนการเฟนตันมีประสิทธิภาพบำบัดมากกว่าในช่วงอัตราส่วนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 1:2.5 และ 1:5 เนื่องจากกระบวนการเฟนตันเสมือน (ตามสมการที่ 4.5 และ 4.6) เกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ อนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{HO}_2\cdot$ ) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์ต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของกระบวนการเฟนตันมีค่าสูงกว่ากระบวนการเฟนตันเสมือน (Neyens & Baeyens, 2003)



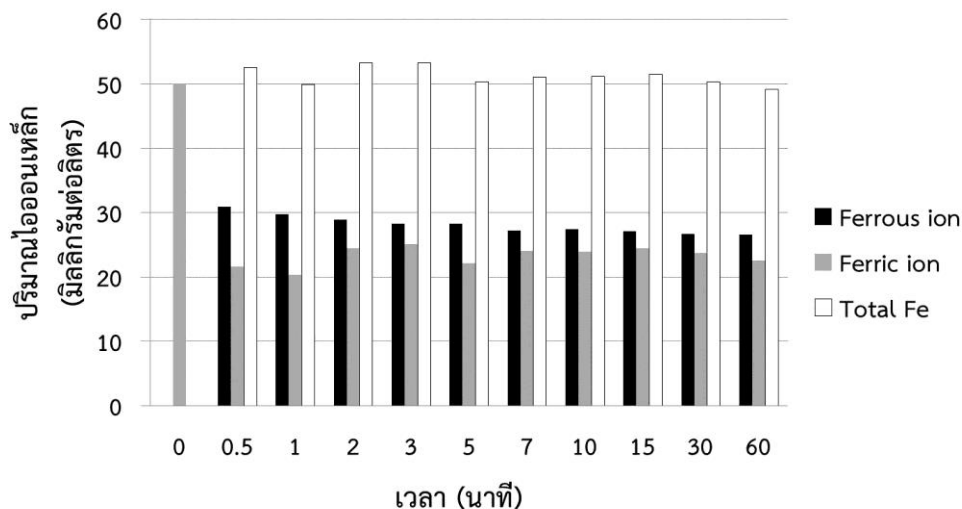


ภาพที่ 4. 16 เทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีด้วยกระบวนการเฟนตันและกระบวนการเฟนตันเสมือน เมื่อใช้ไอออนเหล็ก(เฟอร์รัสและเฟอร์ริกไอออน) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลทางสถิติระหว่างการทำบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากับกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวซึ่งใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนเหล็ก(เฟอร์รัสและเฟอร์ริกไอออน)ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่ 1:2.5 1:5 1:10 และ 1:25 พบว่าการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันและกระบวนการเฟนตันเสมือนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ระดับความเชื่อมั่น 95%) เมื่อใช้เหล็ก(เฟอร์รัสและเฟอร์ริกไอออน)ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 4.5.2 ศึกษาปริมาณเหล็กต่างๆที่คงเหลือในระบบของกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวเมื่อเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

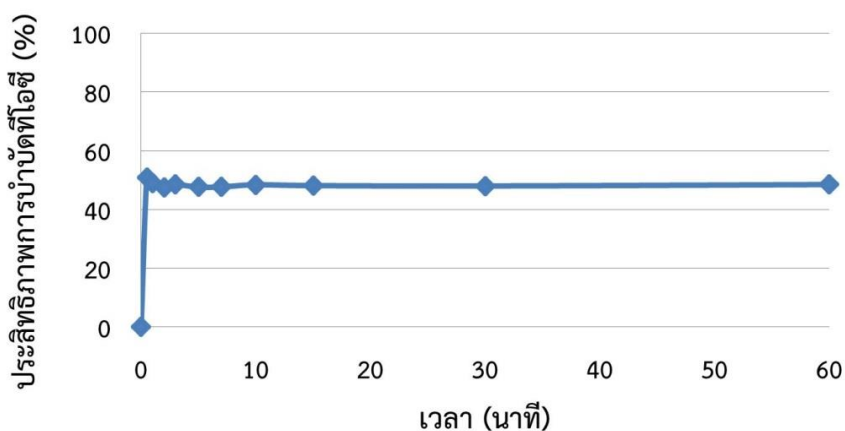
ในศึกษาปริมาณชนิดของไอออนเหล็กที่ทำปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวเมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทำการศึกษาในสถานะที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีสูงสุดคือที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออนเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม และ อัตราส่วนเฟอร์ริกไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1:2.5 โดยวิเคราะห์ปริมาณเฟอร์ริกและเฟอร์รัสไอออนด้วยวิธีพีแนนโทรลีน ดังภาคผนวก ก.2 และภาคผนวก ค.2 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.17 โดยพบว่าที่ปริมาณครั้งนาที่ ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออนลดลงเหลือประมาณ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรในช่วงเริ่มต้นและหลังจากนั้นความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนก็คงที่ตลอดการทดลอง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเฟอร์ริกไอออนถูกเปลี่ยนให้เป็นเฟอร์รัสไอออนได้ดังสมการที่ (4.5) และ (4.6) ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีที่ประสิทธิภาพการบำบัดสูงตั้งแต่ช่วงแรกและคงที่ไปเรื่องจนจบการทดลอง



ภาพที่ 4. 17 แสดงปริมาณไอออนเหล็กที่ช่วงเวลาต่างๆในกระบวนการเฟ้นต้นเสมือนแบบเนื้อเดียวที่ใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 4.5.3 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าที่ไอซีในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟ้นต้นเสมือนแบบเนื้อเดียว

เนื่องจากปัญหาที่ได้กล่าวมาในขั้นต้นจึงทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าที่ไอซีในน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟ้นต้นเสมือนแบบเนื้อเดียวเมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาในสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีสูงสุดคือที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออนเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม และ อัตราส่วนเฟอร์ริกไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1:2.5 ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังภาพที่ 4.18 และภาคผนวก ค.3 พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยค่าที่ไอซีคือประมาณ 50% โดยประสิทธิภาพในการบำบัดที่ไอซีจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและหลังจากนั้นจะคงที่เรื่อยๆไปจนจบการทดลอง (60 นาที) โดยประสิทธิภาพที่ไอซีซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดที่ไอซีที่ได้มีความสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี



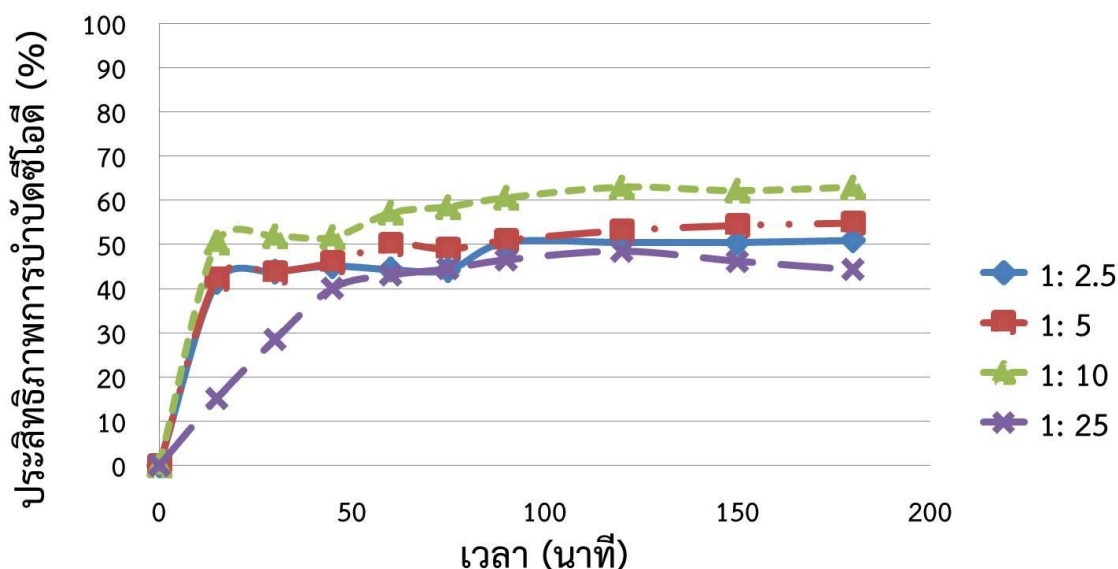
ภาพที่ 4. 18 ประสิทธิภาพการบำบัดที่ไอซีที่มีอัตราส่วนเฟอร์ริกไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมวลที่แตกต่างกันเมื่อใช้เฟอร์ริกไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการเฟนตัน

เนื่องจากกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียว ต้องทำการควบคุมพีเอชให้ได้ 3 ทำให้ต้องมีการเติมกรดเพื่อปรับค่าพีเอช นอกจากนี้เหล็กเพอริกคลอไรด์ที่เติมลงไปนั้น ไม่สามารถที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นจึงได้มีการหาตัวเร่งปฏิกิริยาเฟนตันแบบเนื้อผสมนี้ขึ้น เพื่อที่ว่าเมื่อจบการทดลองแล้วจะสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยานี้กลับมาใช้ใหม่ได้ โดยในงานวิจัยนี้จึงมีการสังเคราะห์ไอรอนโมลิบเดตขึ้นเพื่อใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาเฟนตันเสมือนแบบเนื้อผสม

#### 4.6 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการเฟนตันเสมือนโดยไอรอนโมลิบเดต

ไอรอนโมลิบเดต (Iron molybdate,  $Fe_2(MoO_4)_3$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถสังเคราะห์ได้ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อผสมเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานี้สามารถทำงานได้ในช่วงพีเอชที่กว้างคือ 3-9 มีลักษณะโครงสร้างที่เสถียร สามารถนำมาใช้ซ้ำได้หลายครั้ง (S. H. Tian et al., 2011) ด้วยเหตุนี้เองทำให้ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อผสมนี้

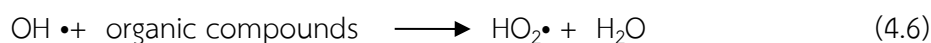
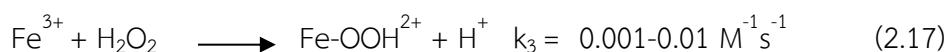
จากการทดลองได้ทำการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเฟอร์ริกไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบสารเนื้อผสมซึ่งใช้ไอรอนโมลิบเดตที่ทำการสังเคราะห์ได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของน้ำมันตัด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยควบคุมพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 4 เติมความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยศึกษาค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วง 0.5 -5 กรัมต่อลิตร โดยทำการศึกษาอัตราส่วนเฟอร์ริกไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมวลที่ 1:2.5 1:5 1:10 และ 1:25 ทำการเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาต่างๆ วิเคราะห์ซีโอดี ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.19 และภาคผนวก ง.1



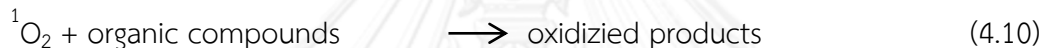
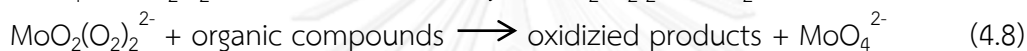
ภาพที่ 4. 19 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอติที่มีอัตราส่วนเฟอร์ริกไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมวลที่แตกต่างกันเมื่อใช้เฟอร์ริกไอออน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อผสม

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอติเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วงความเข้มข้น 0.5 -2 กรัมต่อลิตร เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจะมีการสร้างมีปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลแรดิคัล(OH•) และอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลแรดิคัล (HO<sub>2</sub>•) มากขึ้น ดังสมการที่ (4.1) ถึง (4.3) (Tamimi, Qourzal, Barka, Assabbane, & Ait-ichou, 2008) ทั้งนี้ถ้ามีการเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่า 2 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอติจะมีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไปจะเกิดปฏิกิริยาการขัดขวางออกซิเดชันทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง (Kallel et al., 2009) ดังนั้นอัตราส่วนเฟอร์ริกไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:10 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดประมาณคือ 60%

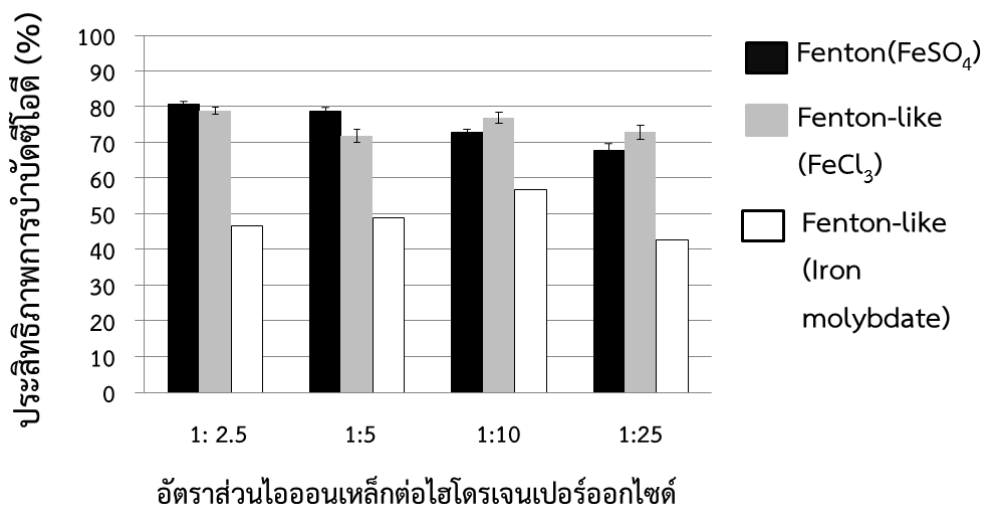
กลไกในกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อผสมที่ใช้ไฮดรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดได้ 2 กลไกคือ เฟอร์ริกไอออนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังสมการที่ (2.17) (2.18) และ (4.6)



และอีกกลไกคือ โมลิบเดต ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ) ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยสร้างสารประกอบเชิงซ้อนโมลิบดินัมเปอร์ออกโซ ( $\text{MoO}_2(\text{O}_2)_2^{2-}$ ) ซึ่งเป็นตัวออกซิแดนซ์ที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ดังสมการที่ (4.7) – (4.8) (Shi, Hua, Zhang, & Tang, 2005) หรือสร้างออกซิเจนอะตอมเดี่ยว (singlet oxygen,  $^1\text{O}_2$ ) ที่ถูกสร้างจากสารประกอบเชิงซ้อนเปอร์ออกโซ (peroxo complex) ดังสมการที่ (4.9) และ (4.10) นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Tian และคณะได้กล่าวว่าเฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) และ โมลิบเดต ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ) สามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ควบคู่กัน (S. Tian et al., 2013) แต่ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนโมลิบดินัมและออกซิเจนอะตอมเดี่ยวเป็นตัวออกซิแดนซ์ที่ความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์น้อยกว่าไฮดรอกซิลแรดิคัล ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีไม่สูงเมื่อเทียบกับกระบวนการเฟนตันที่มีไฮดรอกซิลแรดิคัลเป็นตัวออกซิแดนซ์



เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเมื่อใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการเฟนตันแบบเนื้อเดียวโดยมีเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และสุดท้ายคือกระบวนการเฟนตันแบบเนื้อผสมที่มีไฮดรอกซิลแรดิคัลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังภาพที่ 4.20 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีด้วยกระบวนการเฟนตันและกระบวนการเฟนตันแบบเนื้อเดียวมีค่าใกล้เคียงกันและเมื่อทำการเปรียบเทียบด้วยข้อมูลทางสถิติก็พบว่าข้อมูลทั้งสองชุดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อนำทั้งสองกระบวนการมาเปรียบเทียบกับกระบวนการเฟนตันแบบเนื้อผสมพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของกระบวนการเฟนตันและกระบวนการเฟนตันแบบเนื้อเดียวมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่กว่ากระบวนการเฟนตันแบบเนื้อผสม เนื่องจากกระบวนการเฟนตันแบบเนื้อผสมมีลักษณะเป็นของแข็งไม่ละลายทำให้ในตอนที่เกิดปฏิกิริยาเฟนตันแบบเนื้อผสมจึงใช้เวลาที่นานกว่าการใช้เหล็กในรูปสารละลายทำให้เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาช้ากว่ากระบวนการเฟนตันและกระบวนการเฟนตันแบบเนื้อเดียว โดยใช้เวลาประมาณ 120 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดจึงเริ่มจะคงที่ ในขณะที่กระบวนการเฟนตัน และกระบวนการเฟนตันแบบเนื้อเดียวใช้เวลาเพียง 30 นาที



ภาพที่ 4. 20 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอไซด์ด้วยกระบวนการฟenton (เฟอร์รัสซัลเฟต) กระบวนการฟentonเสมือนแบบเนื้อเดียว (เฟอร์ริกคลอไรด์) และ กระบวนการฟentonเสมือนแบบเนื้อผสม (ไอรอนโมลิบเดต)

ผลการศึกษการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วย กระบวนการฟentonเมื่อใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและฟentonเสมือนแบบเนื้อเดียวเมื่อใช้ เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอไซด์ให้ผลที่ไม่มี ความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ(ระดับความเชื่อมั่น 95%) แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการ การบำบัดด้วย กระบวนการฟentonเสมือนแบบเนื้อผสมเมื่อใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า กระบวนการ ฟentonเสมือนแบบเนื้อผสมมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอไซด์มีค่าต่ำกว่าและใช้เวลานานกว่าใน การบำบัด

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอไซด์ในกระบวนการฟentonเสมือน แบบเนื้อเดียวเมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยากับกระบวนการฟentonเสมือนแบบเนื้อผสม เมื่อใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอไซด์ด้วยกระบวนการฟenton เสมือนแบบเนื้อเดียวมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอไซด์ที่ดีกว่าทั้งนี้อาจมาจากในกระบวนการฟenton เสมือนแบบเนื้อเดียวเฟอร์ริกไอออนได้กระจายตัวอยู่ในสารละลายทำให้เมื่อเติมไฮดรอกซิดเปอร์ ออกไซด์ลงไปจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาฟentonได้เร็วกว่าและมีประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่า ในขณะที่ ไอรอนโมลิบเดตมีลักษณะเป็นของแข็งไม่ละลายน้ำในการเกิดปฏิกิริยาฟentonจะเกิดที่ผิวของไอรอน โมลิบเดตเท่านั้นซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพบำบัดไม่สูงมาก

ทั้งนี้ไอรอนโมลิบเดตอาจปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยการเพิ่มปริมาณไอรอนโม ลิบเดตที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ต่ำกว่า การใช้ไอรอนโมลิบเดตยัง มีข้อดีที่น่าสนใจ คือไม่เป็นการเพิ่มปริมาณของแข็งละลายในน้ำเสียและมีแนวโน้มสามารถนำกลับมา

ใช้ซ้ำได้ แต่ทั้งนี้ไอรอนโมลิบดีนัมที่ใช้ในกระบวนการเฟนตันแบบเนื้อผสมนี้จะต้องทำการสังเคราะห์ขึ้นมา ดังนั้นอาจมีความยุ่งยากที่จะนำเอามาใช้จริง

#### 4.7 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้นของน้ำมันตัดเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือนซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3 และภาคผนวก ฉ.1 พบว่ากระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวเมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดที่ต่ำกว่าคือ 349 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร และ 1,780 บาทต่อกิโลกรัม ซีไอดี เมื่อทำการเปรียบเทียบกับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดในกระบวนการอื่นๆดังตารางที่ 4.4 พบว่าค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันยังมีราคาที่สูง

ตารางที่ 4. 3 แสดงผลเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือน

กระบวนการ	ความเข้มข้นน้ำมันตัดเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร	ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย 1 กิโลกรัมซีไอดี	ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี (%)
เฟนตัน (เฟอร์ริสซัลเฟต)	100	414	2,123	81
เฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียว (เฟอร์ริกคลอไรด์)	100	349	1,780	79

ตารางที่ 4. 4 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการอื่นๆ

กระบวนการ	ความเข้มข้นน้ำมันตัดเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร	ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี (%)	แหล่งอ้างอิง
กระบวนการ Coagulation – Flocculation	1,000	40	95.55	(นุสรุา โรจน์วิลาวัลย์, 2554)

กระบวนการ	ความเข้มข้น น้ำมันตัดเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ค่าใช้จ่ายในการ บำบัด น้ำเสีย 1 ลูกบาศก์ เมตร	ประสิทธิภาพการ บำบัดซีโอดี (%)	แหล่งอ้างอิง
การรวมตะกอนทาง ไฟฟ้า	1,000	36.66	96.12	
กระบวนการอิเล็ก โทรเฟนตัน	100	169.04	92	
กระบวนการโฟโต อิเล็กโทรเฟนตัน	100	169.52	95	



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยเมื่อได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยกระบวนการเฟนตัน(เพอร์ร็อกซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียว(เพอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา)และกระบวนการเฟนตันแบบเนื้อผสม(ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) ทั้งนี้ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องทำการสารสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อใช้ในกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อผสม เมื่อทำการสังเคราะห์แล้วจะต้องมีการศึกษาคุณลักษณะของไอรอนโมลิบเดตว่าสารที่ทำการสังเคราะห์มาได้เป็นตัวเดียวกับกับไอรอนโมลิบเดตที่เราต้องการ โดยทำการศึกษารูปร่างลักษณะไอรอนโมลิบเดตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ศึกษาองค์ประกอบและปริมาณธาตุของไอรอนโมลิบเดตด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) และศึกษาโครงสร้างผลึกของไอรอนโมลิบเดตด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) ในงานวิจัยนี้ทำได้การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการต่างๆเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด โดยผลการศึกษาในแต่ละส่วนสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดในกระบวนการเฟนตันเมื่อใช้เพอร์ร็อกซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการศึกษาที่ความเข้มข้นเพอร์ร็อกซัลเฟต 500 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยศึกษาอัตราส่วนเพอร์ร็อกซัลเฟตต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุดพบว่าที่อัตราส่วนเพอร์ร็อกซัลเฟตต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุดคือ 1: 2.5 เมื่อใช้เพอร์ร็อกซัลเฟตทั้ง 500 และ 50 มิลลิกรัม โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ 86% และ 81% ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเมื่อใช้เพอร์ร็อกซัลเฟตที่ 500 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยข้อมูลทางสถิติ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของทั้งสองตัวแปรไม่มีความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นเพอร์ร็อกซัลเฟตที่ 50 มิลลิกรัมในงานวิจัยนี้ และเมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมที่สุดไปศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยที่โอซีพบว่าแนวโน้มในการบำบัดมีความคล้ายคลึงกันเมื่อเทียบกับการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยซีโอดี

5.1.2 การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดในกระบวนการเฟนตันแบบแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อใช้เพอร์ร็อกซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนเพอร์ร็อกซัลเฟตต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:10 และ 1:25 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงกว่าการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงครั้งเดียวเพียงเล็กน้อย ส่วนที่อัตราส่วนต่างๆไม่พบความแตกต่างกันเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของการเติมครั้งเดียวและการแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยข้อมูลทางสถิติพบว่า การแบ่งเติมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวไม่มีความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดจึงไม่ใช้กระบวนการแบ่งเติม

5.1.3 การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวเมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนของเฟอร์ริกไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 1:2.5 มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีที่ดีที่สุดคือประมาณ 80% ส่วนอัตราส่วนที่เหลือมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีที่ใกล้เคียงกัน โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีมากกว่า 70% นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีระหว่างกระบวนการเฟนตันและกระบวนการเฟนตันเสมือนด้วยข้อมูลทางสถิติพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีและกระบวนการเฟนตันเสมือนด้วยข้อมูลทางสถิติพบว่าคุณสมบัติของกระบวนการเฟนตันและกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวไม่มีความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมที่สุดไปศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยทีโอซีพบว่าแนวโน้มในการบำบัดมีความคล้ายคลึงกันเมื่อเทียบกับการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยซีไอดี

5.1.4 ทำการสังเคราะห์ไอรอนโมลิบเดตเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อผสม จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของไอรอนโมลิบเดตดังต่อไปนี้

- ศึกษารูปร่างลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) โดยมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยประมาณ 500 นาโนเมตร
- ศึกษาองค์ประกอบของธาตุและปริมาณของธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) พบเหล็ก (Fe) โมลิบดีนัม (MO) และ ออกซิเจน (O) เมื่อคำนวณหาอัตราส่วนโมลิบดีนัมต่อเหล็กคือ 1.5
- ศึกษาโครงสร้างผลึกของไอรอนโมลิบเดตด้วยเครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) พบว่ามีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบมอโนคลินิก

5.1.5 การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อผสมโดยใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อควบคุมพีเอชที่ 4 ปริมาณเฟอร์ริกไอออนที่ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนเฟอร์ริกไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมคือ 1:10 โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี 58%

5.1.6 ในงานวิจัยนี้กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือนตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดีได้แก่พีเอช อัตราส่วนเหล็ก (เฟอร์รัสและเฟอร์ริกไอออน)ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาจะรบกวนการวิเคราะห์ซีไอดีจึงมีการแก้ปัญหาโดยการทิ้งไว้ข้ามคืน แต่ถ้าต้องการทราบผลการทดลองทันทีก็สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยทีโอซี

2. ในกระบวนการเฟนตันแบบแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียง 2 ครั้งยังไม่เห็นผลว่าการแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดี ดังนั้นจึงควรมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เป็นระบบต่อเนื่อง

3. กระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อผสมที่ใช้ไอรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถที่จะนำมาใช้ซ้ำ ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนนี้

4. นำกระบวนการเฟนตันและเฟนตันเสมือนไปประยุกต์ใช้ในน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดจริงหรือน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันชนิดอื่นๆ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เจษฎา ถาวรศักดิ์. (2547). การใช้กระบวนการยูวีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์บำบัดน้ำชะซึมจากหลุมฝังกลบ  
มันคงที่ผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้น. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. (วิศวกรรม  
มหาบัณฑิต)
- ชญาสิน พรหมจันทร์. (2554). การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า  
และการทำให้ลอยภายในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก. (วิศวกรรมศาสตร  
มหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนนท์ เฉลิมสินสุวรรณ. (2552). การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและ  
โซโน-เฟนตัน. (วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนากร เมธาธรรม. (2554). การกำจัดสาร 2,4-ไดคลอโรฟีนอลและไตรโคลซานด้วยกระบวนการเฟนตัน  
และอิเล็กโทรเฟนตัน. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นพพร ณะชัยจันทร์. (2555). สถิติเบื้องต้นสำหรับการวิจัย (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). กรุงเทพฯ: บริษัท  
วิทย์พัฒน์จำกัด.
- นุสรรา โรจน์วิลาวัลย์. (2554). การบำบัดน้ำเสียน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและโ  
โตอิเล็กโทรเฟนตัน. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บริษัทออยเซอร์ฟจำกัด. (2010). ส่วนประกอบของน้ำมันหล่อลื่น. Retrieved 2556, มกราคม 6, from  
[http://www.oilservethai.com/index.php?lay=show&ac=article&Ntype=11&Id=5391215  
01](http://www.oilservethai.com/index.php?lay=show&ac=article&Ntype=11&Id=539121501)
- ปฐมาพร นันทากกุล. (2549). การใช้ปฏิกิริยาเฟนตันในการบำบัดค่า COD และสีของน้ำทิ้งจาก  
กระบวนการรักษาเนื้อไม้ยางพาราของโรงงานผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์และน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกล่อง  
กระดาษ. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ประเสริฐ เทียนนิมิตร, ขวัญชัย สันทิพย์สมบุรณ์, & ปานเพชร ชินินทร. (2532). น้ำมันเชื้อเพลิงและสาร  
หล่อลื่น (พิมพ์ครั้งที่ 2 ed.). กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัด.
- มณฑา ประดิษฐ์ขำ. (2550). การปรับปรุงกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีของโรงงานผลิตเคมีภัณฑ์โดย  
เฟนตันออกซิเดชัน. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- มันรัชย์ ตันกุลเวศม์, & มันสิน ตันกุลเวศม์. (2545). เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.).  
กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มารุต โปราณนท์. (2549). การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโทรเฟน-  
ตอน. (วิทยาศาตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มิ่งขวัญ บุตรวงศ์. (2543). การพัฒนารูปแบบการบำบัดน้ำทิ้งน้ำมันตัดโลหะโดยวิธีไบโอรีมีเดียชัน.  
(ปริญญามหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วุฒิ วิพันธ์พงษ์. (2540). การใช้สารเคมีเฟนตันกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม.  
(วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- วุฒิวัตติ หล่อตระกุล. (2552). กระบวนการโคเอเลสเซนซ์สำหรับบำบัดน้ำมันหล่อลื่นในน้ำเสียโดยเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ปรับปรุงพื้นที่ผิว. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์. (2552). การบำบัดและการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคเอเลสเซอร์. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุธรรม ศรีหล่มสัก. (2554). เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเบื้องต้น (พิมพ์ครั้งที่1 ed.). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

#### ภาษาอังกฤษ

- Aravindhan, R., Fathima, N. N., Rao, J. R., & Nair, B. U. (2006). Wet oxidation of acid brown dye by hydrogen peroxide using heterogeneous catalyst Mn-salen-Y zeolite: A potential catalyst. *Journal of Hazardous Materials*, 138(1), 152-159.
- Bataller, 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 Materials Processing Technology*, 152(2), 215-220.
- Bautista, P., Mohedano, A. F., Gilarranz, M. A., Casas, J. A., & Rodriguez, J. J. (2007). Application of Fenton oxidation to cosmetic wastewaters treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 143(1-2), 128-134.
- Bensadok, K., Benammar, S., Lopicque, F., & Nezzal, G. (2008). Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 152(1), 423-430.
- Brown, P. (2010). Colloids - Sols, foams and emulsions. Retrieved 2556, มกราคม 19, from <http://www.docbrown.info/page01/AqueousChem/AqueousChem2.htm>
- Castrol. (2557). Safety data sheet. Retrieved 15 กรกฎาคม 2557 <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/026a/0900766b8026a8bc.pdf>
- Dai, Y., Qi, Y., Zhao, D., & Zhang, H. (2008). An oxidative desulfurization method using ultrasound/Fenton's reagent for obtaining low and/or ultra-low sulfur diesel fuel. *Fuel Processing Technology*, 89(10), 927-932.
- Feng, J., Hu, X., Yue, P. L., Zhu, H. Y., & Lu, G. Q. (2003). Discoloration and mineralization of Reactive Red HE-3B by heterogeneous photo-Fenton reaction. *Water Research*, 37(15), 3776-3784.
- Fu, F., Wang, Q., & Tang, B. (2010). Effective degradation of C.I. Acid Red 73 by advanced Fenton process. *Journal of Hazardous Materials*, 174(1-3), 17-22.

- Gallard, H., & De Laat, J. (2000). Kinetic modelling of Fe(III)/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidation reactions in dilute aqueous solution using atrazine as a model organic compound. *Water Research*, 34(12), 3107-3116.
- Hasan, D. u. B., Abdul Aziz, A. R., & Daud, W. M. A. W. (2012). Oxidative mineralisation of petroleum refinery effluent using Fenton-like process. *Chemical Engineering Research and Design*, 90(2), 298-307.
- Heredia, J. B. D., J.R., & Lopez, R. (2004). Treatment of cork process wastewater by a successive chemical physical method. *Agricultural and food chemistry*, 52, 4501-4507.
- Hodaifa, G., Ochando-Pulido, J. M., Rodriguez-Vives, S., & Martinez-Ferez, A. (2013). Optimization of continuous reactor at pilot scale for olive-oil mill wastewater treatment by Fenton-like process. *Chemical Engineering Journal*, 220(0), 117-124.
- Jagadevan, S., Dobson, P., & Thompson, I. P. (2011). Harmonisation of chemical and biological process in development of a hybrid technology for treatment of recalcitrant metalworking fluid. *Bioresource Technology*, 102(19), 8783-8789.
- Jiang, Y., Pétrier, C., & David Waite, T. (2002). Kinetics and mechanisms of ultrasonic degradation of volatile chlorinated aromatics in aqueous solutions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 9(6), 317-323.
- Jorgensen, S. E. (1979). *Industrial wastewater management*. New York: Elsevier Scientific Publishing.
- Kallel, M., Belaid, C., Mechichi, T., Ksibi, M., & Elleuch, B. (2009). Removal of organic load and phenolic compounds from olive mill wastewater by Fenton oxidation with zero-valent iron. *Chemical Engineering Journal*, 150(2-3), 391-395.
- Kang, Y. W., Cho, M.-J., & Hwang, K.-Y. (1999). Correction of hydrogen peroxide interference on standard chemical oxygen demand test. *Water Research*, 33(5), 1247-1251.
- Kiril Mert, B., Yonar, T., Yalili Kiliç, M., & Kestioglu, K. (2010). Pre-treatment studies on olive oil mill effluent using physicochemical, Fenton and Fenton-like oxidations processes. *Journal of Hazardous Materials*, 174(1-3), 122-128.
- Kumar, P., Prasad, B., Mishra, I. M., & Chand, S. (2008). Treatment of composite wastewater of a cotton textile mill by thermolysis and coagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 151(2-3), 770-779.
- Lucas, M. S., & Peres, J. A. (2009). Removal of COD from olive mill wastewater by Fenton's reagent: Kinetic study. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2-3), 1253-1259.

- Marco, A., Esplugas, S., & Saum, G. (1997). How and why combine chemical and biological processes for wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 35(4), 321-327.
- Neyens, E., & Baeyens, J. (2003). A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. *Journal of Hazardous Materials*, 98(1-3), 33-50.
- Nieto, L. M., Hodaifa, G., Rodríguez, S., Giménez, J. A., & Ochando, J. (2011). Degradation of organic matter in olive-oil mill wastewater through homogeneous Fenton-like reaction. *Chemical Engineering Journal*, 173(2), 503-510.
- Niu, H., Zhang, D., Zhang, S., Zhang, X., Meng, Z., & Cai, Y. (2011). Humic acid coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanoparticles as highly efficient Fenton-like catalyst for complete mineralization of sulfathiazole. *Journal of Hazardous Materials*, 190(1-3), 559-565.
- Peng, C., Gao, L., Yang, S. W., & Sun, J. (2008). A general precipitation strategy for large-scale synthesis of molybdate nanostructures. *Chemical Communication*, 43, 5601-5603.
- Rodríguez, M. (2003). *Fenton and UV-vis Based Advanced Oxidation Processes in Wastewater Treatment: degradation, mineralization and biodegradability enhancement* Barcelona University de Barcelona
- Selcuk, H. (2005). Decolorization and detoxification of textile wastewater by ozonation and coagulation processes. *Dyes and Pigments*, 64(3), 217-222.
- Shi, H. W., X., Hua, R., Zhang, Z., & Tang, J. (2005). Epoxidation of a,b-unsaturated acids catalyzed by tungstate (VI) or molybdate (VI) in aqueous solvents: a specific direct oxygen transfer mechanism. *Tetrahedron*, 61, 1297-1307.
- Tamimi, M., Qourzal, S., Barka, N., Assabbane, A., & Ait-Ichou, Y. (2008). Methomyl degradation in aqueous solutions by Fenton's reagent and the photo-Fenton system. *Separation and Purification Technology*, 61(1), 103-108.
- Tian, S., Zhang, J., Chen, J., Kong, L., Lu, J., Ding, F., & Xiong, Y. (2013). Fe<sub>2</sub>(MoO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> as an Effective Photo-Fenton-like Catalyst for the Degradation of Anionic and Cationic Dyes in a Wide pH Range. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 13333-13341.
- Tian, S. H., Tu, Y. T., Chen, D. S., Chen, X., & Xiong, Y. (2011). Degradation of Acid Orange II at neutral pH using Fe<sub>2</sub>(MoO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> as a heterogeneous Fenton-like catalyst. *Chemical Engineering Journal*, 169(1-3), 31-37.
- Üstün, G. E., Solmaz, S. K. A., Morsünbül, T., & Azak, H. S. (2010). Advanced oxidation and mineralization of 3-indole butyric acid (IBA) by Fenton and Fenton-like processes. *Journal of Hazardous Materials*, 180(1-3), 508-513.

- Wang, H.-Y., Hu, Y.-N., Cao, G.-P., & Yuan, W.-K. (2011). Degradation of propylene glycol wastewater by Fenton's reagent in a semi-continuous reactor. *Chemical Engineering Journal*, 170(1), 75-81.
- Yap, C. L., Gan, S., & Ng, H. K. (2011). Fenton based remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons-contaminated soils. *Chemosphere*, 83(11), 1414-1430.
- Zhang, A., Wang, N., Zhou, J., Jiang, P., & Liu, G. (2012). Heterogeneous Fenton-like catalytic removal of p-nitrophenol in water using acid-activated fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, 201–202(0), 68-73.
- Zhang, L., Cao, X. F., Ma, Y. L., Chen, X. T., & Xue, Z. L. (2010). Pancake-like  $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$  microstructures: microwave-assisted hydrothermal synthesis, magnetic and photocatalytic properties. *New Journal of Chemistry*, 34, 2027-2033.
- Zhou, H., & Smith, D. W. (2002). Advanced technologies in water and wastewater treatment. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 1, 247-264.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก  
วิธีการวิเคราะห์

ภาคผนวก ก.1 การหาปริมาณซีโอดี Chemical Oxygen Demand (COD)

(Close-reflux titrimetric method based on standard methods, APHA,1999)

การวิเคราะห์หาค่าซีโอดีเป็นวิธีวิเคราะห์หาความสกปรกของน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ วิธีนี้เป็น การวัดปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำเสียเพื่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ทั้งนี้การวิเคราะห์ซีโอดีใช้ระยะเวลาสั้น จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการควบคุมและดูแล ระบบบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากถ้ามีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นก็สามารถแก้ไขได้ทันทีที่ นอกจากนี้ยังสามารถ นำค่าซีโอดีไปประมาณค่าบีโอดีของตัวอย่างได้เมื่อทราบอัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดีของน้ำเสียชนิดนั้น

วิธีหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS

ปิเปตน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในหลอดย่อยสลายและเติม  $K_2Cr_2O_7$  0.1N 3 มิลลิลิตร  $H_2SO_4$  7 มิลลิลิตร จากนั้นหยดเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ 1-2 หยดและไทเทรตด้วยสารละลาย FAS

วิธีวิเคราะห์ซีโอดี

1. ปิเปตน้ำตัวอย่างใส่หลอดย่อยสลาย 5 มิลลิลิตร
2. ปิเปต  $K_2Cr_2O_7$  ความเข้มข้น 0.1N 3 มิลลิลิตร และ  $H_2SO_4$  7 มิลลิลิตร
3. นำน้ำตัวอย่างเข้าตูบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส อบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ทิ้งให้ตัวอย่างเย็นจากนั้นหยดเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ 1-2 หยดและไทเทรตด้วยสารละลาย FAS ความเข้มข้น 0.1 N จนกระทั่งสีเปลี่ยนเป็นน้ำตาลแดง
5. ทำแบลนค์ทุกครั้งโดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างโดยทำการวิเคราะห์เหมือนน้ำตัวอย่าง

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

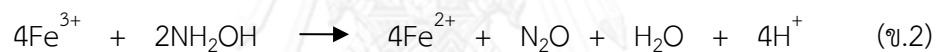
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร) =  $\frac{(A-B) \times N \times 8,000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)}}$

ภาคผนวก ก.2 การหาปริมาณ เฟอร์รัสไอออนและปริมาณเหล็กทั้งหมด ด้วยวิธีฟีแนนโทรลีน (STD APHA,1992)

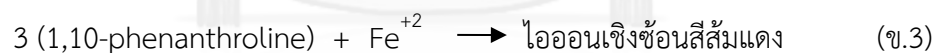
เหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) ทำปฏิกิริยารวมกับ 1,10 ฟีแนนโทรลีน (1,10 phenanthroline) ที่พีเอช ประมาณ 3.2-3.3 เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อน (Complex ion) ที่มีสีส้มแดง ความเข้มข้นของสีจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเหล็กเฟอร์รัสที่มีอยู่ในน้ำซึ่งเป็นไปตามกฎของเบียร์ (Beer's Law) สีที่เกิดขึ้นจะอยู่ตัวได้นานประมาณ 6 เดือน ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์หาเหล็กทั้งหมด (เหล็กเฟอร์ริกและเหล็กเฟอร์รัส) ที่อยู่ในน้ำจำเป็นต้องเปลี่ยนเหล็กเฟอร์ริกให้เป็นเหล็กเฟอร์รัสก่อน เหล็กเฟอร์ริกจะอยู่ในรูปตะกอนของ  $Fe(OH)_3$  ซึ่งไม่ละลายน้ำ ดังนั้นจึงต้องเติมกรดไฮโดรคลอริกเพื่อละลายตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ให้เป็นไอออนเฟอร์ริกก่อน ดังสมการ



และเปลี่ยนไอออนของเหล็กเฟอร์ริกให้เป็นไอออนของเหล็กเฟอร์รัสโดยใช้ไฮดรอกซีลามีน (Hydroxylamine) เป็นตัวรีดิวซ์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



ปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 3.2-3.3 ด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะเซเตตบัฟเฟอร์ แล้วเติม 1,10 ฟีแนนโทรลีน โดย 3 โมเลกุลของฟีแนนโทรลีนจะรวมกับเหล็กเฟอร์รัส 1 ตัว เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนขึ้นดังสมการ



สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น
2. สารละลายไฮดรอกซีลามีน (Hydroxylamine Solution) ละลายไฮดรอกซีลามีน ( $NH_2OH.HCl$ ) 10 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
3. สารละลายแอมโมเนียมอะเซเตตบัฟเฟอร์ (Ammonium Acetate Buffer Solution) ละลายแอมโมเนียมอะเซเตต ( $NH_4C_2H_3O_2$ ) 250 กรัม ในน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร เติมกรดอะเซติกชนิด Glacial 700 มิลลิลิตร ถึงแม้จะใช้แอมโมเนียมอะเซเตตเกรดดีแต่ก็ยังมีเหล็กเจือปนอยู่ ดังนั้นควรจะทำกราฟมาตรฐานใหม่ทุกครั้งเมื่อเตรียมสารละลายแอมโมเนียมอะเซเตตบัฟเฟอร์ใหม่
4. สารละลายฟีแนนโทรลีน (Phenanthroline Solution) ละลาย 1,10 ฟีแนนโทรลีนโมโนไฮเดรต ( $C_{12}H_8N_2H_2O$ ) 100 มก. ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรคนและอุ่นให้ร้อนมีอุณหภูมิ 80 องศา

เซลล์เย็บสออย่าปล่อยให้เดือด ถ้าสารละลายมีสีเข้มให้เตรียมใหม่ ถ้าเติมไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 หยด แทนก็ไม่จำเป็นให้ร้อนก็ได้ (สารละลายนี้ 1 มิลลิลิตรเพียงพอสำหรับเหล็กไม่เกิน 100 ไมโครกรัม)

5. สารละลายสต็อกเหล็ก (Stock Iron Solution) เลือกใช้ข้อใดข้อหนึ่งเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตรลงในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรอย่างช้าๆแล้วนำไปใช้ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate,  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) จำนวน 1.404 กรัม เติมโพตัสเซียมเปอร์มันกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) 0.1 นอร์มัล ทีละหยดจนกระทั่งเกิดสีชมพูอ่อนๆ เติมน้ำกลั่นจนได้ 1,000 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน

สารละลายนี้ 1.00 มิลลิลิตร = Fe 200 ไมโครกรัม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก ก.2.1 วิธีวิเคราะห์เหล็กทั้งหมด (Total Iron)

## การวิเคราะห์

1. เขย่าตัวอย่างให้เข้ากัน ตวงตัวอย่างปริมาตร 50.0 มิลลิลิตร ใส่ในปิกรอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร (ถ้าตัวอย่างน้ำมีเหล็กมากกว่า 200 ไมโครกรัมต้องใช้ปริมาณตัวอย่างให้น้อยลงแล้วเติมน้ำให้เป็น 50.0 มิลลิลิตร)

2. เติมกรดเกลือเข้มข้น 2 มิลลิลิตร และเติมสารละลายไฮดรอกซีลามีน 1 มิลลิลิตร ใส่ลูกแก้ว 3-4 เม็ด นำไปต้มบนเตาแผ่นให้เดือดเพื่อให้แน่ใจว่าเหล็กในน้ำละลายหมดแล้วต้มต่อไปจนกระทั่งปริมาตรลดลงเหลือประมาณ 15-20 มิลลิลิตร ยกลงทำให้เย็นลงจนเท่าอุณหภูมิห้อง

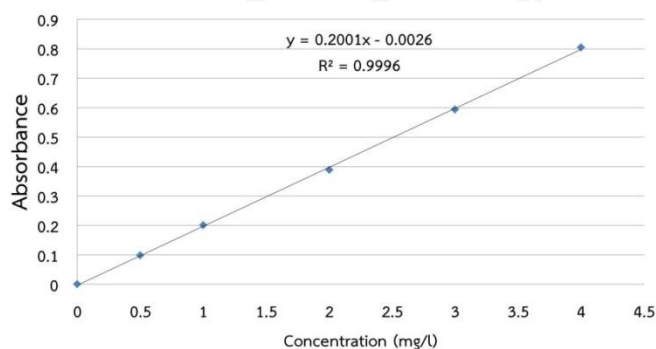
3. เทใส่หลอดเนสเลอร์ขนาด 50 มล.เติมสารละลายอะเซเตตบัฟเฟอร์ 10 มิลลิลิตรและสารละลายฟีนานโทรลีน 4 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ครบขีดปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 10-15 นาที เพื่อให้เกิดสีเข้มที่สุด

4. นำไปวัด Absorbance ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร แบลงค์ใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำแล้วทำขั้นตอนการวิเคราะห์เหมือนตัวอย่าง (ข้อ1-3) อ่านค่าจากกราฟมาตรฐาน

5. ทำกราฟมาตรฐานโดยเตรียมอนุกรมของสารละลายเหล็กให้มีความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 ไมโครกรัม โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเหล็กที่มีความเข้มข้น 1.00 มิลลิลิตร = 10.0 ไมโครกรัม มา 1,2,3,4,5 และ 6 ไมโครกรัม ใส่ในหลอดเนสเลอร์ขนาด 50 มล. แล้วเติมน้ำกลั่นให้ครบปริมาตรเทใส่ปิกรอร์ขนาด 250 มิลลิลิตรแล้วทำตามขั้นตอน 2-4 พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นเหล็กเป็นไมโครกรัมกับ Absorbance ที่อ่านได้

## การคำนวณ

$$\text{เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)} = \frac{\text{ไมโครกรัมเหล็กที่อ่านได้จากกราฟ}}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$



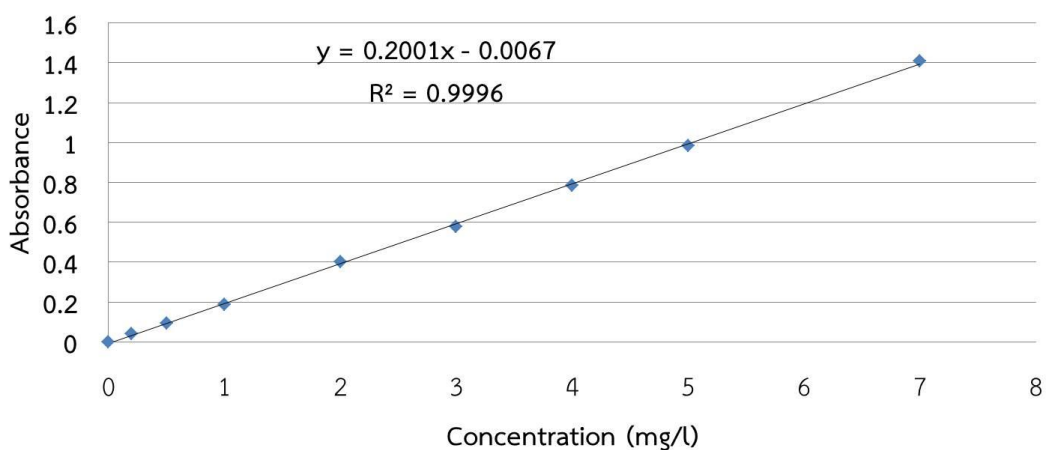
ภาพที่ ก. 1 กราฟมาตรฐานเหล็กทั้งหมด

## ภาคผนวก ก.2.2 การวิเคราะห์เหล็กเฟอรัส (Ferrous Iron)

### วิธีวิเคราะห์

1. ทำตัวอย่างให้เป็นกรดทันที(ที่จุดเก็บตัวอย่าง) โดยเติมกรดเกลือเข้มข้น 2 มิลลิลิตร ลงในขวดตัวอย่างขนาด 100 มิลลิลิตร เติมตัวอย่างน้ำให้เต็มขวด ปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน
2. คูดตัวอย่างที่ทำให้เป็นกรดนี้มา 50 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเนสเลอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟีนานโทรีน 20 มิลลิลิตรและสารละลายอะเซเตตบัฟเฟอร์ 10 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันแล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 มิลลิลิตร
3. ตัดทิ้งไว้ไม่ให้ถูกแสง วัดสีที่เกิดขึ้นภายใน 5-10 นาทีที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร อ่านค่าจากกราฟมาตรฐาน ใช้แปลงค่าน้ำกลั่นที่เติมกรด 1 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร แล้วทำตามข้อ 2-3
4. ทำกราฟมาตรฐานโดยเตรียมอนุกรมมาตรฐานให้มีความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 ไมโครกรัม โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 1 มล. = 10 ไมโครกรัมมา 1,2,3,4 และ 5 มล. ใส่ลงในหลอดเนสเลอร์ขนาด 50 มล. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 มล. แล้วเติมน้ำกลั่นให้ครบปริมาตร แล้วทำตามขั้นตอนตามข้อ 2-3 พล็อตกราฟระหว่าง Absorbance และความเข้มข้นเป็นไมโครกรัมสามารถหาเหล็กเฟอริก (Ferric Iron) ได้โดยนำเหล็กเฟอริสมาลบออกจากเหล็กทั้งหมด ดังนี้

$$\text{เหล็กเฟอริก (Fe}^{3+}\text{)} = \text{เหล็กทั้งหมด} - \text{เหล็กเฟอริส}$$



ภาพที่ ก. 2 กราฟมาตรฐานเฟอร์รัสไอออน

### ภาคผนวก ก.3 วิธีวิเคราะห์ทีโอซี (Total Organic Carbon, TOC)

ทีโอซีหมายถึง สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยเผาสารอินทรีย์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นจึงวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นโดยใช้ IR Detector หรือเปลี่ยน หรือเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็น มีเทน และใช้ ก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) วัดมีเทนที่เกิดขึ้น ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์หรือมีเทนที่ถูกวัดได้จะถูกคำนวณเป็นทีโอซี (TOC)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Instr. Information

System TOC/TN  
 Detector Combustion  
 Catalyst TC/TN  
 Cell Length long

Cal. Curve

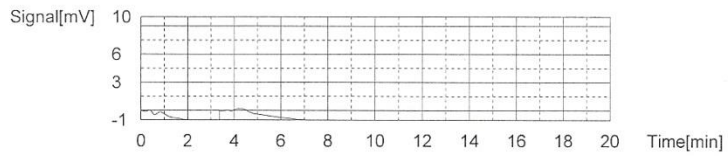
Sample Name: Untitled  
 Sample ID: Untitled  
 Cal. Curve: NPOC\_170457.2014\_04\_17\_09\_02\_55.cal  
 Status: Completed

Type	Anal.
Standard	NPOC

Conc: 0.000mg/L

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	0.000	50uL	1	*****		17/4/2557 9:13:07
2	0.1061	50uL	1	*****		17/4/2557 9:17:41

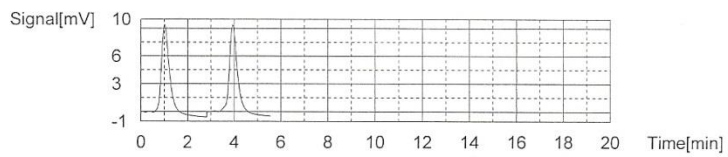
Acid Add. 1.500%  
 Sp. Time 90.00sec  
 Mean Area 0.05305



Conc: 1.000mg/L

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	23.16	50uL	1	*****		17/4/2557 9:26:59
2	23.74	50uL	1	*****		17/4/2557 9:29:55

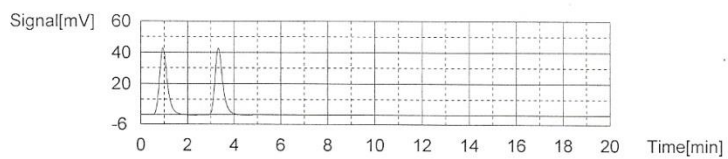
Acid Add. 1.500%  
 Sp. Time 90.00sec  
 Mean Area 23.45



Conc: 5.000mg/L

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	101.6	50uL	1	*****		17/4/2557 9:38:48
2	100.3	50uL	1	*****		17/4/2557 9:41:26

Acid Add. 1.500%  
 Sp. Time 90.00sec  
 Mean Area 101.0

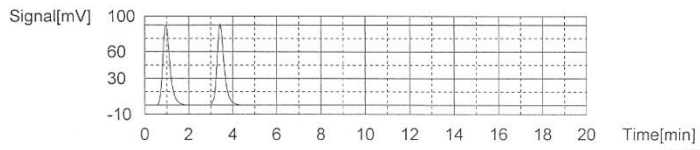


Conc: 10.00mg/L

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	208.1	50uL	1	*****		17/4/2557 9:50:17
2	210.9	50uL	1	*****		17/4/2557 9:52:57



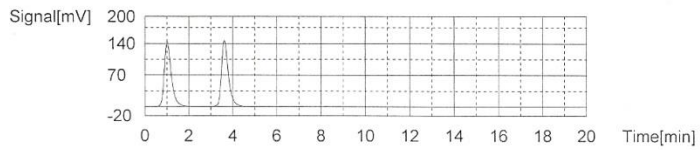
Acid Add. 1.500%  
Sp. Time 90.00sec  
Mean Area 209.5



Conc: 15.00mg/L

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	325.3	50uL	1	*****		17/4/2557 10:01:55
2	328.8	50uL	1	*****		17/4/2557 10:04:43

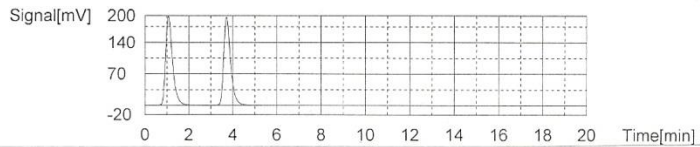
Acid Add. 1.500%  
Sp. Time 90.00sec  
Mean Area 327.1



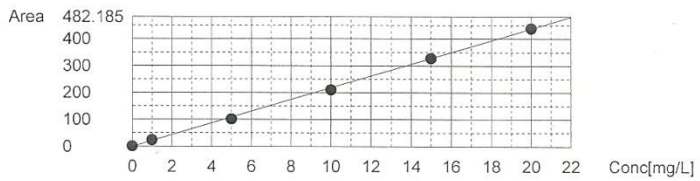
Conc: 20.00mg/L

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	440.2	50uL	1	*****		17/4/2557 10:13:48
2	436.5	50uL	1	*****		17/4/2557 10:16:36

Acid Add. 1.500%  
Sp. Time 90.00sec  
Mean Area 438.4



Slope: 21.89  
Intercept 0.000  
r<sup>2</sup> 0.999234 ✓  
r 0.999617  
Zero Shift Yes



Sample

Sample Name: DI  
Sample ID: Untitled  
Origin: NPOC\_170457.met  
Status: Completed  
Chk. Result: Completed

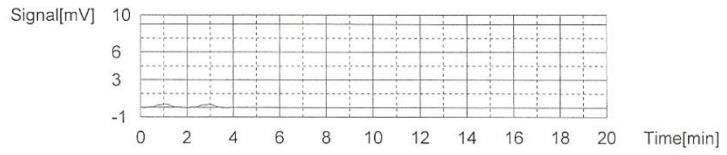
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:0.06730mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	1.508	0.06888mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 12:08:41
2	1.439	0.06572mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 12:11:21

Mean Area 1.474  
Mean Conc. 0.06730mg/L



Sample

Sample Name: 10 ppm  
Sample ID: Untitled  
Origin: NPOC\_170457.met  
Status: Completed  
Chk. Result

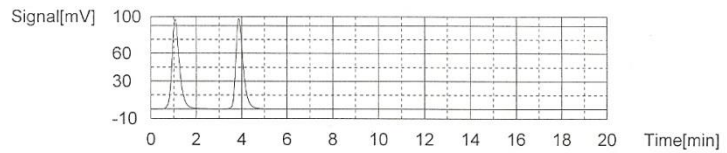
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:10.19mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	225.3	10.29mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 12:20:45
2	220.7	10.08mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 12:23:25

Mean Area 223.0  
Mean Conc. 10.19mg/L



Sample

Sample Name: DJ  
Sample ID: Untitled  
Origin: NPOC\_170457.met  
Status: Completed  
Chk. Result

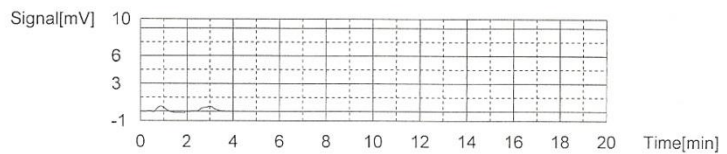
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:0.08007mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	1.740	0.07947mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 12:31:42
2	1.766	0.08056mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 12:34:22

Mean Area 1.753  
Mean Conc. 0.08007mg/L



ภาคผนวก ข

บันทึกผลการทดลองกระบวนการเฟนตัน

ภาคผนวก ข.1 ผลการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไออดีด้วยกระบวนการเฟนตัน

ตารางที่ ข. 1 ผลการทดลองอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีไออดีด้วยกระบวนการเฟนตันที่เฟอร์รัสไอออน 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ค่าซีไออดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไออดี (%)			
	Fe <sup>2+</sup> :H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>				Fe <sup>2+</sup> :H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>			
	1:2.5	1:5	1:10	1:25	1:2.5	1:5	1:10	1:25
0	265	216	221	211	0	0	0	0
0.5	39.2	52.9	63.4	63.1	85	77	71	70
1	35.3	51	57.6	57.2	87	78	74	73
2	39.2	47	49.9	55.3	85	80	77	74
3	33.3	62.7	57.6	57.2	87	73	74	73
5	35.3	58.8	57.6	55.3	87	75	74	74
7	35.3	54.9	51.8	55.3	87	76	77	74
10	39.2	51	49.9	55.3	85	78	77	74
15	27.4	47	51.8	55.3	89	80	77	74
30	29.4	45.1	49.9	57.2	89	81	77	73
60	27.4	45.1	55.7	61.1	90	81	75	71

ตารางที่ ข. 2 ชุดควบคุมการทดลองในกระบวนการเฟนตัน

เวลา (นาทีก)	ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดี (%)		
	ควบคุม พีเอช 3	เติมเพอร์ ริสไอออน แต่ไม่เติม โซเดียมไฮ ดรอกไซด์ พีเอช 3	เติมเพอร์ริส ไอออนและ เติม โซเดียมไฮ ดรอกไซด์ พีเอช 9	ควบคุม พีเอช 3	เติมเพอร์ ริสไอออน แต่ไม่เติม โซเดียมไฮ ดรอกไซด์ พีเอช 3	เติมเพอร์ริส ไอออนและเติม โซเดียมไฮดรอก ไซด์ พีเอช 9
0	251	216	202	0	0	0
0.5	239	204	88.5	4.9	5.7	56.4
1	-	198	89.3	-	8.5	56
2	-	202	86.8	-	6.6	57.2
3	-	202	85.1	-	6.6	58.1
5	6.5	204	84.2	6.5	5.7	58.5
7	-	202	87.6	-	6.6	56.8
10	4.89	202	80.8	4.9	6.6	60.2
15	9.76	204	87.6	9.8	5.7	56.8
30	7.32	206	85.9	7.3	4.7	57.7
60	4.88	206	94.2	4.9	4.7	53.5

ตารางที่ ข. 3 ผลการทดลองอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีด้วยกระบวนการเฟนตันที่เฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (%)			
	$Fe^{2+}:H_2O_2$				$Fe^{2+}:H_2O_2$			
	1:2.5	1:5	1:10	1:25	1:2.5	1:5	1:10	1:25
0	237	258	256	231	0	0	0	0
0.5	41.5	55.3	74.2	71.1	83	79	71	69
1	41.5	55.3	67.6	65.2	83	79	74	72
2	45.4	51.3	72	77	81	80	72	67
3	41.5	49.3	74.2	77	83	81	71	67
5	41.5	55.3	69.8	77	83	79	73	67
7	47.4	55.3	68	71	80	79	73	69
10	47.4	49.3	68	79	80	81	73	70
15	45.4	49.3	70	69.1	81	81	73	70
30	43.5	49.3	76	73.1	82	81	70	68
60	41.5	51.3	72	67.2	83	80	72	71

ตารางที่ ข. 4 ผลการทดลองอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีด้วยกระบวนการเฟนตันแบบแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดี (%)			
	Fe <sup>2+</sup> :H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>				Fe <sup>2+</sup> :H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>			
	1:2.5	1:5	1:10	1:25	1:2.5	1:5	1:10	1:25
0	245	223	198	235	0	0	0	0
0.5	42.8	49.7	35	42.4	83	78	82	82
1	40.8	45.8	35	46.4	83	79	82	80
2	38.8	45.8	33.1	50.3	84	79	83	79
3	38.8	47.7	37	46.4	84	79	81	80
5	38.8	47.7	39	50.3	84	79	80	79
7	38.8	47.7	33.1	50.3	84	79	83	79
10	46.7	49.7	43	58.2	81	78	78	75
12	42.8	53.5	43	52.3	83	76	78	78
15	42.8	55.5	46.9	54.2	83	75	76	77
20	42.8	49.7	45	52.3	83	78	77	78
30	42.8	45.8	43	66.1	83	79	78	72
45	40.8	43.9	39	70	84	80	80	70

ภาคผนวก ข.2 ผลการทดลองการวัดปริมาณเหล็กต่างๆในกระบวนการเฟนตัน

ตารางที่ ข. 5 บันทึกการวัดปริมาณเหล็กต่างๆในกระบวนการเฟนตัน

เวลา (นาที)	กระบวนการเฟนตัน (เฟอร์ริสซัลเฟต) ที่อัตราส่วน $Fe^{2+}:H_2O_2:1:2.5$		
	ความเข้มข้นเหล็กทั้งหมด	ความเข้มข้นเฟอร์ริสไอออน	ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออน
0	-	50	-
0.5	49.8	27.9	21.9
1	46.3	27	19.3
2	45.3	27.3	18
3	44.3	27.8	16.5
5	44.3	27.2	17.1
7	44.3	27.3	17
10	42.8	27.1	15.7
15	41.3	27.4	13.9
30	39.8	28.2	11.6
60	39.8	26.8	13

ภาคผนวก ข.3 ผลการทดลองด้วยทีโอซี เมื่อบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

ตารางที่ ข. 6 ประสิทธิภาพการบำบัด ทีโอซีเทียบเวลาในกระบวนการเฟนตันที่อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2.5

เวลา (นาที)	กระบวนการเฟนตัน (เฟอร์รัสซัลเฟต) ที่อัตราส่วน $Fe^{2+}:H_2O_2$ 1:2.5	
	ค่าทีโอซี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดี (%)
0	4.363	0
0.5	4.135	5.23
1	4.133	5.27
2	4.131	5.32
3	4.157	4.72
5	4.058	6.99
7	4.073	6.65
10	4.069	6.74
15	4.127	5.41
30	4.126	4.61
60	4.163	4.58



Sample

Sample Name: 1  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC\_170457.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result

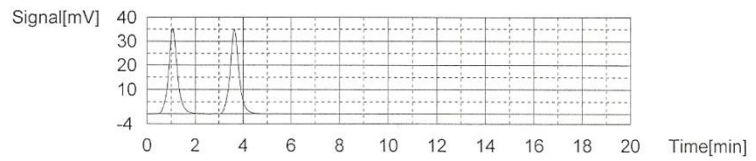
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.133mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	89.99	4.110mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 15:30:45
2	90.97	4.155mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 15:33:21

Mean Area 90.48  
 Mean Conc. 4.133mg/L



Sample

Sample Name: 2  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC\_170457.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result

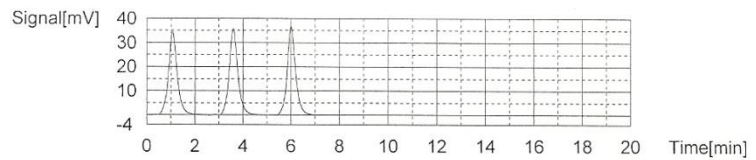
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.131mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	87.98	4.018mg/L	50uL	1	E	NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 15:42:14
2	90.93	4.153mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 15:44:49
3	89.96	4.109mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 15:47:29

Mean Area 90.45  
 Mean Conc. 4.131mg/L



Sample

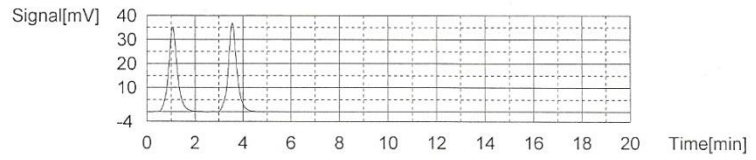
Sample Name: 3  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC\_170457.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	89.91	4.107mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 15:56:14
2	92.12	4.207mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 15:58:51

Mean Area 91.02  
Mean Conc. 4.157mg/L



Sample

Sample Name: 5  
Sample ID: Untitled  
Origin: NPOC\_170457.met  
Status: Completed  
Chk. Result

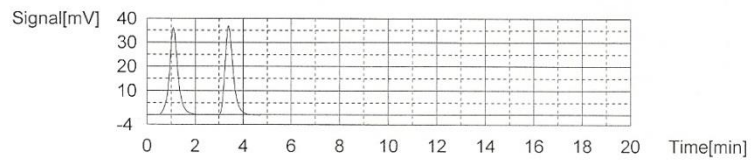
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.058mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	89.86	4.104mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 16:07:40
2	87.82	4.011mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 16:10:07

Mean Area 88.84  
Mean Conc. 4.058mg/L



Sample

Sample Name: 7  
Sample ID: Untitled  
Origin: NPOC\_170457.met  
Status: Completed  
Chk. Result

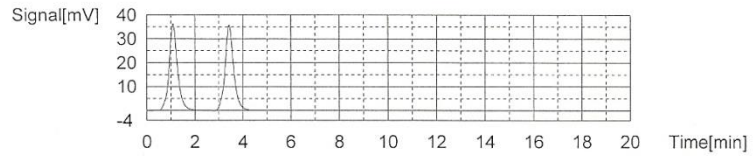
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.073mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	88.60	4.047mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 16:18:55
2	89.74	4.099mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 16:21:37

Mean Area 89.17  
 Mean Conc. 4.073mg/L



Sample

Sample Name: 10  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC\_170457.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result

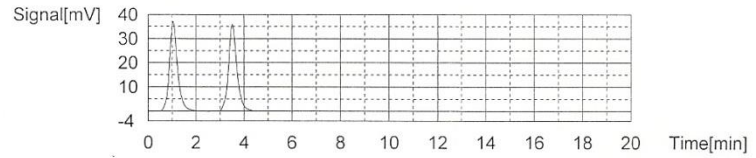
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.069mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	89.46	4.086mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 16:30:25
2	88.73	4.053mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 16:32:56

Mean Area 89.09  
 Mean Conc. 4.069mg/L



Sample

Sample Name: 15  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC\_170457.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result

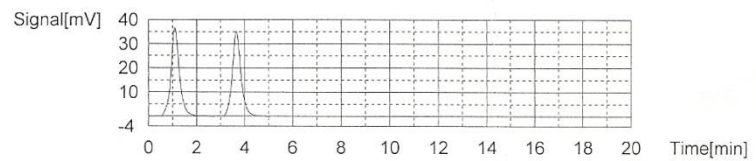
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.127mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	91.01	4.157mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 16:41:55
2	89.69	4.096mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 16:44:33

Mean Area 90.35  
 Mean Conc. 4.127mg/L



Sample

Sample Name: 30  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC\_170457.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result

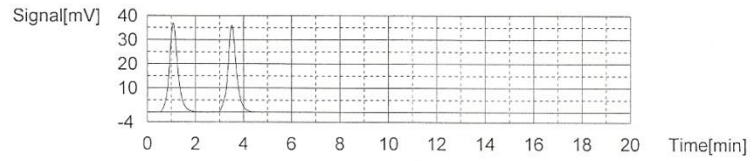
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.162mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	91.70	4.188mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 16:53:15
2	90.57	4.137mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 16:55:53

Mean Area 91.14  
 Mean Conc. 4.162mg/L



Sample

Sample Name: 60  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC\_170457.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result

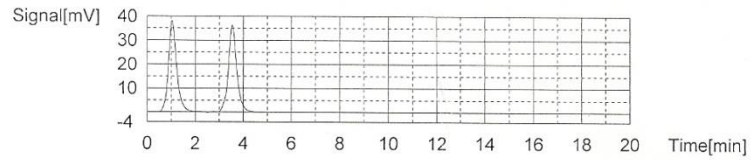
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.163mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	92.12	4.207mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 17:04:37
2	90.19	4.119mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 17:07:07

Mean Area 91.16  
 Mean Conc. 4.163mg/L



Sample

Sample Name: DI  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC\_170457.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result

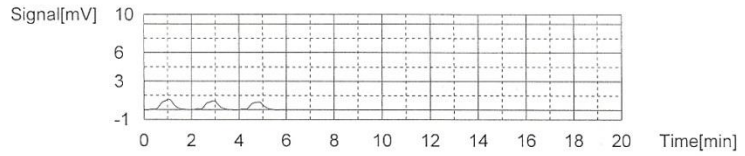
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:0.1536mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	4.034	0.1842mg/L	50uL	1	E	NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 17:15:25
2	3.505	0.1601mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 17:18:05
3	3.223	0.1472mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 17:20:45

Mean Area 3.364  
Mean Conc. 0.1536mg/L



Sample

Sample Name: Blue(Oil)  
Sample ID: Untitled  
Origin: NPOC\_170457.met  
Status: Completed  
Chk. Result

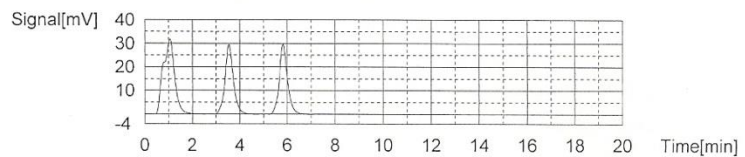
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:3.361mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	106.3	4.855mg/L	50uL	1	E	NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 17:29:33
2	73.90	3.375mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 17:32:05
3	73.26	3.346mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 17:34:46

Mean Area 73.58  
Mean Conc. 3.361mg/L



Sample

Sample Name: Control (H2O2) 0.5  
Sample ID: Untitled  
Origin: NPOC\_170457.met  
Status: Completed  
Chk. Result

Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:11.41mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	250.7	11.45mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 17:43:42
2	249.0	11.37mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 17:46:19

ภาคผนวก ค

บันทึกผลการทดลองกระบวนการฟentonแบบเนื้อเดียวโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์  
เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ภาคผนวก ค.1 ผลการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไออดีด้วยกระบวนการฟentonแบบเนื้อเดียวโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ค. 1 ผลการทดลองอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีไออดีด้วยกระบวนการฟentonแบบเนื้อเดียวที่ความเข้มข้นที่เฟอร์ริกไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาท)	ค่าซีไออดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไออดี (%)			
	$Fe^{3+}:H_2O_2$				$Fe^{3+}:H_2O_2$			
	1:2.5	1:5	1:10	1:25	1:2.5	1:5	1:10	1:25
0	242	200	220	218	0	0	0	0
0.5	53.7	68	55	64.4	78	66	75	70
1	55.6	58.6	49.4	68.3	77	71	78	69
2	47.8	58.6	47.5	58.5	80	71	78	73
3	51.7	56.7	49.4	56.6	79	72	78	74
5	51.7	56.7	45.6	56.6	79	72	79	74
7	47.8	54.8	47.5	56.6	80	73	78	74
10	49.8	52.9	47.5	56.6	79	74	78	74
15	53.7	51	49.4	56.6	78	75	78	74
30	51.7	56.7	47.5	54.6	79	72	78	75
60	45.9	56.7	47.5	54.6	81	72	78	75

ตารางที่ ค. 2 ชุดควบคุมในกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวที่ใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาทีก)	ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดี (%)		
	ควบคุม พีเอช 3	เติมเฟอร์ ริกไอออน แต่ไม่เติม โซเดียมไฮ ดรอกไซด์ พีเอช 3	เติมเฟอร์ริก ไอออนและ เติม โซเดียมไฮ ดรอกไซด์ พีเอช 9	ควบคุม พีเอช 3	เติมเฟอร์ ริกไอออน แต่ไม่เติม โซเดียมไฮ ดรอกไซด์ พีเอช 3	เติมเฟอร์ริก ไอออนและเติม โซเดียมไฮดรอก ไซด์ พีเอช 9
0	251	217	234	0	0	0
0.5	239	204	130	4.9	5.7	44.8
1	-	198	133	-	8.5	43.4
2	-	202	119	-	6.6	49.2
3	-	202	119	-	6.6	49.2
5	6.5	204	116	6.5	5.7	50.6
7	-	202	123	-	6.6	47.7
10	4.89	202	113	4.9	6.6	52
15	9.76	204	119	9.8	5.7	49.2
30	7.32	206	119	7.3	4.7	49.2
60	4.88	206	126	4.9	4.7	46.3

ภาคผนวก ค.2 ผลการทดลองการวัดปริมาณเหล็กต่างๆในกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียว โดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ค. 3 บันทึกการวัดปริมาณเหล็กต่างๆในกระบวนการเฟนตันและกระบวนการเฟนตันเสมือน

เวลา (นาที)	กระบวนการเฟนตันเสมือน (เฟอร์ริกคลอไรด์) ที่อัตราส่วน $Fe^{3+}:H_2O_2:1:2.5$		
	ความเข้มข้นเหล็กทั้งหมด	ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน	ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออน
0	-	50	-
0.5	52.5	30.9	21.6
1	50	29.7	20.3
2	53.3	28.9	24.5
3	53.3	28.3	25.1
5	50.3	28.3	22.1
7	51.1	27.2	24
10	51.1	27.4	23.9
15	51.1	27.1	24.5
30	50.3	26.7	23.7
60	49.1	26.6	22.6



ภาคผนวก ค.3 ผลการทดลองด้วยทีโอซี เมื่อบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตันเสมือนแบบเนื้อเดียวโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ค. 4 ประสิทธิภาพการบำบัด ทีโอซีเทียบเวลาในกระบวนการเฟนตันเสมือนด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ที่อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2.5

เวลา (นาที)	กระบวนการเฟนตัน (เฟอร์ริกคลอไรด์) ที่อัตราส่วน $\text{Fe}^{3+}:\text{H}_2\text{O}_2$ 1:2.5	
	ค่าทีโอซี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดี (%)
0	8.34	0
0.5	4.091	50.95
1	4.258	48.94
2	4.379	47.49
3	4.296	48.49
5	4.368	47.63
7	4.361	47.71
10	4.301	48.43
15	4.325	48.14
30	4.335	48.02
60	4.296	48.49

Sample Name: White  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC\_170457.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result

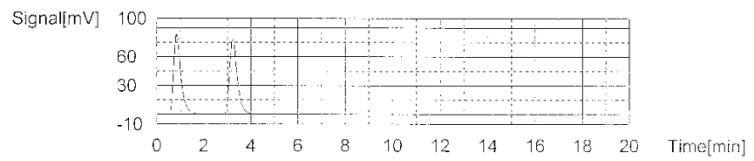
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:8.340mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	183.0	8.358mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 12:43:21
2	182.2	8.322mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 12:45:57

Mean Area: 182.6  
 Mean Conc.: 8.340mg/L



Sample

Sample Name: FeCl 1:2:5 (0.5)  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC\_170457.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result

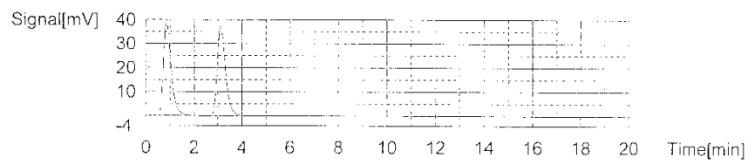
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.091mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	89.19	4.074mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 12:54:38
2	89.97	4.109mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 12:57:18

Mean Area: 89.58  
 Mean Conc.: 4.091mg/L



Sample

Sample Name: 1  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC\_170457.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result

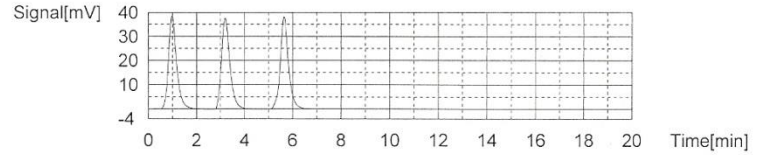
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.258mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	90.40	4.129mg/L	50uL	1	E	NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 13:06:05
2	93.06	4.250mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 13:08:44
3	93.39	4.265mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 13:11:26

Mean Area 93.22  
Mean Conc. 4.258mg/L



Sample

Sample Name: 2  
Sample ID: Untitled  
Origin: NPOC\_170457.met  
Status: Completed  
Chk. Result

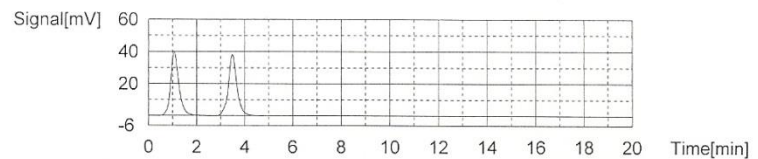
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.379mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	95.74	4.373mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 13:20:06
2	95.99	4.384mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 13:22:47

Mean Area 95.87  
Mean Conc. 4.379mg/L



Sample

Sample Name: 3  
Sample ID: Untitled  
Origin: NPOC\_170457.met  
Status: Completed  
Chk. Result

Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.296mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	93.67	4.278mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 13:31:29
2	94.46	4.314mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 13:34:13

Sample

Sample Name: 10  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC\_170457.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result

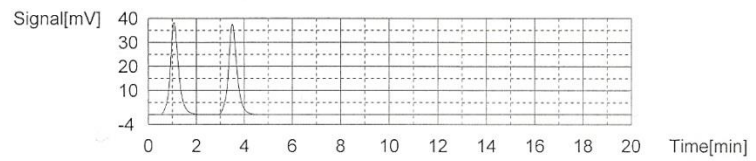
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.301mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	93.55	4.273mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 14:05:55
2	94.79	4.329mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 14:08:35

Mean Area 94.17  
 Mean Conc. 4.301mg/L



Sample

Sample Name: 15  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC\_170457.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result

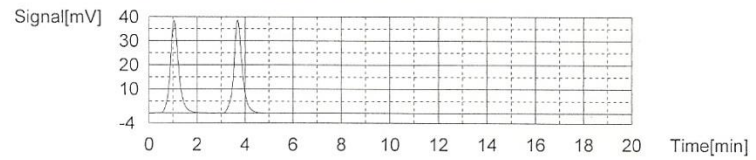
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.325mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	94.37	4.310mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 14:17:29
2	95.01	4.339mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 14:20:06

Mean Area 94.69  
 Mean Conc. 4.325mg/L



Sample

Sample Name: 30  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC\_170457.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result

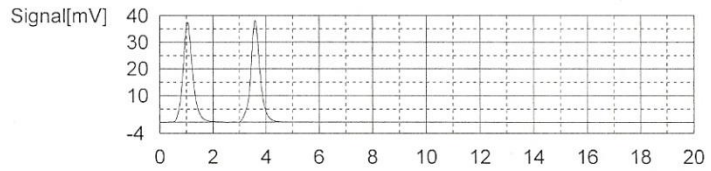
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.335mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	95.50	4.362mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 14:28:51
2	94.33	4.308mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 14:31:27

Mean Area 94.91  
Mean Conc. 4.335mg/L



Sample

Sample Name: 60  
Sample ID: Untitled  
Origin: NPOC\_170457.met  
Status: Completed  
Chk. Result

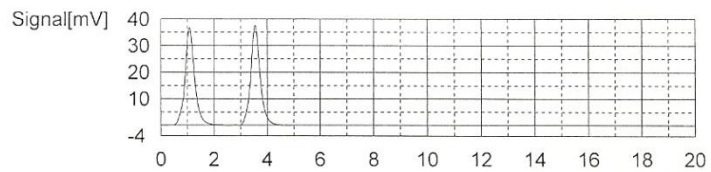
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.296mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	93.08	4.251mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 14:40:16
2	95.03	4.340mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 14:42:54

Mean Area 94.06  
Mean Conc. 4.296mg/L



Sample

Sample Name: DI  
Sample ID: Untitled  
Origin: NPOC\_170457.met  
Status: Completed  
Chk. Result

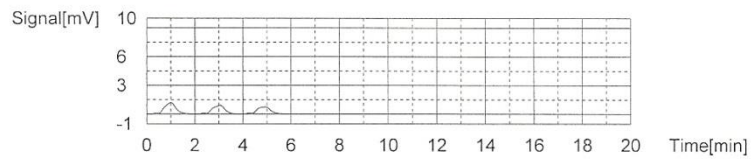
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:0.1755mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	4.084	0.1865mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 14:51:13
2	3.600	0.1644mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 14:53:47
3	2.883	0.1317mg/L	50uL	1	E	NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 14:56:27

Mean Area 3.842  
 Mean Conc. 0.1755mg/L



Sample Fenton 1:2.5

Sample Name: Yellow (Oil)  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC\_170457.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result

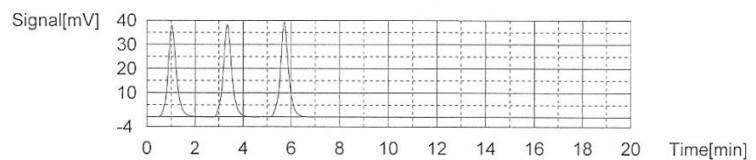
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.363mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	91.30	4.170mg/L	50uL	1	E	NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 15:05:05
2	94.94	4.336mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 15:07:48
3	96.10	4.389mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 15:10:27

Mean Area 95.52  
 Mean Conc. 4.363mg/L



Sample

Sample Name: Fenton 1:2.5 (0.5)  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC\_170457.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result

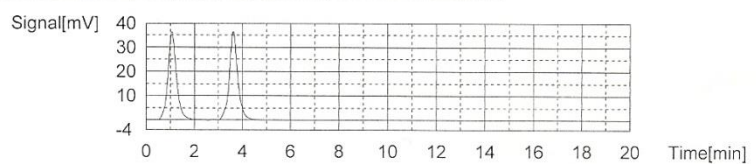
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:4.135mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	90.24	4.122mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 15:19:15
2	90.82	4.148mg/L	50uL	1		NPOC_170457.2014_04_17_09_02_55.cal	17/4/2557 15:21:51

Mean Area 90.53  
 Mean Conc. 4.135mg/L



ภาคผนวก ง

บันทึกผลการทดลองกระบวนการฟentonแบบเนื้อผสมโดยใช้ไฮดรอนโมลิบเดต  
เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ภาคผนวก ง.1 ผลการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดีด้วยกระบวนการฟentonแบบเนื้อผสมโดยใช้ไฮดรอนโมลิบเดตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ง. 1 ผลการทดลองอัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีด้วยกระบวนการฟentonแบบเนื้อผสมที่ความเข้มข้นที่เฟอร์ริกไอออน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาท)	ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดี (%)			
	$Fe^{3+}:H_2O_2$				$Fe^{3+}:H_2O_2$			
	1:2.5	1:5	1:10	1:25	1:2.5	1:5	1:10	1:25
0	227	203	232	210	0	0	0	0
15	133	118	117	180	44	42	50	14
30	128	110	113	154	45	46	51	27
45	125	111	111	123	45	45	52	42
60	125	103	100	119	43	49	57	43
75	129	101	96	120	47	50	59	43
90	120	100	92	111	50	51	60	47
120	113	96	88	104	50	53	62	50
150	113	92	84	117	50	55	64	44
180	112	90	84	121	51	56	64	43

**ภาคผนวก จ**  
**การทดลองความแตกต่างกันทางสถิติ**

ตารางที่ จ. 1 ทดสอบความแตกต่างของร้อยละการบำบัดซีโอดีในกระบวนการฟentonเมื่อความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 500 และ 50 มิลลิกรัม เมื่อใช้อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2.5

Source of Variation	SS	dF	MS	F	P-value	F-crit
Between Groups	64.20057	1	64.20057	0.113802	0.73905	4.30094
Within Groups	12411.18	22	564.1446			
Total	12475.38	23				

ตารางที่ จ. 2 ทดสอบความแตกต่างของร้อยละการบำบัดซีโอดีในกระบวนการฟentonเมื่อความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 500 และ 50 มิลลิกรัม เมื่อใช้อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:5

Source of Variation	SS	dF	MS	F	P-value	F-crit
Between Groups	7.16656	1	7.16656	0.0139	0.907722	4.30095
Within Groups	11342	22	515.547			
Total	11349.2	23				

ตารางที่ จ. 3 ทดสอบความแตกต่างของร้อยละการบำบัดซีโอดีในกระบวนการฟentonเมื่อความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 500 และ 50 มิลลิกรัม เมื่อใช้อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:10

Source of Variation	SS	dF	MS	F	P-value	F-crit
Between Groups	353.6354	1	353.6354	0.72494	0.40369	4.30094
Within Groups	10731.81	22	487.8093			
Total	11085.44	23				



ตารางที่ จ. 4 ทดสอบความแตกต่างของร้อยละการบำบัดซีโอดีในกระบวนการเฟนตันเมื่อความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 500 และ 50 มิลลิกรัม เมื่อใช้อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:25

Source of Varidation	SS	dF	MS	F	P-value	F-crit
Between Groups	389.4157	1	389.4157	0.90554	0.35163	4.30094
Within Groups	9460.754	22	430.0343			
Total	9850.169	23				

ตารางที่ จ. 5 ทดสอบความแตกต่างของร้อยละการบำบัดซีโอดีในกระบวนการเฟนตันระหว่างการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวและแบ่งเติม เมื่อความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัม เมื่อใช้อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2.5

Source of Varidation	SS	dF	MS	F	P-value	F-crit
Between Groups	64.20057	1	64.20057	0.11380	0.73905	4.30094
Within Groups	12411.18	22	564.1446			
Total	12475.38	23				

ตารางที่ จ. 6 ทดสอบความแตกต่างของร้อยละการบำบัดซีโอดีในกระบวนการเฟนตันระหว่างการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวและแบ่งเติม เมื่อความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัม เมื่อใช้อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:5

Source of Varidation	SS	dF	MS	F	P-value	F-crit
Between Groups	7.16656	1	7.16656	0.0139	0.90722	4.30095
Within Groups	11342	22	515.547			
Total	11349.2	23				

ตารางที่ จ. 7 ทดสอบความแตกต่างของร้อยละการบำบัดซีโอดีในกระบวนการฟenton ระหว่างการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวและแบ่งเติม เมื่อความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัม เมื่อใช้อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:10

Source of Varidation	SS	dF	MS	F	P-value	F-crit
Between Groups	353.6354	1	353.6354	0.72494	0.40369	4.30094
Within Groups	10731.81	22	487.8093			
Total	11085.44	23				

ตารางที่ จ. 8 ทดสอบความแตกต่างของร้อยละการบำบัดซีโอดีในกระบวนการฟenton ระหว่างการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ครั้งเดียวและแบ่งเติม เมื่อความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 50 มิลลิกรัม เมื่อใช้อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:25

Source of Varidation	SS	dF	MS	F	P-value	F-crit
Between Groups	389.4157	1	389.4157	0.90554	0.35163	4.30094
Within Groups	9460.754	22	430.0343			
Total	9850.169	23				

ตารางที่ จ. 9 ทดสอบความแตกต่างของร้อยละการบำบัดซีโอดีในกระบวนการฟenton และฟenton เสมือน(เฟอร์ริกคลอไรด์) เมื่อความเข้มข้นเหล็กไอออน 50 มิลลิกรัม เมื่อใช้อัตราส่วนเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2.5

Source of Varidation	SS	dF	MS	F	P-value	F-crit
Between Groups	14.89136	1	14.89136	0.02547	0.87478	4.35124
Within Groups	11689.1	20	584.4551			
Total	11703.99	21				

ตารางที่ จ. 10 ทดสอบความแตกต่างของร้อยละการบำบัดซีโอดีในกระบวนการฟenton และฟenton เสมือน(เพอร์ริกคลอไรด์) เมื่อความเข้มข้นเหล็กไอออน 50 มิลลิกรัม เมื่อใช้อัตราส่วนเพอร์รัสไอออน ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:5

Source of Varidation	SS	dF	MS	F	P-value	F-crit
Between Groups	175.6303	1	175.6303	0.33768	0.56766	4.35124
Within Groups	10402.05	20	520.1026			
Total	10577.68					

ตารางที่ จ. 11 ทดสอบความแตกต่างของร้อยละการบำบัดซีโอดีในกระบวนการฟenton และฟenton เสมือน(เพอร์ริกคลอไรด์) เมื่อความเข้มข้นเหล็กไอออน 50 มิลลิกรัม เมื่อใช้อัตราส่วนเพอร์รัสไอออน ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:10

Source of Varidation	SS	dF	MS	F	P-value	F-crit
Between Groups	78.88889	1	78.88889	0.15462	0.69831	4.35124
Within Groups	10203.79	20	510.1894			
Total	10282.68	21				

ตารางที่ จ. 12 ทดสอบความแตกต่างของร้อยละการบำบัดซีโอดีในกระบวนการฟenton และฟenton เสมือน(เพอร์ริกคลอไรด์) เมื่อความเข้มข้นเหล็กไอออน 50 มิลลิกรัม เมื่อใช้อัตราส่วนเพอร์รัสไอออน ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:25

Source of Varidation	SS	dF	MS	F	P-value	F-crit
Between Groups	94.43347	1	94.43347	0.21076	0.65111	4.35124
Within Groups	8960.868	20	448.0434			
Total	9055.301	21				

**ภาคผนวก ฉ**  
**การคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัด**

ภาคผนวก ฉ.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีปริมาตรน้ำเสีย 1 ลิตร โดยใช้ความเข้มข้นเฟอร์รัสซัลเฟต 0.249 กรัมต่อลิตร และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.125 กรัมต่อลิตร

ราคาสารเคมีเฟอร์รัสซัลเฟต	=	0.249 กรัม × 0.94 บาทต่อกรัม
	=	0.234 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	234 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
ราคาสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	=	0.125 กรัม × 0.71 บาทต่อกรัม
	=	0.089 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	89 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
ราคาสารเคมีกรดซัลฟิวริก	=	0.073 กรัม × 0.61 บาทต่อกรัม
	=	0.044 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	44 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
ราคาสารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์	=	0.15 กรัม × 0.31 บาทต่อกรัม
	=	0.047 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	47 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
ดังนั้น ค่าใช้จ่าย	=	234 + 89 + 44 + 47
	=	414 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

เมื่อคิดค่าใช้จ่าย (บาทต่อกิโลกรัมซีโอดี) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าใช้จ่าย} = \frac{0.414 \text{ บาท}}{\text{ลิตร}} \times \frac{1 \text{ ลิตร}}{195 \text{ มิลลิกรัมซีโอดี}} \times \frac{10^6 \text{ มิลลิกรัมซีโอดี}}{1 \text{ กิโลกรัมซีโอดี}} = 2,123 \text{ บาทต่อกิโลกรัมซีโอดี}$$

ภาคผนวก ฉ.2 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการฟenton เสมือนแบบเนื้อเดียวที่ใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีปริมาตรน้ำเสีย 1 ลิตร โดยใช้ความเข้มข้นเฟอร์ริกคลอไรด์ 0.242 กรัมต่อลิตร และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.125 กรัมต่อลิตร

ราคาสารเคมีเฟอร์รัสซัลเฟต	=	0.242 กรัม × 0.7 บาทต่อกรัม
	=	0.169 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	169 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
ราคาสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	=	0.125 กรัม × 0.71 บาทต่อกรัม
	=	0.089 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	89 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
ราคาสารเคมีกรดซัลฟิวริก	=	0.073 กรัม × 0.61 บาทต่อกรัม
	=	0.044 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	44 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
ราคาสารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์	=	0.15 กรัม × 0.31 บาทต่อกรัม
	=	0.047 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร
	=	47 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
ดังนั้น ค่าใช้จ่าย	=	169 + 89 + 44 + 47
	=	349 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

เมื่อคิดค่าใช้จ่าย (บาทต่อกิโลกรัมซีโอดี) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าใช้จ่าย} = \frac{0.349 \text{ บาท}}{\text{ลิตร}} \times \frac{1 \text{ ลิตร}}{196 \text{ มิลลิกรัมซีโอดี}} \times \frac{10^6 \text{ มิลลิกรัมซีโอดี}}{1 \text{ กิโลกรัมซีโอดี}} = 1,780 \text{ บาทต่อกิโลกรัมซีโอดี}$$

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชนัญญา เพิ่มชาติ เกิดเมื่อวันที่ 16 มกราคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2554

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13 จัดที่โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รongเมือง กรุงเทพฯ ระหว่างวันที่ 26 -28 มีนาคม 2557



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY