

การบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์โดยใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมผลิต
ชิ้นส่วนยานยนต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TREATMENT OF USED COOLANT OIL VIA MODIFIED FENTON REACTION USING WASTE
FROM AUTO PARTS MANUFACTURING



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

Inter-Department of Environmental Science

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟ้นต้น ประยุกต์โดยใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยาน ยนต์
โดย	นายปรีชาพัฒน์ พัวสุวรรณ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันทพงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารัฐ ศรีทองอุทัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนุญ หนูจักร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิมย์ม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันทพงษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารัฐ ศรีทองอุทัย)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญฤทธิ์ ปัญญาภิญโญผล)

ปรีชาพัฒน์ พัวสุวรรณ : การบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตัน
 ประยุกต์โดยใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์. (TREATMENT OF
 USED COOLANT OIL VIA MODIFIED FENTON REACTION USING WASTE FROM
 AUTO PARTS MANUFACTURING) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.วรพจน์ กนกกันทพงษ์,
 อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.สรารุช ศรีทองอุทัย

การศึกษาคั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้
 แล้วจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์ โดยการใช้ผงเหล็ก
 ซีตบลาสท์และตะกัร้นอะลูมิเนียมเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเดียวกัน โดยผงเหล็ก
 ซีตบลาสท์จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันแทนการใช้สารละลายเกลือ
 เหล็ก ส่วนตะกัร้นอะลูมิเนียมจะทำหน้าที่เป็นตัวสนับสนุนปฏิกิริยา ภาวะที่ทำการศึกษา ได้แก่
 เวลาในการบำบัดช่วง 5 – 180 นาที พีเอชเริ่มต้นช่วง 3 - 5 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช่วง
 0.5 – 1.5 มิลลิลิตร ผงเหล็กซีตบลาสท์ช่วง 0.25 – 3.5 กรัม และตะกัร้นอะลูมิเนียมช่วง
 0.25 – 2 กรัม การเลือกภาวะที่เหมาะสมจะพิจารณาจากประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเป็นหลัก
 หลังจากได้ภาวะที่เหมาะสมแล้วจะทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดพารามิเตอร์อื่น ๆ เช่น
 บีโอดี และปริมาณของแข็งแขวนลอย รวมทั้งศึกษาการนำตะกอนจากการบำบัดกลับมาใช้ซ้ำ และ
 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการบำบัดระหว่างกระบวนการเฟนตันประยุกต์และ
 เฟนตันปกติ ผลการศึกษาพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วย
 กระบวนการเฟนตันประยุกต์ คือ เวลา 60 นาที พีเอชเริ่มต้น 3 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
 1 มิลลิลิตร ปริมาณผงเหล็กซีตบลาสท์ 2.5 กรัม และปริมาณตะกัร้นอะลูมิเนียม 1 กรัม ต่อน้ำมัน
 หล่อเย็น 50 มิลลิลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี บีโอดี และปริมาณของแข็งแขวนลอยใน
 น้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว ณ ภาวะที่เหมาะสม เฉลี่ยร้อยละ 47.31, 53.34 และ 74.96 ตามลำดับ
 ตะกอนหลังบำบัดของกระบวนการเฟนตันประยุกต์สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก 1 ครั้งโดยที่
 ประสิทธิภาพไม่ต่างจากเดิม และจากการเปรียบเทียบพบว่ากระบวนการเฟนตันประยุกต์มี
 ประสิทธิภาพเฉลี่ยในการบำบัดซีโอดีในน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วมากกว่าเฟนตันปกติอยู่ประมาณร้อย
 ละ 28 และมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้อยกว่าประมาณ 340 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5987167820 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: Wastewater treatment, Advanced Oxidation Processes (AOPs),
Cutting oil, Shot blast, Zero valent iron (ZVI), Aluminium dross

Preechat Puasuwon : TREATMENT OF USED COOLANT OIL VIA MODIFIED
FENTON REACTION USING WASTE FROM AUTO PARTS MANUFACTURING.

Advisor: Vorapot Kanokkantapong, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. Sarawut
Srithongouthai, Ph.D.

The objective of this research is to study the optimum conditions of coolant oil treatment from auto parts manufacturing with modified Fenton reaction by reused iron dust from shot blast process and aluminium dross from casting process of auto parts manufacturing. The wastewater treatment experiment was conducted in range of reaction time 5-180 minutes, initial pH 3-5, hydrogen peroxide dose 0.5-1.5 ml, shot blast dose 0.25-3.5 g and aluminium dross dose 0.25-2 g. The optimum condition was mainly considered in COD removal efficiency and subsequently removal efficiency of other parameters such as BOD, and TSS. The results showed that optimum condition in this study were 60-minute reaction time, initial pH at 3, 1 ml of hydrogen peroxide, 2.5 g of shot blast, and 1 g of aluminium dross in 50 ml for coolant oil wastewater treatment. Furthermore, removal efficiency of COD, BOD, and TSS under this condition of modified Fenton process was 47.31, 53.34 and 74.96 %, respectively. Thus, sludge from modified Fenton treatment could be reused as Fenton catalyst one more time with almost no different in COD removal efficiency. Furthermore, result from comparison of modified Fenton and conventional Fenton showed that modified Fenton provided 28 % higher efficiency of COD removal than another and require less operating cost than conventional Fenton about 340 THB/m³

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) สำหรับทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัย พร้อมทั้งขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) ที่ได้จัดสรรงบประมาณสนับสนุน อำนวยความสะดวกและสนับสนุนในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์อันเป็นประโยชน์ต่อความสำเร็จของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเพื่อทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงเจ้าหน้าที่ในหลักสูตรทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเพื่อสถานที่ รวมถึงอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีในการทำทดลอง และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาทุกท่านที่คอยจัดสรรเครื่องมือ ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์ อีกทั้งให้การต้อนรับและช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดการทำกรวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการเตรียมตัวอย่าง

ขอขอบคุณโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ นิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร จังหวัดชลบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันหล่อเย็น ผงเหล็กข้อต่อบลาสต์ และตะกรันอะลูมิเนียม รวมถึงข้อมูลด้านกระบวนการผลิตต่าง ๆ สำหรับการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.วราภรณ์ กนกกันตพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช ศรีทองอุทัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยดูแล ให้คำแนะนำ และช่วยแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น จนทำให้การทำวิจัยในครั้งนี้ผ่านไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยฤทธิ์ ปัญญาภิญญาผล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ อาจารย์กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะในการแก้ไขปรับปรุงจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี

และขอขอบคุณที่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทั้งที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือ จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ปรีชาพัฒน์ พัวสุวรรณ

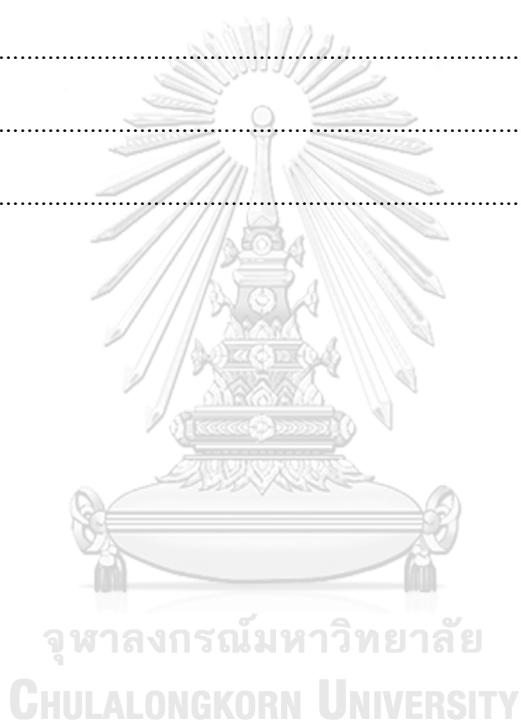
สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญภาพ	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 คำจำกัดความ	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1.1 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes: AOPs).....	5
2.1.2 กระบวนการเฟนตัน (Fenton process/ Fenton reaction).....	9
2.1.3 ปฏิกิริยาคลายเฟนตัน (Fenton-like reaction).....	12
2.1.4 ผลของตัวสนับสนุนปฏิกิริยาต่อกระบวนการเฟนตัน	13

2.1.4	อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ (Auto parts manufacturing).....	16
2.1.5	น้ำมันหล่อเย็น (Coolant oil)	18
2.1.6	เหล็กช็อตบลาสท์ (Shot blast iron).....	20
2.1.7	ตะกรันอะลูมิเนียม (Aluminum dross).....	21
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.2.1	การศึกษาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการพ่นต้น	23
2.2.2	การบำบัดน้ำมันหล่อเย็นด้วยกระบวนการพ่นต้นและพ่นต้นประยุกต์.....	32
2.2.3	การบำบัดน้ำมันหล่อเย็นด้วยวิธีการอื่น ๆ นอกเหนือจากพ่นต้น.....	34
2.2.4	การบำบัดน้ำเสียอื่น ๆ ด้วยกระบวนการพ่นต้น	35
2.2.5	การบำบัดน้ำเสียอื่น ๆ ด้วยกระบวนการคล้ายพ่นต้นหรือพ่นต้นประยุกต์	36
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย	44
3.1	พื้นที่ศึกษาวิจัย.....	44
3.2	กรอบงานวิจัย	44
3.3	วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี.....	45
3.3.1	วัสดุ.....	45
3.3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	46
3.3.3	สารเคมี.....	47
3.4	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	47
3.4.1	การศึกษาลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของของเสียอุตสาหกรรมที่นำมาใช้การทดลอง	47
3.4.2	การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการพ่นต้นประยุกต์.....	48
3.4.3	การศึกษาพารามิเตอร์อื่น ๆ ในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการพ่นต้นประยุกต์.....	54

3.4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการ เฟนตันและเฟนตันประยุกต์.....	55
3.4.5 ศึกษาการนำตะกอนจากการบำบัดกลับมาใช้ซ้ำ	55
3.4.6 การประเมินต้นทุนในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์และเฟนตันปกติ	56
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล	57
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	58
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของของเสียอุตสาหกรรมที่ใช้การทดลอง	58
4.1.1 ลักษณะของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วที่ใช้ในการทดลอง	58
4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางการภาพของผงเหล็กช็อดบลาสท์และตะกรันอะลูมิเนียมก่อนและหลังใช้งาน ด้วย Scanning electron microscope.....	59
4.1.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กช็อดบลาสท์และตะกรันอะลูมิเนียมก่อนและหลังใช้งาน ด้วย X-Ray Fluorescence Spectrometry.....	64
4.1.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กช็อดบลาสท์และตะกรันอะลูมิเนียมก่อนและหลังใช้งาน ด้วย X-Ray Diffractometer	67
4.2 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์.....	71
4.2.1 การศึกษาเวลาในการบำบัดที่เหมาะสม	71
4.2.2 การศึกษาพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม.....	73
4.2.3 การศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม.....	74
4.2.4 การศึกษาปริมาณผงเหล็กช็อดบลาสท์ที่เหมาะสม	76
4.2.5 การศึกษาปริมาณตะกรันอะลูมิเนียมที่เหมาะสม	78
4.3 การศึกษาพารามิเตอร์อื่น ๆ ในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์.....	83
4.4 ศึกษาการนำตะกอนจากการบำบัดกลับมาใช้ซ้ำ.....	85

4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการ เฟนตัน และเฟนตันประยุกต์.....	88
4.6 การประเมินต้นทุนในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์ และเฟนตันปกติ.....	90
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	93
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	93
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
บรรณานุกรม.....	95
ภาคผนวก.....	103
ประวัติผู้เขียน.....	113



สารบัญญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการออกซิไดซ์ tartaric acid ด้วยกระบวนการเฟนตัน	9
รูปที่ 2.2 การสร้างพันธะระหว่าง Siloxane และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	14
รูปที่ 2.3 การเกิดไฮโดรเจนไอออนบริเวณพื้นผิวของซิลิคอนไดออกไซด์.....	14
รูปที่ 2.4 ผลของอะลูมิเนียมในกระบวนการเฟนตัน	15
รูปที่ 2.5 ผังขั้นตอนของกระบวนการผลิตยานยนต์ ชิ้นส่วนและอะไหล่ยานยนต์.....	17
รูปที่ 2.6 ตะกรันขาว (ก) ตะกรันดำ (ข) และตะกรันเกลือ (ค) อันเกิดจากกระบวนการผลิตใน อุตสาหกรรม	21
รูปที่ 2.7 ป้ายสัญลักษณ์ในการขนส่งตะกรันอะลูมิเนียม	22
รูปที่ 3.1 น้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วที่ใช้ในการทดลอง.....	45
รูปที่ 3.2 ผงเหล็กช็อตบลาสท์ที่ใช้ในการทดลอง	46
รูปที่ 3.3 ตะกรันอะลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลอง	46
รูปที่ 3.4 ผังขั้นตอนการศึกษาเวลาในการบำบัด พีเอช ปริมาณผงเหล็กช็อตบลาสท์ และปริมาณ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม	49
รูปที่ 3.5 ผังขั้นตอนการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันปกติ	56
รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กช็อตบลาสท์ก่อนใช้งาน.....	60
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS.....	61
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของตะกรันอะลูมิเนียมก่อนใช้งาน	62
รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของตะกอนหลังใช้งาน.....	63
รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีของผงเหล็กช็อตบลาสท์จากเครื่อง XRD	68
รูปที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีของตะกรันอะลูมิเนียมจากเครื่อง XRD.....	69
รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีของตะกอนหลังใช้งานจากเครื่อง XRD	70

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการบำบัดและการกำจัดซีโอดีในรูป C/C_0 72

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นและการกำจัดซีโอดีในรูป C/C_0 73

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และการกำจัดซีโอดีในรูป C/C_0 ... 75

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงเหล็กช็อคตบลาสท์และการกำจัดซีโอดีในรูป C/C_0 77

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนอะลูมิเนียมและการกำจัดซีโอดีในรูป C/C_0 79

รูปที่ 4.13 ตะกอนหลังใช้งาน (ก.) ก่อนผ่านการอบ และ (ข.) หลังผ่านอบ..... 86

รูปที่ 4.14 การกำจัดซีโอดีในรูป C/C_0 ของตะกอนเฟนตันหลังใช้ซ้ำครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2..... 87

รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีในรูป C/C_0 ของกระบวนการเฟนตันประยุกต์ และเฟนตันปกติ..... 89



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมการการเกิดปฏิกิริยาของของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง	6
ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารแต่ละชนิด	6
ตารางที่ 2.3 ประเภทของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเมื่อแบ่งตามภูมิภาคของสารที่ใช้	8
ตารางที่ 2.4 สรุปการปลดปล่อยมลพิษจากอุตสาหกรรมยานยนต์ ชิ้นส่วน และอะไหล่ยานยนต์.....	18
ตารางที่ 2.5 ข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับการหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟนตัน	24
ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ในการศึกษาเวลาในการบำบัดที่เหมาะสม.....	50
ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ในการศึกษาพีเอชที่เหมาะสม	50
ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ในการศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม.....	51
ตารางที่ 3.4 ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ในการศึกษาทดลองชุดควบคุมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	51
ตารางที่ 3.5 ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ในการศึกษาปริมาณผงเหล็กช็อดบลาสท์ที่เหมาะสม	52
ตารางที่ 3.6 ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ในการศึกษาทดลองชุดควบคุมของผงเหล็กช็อดบลาสท์....	53
ตารางที่ 3.7 ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ในการศึกษาปริมาณตะกั่วอะลูมิเนียมที่เหมาะสม .	53
ตารางที่ 3.8 ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ในการศึกษาทดลองชุดควบคุมของตะกั่วอะลูมิเนียม	54
ตารางที่ 3.9 วิธีการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการศึกษา	57
ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วที่นำมาใช้ในงานวิจัย.....	58
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กช็อดบลาสท์ ตะกั่วอะลูมิเนียม และตะกอนหลัง ใช้ งาน จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF	65
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการ เฟนตันประยุกต์.....	84

ตารางที่ 4.5 การประเมินต้นทุนในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์ และเฟนตันปกติ	91
--	----



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมมากถึงกว่า 130,000 โรงงาน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2560) ซึ่งการผลิตในกระบวนการอุตสาหกรรมเหล่านี้ล้วนก่อให้เกิดของเสียอุตสาหกรรมจำนวนมาก จากรายงานสถานการณ์มลพิษประเทศไทย ปี 2559 ของเสียอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นจัดเป็นกากอุตสาหกรรมไม่อันตรายประมาณ 34.6 ล้านตัน และกากอุตสาหกรรมอันตรายประมาณ 2.8 ล้านตัน และในบรรดาของเสียทั้งหมด มีของเสียที่ได้รับการจัดการอย่างถูกต้องเพียงร้อยละ 35 เท่านั้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2559) ซึ่งหากของเสียเหล่านี้ถูกปล่อยออกสู่ภายนอกโดยไม่มีการจัดการที่เหมาะสม ย่อมส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ทั้งนี้หนึ่งในประเภทอุตสาหกรรมซึ่งมีจำนวนมาก และก่อให้เกิดกากของเสียมากมายคือ อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งมีมากถึงกว่า 3,400 โรงในประเทศไทย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2560)

กระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ก่อให้เกิดของเสียหลายประเภท เช่น น้ำเสีย ตะกอนโลหะ ฟลูออไรด์ กากตะกอนโลหะ ฯลฯ ในบรรดาของเสียเหล่านี้ น้ำมันหล่อเย็น (coolant oil) จัดเป็นของเสียที่ควรให้ความสำคัญ เนื่องจากมีส่วนผสมหลักที่เป็นน้ำมันแร่หรือน้ำมันปิโตรเลียม และน้ำมันสังเคราะห์ที่มีส่วนผสมของสารต่าง ๆ เช่น สารประกอบ Boramide, Alkanolamine Esters, Glycols, Nitrate, Phosphate และสารฆ่าเชื้อ ส่วนประกอบเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก หลังจากใช้งานแล้วทำให้เกิดน้ำเสียที่มีค่าสารอินทรีย์ในรูป Chemical Oxygen Demand (COD) สูง ซึ่งหากถูกปล่อยออกสู่แหล่งน้ำจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเนื่องจากสารอินทรีย์ย่อยสลายยากเหล่านี้ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยการบำบัดทางชีวภาพ จึงต้องใช้วิธีการทางเคมีในการบำบัด ที่นิยมคือ กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes: AOPs) ซึ่งอาศัยการทำปฏิกิริยาทางเคมีของสารบางชนิด เพื่อสร้างสารที่มีความสามารถในการออกซิเดชันสูง ที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ย่อยสลายยากให้หมดไปหรือเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ย่อยสลายได้ง่ายขึ้น

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงนี้มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น โอโซน UV โฟโตคะตะไลซิส และกระบวนการเฟนตัน งานวิจัยของ Esplugas et al. (2002) รายงานว่ากระบวนการเฟนตันเป็นกระบวนการที่สามารถใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 100

อย่างไรก็ตามกระบวนการเฟนตันมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น ค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง บำบัดได้เต็มประสิทธิภาพที่ช่วงพีเอชค่อนข้างแคบ เกิดกากตะกอนเหล็กหลังการบำบัดซึ่งต้องมีค่าใช้จ่ายในการกำจัด ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าจึงมีเป้าหมายที่จะปรับปรุงกระบวนการเฟนตันเพื่อลดข้อจำกัดของกระบวนการเฟนตัน โดยการนำของเสียจากอุตสาหกรรมเดียวกันมาประยุกต์ใช้ จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า เหล็กประจุศูนย์ (Fe^0) สามารถใช้แทนสารละลายเกลือเหล็กในกระบวนการเฟนตัน นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยพบว่า ซิลิกา (Si) และ อะลูมิเนียม (Al) มีส่วนช่วยเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการเฟนตันได้ (Zhuang, Han and Shan, 2016) ซึ่งในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มีของเสียประเภทผงเหล็กจากกระบวนการขัดผิวชิ้นงานหรือช็อตบลาสท์ (shot blast) ซึ่งเป็นเหล็กประจุศูนย์และมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ รวมทั้งตะกอนอะลูมิเนียมจากกระบวนการหลอมชิ้นส่วนยานยนต์ที่เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก อ้างอิงจากข้อมูลของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จากนิคมอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งในประเทศไทย มีปริมาณของเสียประเภทผงเหล็กช็อตบลาสท์ และตะกอนอะลูมิเนียมที่ต้องการกำจัด ถึงกว่า 11 และ 34 ตันต่อเดือน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีน้ำเสียประเภทน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วที่ต้องการกำจัดอีกกว่า 6 ตันต่อวัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะนำของเสียอุตสาหกรรมเหล่านี้มาประยุกต์ใช้เพื่อบำบัดน้ำมันหล่อเย็นด้วยกระบวนการเฟนตัน อันเป็นการหมุนเวียนของเสียกลับมาใช้ใหม่ และช่วยในการบำบัดน้ำเสียได้ในเวลาเดียวกัน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์ โดยการนำผงเหล็กช็อตบลาสท์ และตะกอนอะลูมิเนียม จากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มาประยุกต์ใช้

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วของกระบวนการเฟนตันประยุกต์และเฟนตันปกติ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

กระบวนการเฟนตันประยุกต์ที่นำผงเหล็กช็อตบลาสท์ และตะกอนอะลูมิเนียมมาประยุกต์ใช้สามารถลดปริมาณซีโอดีของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วให้น้อยกว่า 750 มิลลิกรัมต่อลิตร (ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมในนิคมอุตสาหกรรม) (การนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย, 2560)

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 น้ำเสียประเภทน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วจะนำมาจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในนิคมอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งในประเทศไทย

1.4.2 ของเสียจากอุตสาหกรรมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการเฟนตันมีทั้งสิ้น 2 ประเภท ได้แก่ ผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกัณอะลูมิเนียม จากโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งเดียวกับการนำน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว

1.4.3 ศึกษาลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กช็อตบลาสท์ และตะกัณอะลูมิเนียม โดยใช้ Scanning Electron Microscopy (SEM), X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) และ X-Ray Diffractometer (XRD)

1.4.4 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วของกระบวนการเฟนตัน และเฟนตันประยุกต์ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยภาวะที่เหมาะสมที่ทำการศึกษา ได้แก่ เวลา สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณเหล็กช็อตบลาสท์ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และปริมาณตะกัณอะลูมิเนียม

1.4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วของกระบวนการเฟนตันโดยพิจารณาจากค่าซีไอดีเป็นหลัก และเมื่อได้ภาวะการบำบัดที่เหมาะสมจะทำการศึกษาพารามิเตอร์อื่น ๆ ได้แก่ บีไอดี ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลาย และไอออนคงเหลือหลังการบำบัด

1.5 คำจำกัดความ

1.5.1 กระบวนการเฟนตันประยุกต์: กระบวนการเฟนตันที่มีการปรับปรุงโดยมีเป้าหมายเพื่อลดข้อจำกัดของกระบวนการเฟนตันให้น้อยลง และเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้มากขึ้น ด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) หรือตัวออกซิไดซ์ หรือเพิ่มสนับสนุนปฏิกิริยาต่าง ๆ เข้าไปในกระบวนการ สำหรับในงานวิจัยนี้จะเป็นการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาจากสารละลายเหล็กเป็นเหล็กประจุศูนย์จากผงเหล็กช็อตบลาสท์ พร้อมกับเพิ่มตัวสนับสนุนปฏิกิริยา คือ อะลูมิเนียมจากตะกัณอะลูมิเนียม

1.5.2 ของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์: ของเสียอันเกิดจากกระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ โดยของเสียที่ถูกนำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์จากกระบวนการขัดผิวชิ้นส่วน และตะกัณอะลูมิเนียมจากกระบวนการหลอมชิ้นส่วน

1.5.3 ผงเหล็กช็อตบลาสท์ (shot blast): ผงเหล็กอันเกิดจากเหล็กทรงกลมขนาดเล็กที่ใช้ในกระบวนการขัดผิวชิ้นส่วน โดยใช้พ่นเพื่อกำจัดเหล็กส่วนเกินรวมถึงทรายจากแบบพิมพ์ทรายที่อาจติด

มากับชิ้นงานในกระบวนการหลอมชิ้นส่วน เพื่อตกแต่งให้ชิ้นงานมีรูปร่างตรงตามต้องการ หลังการใช้ งานเหล็กหล่อตบลาสต์จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิมทำให้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากอาจทำให้ชิ้นงานที่ถูกพ่นเสียหาย และอาจมีเศษผงทรายแบบพิมพ์ทรายปะปนอยู่กับผง เหล็กด้วย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้นำของเสียจากอุตสาหกรรมมาหมุนเวียนใช้ใหม่ ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย

1.6.2 สามารถนำผลข้อมูลจากการวิจัยไปใช้ในการประเมินด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อพิจารณา ทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม

1.6.3 สามารถใช้เป็นแนวทางและข้อมูลอ้างอิงสำหรับการศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ ของกระบวนการเฟ้นต้นต่อไปในอนาคต



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes: AOPs)

2.1.1.1 ความหมายและประเภทของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง คือกระบวนการออกซิเดชันที่มุ่งเน้นให้เกิดผลผลิตหลักเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ส่วนใหญ่ คือ ไฮดรอกซิลอิสระ (hydroxyl radical: $\bullet\text{OH}$) ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดสารมลพิษ และสารปนเปื้อนต่าง ๆ แม้แต่พวกสารที่ย่อยสลายยากที่วิธีการทางชีวภาพไม่สามารถกำจัดได้ หรือสารอินทรีย์บางชนิด ให้หมดไป ความเป็นพิษน้อยลง หรือให้อยู่ในรูปที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น (Esplugas et al., 2002) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงมีด้วยกันหลัก ๆ 3 รูปแบบ ได้แก่ การออกซิเดชันด้วยโอโซน (Ozone base oxidation) การออกซิเดชันด้วยแสงยูวี (UV base oxidation) การออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2 base oxidation) (H. Glaze, Kang and H. Chapin, 1987) เนื่องจากกระบวนการนี้มีความสามารถในการออกซิเดชันสูง ทำให้ในยุคแรก (ประมาณช่วงปี ค.ศ. 1980-1989) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงถูกใช้ในการบำบัดน้ำเพื่อผลิตน้ำดื่ม (Deng and Zhao, 2015; Glaze, 1987) และมีการใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น จนถูกนำไปบำบัดน้ำเสียประเภทอื่น ๆ ต่อมาจนถึงปัจจุบัน โดยมีทั้งการใช้เป็นระบบบำบัดหลักเพื่อกำจัดสารมลพิษให้หมดไป และใช้เป็นระบบบำบัดขั้นต้นเพื่อเปลี่ยนสารมลพิษให้อยู่ในรูปที่กำจัดได้ง่ายขึ้นก่อนเข้าสู่ระบบหลักต่อไป

นอกจากรูปแบบหลักทั้ง 3 แล้ว ในปัจจุบันยังมีการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง จนเกิดเป็นรูปแบบใหม่อีกมากมาย เช่น การออกซิเดชันที่ใช้ตัวออกซิเดชันหลักหลายตัวพร้อม ๆ กัน เช่น การใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$) โอโซนร่วมกับแสงยูวี (O_3/UV) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับยูวี ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$) หรือการใช้ตัวออกซิเดชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ต่าง ๆ เช่น กระบวนการเฟนตันที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไอออนของเหล็ก และกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) ที่ใช้แสงยูวีร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โดยสมการแสดงปฏิกิริยาของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงแต่ละประเภท ดังตารางที่ 2.1

นอกจากไฮดรอกซิลอิสระ ($\bullet\text{OH}$) แล้ว กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงยังสามารถสร้างอนุมูลอิสระชนิดอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเปอร์ออกซิลอิสระ ($\bullet\text{HO}_2$, $\bullet\text{OOH}$) หรือออกซิเจนอิสระ ($\bullet\text{O}$) ได้เช่นกัน

โดยอนุมูลอิสระแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการออกซิไดซ์ต่างกันไป สังเกตได้จากค่าความสามารถในการออกซิไดซ์ (Oxidation potential: E_h) ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สมการการเกิดปฏิกิริยาของของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

กระบวนการ	สมการปฏิกิริยา	แหล่งที่มา
โอโซน+ยูวี	$O_3 + H_2O + hv \rightarrow H_2O_2 + O_2$ $O_3 + H_2O_2 \rightarrow 2\cdot OH + 3O_2$ $2\cdot OH \rightarrow H_2O_2$	Izadifard, Achari and Langford (2017)
โอโซน+ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	$O_3 + H_2O_2 \rightarrow 2\cdot OH + 3O_2$	Esplugas et al. (2002)
ยูวี+ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	$H_2O_2 + hv \rightarrow 2\cdot OH$	Esplugas et al. (2002)
เฟนตัน	$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + \cdot OH + OH^-$ $Fe^{3+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{2+} + \cdot OOH + H^+$	Barbusinski (2009)
โฟโตคะตะไลซิส	$Ti_2O_2 + hv \rightarrow h_{Ti}^+ + e_{Ti}^-$ $h_{Ti}^+ + H_2O \rightarrow \cdot OH_{Ti} + H^+$	Zhou and Smith (2002)

ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารแต่ละชนิด (ที่มา: Zhou and Smith (2002) และ George, Franklin and David (2003))

ชนิดของสาร	ความสามารถในการออกซิไดซ์ E_h (V)
F_2	3.06
$\cdot OH$	2.80
$\cdot O$	2.42
O_3	2.07
H_2O_2	1.77
$\cdot HO_2$	1.70
HOCl	1.49
Cl_2	1.39

2.1.1.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

จากตารางที่ 2.2 จะพบว่าไฮดรอกซิลอิสระ ($\bullet\text{OH}$) มีค่าความสามารถในการออกซิไดซ์สูงถึง 2.8 v เป็นรองเพียงฟลูออรีน (F_2) เท่านั้น กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงจึงให้ความสำคัญกับไฮดรอกซิลอิสระเป็นหลัก โดยจากงานวิจัยของธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ (2552) ได้อธิบายถึงการทำปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลอิสระกับสารอินทรีย์ ประกอบด้วยปฏิกิริยา 4 รูปแบบ คือ radical addition, hydrogen abstraction, electron transfer และ radical combination และเมื่อปฏิกิริยาการย่อยสลายดำเนินไปจนถึงจุดสิ้นสุด สารอินทรีย์เป้าหมายจะถูกออกซิไดซ์จนอยู่ในรูปที่ย่อยสลายได้ง่ายขึ้น หรืออาจถูกย่อยสลายจนหมด เหลือเพียงคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และสารประกอบที่ตกค้างบางชนิดเท่านั้น โดยรายละเอียดของปฏิกิริยามีดังนี้

1) Radical addition

ไฮดรอกซิลอิสระเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ประเภท aliphatic หรือ aromatic เกิดเป็นสารประกอบอีกชนิดหนึ่งที่มีความเสถียรต่ำและสามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนหรืออนุมูลอิสระอื่น ๆ ได้ ดังสมการ



(เมื่อ R คือ โมเลกุลของสารอินทรีย์เป้าหมาย)

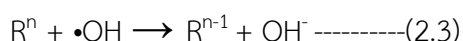
2) Hydrogen abstraction

ไฮดรอกซิลอิสระดึงอะตอมของไฮโดรเจนออกจากสารประกอบอินทรีย์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอินทรีย์อิสระ ($\bullet\text{R}$) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์อื่นได้ เช่น เปอร์ออกซิลอิสระ (peroxyl radical: $\bullet\text{HO}_2$) ดังสมการ



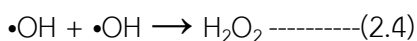
3) Electron transfer

ไฮดรอกซิลอิสระสามารถดึงอิเล็กตรอนออกจากสารประกอบหรือไอออน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไอออนที่มีประจุสูงขึ้น หรืออนุมูลอิสระได้ โดยการเกิดปฏิกิริยา Electron transfer นี้จะขึ้นกับจำนวนประจุของสารตั้งต้น ดังสมการ



4) Radical combination

กรณีที่ไม่ได้เข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ ไฮดรอกซิลอิสระจะเข้าร่วมตัวกันเอง เพื่อให้อยู่ในรูปที่เสถียรขึ้น ดังสมการ



2.1.1.3 ประเภทของปฏิกิริยาในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

ประเภทของการเกิดปฏิกิริยาสามารถแบ่งตามวัฏภาค (phase) ของสารที่ใช้ โดยแบ่งได้เป็น

2 ประเภท คือ

1) การทำปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ หรือปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว (homogeneous reaction) คือ ปฏิกิริยาที่ทั้งสารตั้งต้น สารผลิตภัณฑ์ และตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในวัฏภาค (phase) เดียวกัน

2) การทำปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ หรือปฏิกิริยาแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous reaction) คือ ปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้น สารผลิตภัณฑ์ และตัวเร่งปฏิกิริยาตัวใดตัวหนึ่งอยู่ต่างวัฏภาคกัน สารที่อยู่ต่างวัฏภาคในปฏิกิริยานี้จะมีการกระจายไม่สม่ำเสมอและสภาพการเคลื่อนที่จะแตกต่างจากสารอื่น ๆ (ชนารัตน์ สุทธะนันท์, 2558)

โดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงสามารถแบ่งตามตามวัฏภาคของสารที่ใช้ได้ดังตารางที่ 2.3 ตารางที่ 2.3 ประเภทของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเมื่อแบ่งตามวัฏภาคของสารที่ใช้

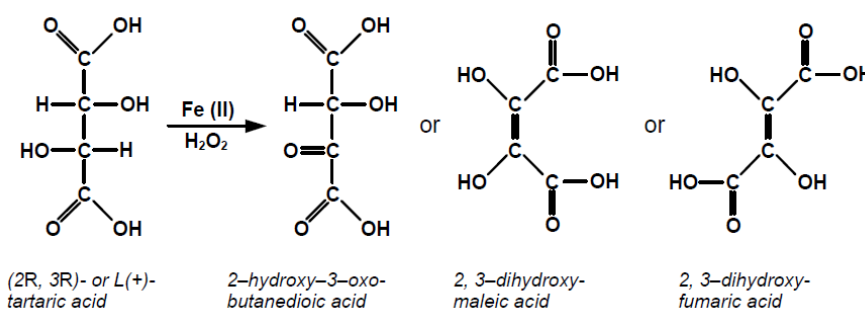
ประเภทปฏิกิริยา	
ปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์	ปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์
กระบวนการเฟนตัน: $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$	กระบวนการคล้ายเฟนตันบางชนิด: $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}/\text{m}^{\text{n}+}$ -solid state
กระบวนการคล้ายเฟนตันบางชนิด: $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{3+}/\text{m}^{\text{n}+}$	เฟนตันเหล็กประจุศูนย์: $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^0 / \text{Fe}$ (nano-zero valent iron)
โซโนเฟนตัน: Ultrasound/ $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$	โฟโตคะตะไลซิส: $\text{TiO}_2/\text{ZnO}/\text{CdS} + \text{UV}$
โฟโตเฟนตัน: UV/ $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$	
อิเล็กโตรเฟนตัน: Elec/ $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$	
โอโซน: O_3	
โอโซน+ยูวี: $\text{O}_3 + \text{UV}$	
โอโซน+ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์: $\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$	
โอโซน+ยูวี+ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์: $\text{O}_3 + \text{UV} + \text{H}_2\text{O}_2$	

ถึงแม้จะมีรูปแบบปฏิกิริยามากมายหลายชนิด แต่ปฏิกิริยาหลัก ๆ ในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงจะเป็นดังสมการที่ (2.1)-(2.4) นอกจากนี้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงทุกชนิดก็มีข้อด้อยที่เหมือน ๆ กัน คือสิ้นเปลืองทรัพยากรในการใช้งานค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการกำจัดมลพิษด้วยวิธีการอื่น ๆ เช่น การออกซิไดซ์ด้วยโอโซนและยูวีจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้งานเครื่องกำเนิดโอโซนและหลอดยูวี หรือการออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต้องสิ้นเปลืองสารเคมีเป็นจำนวนมาก ซึ่งต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อลดข้อด้อยตรงจุดนี้ต่อไป

2.1.2 กระบวนการเฟนต์ัน (Fenton process/ Fenton reaction)

2.1.2.1 ความเป็นมาและความหมายของกระบวนการเฟนต์ัน

กระบวนการเฟนต์ัน ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1894 โดย Henry John Horstman Fenton ได้ทำการทดลองใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ร่วมกับเกลือเหล็กในการออกซิไดซ์ tartaric acid รวมถึงสารจำพวกกรดอินทรีย์ต่าง ๆ และพบว่าปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่รุนแรง สามารถออกซิไดซ์สารจำพวกกรดอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์รูปแบบต่าง ๆ มากมายดังรูปที่ 2.1 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ถูกเรียกว่า Fenton reaction และสารที่เกิดจากการผสมกันระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเกลือของเหล็กถูกเรียกว่า Fenton Reagent (Barbusinski, 2009)



รูปที่ 2.1 สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการออกซิไดซ์ tartaric acid ด้วยกระบวนการเฟนต์ัน

(ที่มา: Barbusinski (2009))

หลังจากนั้นกระบวนการเฟนต์ันก็กลายเป็นกระบวนการที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและมีการศึกษาต่อกันเรื่อยมา ด้วยจุดเด่นที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่รุนแรงสามารถกำจัดพวกสารอันตรายได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงเป็นกระบวนการที่ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เพิ่มเติมในการทำปฏิกิริยา ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการออกซิเดชันอื่น ๆ เช่น กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ต้องใช้

หลอดยูวี และกระบวนการออกซิไดซ์ด้วยโอโซนที่ต้องใช้เครื่องกำเนิดโอโซน ทำให้กระบวนการเพนตันถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในฐานะกระบวนการที่ช่วยในการกำจัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม เช่น การบำบัดน้ำเสีย

สำหรับในด้านการบำบัดน้ำเสีย กระบวนการเพนตันเป็นกระบวนการที่อาศัยการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ไอออนเหล็ก (Fe^{2+}/Fe^{3+}) จากสารละลายเกลือเหล็กอย่างเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) เฟอร์ริกซัลเฟต ($Fe_2(SO_4)_3$) หรือเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) กับตัวออกซิไดซ์ คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อสร้างไฮดรอกซิลอิสระ ($\bullet OH$) ในการย่อยสารอินทรีย์ในน้ำเสีย (Barbusinski, 2009) ด้วยปฏิกิริยา ดังสมการที่ (2.5) (2.6) และ (2.7)



จากสมการที่ (2.5) และ (2.6) Fe^{2+} จะถูกออกซิไดซ์เป็น Fe^{3+} ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เกิดเป็น $\bullet OH$ ขึ้นมาและเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ ส่วน Fe^{3+} จะถูกรีดิวซ์กลับเป็น Fe^{2+} ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อีกครั้งหนึ่ง เกิดเป็นปฏิกิริยาดังสมการที่ (2.5) อีกครั้ง หรืออาจกล่าวได้ว่า ทรายใดที่ยังมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เหลืออยู่ในระบบ ปฏิกิริยาเพนตันก็ยังสามารถเกิดขึ้นต่อไปได้เรื่อย ๆ

แม้จะมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการเพนตันก็ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงเมื่อเทียบกับการบำบัดด้วยวิธีชีวภาพ สามารถบำบัดได้เต็มประสิทธิภาพเฉพาะในช่วงพีเอชต่ำ (ประมาณพีเอช 3-5) เนื่องจากหากอยู่ในภาวะเป็นด่าง ไอออนของเหล็กจะตกตะกอน หรือการทำให้เกิดตะกอนเหล็กเป็นผลพลอยได้หลังการบำบัด ซึ่งต้องมีค่าใช้จ่ายในปรับสภาพน้ำหลังการบำบัดเพิ่มเติม

2.1.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการเพนตัน

1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาเพนตัน ดังตารางที่ 2.5 และได้พบว่าค่าพีเอชที่มีความเหมาะสมอยู่ในช่วงที่เป็นกรด (พีเอช 3-5) เนื่องจากที่พีเอชเป็นกลางถึงเป็นด่าง (พีเอช 7 ขึ้นไป) ไอออนของเหล็กจะตกตะกอน ประกอบกับ H_2O_2 จะไม่เสถียรและแตกตัวได้ง่ายที่พีเอชมากกว่า 10 (มณฑา ประดิษฐ์ขำ, 2550) นอกจากนี้ที่พีเอชมากกว่า 3 สัดส่วนเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) จะกลับมามีส่วนสูงกว่าเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ส่งผลให้ไฮดรอกซิลอิสระมี

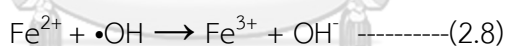
ปริมาณน้อยลงซึ่งจะเกิดผลเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์โดยตรง (ชนารัตน์ สุทธะนันท์, 2558)

2) อุณหภูมิ

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการเฟนตันนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามหากเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 40-50 องศาเซลเซียส ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะแตกตัวเป็นน้ำและออกซิเจนทำให้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่จะเกิดปฏิกิริยาเฟนตันลดน้อยลง (มณฑา ประดิษฐ์ข้า, 2550)

3) ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวออกซิไดซ์

จากสมการที่ (2.5) และ (2.6) ที่ได้กล่าวไปในข้างต้น จะพบว่าปริมาณของไอออนเหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ถือเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการเฟนตัน เนื่องจากเป็นแหล่งกำเนิดไฮดรอกซิลอิสระขึ้นมาในระบบเพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับสารมลพิษ ซึ่งหากมีปริมาณตัวใดตัวหนึ่งไม่เหมาะสม เช่น มีปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวออกซิไดซ์น้อยเกินไป ปฏิกิริยาการหมุนเวียนไอออนของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} เพื่อสร้างไฮดรอกซิลอิสระจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้หรือเกิดขึ้นได้น้อยลงกลับกันหากมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวออกซิไดซ์มากเกินไป ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวออกซิไดซ์ส่วนเกินจะเข้าทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลอิสระ ส่งผลให้ปริมาณไฮดรอกซิลอิสระที่จะทำหน้าที่ย่อยสลายการมลพิษลดลง ดังสมการที่ (2.8) (Bai et al., 2017) และ (2.9) (Ghime and Ghosh, 2017)



จนทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงในที่สุด นอกจากนี้ในการเลือกใช้ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวออกซิไดซ์ที่เหมาะสมนอกจากด้านประสิทธิภาพในการบำบัดแล้ว ยังต้องมองถึงด้านความคุ้มค่าด้วย

4) เวลาในการเกิดปฏิกิริยา

ระยะเวลาที่เหมาะสมของกระบวนการเฟนตันในการบำบัดสารมลพิษแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันไป ตั้งแต่หน่วยนาที่ไปจนถึงวัน หรืออาจกล่าวได้ว่าเวลาในการเกิดปฏิกิริยามีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด ดังนั้นควรพิจารณาเวลาที่จะใช้เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่เหมาะสมที่สุด โดยปกติหากสารมลพิษมีความเข้มข้นมาก หรือมีโครงสร้างที่ซับซ้อนอาจต้องใช้เวลาในการบำบัดนานขึ้น

5) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารมลพิษที่ต้องการกำจัด

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารมลพิษที่ต้องการกำจัดที่แตกต่างกันย่อมส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการเฟนตัน เช่น งานวิจัยของ Bai et al. (2017) ที่ศึกษาการบำบัดไนโตรเบนซีนด้วยปฏิกิริยาคัลลายเฟนตัน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไนโตรเบนซีนเพิ่มขึ้นจาก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดกลับลดลงจากที่สามารถกำจัดได้ทั้งหมดในเวลา 20 นาที เหลือเพียงกำจัดได้ร้อยละ 20 เท่านั้น เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไฮดรอกซิลอิสระในระบบมีจำกัด นอกจากนี้ไฮดรอกซิลอิสระบางส่วนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์จะทำให้เกิดสารประกอบอินทรีย์อิสระ ($\bullet R$) ตัวอื่น ๆ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้อยกว่าไฮดรอกซิลอิสระ เช่น ไฮโดรเปอร์ออกซิลอิสระ ($\bullet HO_2$)

2.1.3 ปฏิกิริยาคัลลายเฟนตัน (Fenton-like reaction)

เนื่องจากกระบวนการเฟนตันยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ทำให้มีการศึกษาเพื่อหาทางลดข้อจำกัดดังกล่าว ทางออกหนึ่งในการแก้ปัญหา ก็คือการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวออกซิไดซ์ ไอออนเหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารอื่น ๆ หรือการเปลี่ยนรูปแบบการทำปฏิกิริยา จากเดิมที่กระบวนการเฟนตันเป็นการทำปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (homogeneous reaction) คือปฏิกิริยาที่ทั้งสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์อยู่ในวัฏภาค (phase) เดียวกัน ไปเป็นการทำปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous reaction) ที่เป็นปฏิกิริยาที่ทั้งสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์มีวัฏภาคที่ต่างกัน การศึกษาดังกล่าวส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาที่คล้ายคลึงกับกระบวนการเฟนตันขึ้นมาเป็นจำนวนมาก หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาคัลลายเฟนตัน (Fenton like reaction)

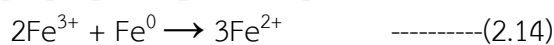
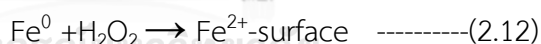
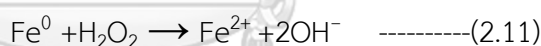
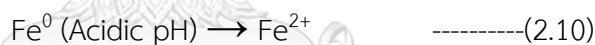
จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีนักวิจัยได้ให้คำจำกัดความของ Fenton-like reaction ไว้ค่อนข้างหลากหลาย เช่น

Masarwa et al. (2005) ให้คำจำกัดความว่า “Fenton-like reaction หมายถึง ปฏิกิริยาคัลลายคลึงกับเฟนตันที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารพวกเปอร์ออกไซด์และสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ (Metal complex) ในสภาพที่เป็น low valent oxidation state ซึ่งถือเป็นปฏิกิริยาที่มีความโดดเด่นเนื่องจากมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่หลากหลาย”

Zhou et al. (2015) ให้คำจำกัดความว่า “Fenton like reaction คือ กระบวนการเฟนตันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท mineral-catalyst ในการทำปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบ heterogeneous reactions และจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัว mineral-catalyst ในสภาวะกรด”

Fischbacher, von Sonntag and Schmidt (2017) ให้คำจำกัดความว่า “Fenton like reaction หรือเรียกอีกชื่อว่า Fenton-type reaction คือกระบวนการเฟนตันที่ใช้โลหะทรานซิชันอื่น ๆ นอกเหนือจาก Fe^{2+} ในการทำปฏิกิริยา เช่น Cu^+ , Fe^{3+} ”

จากคำจำกัดความข้างต้น อาจกล่าวได้ว่ากระบวนการเฟนตันประยุกต์ (modified Fenton) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ถือเป็น ปฏิกิริยาคลายเฟนตันได้เช่นกัน เนื่องจากเป็นกระบวนการเฟนตันที่ใช้ผงเหล็กจากกระบวนการซ็อดบลาสท์ซึ่งเป็นเหล็กประจุศูนย์ (Fe^0) แทน Fe^{2+} ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบ heterogeneous reactions เนื่องจากสารตั้งต้นในปฏิกิริยามีทั้งสารที่อยู่ในสถานะของแข็งและสารละลายอยู่ด้วยกัน โดยปฏิกิริยาของกระบวนการเฟนตันเมื่อใช้ Fe^0 จะเกิดการแตกตัวของ Fe^0 ในสภาวะกรด และการทำปฏิกิริยาของ Fe^0 กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็น Fe^{2+} ดังสมการที่ (2.10) และ (2.11) นอกจากนี้การทำปฏิกิริยากับกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของ Fe^0 ได้อีกด้วย ดังสมการที่ (2.12) และ (2.13) (Gomathi et al., 2009) และ Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อดังสมการที่ (2.5) และ (2.6) ที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 2.1.2 นอกจากนี้ Fe^0 ยังมีส่วนช่วยในการรีดิวซ์ Fe^{3+} กลับเป็น Fe^{2+} (Martins et al., 2012) ดังสมการที่ (2.14) ส่งผลให้การหมุนเวียนไอออนเหล็กในกระบวนการเฟนตันเป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น



2.1.4 ผลของตัวสนับสนุนปฏิกิริยาต่อกระบวนการเฟนตัน

นอกจากการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว ยังมีงานวิจัยอีกจำนวนหนึ่ง ที่ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเฟนตันโดยการใช้ตัวสนับสนุนปฏิกิริยา โดยธาตุหลัก ๆ ที่มักถูกกล่าวถึงในการสนับสนุนปฏิกิริยาเฟนตัน ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) และซิลิกา (Si) โดยธาตุทั้ง 2 ตัวมีคุณสมบัติในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเฟนตันได้ ดังนี้

2.1.4.1 ผลของซิลิกาต่อกระบวนการเฟนตัน

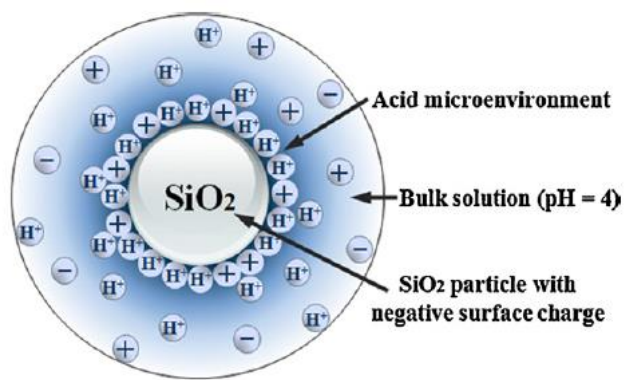
ซิลิกาในรูปของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) สามารถยึดจับกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ โดยการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างไฮโดรเจนอะตอมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และออกซิเจนที่อยู่ในสายโซ่ Siloxane bridges (Si-O-Si) ดังรูปที่ 2.2 ส่งผลให้โมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ถูกตรึงรวมไว้ในที่เดียว ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีโอกาสที่จะสัมผัสกับ Fe^{2+} และทำปฏิกิริยาเกิดเป็น $\bullet\text{OH}$ ได้มากขึ้น (Tu et al., 2012)



รูปที่ 2.2 การสร้างพันธะระหว่าง Siloxane และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
(ที่มา: Tu et al. (2012))

นอกจากนี้บริเวณพื้นผิวของซิลิคอนไดออกไซด์อาจมีการสร้างหมู่ฟังก์ชัน silanol (Si-OH) ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออน (H^+) ออกมาได้เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีพีเอชมากกว่า 2.0–3.5 (Tu et al., 2012) ส่งผลให้สารละลายมีความเป็นกรดมากขึ้น ซึ่งมีความเหมาะสมกับกระบวนการเฟนตัน

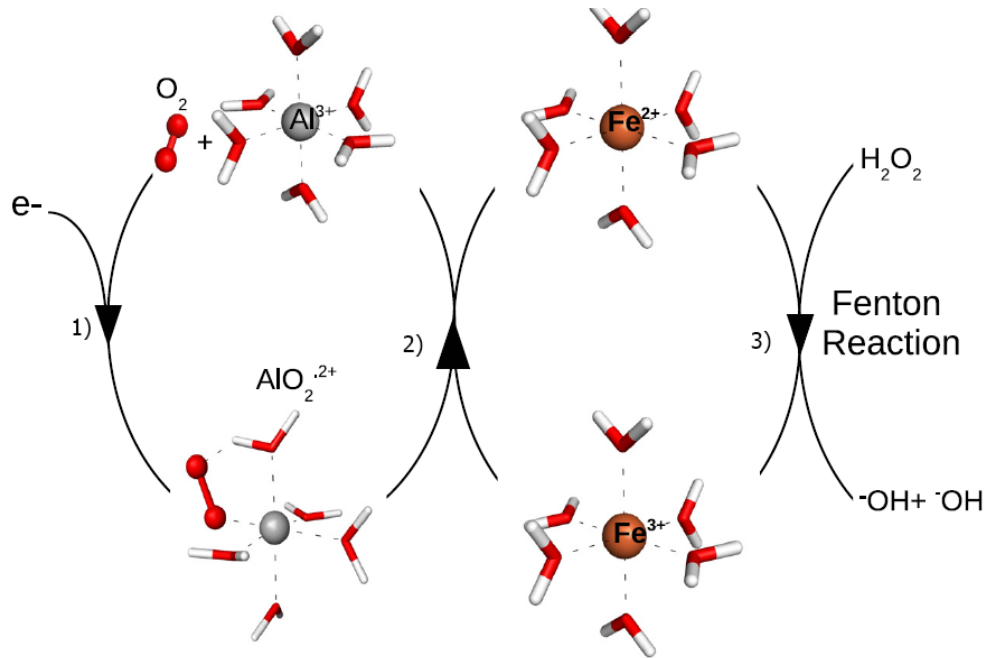


รูปที่ 2.3 การเกิดไฮโดรเจนไอออนบริเวณพื้นผิวของซิลิคอนไดออกไซด์ (ที่มา: Tu et al. (2012))

2.1.4.2 ผลของอะลูมิเนียมต่อกระบวนการเฟนตัน

อะลูมิเนียมที่ละลายน้ำอยู่ในรูปอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) จะรวมตัวกับซูเปอร์ออกไซด์ ($\bullet\text{O}_2^-$) เพื่อให้อยู่ในรูปที่เสถียรคืออะลูมิเนียมซูเปอร์ออกไซด์ ($\bullet\text{AlO}_2^{2+}$) ซึ่งสามารถรีดิวซ์

Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} ได้ ส่งผลให้มี Fe^{2+} มากขึ้นและทำให้เกิดปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันเพื่อสร้าง $\cdot\text{OH}$ ได้มากขึ้นตามไปด้วย (Ruipérez et al., 2012) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ผลของอะลูมิเนียมในกระบวนการเฟนตัน (ที่มา: Ruipérez et al. (2012))

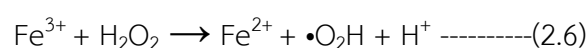
จากรูปที่ 2.4 การเกิดปฏิกิริยาของอะลูมิเนียมในกระบวนการเฟนตัน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

1) อะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) รวมตัวกับซูเปอร์ออกไซด์ ($\cdot\text{O}_2^-$) เพื่อให้อยู่ในรูปที่เสถียร เกิดเป็นอะลูมิเนียมซูเปอร์ออกไซด์ ($\cdot\text{AlO}_2^{\cdot 2+}$)

2) อะลูมิเนียมซูเปอร์ออกไซด์เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับ Fe^{3+} โดย Fe^{3+} เป็นตัวรับอิเล็กตรอนและถูกรีดิวซ์เป็น Fe^{2+} ในขณะที่อะลูมิเนียมซูเปอร์ออกไซด์ที่สูญเสียอิเล็กตรอน เกิดความไม่เสถียร จึงแยกตัวกลับเป็นอะลูมิเนียมไอออนและออกซิเจนตามเดิม และรวมตัวกันเกิดอะลูมิเนียมซูเปอร์ออกไซด์อีกครั้งหนึ่ง

3) Fe^{2+} เข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการเฟนตัน เกิดเป็น $\cdot\text{OH}$ โดย Fe^{2+} จะถูกออกซิไดซ์เป็น Fe^{3+} อีกครั้ง และเข้าทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมซูเปอร์ออกไซด์ต่อไป โดยหมุนเวียนเป็นวัฏจักร

จากสมการที่ (2.6) ของกระบวนการเฟนตันที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 2.1.2



จะพบว่าในกระบวนการเฟนตันปกติ สารที่ทำหน้าที่รีดิวซ์ Fe^{3+} กลับเป็น Fe^{2+} คือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่เมื่อในระบบมีอะลูมิเนียมเพิ่มเข้ามา อะลูมิเนียมซูเปอร์ออกไซด์จะเป็นตัวช่วยรีดิวซ์

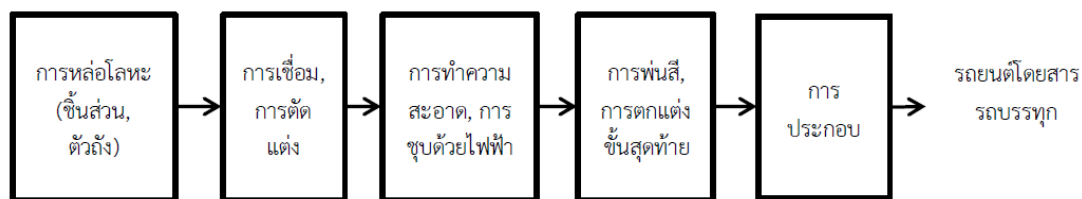
Fe^{3+} กลับเป็น Fe^{2+} อีกทางหนึ่ง ซึ่งเป็นการช่วยให้การหมุนเวียนอิเล็กตรอนของปฏิกิริยาเฟนตันเกิดได้มากขึ้น และช่วยลดการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ถือเป็นปัจจัยจำกัดในกระบวนการเฟนตันได้

2.1.4 อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ (Auto parts manufacturing)

อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ จัดเป็นอุตสาหกรรมประเภทที่ 77 คือ โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับรถยนต์ หรือรถพ่วงอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่าง อันเกี่ยวกับการสร้าง ประกอบ ดัดแปลง หรือเปลี่ยนแปลงสภาพรถยนต์ และการทำชิ้นส่วนพิเศษหรืออุปกรณ์สำหรับรถยนต์หรือรถพ่วง และประเภทที่ 78 คือ โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับจักรยานยนต์ จักรยานสามล้อ หรือจักรยานสองล้ออย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง อันเกี่ยวกับการสร้าง ประกอบ ดัดแปลงหรือเปลี่ยนแปลงสภาพ และการทำชิ้นส่วนพิเศษหรืออุปกรณ์สำหรับจักรยานยนต์ จักรยานสามล้อ หรือจักรยานสองล้อ ตามกฎกระทรวง (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2535) ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีจำนวนมากในประเทศไทย จากข้อมูล ณ เดือนกันยายน พ.ศ. 2560 ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม อุตสาหกรรม 2 ประเภทนี้มีจำนวนประมาณ 3,400 โรงงาน

2.1.4.1 ขั้นตอนของการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จะเริ่มจากการหล่อชิ้นส่วนหรือหลอมเหล็ก (foundry หรือ casting) โดยใช้โลหะที่ถูกให้ความร้อนจนเป็นของเหลวเป็นวัตถุดิบในการหล่อ เช่น เหล็ก หรือ อะลูมิเนียม และใช้แบบพิมพ์เพื่อเป็นพื้นฐานให้โลหะแข็งตัวจนได้เป็นชิ้นส่วนที่ต้องการ ซึ่งโดยปกติแล้วแบบพิมพ์มักสร้างขึ้นจากทราย เนื่องจากมีความทนต่อความร้อน และค่าใช้จ่ายต่ำ ต่างจากแบบพิมพ์ที่สร้างจากโลหะหรือพลาสติกที่ไม่สามารถทนทานต่อความร้อนในการหลอมได้ นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายในการผลิตแบบพิมพ์สูง หลังจากนั้นโลหะที่ถูกให้ความร้อนจะถูกรินใส่แบบพิมพ์ รอให้เย็นตัวจากนั้นแบบพิมพ์ทรายถูกกระเทาะออกและนำชิ้นส่วนที่หลอมเข้าสู่กระบวนการตัดแต่งและขัดผิว (shot blasting) โดยใช้เหล็กหรือทรายขนาดเล็กพ่นเพื่อกำจัดแบบพิมพ์ทรายที่ตกค้าง หรือส่วนที่เกินจากการหลอมออกไป ถัดมาจะเข้าสู่ขั้นตอนการทำความสะอาด การชุบด้วยไฟฟ้า การพ่นสี ตกแต่งขั้นสุดท้าย ไปจนถึงการประกอบจนออกมาเป็นยานยนต์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ผังขั้นตอนของกระบวนการผลิตยานยนต์ ขึ้นส่วนและอะไหล่ยานยนต์

(ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2556))

2.1.4.1 มลพิษจากกระบวนการผลิตขึ้นส่วนยานยนต์

1) กระบวนการหลอมขึ้นส่วน

ก่อให้เกิดมลพิษประเภทฝุ่นฟุ้งกระจาย ที่ประกอบด้วยโลหะหรือสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่ใช้ในการเชื่อมโลหะ ซึ่งอาจถูกปลดปล่อยออกสู่อากาศหรือถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นของเสียดังกล่าว กระบวนการหลอมโลหะ เช่น กากตะกรันโลหะที่เหลือจากการหลอม ผงทราย ฝุ่นทรายจากแบบพิมพ์ทรายใช้แล้ว

2) การขึ้นรูป การเชื่อมและการตัดแต่ง

ก่อให้เกิดมลพิษประเภทปนน้ำเสียเป็นสารเคมี เช่น น้ำเสียจากน้ำมันหล่อเย็นที่ใช้แล้ว หรือของเสียที่อยู่ในรูปของแข็ง เช่นเศษขึ้นส่วนที่เหลือจากกระบวนการตัด รวมไปถึงผงเหล็กช็อตบลาสต์ที่ใช้ในการตัดแต่งขึ้นส่วน

3) การทำความสะอาด การทำขจัดไขมัน

เกิดมลพิษจากสารประกอบอินทรีย์ระเหย (VOCs) หรือสารอนินทรีย์ที่ใช้ในการทำความสะอาดหรือตัวทำละลายไขมัน หรือสารที่ใช้เคลือบผิวโลหะ ที่อาจถูกปล่อยออกสู่อากาศหรือแหล่งน้ำ

4) การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

เกิดมลพิษจากโลหะหนัก (เช่น นิกเกิล สังกะสี) หรือสารอนินทรีย์ที่ใช้เป็นน้ำยาในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ที่อาจถูกปล่อยออกสู่อากาศ แหล่งน้ำ

5) การพ่นสี การตกแต่งขั้นสุดท้าย

เกิดมลพิษจากสารประกอบอินทรีย์ระเหย โลหะ หรือสารอื่นที่เกี่ยวข้องกับการนำมาใช้ในกระบวนการพ่นสีหรือการตกแต่งขั้นสุดท้าย ถูกปล่อยออกมาสู่อากาศ และแหล่งน้ำ

โดยการปลดปล่อยมลพิษจากอุตสาหกรรมผลิตขึ้นส่วนยานยนต์ สรุปลงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สรุปการปลดปล่อยมลพิษจากอุตสาหกรรมยานยนต์ ชิ้นส่วน และอะไหล่ยานยนต์ (ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2556))

ลำดับที่	กระบวนการที่มีการระบายมลพิษ	การปลดปล่อยและเคลื่อนย้าย	ชนิดของสาร		
			สารอินทรีย์ระเหย	โลหะหนัก	อื่น ๆ
1	การหลอมชิ้นส่วน	อากาศ/ขยะ	✓	✓	✓
2	การขึ้นรูป การเชื่อมและการตัดแต่ง	น้ำ/ขยะ			✓
3	การทำความสะอาด การทำขจัดไขมัน	อากาศ/น้ำ/ขยะ	✓		
4	การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	อากาศ/น้ำ/ขยะ		✓	✓
5	การพ่นสี การตกแต่งขั้นสุดท้าย	อากาศ/น้ำ/ขยะ	✓	✓	✓

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่ขั้นตอนการหลอมชิ้นส่วนและการตัดแต่ง อันก่อให้เกิดของเสียประเภทน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว เหล็กขี้อบลาสต์ และตะกรันอะลูมิเนียม

2.1.5 น้ำมันหล่อเย็น (Coolant oil)

น้ำมันหล่อเย็น หรือน้ำมันตัด (cutting oil) เป็นสารหล่อเย็นที่ช่วยระบายความร้อน รวมถึงลดการเสียดสีจากกระบวนการตัดเฉือนวัสดุ น้ำมันหล่อเย็นที่ดีควรมีสมบัติดูดซับและถ่ายเทความร้อนได้ดี มีความหนืดต่ำ ช่วยป้องกันการเกิดสนิม ป้องกันการเติบโตของจุลินทรีย์ ไม่ติดไฟ ไม่เกิดควันมากเกินไป และปราศจากสิ่งปนเปื้อนที่อาจทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดคราบได้ องค์ประกอบหลักของน้ำมันหล่อเย็น จะแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่ น้ำมันพื้นฐาน (based oil) และสารเติมแต่ง (additive) (ฉิชาบูล บุญวรโชติ, 2549) และเนื่องจากน้ำมันหล่อเย็นมักมีสารเติมแต่งประเภทสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่ เมื่อผสมกับน้ำจึงทำให้เกิดน้ำเสียนิอิมัลชันที่มีความคงตัว (Stabilized emulsion) โดยที่สารลดแรงตึงผิวจะแทรกอยู่ระหว่างผิวของน้ำกับน้ำมันเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างทั้ง 2 ตัว ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กจนไม่สามารถรวมตัวกันได้ ทำให้น้ำมันหล่อเย็นมีความเสถียรและยากต่อการบำบัดมากขึ้น (เพชร โพธิ์ทอง, 2554)

โดยทั่วไปแล้วน้ำมันหล่อเย็นมักประกอบด้วยส่วนผสม ดังนี้

2.1.5.1 น้ำมันพื้นฐาน

ส่วนใหญ่จะมีส่วนประกอบจากน้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างของสารไฮโดรคาร์บอนหลายประเภท เช่น อะโรมาติก (Aromatic) แนฟทาติก

(Naphthenic) พาราฟินิก (Paraffinic) หรือ แอลเคน (Alkane) นอกจากนี้สำหรับน้ำมันหล่อเย็นบางประเภทอาจมีน้ำมันพื้นฐานที่มาจากสัตว์ พืช หรือสารสังเคราะห์ก็ได้เช่นกัน

2.1.5.2 สารเติมแต่ง

สารเติมแต่งของน้ำมันหล่อเย็นส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำ เช่น

1) สารอิมัลซิไฟเออร์และลดความตึงผิว (emulsifier and surfactant) ทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวของของเหลวและกระจายอนุภาคน้ำมันในน้ำ ส่วนใหญ่มักจะใช้สารประเภท กรดแนฟเทนิก (naphthenic acid) ปีโตรเลียมซัลโฟเนต (petroleum sulfonate) เกลือซัลเฟต (sulfate salt) โซเดียมโซฟ (sodium soap) เป็นต้น

2) สารรับแรงกดสูง (extreme pressure agents) ทำหน้าที่เพิ่มการหล่อลื่นให้แก่ผิวโลหะ ไม่ว่าจะเป็นเครื่องจักร มีดกลึง หรือผิวชิ้นงาน ช่วยป้องกันไม่ให้ผิวโลหะฝูกร้อนหรือหลอมรวมกันจากความร้อนในการตัด มักเป็นสารประกอบซัลเฟอร์ คลอรีน ฟอสฟอรัส ตะกั่ว เป็นต้น

3) สารป้องกันการกัดกร่อน (corrosion inhibitor) เป็นสารที่ช่วยสร้างชั้นฟิล์มบนผิวโลหะ เพื่อป้องกันฝูกร้อนจากปฏิกิริยาทางเคมีของกรดและสารเปอร์ออกไซด์ มักเป็นสารกลุ่มซัลโฟเนต เอมีน เอไมด์ ซิลิเกต ฟอสเฟต ไนเตรต โซเดียมโมลิบเดต เกลือกรดไขมัน เป็นต้น

4) สารลดแรงเสียดทานและเพิ่มคุณสมบัติเปียกผิว (friction reduction and wettability agents) เป็นตัวละลายอนุภาคน้ำมันสร้างเป็นชั้นปกป้องผิวโลหะ ได้แก่ น้ำมันพืชและสัตว์ กรดไขมัน และแอลกอฮอล์

5) สารฆ่าเชื้อ (disinfectant) ทำหน้าที่ควบคุมและยับยั้งการเติบโตของจุลินทรีย์ ส่วนใหญ่มักเป็นสารกลุ่ม Halo-organic

6) สารรักษาความเป็นด่าง (alkaline reserve) ทำหน้าที่ควบคุมความเป็นกรด-ด่างให้เหมาะสมกับการใช้งาน และยับยั้งการเติบโตของแบคทีเรีย รวมไปถึงป้องกันการเกิดสนิม โดยปกติจะควบคุมให้อยู่ในช่วงพีเอช 8.5-9.0 สารจำพวกนี้ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และเอทานอลาไมด์

7) สารเพิ่มความเสถียร (stabilizer) ช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายในน้ำมัน เพื่อป้องกันการแยกตัวของสารในภาวะที่อุณหภูมิต่ำ ได้แก่ สารพวกแอลกอฮอล์ และไกลคอล

8) สารป้องกันการเกิดฟอง (defoamer) ได้แก่ สารประกอบซิลิกอน ช่วยลดการเกิดฟองจากสภาพที่มีแรงตึงผิวสูงของน้ำมันหล่อเย็น

9) สารลดความกระด้าง (hardness removal agents) ช่วยลดความรุนแรงของสารและไอออนที่ทำให้เกิดความกระด้าง เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม รวมทั้งช่วยรักษาความเสถียรแก่สารอิมัลซิไฟเออร์และมีส่วนช่วยในการยืดอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อเย็น ได้แก่ สารเอทิลีนไดเอมีน เททระอะซิติก (Ethylenediaminetetraacetic acid: EDTA)

10) สารเติมแต่งอื่น ๆ เช่น สารเพิ่มความตึงเครียด สารเพิ่มความนุ่ม สารช่วยยึดจับไอออนของโลหะ (Chelating agent) สารต้านการเกิดละออง

โดยน้ำมันหล่อเย็นแบ่งได้เป็น 4 ประเภทตามสัดส่วนขององค์ประกอบ ได้แก่

1) น้ำมันล้วน (Straight oil) เป็นน้ำมันหล่อเย็นที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบทั้งหมดโดยไม่มีส่วนผสมอื่น สามารถใช้งานได้เลยโดยไม่ต้องผสมน้ำ มีราคาถูก มีคุณสมบัติหล่อลื่นสูง เหมาะสำหรับงานตัดที่มีรอบต่ำและงานที่ต้องการความละเอียดสูง มีข้อเสียคือ ช่วยลดอุณหภูมิได้ไม่ทันัก และทำให้เกิดกลิ่นฉุน ละออง และควันขณะการใช้งาน

2) โซลูเบิลออยล์ (Soluble oil) เป็นน้ำมันหล่อเย็นที่ประกอบด้วยน้ำมันและน้ำ โดยมีอัตราส่วนน้ำมันแรมมากกว่าน้ำ โดยทั่วไปประมาณร้อยละ 60-90 มีสารอิมัลซิไฟเออร์เป็นส่วนประกอบซึ่งช่วยทำให้น้ำมันละลายรวมตัวกับน้ำ ก่อนใช้งานต้องผสมน้ำกลั่นอัตรา 1:5- 1:40 เป็นน้ำมันหล่อเย็นที่เหมาะสมสำหรับงานเบาและงานปานกลาง มีคุณสมบัติหล่อลื่นดีเยี่ยม แต่มีข้อเสียคือ อายุใช้งานน้อย เน้าเสียนง่าย และเนื่องจากมีน้ำเป็นส่วนประกอบจึงอาจทำให้ชิ้นส่วนโลหะเกิดสนิมได้

3) น้ำมันกึ่งสังเคราะห์ (Semi-synthetic) เป็นสารผสมระหว่างโซลูเบิลออยล์และน้ำมันสังเคราะห์ ก่อนใช้งานต้องผสมน้ำกลั่น 1:10-1:40 เหมาะกับงานที่มีความเร็วรอบสูง มีคุณสมบัติการหล่อลื่นและลดอุณหภูมิที่ดี มีอายุการใช้งานมากกว่าโซลูเบิลออยล์ และเกิดควันและละอองระหว่างใช้งานน้อยกว่าน้ำมันล้วน

4) น้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic) เป็นน้ำมันหล่อเย็นที่ประกอบด้วยน้ำมันสังเคราะห์ทั้งหมด ไม่มีองค์ประกอบของน้ำมันแรมและน้ำ แต่อาจทำการผสมน้ำกลั่น 1:10- 1:40 ก่อนใช้งาน ซึ่งน้ำมันประเภทนี้มีคุณสมบัติในการลดความร้อนและแรงเสียดสีได้ดี และดูแลรักษาสภาพได้ง่าย แต่จะมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นต่ำ

สำหรับน้ำมันหล่อเย็นจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ถือเป็นของเสียอันตรายอันเกิดจากการตัดแต่ง และปรับสภาพผิวโลหะ พลาสติก ด้วยกระบวนการทางกายภาพ หรือเชิงกลที่มีรหัสของเสีย 12 01 09 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 หมายถึง อิมัลชัน หรือสารละลาย ที่ไม่มีธาตุฮาโลเจน ที่ใช้งานสำหรับงานกลึง ตะไบ เจียร (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)

2.1.6 เหล็กช็อตบลาสท์ (Shot blast iron)

เหล็กช็อตบลาสท์ เป็นเหล็กทรงกลมขนาดเล็กที่ใช้ในกระบวนการขัดผิวชิ้นส่วน โดยจะใช้พ่นกำจัดเหล็กส่วนเกินรวมถึงทรายจากแบบพิมพ์ทรายที่อาจติดมากับชิ้นงานในกระบวนการตัดแต่งหลังการหล่อชิ้นส่วน เพื่อตกแต่งให้ชิ้นงานมีรูปร่างตรงตามต้องการ หลังการใช้งานเหล็กช็อตบลาสท์จะมี

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิมทำให้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากอาจทำให้ชิ้นงานที่ ถูกพ่นเสียหาย และอาจมีเศษแบบพิมพ์ทรายปะปนอยู่กับผงเหล็กด้วย

สำหรับแบบเหล็กข้อต่อพลาสติกจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ถือเป็นสิ่งปฏิภูลหรือ วัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากการตัดแต่ง และปรับสภาพผิวโลหะ พลาสติก ด้วยกระบวนการทางกายภาพ หรือเชิงกล มีรหัสของเสีย 12 01 16 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิภูล หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 หมายถึง วัสดุพ่นขัดผิวที่มีสารอันตราย (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)

2.1.7 ตะกรันอะลูมิเนียม (Aluminum dross)

ตะกรันอะลูมิเนียม เป็นตะกรันที่เกิดจากกระบวนการถลุงแร่ หรือหลอมโลหะใน อุตสาหกรรม แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ ตะกรันขาวซึ่งเป็นตะกรันที่มีองค์ประกอบของอะลูมิเนียมสูง มากกว่าร้อยละ 70 ตะกรันดำซึ่งเป็นตะกรันที่มีองค์ประกอบของอะลูมิเนียมอิสระต่ำ โดยส่วนใหญ่จะ อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ และตะกรันเกลือซึ่งเป็นตะกรันที่มีอะลูมิเนียมต่ำมาก (ดิษยพงศ์ หกสุวรรณ, 2555) ดังรูปที่ 2.6 โดยมีงานวิจัยยืนยันจาก Dash et al. (2008) ที่ศึกษาพบว่าใน ตะกรันอะลูมิเนียมกว่าร้อยละ 50 ประกอบไปด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ยังสามารถสกัด กลับมาใช้งานใหม่ได้ โดยการใช้วิธีสกัดด้วยกรดซัลฟูริก



รูปที่ 2.6 ตะกรันขาว (ก) ตะกรันดำ (ข) และตะกรันเกลือ (ค)

อันเกิดจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม (ที่มา: ดิษยพงศ์ หกสุวรรณ (2555))

ในงานวิจัยครั้งนี้ ตะกรันอะลูมิเนียมที่นำมาใช้จะเป็นตะกรันที่เหลือทิ้งจากกระบวนการ หลอมชิ้นส่วนของอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ โดยคาดว่าจัดอยู่ในประเภทตะกรันดำ ที่มี ปริมาณของอะลูมิเนียมค่อนข้างต่ำและส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์

ตะกรันอะลูมิเนียมเป็นของเสียที่มีปริมาณสูง โดยมีปริมาณทั่วโลกสูงถึงประมาณ 28 ล้านตัน ในปี ค.ศ. 1990 และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มเรื่อย ๆ จนถึงกว่า 97 ล้านตันในปี ค.ศ. 2020 นอกจากนี้ยังมี การศึกษาพบว่ากระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับอะลูมิเนียม ก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจก

ประมาณ ร้อยละ 1 ของทั้งหมดโดยร้อยละ 40 มาจากกระบวนการผลิตโดยตรง และร้อยละ 60 มาจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงาน (International Aluminium Institute, 2009)

สำหรับในประเทศไทยตะกั่วอะลูมิเนียมจัดเป็นของเสียอันตราย เนื่องจากเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้รุนแรง และทำปฏิกิริยากับสารอื่นเกิดเป็นสารที่ลุกติดไฟได้ ถูกจัดเป็นสารอันตรายที่มี UN number 3170 คือ อะลูมิเนียมอันเกิดจากกระบวนการถลุงโลหะ และจัดอยู่ในสารที่มีความเป็นอันตรายประเภทที่ 4.3 คือ เป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วได้แก๊สไวไฟหรือแก๊สพิษหรือก่อให้เกิดการลุกติดไฟหรือระเบิดได้ (United Nation, Newyork and Geneva, 2009) โดยมีการกำหนดป้ายสัญลักษณ์ในการขนส่ง ดังรูปที่ 2.7

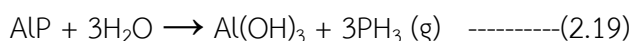
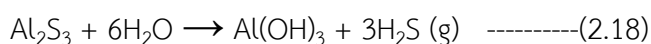
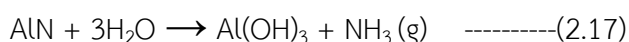
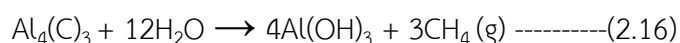
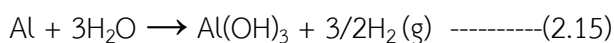


รูปที่ 2.7 ป้ายสัญลักษณ์ในการขนส่งตะกั่วอะลูมิเนียม

(ที่มา: United States Department of Transportation: USDOT (2011))

นอกจากนี้ตะกั่วอะลูมิเนียมอันเกิดจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ จะเกิดจากกระบวนการหลอมชิ้นส่วนประเภทอะลูมิเนียม ซึ่งถือเป็นของเสียอันตรายอันเกิดจากกระบวนการใช้ความร้อน ที่มีรหัสของเสีย 10 03 09 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 มีลักษณะ คือ เป็นกากตะกั่วอันเกิดจากกระบวนการผลิตทุติยภูมิ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)

สาเหตุที่ตะกั่วอะลูมิเนียมจัดเป็นของเสียอันตรายสำหรับหลาย ๆ หน่วยงาน มีสาเหตุมาจากการทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นสารอันตรายอื่น ๆ ดังสมการ (2.15)-(2.19) (ดิษยพงศ์ หกสุวรรณ, 2555)



จากสมการ (2.14)-(2.18) พบว่าการทำปฏิกิริยาระหว่างตะกอนอะลูมิเนียมกับน้ำ ก่อให้เกิดแก๊สอันตราย ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สมีเทน (CH_4) แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และแก๊สฟอสฟีน (PH_3) ซึ่งล้วนแต่เป็นแก๊สอันตรายที่อยู่ในเอกสารข้อมูลความปลอดภัยสารเคมี (Material Safety Data Sheet: *MSDS*)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟนตัน

จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับการหาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารมลพิษต่าง ๆ ด้วยกระบวนการเฟนตัน โดยทำการทดลองที่พีเอช ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณตัวออกซิไดซ์ สัดส่วนโมลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อตัวออกซิไดซ์ ($Fe:H_2O_2$ ratio) ต่าง ๆ รวมไปถึงการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวออกซิไดซ์จากเกลือเหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารอื่น เพื่อให้ได้ภาวะที่กระบวนการเฟนตันสามารถกำจัดสารมลพิษแต่ละชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับการหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟนตัน ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับการหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเพนตัน

ผู้วิจัย (ปี)	น้ำเสียที่ทดลอง	กระบวนการ	พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	วิธีการตรวจวัด	ประสิทธิภาพสูงสุด (%)	ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษา							
						ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (mg/L)	ตัวออกซิไดซ์ (mg/L)	พีเอชเริ่มต้น	ความเร็วในการกวน (rpm)	เวลาในการทดลอง (min)	ตัวสนับสนุนปฏิกิริยา	
จุฬารัตน์พงษ์ (2540)	โรงงานย้อมผ้าและตัดย้อมผ้า	เพนตัน	สีย้อมไทเทเนียมแดง ม่วง และน้ำตาลอ่อน	UV-vis spectro	> 80	-	Fe ²⁺ (178.6)	H ₂ O ₂ (200)	3	120	60	-	
			COD	Close reflux	12-42	600							
กฤษฎาพร สโตน (2546)	สีย้อมสังเคราะห์	โพลีเพนตัน	สีย้อมรีแอคทีฟเรด 141	UV-vis spectro meter	100	40.04	Fe ²⁺ (5)	H ₂ O ₂ (50)	-	3	2	หลอดแม่อร์คิวรีชนิดความดันสูง	
			TOC	TOC analyzer	53	9.30					120		
ปาริฉัตร ชิงปรีชา (2546)	อะนิลีนสังเคราะห์	เพนตัน	อะนิลีน	GC	40	0.01 M						-	
			TOC	Persulfate method	25	720							
		อิเล็กโตรเพนตัน	อะนิลีน	GC	100	0.01 M				2			
			TOC	Persulfate method	50	720							กระแสไฟฟ้า 4 amp

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับการหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการฟenton (ต่อ)

ผู้วิจัย (ปี)	น้ำเสียที่ทดลอง	กระบวนการ	พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	วิธีการตรวจวัด	ประสิทธิภาพสูงสุด (%)	ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษา							
						ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (mg/L)	ตัวออกซิไดซ์ (mg/L)	พีเอชเริ่มต้น	ความเร็วในการกวน (rpm)	เวลาในการทดลอง (min)	ตัวสนับสนุนปฏิกิริยา	
เสริมพงศ์ สายรัมย์ (2551)	อะนิลีนสังเคราะห์	โอเด็คโตรฟenton	อะนิลีน	GC-FID	100	-	Fe ²⁺ (190)	H ₂ O ₂ (2450)	2	-	120	ไฟฟ้า 2,5 amp	
			COD	STD method	57.12								
ฉันทน์ เอลิมสินสุวรรณ (2552)	น้ำมันตัดสังเคราะห์	โตนฟenton	COD	STD method	91.3	3000-	Fe ²⁺ (500)	H ₂ O ₂ (140000)	1.7	100	60	อัลตราโซนิก 400W	
					99.9	31000	Fe ²⁺ (5)	H ₂ O ₂ (140000)					
ทศวัฒน์ สุขยยะ และคณะ (2553)	กรดฮิวมิกสังเคราะห์	ฟenton	กรดฮิวมิก	UV-vis spectro	66	50	Fe ²⁺ (3040)	H ₂ O ₂ (3298)	3	100	180	-	
Lu et al. (2010)	ปิโตรเลียมในดิน	Modified Fenton	total dichloro methane	ESI FT-ICR/MS	40	14,800	Fe ³⁺ -EDTA	H ₂ O ₂ (16660)	7	150	1140	-	
			COD	Close reflux	83.45	1008.92-12688			2		20		
ณัชชาธิษั ธนกรจิตติพัฒน์ (2555)	น้ำเสียโรงอาหาร	โฟโตฟenton	BOD	azide modification	89.68	615-1380	Fe ²⁺ (2500)	H ₂ O ₂ (500)	5	120	20	หลอด UV 15,40 W	
			SS	GF/C filtration	99.03	0.32-1.25							90
			TDS	GF/C filtration	71.13	0.69-4.589	Fe ²⁺ (1500)	H ₂ O ₂ (300)	7				90
			FOG	Soxhlet	95.27	20-1180							20

ตารางที่ 2.7 ข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับการหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการฟenton (ต่อ)

ผู้วิจัย (ปี)	น้ำเสียที่ทดลอง	กระบวนการ	พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	วิธีการตรวจวัด	ประสิทธิภาพสูงสุด (%)	ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษา						
						ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (mg/L)	ตัวออกซิไดซ์ (mg/L)	พีเอชเริ่มต้น	ความเร็วในการกวน (rpm)	เวลาในการทดลอง (min)	ตัวสนับสนุนปฏิกิริยา
Shimizu et al. (2012)	ฟีนอลสังเคราะห์	Fe ⁰ ฟenton + เต็มอากาศ	ฟีนอล	HPLC	91	25	Fe ⁰ (1000)	เติมอากาศ (0.5 l/min)	3	400	300	-
						20						
Punzi, Mattiasson and Jonstrup (2012)	สีย้อมสังเคราะห์	โฟโตฟenton Fe ⁰ โฟโตฟenton	สีย้อม	UV-vis spectro	100	100	Fe ²⁺ /Fe ⁰ (0.25)	H ₂ O ₂ (408)	3	140	120	หลอด UV 18W
						100					240	
ชญัญญา เพิ่มชาติ (2556)	น้ำมันตัดสังเคราะห์	Modified ฟenton (เบ็ดเตล็ด)	COD	Close reflux	80	185-231	Fe ³⁺ (50)	H ₂ O ₂ (20)	3	-	60	-
						58	FeMoO ₄ (200)		4			
วิภาดา วิศาลศิริรักษ์ (2557)	โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ	ฟenton	ซี	Pt-Co method UV-vis spectro	26	7200-7400 pt-co	Fe ²⁺ (400)	H ₂ O ₂ (1000)	3	-	60	-
						900-1100						
						2800-3100						

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับการหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการฟenton (ต่อ)

ผู้วิจัย (ปี)	น้ำเสียที่ทดลอง	กระบวนการ	พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	วิธีการตรวจวัด	ประสิทธิภาพสูงสุด (%)	ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษา							
						ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (mg/L)	ตัวออกซิไดซ์ (mg/L)	พีเอชเริ่มต้น	ความเร็วในการกวน (rpm)	เวลาในการทดลอง (min)	ตัวสนับสนุนปฏิกิริยา	
วิภาดา วิศาลศิริรักษ์ (2557) (ต่อ)	โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ	ฟenton (แบ่งเติม)	สี	Pt-Co	45	7200-7400 pt-co	Fe ²⁺ (400)	H ₂ O ₂ (1000)	3	-	80	-	
			ลิกนิน	UV-vis spectro	39	900-1100							
			COD	Close reflux	38	2800-3100							
		อิเล็คโตรฟenton (แบ่งเติม)	สี	Pt-Co	30	7200-7400 pt-co		ขี้ไฟฟ้าเหล็ก	H ₂ O ₂ (200)	3	-	60	กระดาษไฟฟ้า 200 A/m ²
			ลิกนิน	UV-vis spectro	24	900-1100							
			COD	Close reflux	23	2800-3100							
อาการีย์ ประเสริฐศรี (2557)	น้ำมันตัดสังเคราะห์ (H ₂ O ₂)	ฟenton (แบ่งเติม)	COD	Close reflux	97	190-230	Fe ²⁺ (200)	H ₂ O ₂ (500)	3	200	1	-	
Azmi et al. (2014)	สีย้อมสังเคราะห์	Modified โฟโตฟenton	สีย้อม	AG25	99	50	Fe-clay (1250)	H ₂ O ₂ (2278)	3	-	20	หลอด UV	
				RB4	81								
				DB71	94								
ชนารัตน์ สุทธะนันท์ (2558)	น้ำมันตัดสังเคราะห์	ฟenton (แบ่งเติม)	COD	Close reflux	100	100	Fe ²⁺ (50)	H ₂ O ₂ (125)	-	125	30	-	
						198-220	ขี้ไฟฟ้า Fe-St	H ₂ O ₂ (250)					ไฟฟ้า 35.71 A/m ²

ตารางที่ 2.10 ข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับการหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการฟenton (ต่อ)

ผู้วิจัย (ปี)	น้ำเสียที่ทดลอง	กระบวนการ	พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	วิธีการตรวจวัด	ประสิทธิภาพสูงสุด (%)	ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษา							
						ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (mg/L)	ตัวออกซิไดซ์ (mg/L)	พีเอชเริ่มต้น	ความเร็วในการกวน (rpm)	เวลาในการทดลอง (min)	ตัวสนับสนุนปฏิกิริยา	
Santos et al. (2016)	Perfluoro octanoic acid สังเคราะห์	ฟenton	Perfluoro octanoic acid	HPLC	~10	Fe ³⁺ (1200)	H ₂ O ₂ (5610)	2.68	-	500			
		Persulfate oxidation				Sodium Persulfate (12614)	2.94	ความร้อน 70 °C					
		ฟenton + การดูดซับ				H ₂ O ₂ (5610)	2.73	กรดอะซิติก					
Deví, Srinivas and ArunaKumari (2016)	สี้อม MV สังเคราะห์	Modified โฟโต ฟenton	สี้อม MV	UV-vis spectro	100	Fe ³⁺ (1200)	H ₂ O ₂ (10)	3	-	40		หลอดเมออร์คิวรี 125W	
						Fe ⁰ (20)	PMS ¹ (30)						70
							PDS ² (30)						
Yoon et al. (2016)	ฟีนอล สังเคราะห์	Modified ฟenton	ฟีนอล	HPLC	100	Fe ⁰ (1000)	H ₂ O ₂ (1750)	2.5	-	1			
								25					
Wang P. et al. (2016)	methyl-orange สังเคราะห์	Modified Photo-Fenton	สี้อม MO	UV-vis spectro	90	10	H ₂ O ₂ (816)	3.5	-	30	หลอดเมออร์คิวรี 500W		

ตารางที่ 2.12 ข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับการหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการฟenton (ต่อ)

ผู้วิจัย (ปี)	น้ำเสียที่ทดลอง	กระบวนการ	พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	วิธีการตรวจวัด	ประสิทธิภาพสูงสุด (%)	ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษา						
						ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (mg/L)	ตัวออกซิไดซ์ (mg/L)	พีเอชเริ่มต้น	ความเร็วในการกวน (rpm)	เวลาในการทดลอง (min)	ตัวสนับสนุนปฏิกิริยา
Yehia, Eshaq and ElMetwally (2016)	Nitrophenol สังเคราะห์	เฟนตัน	p-nitrophenol	HPLC	40	Fe ²⁺ (1000)	H ₂ O ₂	6.3	130	30	-	
					100	Fe-aspartate (20)	5					
					100	Fe-glutamate (20)	10					
					10-25	Cu/Co-aspartate (20)	30					
					10-25	Cu/Co-glutamate (20)	30					
Zhuang et al. (2016)	โรงผลิตแก๊สด้วยถ่านหิน	เฟนตัน	COD Phenol	Standard methods	50	Fe+cat	H ₂ O ₂ (150)	6	-	120	coal fly ash + sewage sludge	
					80	alyst (10000)	600-700					
Bai et al. (2017)	Nitrobenzene สังเคราะห์	Modified เฟนตัน	H ₂ O ₂ Fe	HPLC titanium sulfate o-phenanthroline	100	Co-Fe Layered (1000)	H ₂ O ₂ (500)	2.7	180	30	-	
												20 และ (50)

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับการหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟนตัน (ต่อ)

ผู้วิจัย (ปี)	น้ำเสียที่ทดลอง	กระบวนการ	พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	วิธีการตรวจวัด	ประสิทธิภาพสูงสุด (%)	ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษา						
						ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (mg/L)	ตัวออกซิไดซ์ (mg/L)	พีเอชเริ่มต้น	ความเร็วในการกวน (rpm)	เวลาในการทดลอง (min)	ตัวสนับสนุนปฏิกิริยา
Xia et al. (2017)	ฟีนอลสังเคราะห์	Modified เฟนตัน	ฟีนอล	-	>90	35	Dendritic ZVI (100)	H ₂ O ₂ (204)	4	-	30	-
Tian et al. (2017)	Ofloxacin สังเคราะห์	Modified เฟนตัน	Ofloxacin	HPLC	100	12	Cu-MIO ⁴ (250)	H ₂ O ₂	3.6-10	-	60	-
							CO ₂ S ⁵ /Cu-MIO (250)	1	10	-	-	
Liu et al. (2017)	Amoxicillin สังเคราะห์	Modified เฟนตัน	Amoxicillin	UV-spectro	60.2	50	Fe ⁰	H ₂ O ₂	3	150	50	-
					90		Nano	224				Cu ²⁺ 1 mM
					55		500					Mg ²⁺ 1 mM

หมายเหตุ: ¹peroxymonosulfate ⁴ mesoporous iron oxide

²peroxydisulfate ⁵ carbon quantum dots

³ hydrophilic graphene

จากตารางที่ 2.5 พบว่าภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตันมีความแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของสารมลพิษที่บำบัด โดยเฉพาะปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวออกซิไดซ์ ที่มีช่วงความแตกต่างของปริมาณที่เหมาะสมค่อนข้างสูง ตั้งแต่หลักหน่วยไปจนถึงหลักหมื่นมิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดก็มีตั้งแต่ใช้เวลาไม่ถึง 1 ชั่วโมง ไปจนถึง 1 วัน ส่วนช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเฟนตันส่วนใหญ่จะไปในทางเดียวกัน คือ มีความเหมาะสมในสภาวะที่เป็นกรด (พีเอช 2-3) โดยหากต้องการบำบัดในสภาวะที่เป็นด่างได้อย่างมีประสิทธิภาพจะต้องมีการดัดแปลงกระบวนการเฟนตันด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวเร่งปฏิกิริยาตัวออกซิไดซ์ หรือเพิ่มตัวเร่งและตัวสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาก่อนเสมอ

2.2.2 การบำบัดน้ำมันหล่อเย็นด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันประยุกต์

ธนันท์ เถลิงสินสุวรรณ (2552) ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กระบวนการอะคูสติคออกซิเดชัน (acoustic oxidation) ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันหล่อเย็น ซึ่งได้ผลว่าการใช้กระบวนการอะคูสติคออกซิเดชันเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการบำบัดน้ำเสียชนิดนี้ โดยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียประมาณร้อยละ 10 เท่านั้น จึงมีการนำกระบวนการอะคูสติคออกซิเดชันมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเฟนตัน เป็นกระบวนการโซโนเฟนตัน ทำให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงถึงร้อยละ 91.3 เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 140 กรัมต่อลิตรและ Fe^{2+} ในรูปเฟอร์รัสซัลเฟต 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 1.7 นอกจากนี้ยังมีการนำกระบวนการโคแอกกูเลชันมาใช้ร่วมกับกระบวนการโซโนเฟนตัน ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงขึ้นถึงร้อยละ 99.9 และช่วยให้ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดลดลง โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียง 1.4 กรัมต่อลิตรและ Fe^{2+} 5 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่านั้น

นุสรา โรจน์วิลาวัลย์ (2554) ศึกษาการบำบัดน้ำมันปนเปื้อนน้ำมันหล่อเย็นสังเคราะห์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตันและโฟโตอิเล็กโตรเฟนตัน พบว่าสามารถบำบัดซีโอดีของน้ำมันหล่อเย็นสังเคราะห์ได้สูงสุดที่ร้อยละ 92 และร้อยละ 95 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 5 กรัมต่อลิตร และสัดส่วน $Fe:H_2O_2$ โดยมวลอยู่ในช่วง 1:5-1:10 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดอยู่ที่ 30-60 นาที

ชนัญญา เพิ่มชาติ (2556) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันหล่อเย็นความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการเฟนตัน 4 รูปแบบ คือ แบบที่ 1 กระบวนการเฟนตันปกติโดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟต แบบที่ 2 กระบวนการเฟนตันปกติโดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟตแบบแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แบบที่ 3 กระบวนการคล้ายเฟนตันแบบเอกพันธ์ (homogeneous reaction) โดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ และแบบที่ 4 กระบวนการคล้ายเฟนตันแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous reaction)

โดยใช้ไอออนโมลิบดีเตตสังเคราะห์ พบว่ากระบวนการเฟนตันปกติ และกระบวนการเฟนตันแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเข้มข้น 95% โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดในรูปของซีไอดีสูงสุดที่ร้อยละ 86 ในเวลา 60 นาที และความเข้มข้นของ Fe^{2+} และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมคือ 50 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ พีเอชที่เหมาะสม คือ 3 สำหรับกระบวนการคล้ายเฟนตันแบบเอกพันธ์ให้ประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 80 และภาวะที่เหมาะสมเช่นเดียวกับรูปแบบที่ 1 และ 2 ส่วนกระบวนการคล้ายเฟนตันแบบวิวิธพันธุ์ที่ใช้ไอออนโมลิบดีเตตสังเคราะห์ ได้ประสิทธิภาพสูงสุดเพียงร้อยละ 58 เมื่อใช้ไอออนโมลิบดีเตต 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอช 4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการเฟนตันประยุกต์ที่ใช้ไอออนโมลิบดีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีความเหมาะสมต่อการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นน้อยกว่ากระบวนการเฟนตันตามปกติ

อาจารย์ ประเสริฐศรี (2557) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันหล่อเย็นสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 50-150 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการเฟนตันปกติแบบแบ่งเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลปรากฏว่าสามารถกำจัดเสียปนเปื้อนน้ำมันหล่อเย็นในรูปของซีไอดีได้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 97 ในเวลาเพียง 1 นาที เมื่อใช้ Fe^{2+} 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 3 และความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อพยายามจะเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นเป็นร้อยละ 98 พบว่าต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากขึ้นถึง 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังทดลองเพิ่มเติมเกี่ยวกับการจัดการตะกอนหลังการบำบัด พบว่าการปรับพีเอชเป็นกลางด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และใช้อัตราการไหลกลับของถังตกตะกอน 0.2 – 0.45 และ 0.7–1.9 เมตรต่อชั่วโมง จะสามารถแยกตะกอนเหล็กรอกได้มากกว่าร้อยละ 80 และพบว่าตะกอนเหล็กที่เกิดจากกระบวนการเฟนตันยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างน้อย 5 ครั้ง โดยที่ยังให้ประสิทธิภาพการบำบัดไม่ต่างจากเดิม และไม่จำเป็นต้องเติมเฟอร์รัสไอออนเพิ่ม

ชนารัตน์ สุทธะนันท์ (2558) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันหล่อเย็นสังเคราะห์ด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตัน 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบที่ 1 กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าผลิต Fe^{2+} โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก-เหล็กกล้าไร้สนิมและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไม่ใช้สารละลายเหล็ก แบบที่ 2 กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์-แกรไฟต์ และสารละลาย Fe^{2+} ไม่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และแบบที่ 3 กระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าผลิตทั้ง Fe^{2+} และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก-ไทเทเนียม และการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที ไม่ใช้ทั้งสารละลายเหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลปรากฏว่า รูปแบบที่ 1 และ 3 สามารถกำจัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันหล่อเย็นสังเคราะห์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรให้หมดไปได้ ส่วน

รูปแบบที่ 2 สามารถกำจัดได้ร้อยละ 99.36 ซึ่งถือว่ากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันมีความเหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันหล่อเย็นที่มีความเข้มข้นต่ำ

Seo et al. (2007) ศึกษาการใช้กระบวนการเฟนตันร่วมกับเสียงอัลตราโซนิก หรือ โซโนเฟนตันในการกำจัดน้ำมันหล่อเย็น ซึ่งสามารถลดซีไอดีและของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids: SS) ได้สูงสุดถึงร้อยละ 98 และ 93 ตามลำดับ ในเวลา 30 นาที เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 10% และ Fe^{2+} ในรูปเฟอร์รัสซัลเฟต 3 กรัมต่อลิตร ที่พีเอช 3 นอกจากนี้ยังทำการทดสอบ Thin Layer Chromatography (TLC) ของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก 2 ตัว ในน้ำมันหล่อเย็น คือ ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA) และ Triethanolamine (TEA) ผลปรากฏว่าสารประกอบทั้ง 2 ตัวมีการเปลี่ยนแปลงสภาพไปหลังการบำบัดด้วยโซโนเฟนตัน ซึ่งแตกต่างจากผลที่ได้จากการบำบัดด้วยโคแอกกูเลชัน ที่สารประกอบทั้ง 2 ชนิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักจากน้ำเสียเริ่มต้น

2.2.3 การบำบัดน้ำมันหล่อเย็นด้วยวิธีการอื่น ๆ นอกเหนือจากเฟนตัน

ณัฐวิญญู ชวลิตพรศิยา (2552) ศึกษาการกำจัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันหล่อเย็นสังเคราะห์ด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคอะเลสเซอร์และถังตกตะกอน โดยประยุกต์ใช้ตัวกลางโพลีโพรพิลีนรูปร่างต่าง ๆ 3 รูป ได้แก่ เม็ดกลม เส้นใย และหลอดกลวง ผลปรากฏว่าตัวกลางชนิดหลอดกลวงให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันหล่อเย็นในรูปของซีไอดีสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 43.64 และเมื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด ด้วยการวางตัวกลางหลายชนิดแบบขั้นตอนทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 59.12

พชร โพธิ์ทอง (2554) ศึกษาการกำจัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันหล่อเย็นสังเคราะห์และน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่าย โดยใช้กระบวนการลอยตะกอนด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน หรือเรียกว่า Modified Dissolved Air Flotation ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันหล่อเย็นร้อยละ 82 ในขณะที่กระบวนการโคแอกกูเลชันเพียงอย่างเดียวให้ประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 68 และกระบวนการลอยตะกอนด้วยอากาศละลายไม่สามารถกำจัดน้ำมันหล่อเย็นได้แม้แต่น้อย เนื่องจากอนุภาคของน้ำมันหล่อเย็นที่เป็นอิมัลชันและมีสารลดแรงตึงผิวทำให้มีขนาดเล็กจนไม่สามารถแยกด้วยการทำให้ลอยได้

จิตรภา มงคลเนาวรัตน์ (2557) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันหล่อเย็นด้วยกระบวนการรวมตะกอนและลอยตัวด้วยไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่า กระบวนการรวมตะกอนและลอยตัวด้วยไฟฟ้าสามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันหล่อเย็นได้ประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 99 โดยมีภาวะที่เหมาะสม คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2.5 เซนติเมตร และความหนาแน่น

ของกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียจะส่งผลต่อระยะเวลาในการบำบัด เนื่องจากความต้องการปริมาณไอออนที่ปล่อยออกมาจากขั้วไฟฟ้า จะมีความแตกต่างกัน โดยยิ่งความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้นมาก ยิ่งต้องใช้เวลาในการบำบัดนานขึ้น

ทักษิณา โพธิ์ใหญ่ (2557) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันหล่อเย็นสังเคราะห์ ด้วยวิธีการทำลายเสถียรภาพด้วยสารเคมี กระบวนการโคอะเลสเซอร์ และการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน พบว่า การกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันสูงสุดมากกว่าร้อยละ 95 แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการอุดตันของตัวกรอง ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการเดินระบบที่สูงขึ้น ถัดมาคือ การบำบัดด้วยวิธีการทำลายเสถียรภาพมีประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70 และสุดท้ายคือกระบวนการโคอะเลสเซอร์ ที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดร้อยละ 40 แต่เมื่อนำน้ำเสียมาทำลายเสถียรภาพในเบื้องต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการโคอะเลสเซอร์ พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดของโคอะเลสเซอร์เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 50 และเมื่อประยุกต์ใช้ 3 ระบบร่วมกันพบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงถึงร้อยละ 97 และยังช่วยลดปัญหาการอุดตันของตัวกรองได้อีกด้วย

2.2.4 การบำบัดน้ำเสียอื่น ๆ ด้วยกระบวนการเฟนตัน

วุฒิ วิพันธ์พงษ์ (2540) ศึกษาการใช้เฟนตันในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยน้ำเสียที่ศึกษามีทั้งสิ้น 4 โทนสี ได้แก่ โทนดำ โทนม่วง โทนแดง และโตนน้ำตาลอ่อน ซึ่งถูกเตรียมให้มีค่าซีโอดีคงที่อยู่ที่ 600 มิลลิกรัมต่อลิตรทุกโทนสี ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการกำจัดสี คือ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และสัดส่วนโมลของ $H_2O_2:Fe$ โดยสัดส่วนที่เหมาะสมคือ 5:1 สำหรับสีโทนดำ แดง และน้ำตาลอ่อน ยกเว้นสีโทนม่วงที่สัดส่วนที่เหมาะสมคือ 10:1 เมื่อใช้สัดส่วนที่เหมาะสม ประสิทธิภาพในการกำจัดสีอยู่ที่มากกว่าร้อยละ 80 และมีค่าโออาร์พีอยู่ในระดับสูง คือ 583-614 มิลลิโวลท์ แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเพียงร้อยละ 12-42 เท่านั้น

สงกรานต์ คำศรี (2546) ศึกษาการบำบัดน้ำชะขยะมูลฝอยด้วยกระบวนการเฟนตัน โดยสามารถลดสีและซีโอดีลงไปได้ร้อยละ 91.36 และ 73.8 ตามลำดับ และความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม คือ 11 กรัมต่อลิตร สัดส่วนโมล $H_2O_2:Fe$ เท่ากับ 1:5 และพีเอช 8 ซึ่งถือว่ามีค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุด เมื่อเทียบกับกระบวนการเฟนตันในงานวิจัยอื่น ๆ นอกจากนี้ยังมีการทดลองในแบบจำลองซึ่งมีน้ำเสียปริมาณมาก พบว่าเมื่อน้ำเสียมีปริมาณและความลึกมากขึ้นจะส่งผลให้ออกซิเจนระเหยได้น้อยทำให้การกำจัดสีมีประสิทธิภาพมากขึ้น

วรวิทย์ วงศ์นิรามย์กุล (2546) ศึกษาการบำบัดสารอินทรีย์อันตรายในน้ำเสียจากโรงงานยางพาราได้แก่ 3-methyl indole และ diisobutyl phthalate ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อย

สลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ ด้วยกระบวนการเฟนตัน ผลปรากฏว่าสามารถกำจัด 3-methyl indole ได้เกือบทั้งหมด และ diisobutyl phthalate ร้อยละ 90 ในเวลา 180 นาที รวมถึงสามารถกำจัด ซีไอดีไปได้ร้อยละ 48 และช่วยเพิ่มค่า Biodegradability ขึ้นประมาณ 0.1 ซึ่งแสดงว่ากระบวนการเฟนตันมีความเหมาะสมในการเป็นระบบบำบัดเบื้องต้นก่อนเข้าสู่การบำบัดทางชีวภาพของโรงงานแห่งนี้ โดยมีภาวะเหมาะสมในการบำบัดที่พีเอช 3 ความเข้มข้น Fe^{2+} 70 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 617 มิลลิกรัมต่อลิตร

มณฑา ประดิษฐชา (2550) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเคมีภัณฑ์ที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีโคแอกกูเลชันมาแล้วด้วยกระบวนการเฟนตัน พบว่าพีเอชที่เหมาะสมที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ 3 ความเข้มข้น Fe^{2+} 1.33 มิลลิกรัมต่อลิตรและความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.36 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดซีไอดีของน้ำเสียลงได้ร้อยละ 65-70 ลดค่าของแข็งแขวนลอยและโครเมียมไตรวาเลนต์ (Cr^{3+}) ลงได้มากกว่าร้อยละ 90 และลดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) ลงได้ร้อยละ 69 ในเวลา 30 นาที โดยกระบวนการเฟนตันสามารถกำจัดโครเมียมซึ่งเป็นโลหะหนักได้มากกว่าวิธีการตกตะกอนทางเคมี (precipitation) ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{3+} สูงสุดที่ร้อยละ 75.24 และ Cr^{6+} ร้อยละ 20 เท่านั้น

ทศวัตต์ สุธัยยะ และคณะ (2553) ศึกษาการย่อยสลายกรดฮิวมิกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเฟนตัน และกระบวนการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ พบว่ากระบวนการเฟนตันสามารถย่อยสลายกรดฮิวมิกได้ร้อยละ 66 ในเวลา 180 นาที ที่ภาวะที่เหมาะสมคือ พีเอชเท่ากับ 3 สัดส่วนกรดฮิวมิกต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อไอออนเหล็ก ($HA:H_2O_2:Fe^{2+}$) คือ 1:560:140 ในขณะที่การย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเพียงร้อยละ 33 เท่านั้น และใช้เวลานานถึง 27 วัน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2.5 การบำบัดน้ำเสียอื่น ๆ ด้วยกระบวนการคล้ายเฟนตันหรือเฟนตันประยุกต์

เนื่องจากกระบวนการเฟนตัน ยังมีข้อจำกัดในการบำบัดน้ำเสียหรือสารมลพิษบางประเภท จึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่พยายามปรับปรุงกระบวนการเฟนตันไม่ว่าจะโดยวิธีการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยา เปลี่ยนตัวออกซิไดซ์ หรือการเพิ่มตัวสนับสนุนปฏิกิริยาใหม่ ๆ เข้าไปในระบบ โดยมีเป้าหมายเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดของกระบวนการเฟนตันให้สูงขึ้น ตัวอย่างงานวิจัยได้แก่

กฤษฎาพร สีโต (2546) ศึกษาการใช้กระบวนการเฟนตันร่วมกับแสง UV จากหลอดเมอควีรีชนิดแรงดันสูงหรือเรียกว่าโฟโตเฟนตัน ในการบำบัดสีย้อมสังเคราะห์ประเภทรีแอคทีฟเรด ซึ่งสามารถกำจัดสีย้อมให้หมดไปได้ในเวลาอันสั้น (กำจัดได้หมดใน 2 นาที) และสามารถลด

สารอินทรีย์ในรูปของทีโอซีลงได้ร้อยละ 53 ใน 2 ชั่วโมง ที่พีเอช 3 ซึ่งให้ประสิทธิภาพมากกว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสอยู่ถึงร้อยละ 20 นอกจากนี้ยังศึกษาเพิ่มเติมพบว่าแสงอาทิตย์เวลา 12.30 น. สามารถใช้แทนแสงจากหลอดเมอควีร์ชนิดแรงดันสูงได้ โดยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดแทบไม่แตกต่างกัน

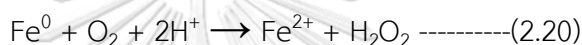
ปาริฉัตร ชิวปรีชา (2546) ศึกษาเปรียบเทียบการใช้กระบวนการเฟนตันปกติ และเฟนตันร่วมกับการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าหรือเรียกว่าอิเล็กโทรเฟนตันในการกำจัดอะนิลีน และทีโอซีพบว่ากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตันสามารถกำจัดอะนิลีนได้หมดภายในเวลา 60 นาที และสามารถลดปริมาณทีโอซีลงได้ร้อยละ 50 ในเวลา 2 ชั่วโมง ในขณะที่กระบวนการเฟนตันปกติสามารถกำจัดอะนิลีนได้เพียงร้อยละ 40 และทีโอซีร้อยละ 25 ในเวลา 2 ชั่วโมง โดยผลการศึกษาระบุว่าอัตราการย่อยสลายอะนิลีนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณจนถึงจุดหนึ่งอัตราการย่อยสลายจะไม่เพิ่มขึ้นอีก ส่วนปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่ได้เป็นปัจจัยหลักต่ออัตราการย่อยสลายของกระบวนการเฟนตันปกติ แต่กลับเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน

ณัฐพล สุนทรวิภาต (2547) ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงพยาบาลด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน โดยภาวะที่เหมาะสมคือ ที่พีเอช 3 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 135 มิลลิกรัมต่อลิตรและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5400 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีไปได้สูงสุดร้อยละ 75 นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการโฟโตเฟนตันสามารถลดความเป็นพิษของน้ำเสียได้น้อยลง และเพิ่มค่า Biodegradability ให้มากขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงความเหมาะสมในการเป็นระบบบำบัดขั้นต้นก่อนบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพต่อไป

วิภาดา วิศาลสิริรักษ์ (2557) ศึกษาการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ ด้วยกระบวนการเฟนตันปกติ กระบวนการเฟนตันประยุกต์ด้วยการแบ่งเติมสารเคมี และเฟนตันประยุกต์แบบอิเล็กโทรเฟนตัน ผลการทดลองพบว่ากระบวนการเฟนตันที่มีการแบ่งเติมทั้งเหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จำนวน 12 ครั้ง มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายลิกนินและซีโอดีสูงสุด และสูงกว่ากระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน โดยสามารถลดซีโอดีร้อยละ 45 ลดปริมาณลิกนินได้ร้อยละ 39 และลดซีโอดีลงได้ร้อยละ 38 ที่พีเอชเริ่มต้น 3 และปริมาณ Fe^{2+} ที่ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากการเติมสารเป็นช่วง ๆ จะช่วยลดการยับยั้งการเกิดไฮดรอกซิลอิสระจากการมีสารเคมีอยู่ในระบบมากเกินไป นอกจากนี้เมื่อศึกษาปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น พบว่าการแบ่งเติมทั้งเหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถลดปริมาณตะกอนไปได้ร้อยละ 20.7 เมื่อเปรียบเทียบกับเติมสารแบบครั้งเดียว

Gomathi et al. (2009) ศึกษาการบำบัดสีย้อมประเภทเมทิลออเรนจ์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้เหล็กประจุศูนย์ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดในภาวะที่มีแสงยูวี และไม่มีแสง เมื่อใช้ตัวออกซิไดซ์ 2 ชนิดคือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ผลปรากฏว่าเฟนตันเหล็กประจุศูนย์ที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในภาวะที่มีแสงยูวี ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมากที่สุดโดยสามารถบำบัดได้เกือบทั้งหมดในเวลา 16 นาที ในขณะที่การทดลองในภาวะอื่น ๆ จะอยู่ในช่วงร้อยละ 10-70

Shimizu et al. (2012) ศึกษาการกำจัดฟีนอลด้วยกระบวนการเฟนตันที่ใช้เหล็กประจุศูนย์ โดยใช้ในการเติมอากาศที่ 0.5 ลิตรต่อนาที แทนการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะถูกสร้างขึ้นในระบบ โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กประจุศูนย์กับออกซิเจนในสภาวะกรด ดังสมการ (2.20)



ผลปรากฏว่า ในภาวะที่เหมาะสม พีเอช 3 ปริมาณเหล็กประจุศูนย์ 1 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัดฟีนอลไปได้กว่าร้อยละ 95 ใน 1500 นาที โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเร็วมากในช่วงแรก (ประสิทธิภาพขึ้นสูงเกินร้อยละ 90 ตั้งแต่ 300 นาทีแรก ก่อนจะค่อย ๆ คงที่จนถึง 1500 นาที) แต่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปทีโอซีเพียงร้อยละ 24.3 เท่านั้น จากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าฟีนอลที่ถูกกำจัดด้วยกระบวนการเฟนตัน ถูกเปลี่ยนรูปอยู่ในรูปของอนุพันธ์อื่น แต่ยังมีสภาพเป็นสารอินทรีย์ เช่น แคทีคอล และไฮโดรควิโนน จึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณของฟีนอลหลังการบำบัดลดลง แต่ปริมาณสารอินทรีย์โดยรวมไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

Punzi et al. (2012) ศึกษาการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน และเปรียบเทียบการบำบัดสีย้อมระหว่างกระบวนการโฟโตเฟนตันแบบเอกพันธ์ที่ใช้ Fe^{2+} และกระบวนการโฟโตเฟนตันแบบวิวิธพันธ์ที่ใช้ Fe^0 ผลที่ได้คือ ทั้ง 2 กระบวนการสามารถกำจัดสีย้อมประเภทริมาซอลเรดให้หมดไปได้ โดยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้ Fe^{2+} สามารถกำจัดสีย้อมได้หมดในเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนโฟโตเฟนตันที่ใช้ Fe^0 กำจัดได้หมดในเวลา 4-8 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าโฟโตเฟนตันที่ใช้ Fe^{2+} มีความเร็วในการทำปฏิกิริยามากกว่าโฟโตเฟนตันที่ใช้ Fe^0 แต่โฟโตเฟนตันที่ใช้ Fe^0 ก็มีข้อดีตรงที่ช่วยลดปริมาณเหล็กละลายในน้ำหลังบำบัดลงได้ร้อยละ 50 และนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้โดยที่ประสิทธิภาพไม่ลดลงไปมากนัก

Tu et al. (2012) ศึกษาการบำบัดสีย้อมแอซิดออเรนจ์ 2 ด้วยกระบวนการคล้ำเฟนตัน โดยใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟตร่วมกับตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย พบว่ากระบวนการดังกล่าวสามารถกำจัดสีย้อมได้เกือบทั้งหมดในเวลา 180 นาที จากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าสารอินทรีย์ใน

ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น และจากผลการทดลองพบว่าสารอนินทรีย์ที่มีผล คือ ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) โดยใช้เหตุผลว่าซิลิคอนไดออกไซด์มีสายโซ่ siloxane bridges ซึ่งประกอบด้วยพันธะ Si-O ที่สามารถสร้างพันธะยึดจับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยพันธะไฮโดรเจนได้ ส่วนอะลูมิเนียมออกไซด์มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาในการรีดิวซ์ Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวช่วยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการคล้ายเฟนตันสูงขึ้น

Azmi et al. (2014) ศึกษาการบำบัดสีย้อมแอซิดกรีน 25 ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเหล็กผสมกับดินเหนียวซึ่งเตรียมโดยวิธี calcination ผลปรากฏว่าสามารถกำจัดสีย้อมแอซิดกรีนไปได้ถึงร้อยละ 99 ในเวลาเพียง 20 นาที ที่พีเอช 3 เมื่อใช้เหล็กผสมดินเหนียว 1.25 กรัมต่อลิตรและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6.7 มิลลิโมลลาร์ นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดสีย้อมชนิดไตรเอกบลู 71 และรีแอคทีฟบลู 4 ได้ถึงร้อยละ 94 และ 81 ตามลำดับ ในเวลา 20 นาที

Santos et al. (2016) ศึกษาการกำจัดกรดเปอร์ฟลูออโรออกตาโนอิกด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับกรดฮิวมิก ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างกระบวนการออกซิเดชันและการดูดซับ ผลปรากฏว่าเมื่อใช้กระบวนการเฟนตันร่วมกับกรดฮิวมิก สามารถกำจัดกรดเปอร์ฟลูออโรออกตาโนอิกให้หมดไปได้ ในเวลา 25 นาที เมื่อใช้ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 165 มิลลิโมลลาร์ Fe^{3+} 3 มิลลิโมลลาร์ และกรดฮิวมิก 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 2.73 ซึ่งให้ประสิทธิภาพเทียบเท่ากับการออกซิไดซ์ด้วยโซเดียมเปอร์ซัลเฟตที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในเวลา 250 นาที

Devi et al. (2016) เปรียบเทียบผลของกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้เหล็กประจุศูนย์ในการบำบัดสีย้อมประเภทเมทิลไวโอเล็ต เมื่อใช้ตัวออกซิไดซ์ 3 ชนิด ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เปอร์ออกซิโมนอซัลเฟต และเปอร์ออกซีไดซัลเฟต ผลปรากฏว่าเปอร์ออกซิโมนอซัลเฟตให้ประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงที่พีเอชสูง (5-7) แต่สำหรับที่พีเอช 3 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเปอร์ออกซิโมนอซัลเฟตมีประสิทธิภาพสูงสุดใกล้เคียงกัน โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความเร็วในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าเล็กน้อยในช่วงแรก สำหรับในด้านการนำเหล็กประจุศูนย์กลับมาใช้ซ้ำ การศึกษาพบว่าเมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ เหล็กประจุศูนย์กลับมาใช้ซ้ำได้หลายครั้งกว่าเมื่อเปอร์ออกซิโมนอซัลเฟต และเปอร์ออกซีไดซัลเฟต หรืออาจกล่าวได้ว่า ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีคุณสมบัติในการรักษาสภาพตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า

Zhuang et al. (2016) ศึกษาเกี่ยวกับการใช้เฟนตันร่วมกับเถ้าลอยและตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย ในการบำบัดน้ำเสียจากระบบการผลิตแก๊ส ผลปรากฏว่าการเพิ่มเถ้าลอยและตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเข้าไปในกระบวนการเฟนตันช่วยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้น และมี

การศึกษาต่อพบว่าที่ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นนั้นมาจากซิลิกาและอะลูมิเนียมซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่อยู่ในถ้ำลอย โดยสามารถบำบัดฟีนอลในน้ำเสียได้ถึงร้อยละ 80 และซีโอดีร้อยละ 50 ในเวลา 2 ชั่วโมง

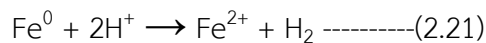
Yoon et al. (2016) ศึกษาการบำบัดฟีนอลด้วยกระบวนการเฟนตันที่ใช้เหล็กประจุศูนย์ แทนสารละลายเกลือเหล็ก พบว่าสามารถกำจัดฟีนอลได้ทั้งหมดในเวลาไม่ถึง 3 นาที และกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของทีโอซีได้กว่าร้อยละ 75 เมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 มิลลิโมลาร์ นอกจากนี้ยังศึกษาการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน โดยไม่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ใช้การเติมอากาศเพื่อสร้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แทน แต่พบว่ามีประสิทธิภาพและความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาด้อยกว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อยู่พอสมควร โดยเมื่อเวลาผ่านไป 300 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลเพียงร้อยละ 60 เท่านั้น ส่วนผลการศึกษาสภาพพื้นผิวของเหล็กประจุศูนย์ด้วยเทคนิคทาง X-rays พบว่าหลังใช้ในการบำบัดแล้วบนพื้นผิวของเหล็กประจุศูนย์มีสารประกอบจำพวกเหล็กออกไซด์ (Fe-O bond) เกิดขึ้น โดยยิ่งเห็นได้ชัดตามปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากขึ้น ซึ่งเป็นตัวยืนยันว่ามีการแลกเปลี่ยนประจุเกิดขึ้นตามทฤษฎีของเฟนตันที่ใช้เหล็กประจุศูนย์

Wang et al. (2016) ศึกษาการใช้เหล็กสังเคราะห์ร่วมกับ hydrophilic graphene ในกระบวนการโฟโตเฟนตัน เพื่อบำบัดสีย้อมประเภทเมทิลออเรนจ์ ผลปรากฏว่าสามารถกำจัดสีย้อมไปได้ถึงเกือบร้อยละ 90 ในเวลา 30 นาที ที่พีเอช 3.5 โดยระบุว่า hydrophilic graphene มีส่วนช่วยให้ปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันเกิดเร็วขึ้น เนื่องจากมีคุณสมบัติในการดูดซับ และการนำไฟฟ้าที่ดี ทำให้การแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเพื่อเปลี่ยนรูประหว่าง Fe^{2+} และ Fe^{3+} เป็นไปได้ง่าย

Yehia et al. (2016) มีการใช้กระบวนการเฟนตันร่วมกับสารคีเลต และไอออนของโคบอลต์ (CO) เพื่อบำบัด p-nitrophenol โดยการนำสารละลายเหล็กมาทำปฏิกิริยากับสารคีเลต ได้แก่ Aspartate และ Glutamate เกิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-Aspartate และ Fe-Glutamate ซึ่งสามารถกำจัด p-nitrophenol ให้หมดไปได้ที่สภาวะพีเอชเป็นกลาง ซึ่งเป็นช่วงที่เฟนตันปกติทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ โดยใช้เวลาเพียง 5-10 นาทีเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีการทดลองเปลี่ยนสารละลายเหล็ก เป็นโลหะหนักชนิดอื่น ได้แก่ ทองแดง (Cu) และโคบอลต์ (Co) มาใช้ในกระบวนการคล้ายเฟนตัน แต่ประสิทธิภาพที่ได้กลับน้อยมาก สามารถกำจัด p-nitrophenol ที่ภาวะเดียวกัน ได้เพียงร้อยละ 10-25 เท่านั้น

Santos-Juanes et al. (2017) ประยุกต์ใช้เหล็กประจุศูนย์จากฝอยขัดหม้อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตเฟนตัน โดยพบว่าเมื่อใช้เหล็กประจุศูนย์ในกระบวนการเฟนตัน Fe^0 จะ

แตกตัวเป็น Fe^{2+} เมื่ออยู่ในสภาวะกรด หรือได้รับ H^+ จาก H_2O_2 ดังสมการที่ (2.21) หลังจากนั้น Fe^{2+} ก็จะเกิดปฏิกิริยาตามกระบวนการเฟนตันปกติต่อไป



จากการทดลองใช้กระบวนการโฟโตเฟนตันบำบัดสารละลายผสม ที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ย่อยสลายยาก 5 ประเภท ได้แก่ benzoic acid, caffeine, p-toluensulfonic acid, 4-nitrobenzoic acid และ acetaminophen พบว่าสามารถกำจัดสารทั้ง 5 ชนิดได้ตั้งแต่ร้อยละ 30-80 โดยประมาณ ใน 90 นาที ที่พีเอช 3.5 นอกจากนี้จากการทดลองดังกล่าวยังพบว่านอกจากการออกซิไดซ์ด้วยเฟนตันตามปกติแล้ว เหล็กประจุศูนย์ยังมีความสามารถในการรีดิวซ์สารอินทรีย์ย่อยสลายยากบางชนิดให้กลายเป็นสารที่ย่อยสลายง่ายได้ เช่น การรีดิวซ์ 4-nitrobenzoic acid เป็น aminobenzoic acid โดยการใช้เหล็กประจุศูนย์เพียงอย่างเดียวสามารถรีดิวซ์ 4-nitrobenzoic acid เป็น aminobenzoic acid ได้ทั้งหมดในเวลา 120 นาที ที่พีเอชเริ่มต้น 5.5 หลังจากนั้น aminobenzoic acid จะถูกกำจัดด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันร้อยละ 80 ในเวลา 60 นาที

Xia et al. (2017) ทำการสังเคราะห์เหล็กประจุศูนย์แบบพิเศษ โดยเหล็กประจุศูนย์จะถูกสังเคราะห์ขึ้นมาด้วยการผสมสารละลายเฟอร์ริซัลเฟตและเอทานอล และถูกนำไปผ่านกระแสไฟฟ้าให้เกิดการตกตะกอนเป็นเหล็กประจุศูนย์ ถูกเรียกว่า Dendritic Zero Valent Iron ซึ่งเป็นเหล็กที่มีความเล็กระดับนาโน เมื่อนำไปทดลองใช้ในกระบวนการคล้ำยเฟนตันเพื่อบำบัดฟีนอลสังเคราะห์ พบว่าให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงถึงกว่าร้อยละ 90 ในเวลา 30 นาที ที่พีเอช 4 โดยตัวเหล็กมีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ต่อเนื่องได้ 3 ครั้ง โดยที่ประสิทธิภาพลดลงเหลือประมาณร้อยละ 70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Tian et al. (2017) ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัด Ofloxacin ด้วยกระบวนการคล้ำยเฟนตันโดยใช้ Carbon Quantum Dots (CQDs) ร่วมกับ Cu-modification Mesoporous Iron Oxide (Cu-MIO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีเป้าหมายเพื่อให้สามารถใช้กระบวนการเฟนตันสามารถในการบำบัดสารย่อยสลายยากที่ช่วงพีเอชกว้างขึ้น ผลปรากฏว่ากระบวนการคล้ำยเฟนตัน CQDs ร่วมกับ Cu-MIO สามารถบำบัด Ofloxacin ได้ประสิทธิภาพร้อยละ 91-100 ตั้งแต่ช่วง พีเอช 3.6-10

Liu et al. (2017) ศึกษาผลของแคทไอออนประจุ 2 ได้แก่ ไอออนของทองแดง (Cu^{2+}) และ แมกนีเซียม (Mg^{2+}) ต่อประสิทธิภาพในการบำบัด Amoxicillin ด้วยกระบวนการเฟนตันที่ใช้เหล็กประจุศูนย์แบบนาโนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าไอออนของทองแดงที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์มีส่วนช่วยให้ประสิทธิภาพในการกำจัด Amoxicillin เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 90 ใน 50 นาที ส่วนไอออน

ของแมกนีเซียมที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ กลับทำให้ประสิทธิภาพลดลงเหลือเพียงร้อยละ 55 ใน 50 นาที

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวไป มีงานวิจัยอยู่จำนวนหนึ่งที่ชี้ให้เห็นว่า เหล็กประจุศูนย์ (Fe^0) อย่าง เหล็กซ็อบลาสท์สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทนไอออนจากสารละลายเกลือเหล็ก (Fe^{2+}) ได้นอกจากยังพบว่าวัสดุบางอย่างที่มีซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) เป็นองค์ประกอบ สามารถใช้เป็นตัวสนับสนุนปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเฟนตันได้

เช่น งานวิจัยของ Punzi et al. (2012) ที่มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง Fe^0 และ Fe^{2+} ในการบำบัดสีย้อม ผลปรากฏว่าเฟนตันที่ใช้ Fe^0 สามารถบำบัดสีย้อมได้เช่นเดียวกับเฟนตันที่ใช้ Fe^{2+} โดยมีประสิทธิภาพที่สามารถย่อยรับได้ นอกจากนี้ยังชี้ว่าการใช้ Fe^0 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทนเหล็กในรูปสารละลายมีข้อดี อีก 2 ประการ คือ ช่วยลดปริมาณไอออนของเหล็กที่ปนเปื้อนออกมากับน้ำหลังการบำบัด โดยปริมาณไอออนของเหล็กที่ปนเปื้อนมีน้อยกว่าการใช้เฟนตันปกติถึงร้อยละ 50 และเหล็กประจุศูนย์ที่เดิมอยู่ในรูปของแข็ง หลังจากใช้ในการบำบัดแล้วจะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง ต่างจาก Fe^{2+} ที่เป็นสารละลายใช้แล้วหมดไป จากผลการวิจัยพบว่าเหล็กประจุศูนย์สามารถนำกลับมาใช้ในการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการเฟนตันได้ใหม่ต่อเนื่องถึง 20 ชุดการทดลองโดยที่ประสิทธิภาพไม่ลดลงมากนัก ซึ่งได้ผลแบบเดียวกับงานวิจัยของ Devi et al. (2016) ที่ได้ทำการนำเหล็กประจุศูนย์กลับมาใช้ใหม่ โดยที่ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่ลดลงไปมากนักใน 6 ชุดการทดลอง

สำหรับในส่วนของการเพิ่มตัวสนับสนุนปฏิกิริยา งานวิจัยของ Zhuang et al. (2016) ที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้เฟนตันร่วมกับเถ้าลอยและตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแก๊ส ชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มเถ้าลอยและตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเข้าไปในกระบวนการเฟนตันช่วยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้น และมีการศึกษาต่อพบว่าที่ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นนั้นมาจากซิลิกาและอะลูมิเนียมซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่อยู่ในเถ้าลอย โดยมีงานวิจัยที่ใกล้เคียงกันคือ งานวิจัยของ Tu et al. (2012) ที่ได้ศึกษาการใช้ซิลิกาและอะลูมิเนียมเป็นตัวสนับสนุนปฏิกิริยาในการบำบัดสีย้อม AOII ด้วยกระบวนการเฟนตัน ซึ่งก็ได้ผลไปในทางเดียวกัน คือกระบวนการเฟนตันที่มีซิลิกาและอะลูมิเนียมเป็นตัวสนับสนุนปฏิกิริยามีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ทั้งนี้มีเหตุผลมาจากซิลิกานั้น จะอยู่ในรูปของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งมีสาย Siloxane bridges ($-Si-O-Si-$) ซึ่งช่วยในการยึดจับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้ออกาสในการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างไอออนของเหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีมากขึ้น ส่วนอะลูมิเนียม ในรูปของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) จะไปช่วยในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับ Fe^{3+} ทำให้ Fe^{3+} ถูกรีดิวซ์เป็น Fe^{2+} ได้

มากขึ้น ซึ่งทั้ง 2 กรณีนี้ส่งผลให้เกิดไฮดรอกซิลอิสระเป็นไปได้ง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น จากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้กล่าวมา จึงเป็นที่มาของกระบวนการเฟนตันประยุกต์ในงานวิจัยนี้ ที่นำของเสียอุตสาหกรรมอย่างเหล็กซัลเฟตบลาสท์ และตะกอนอะลูมิเนียม มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเฟนตัน



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย

ทำการศึกษากาฐะที่เหมะสม และการเปรียบเทียบประสิทธิภัพในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็น ใช้แล้วของกระบวนการเพนตันและเพนตันประกะยุคต์ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกาฐะที่เหมะสมที่ทำการศึกษา ได้แก่ เวลา สภาพความเป็นกรด-ต่า (pH) ปริมาณเหล็กซ้อตบลาสท์ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ ปริมาณตะกัรันอะลูมิเนียมที่เหมะสม และเปรียบเทียบประสิทธิภัพการบำบัดในรูปของค่าซีไอดี ทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ซ้า

3.2 กรอบงานวิจัย

งานวิจัยในครั้งนี ประกะอบไปด้วย 6 ส่วนหลัก ได้แก่

ส่วนที่ 1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกะอบทางเคมีของของเสียอุตสาหกรรม ที่นำมาใช้การทดลอง

ส่วนที่ 2 การศึกษากาฐะที่เหมะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการ เพนตันประกะยุคต์

- ศึกษาเวลาในการบำบัดที่เหมะสม
- ศึกษาพีเอชที่เหมะสม
- ศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมะสม
- ศึกษาปริมาณผงเหล็กซ้อตบลาสท์ที่เหมะสม
- ศึกษาปริมาณตะกัรันอะลูมิเนียมที่เหมะสม

ส่วนที่ 3 การศึกษาการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเพนตันสำหรับ พารามิเตอร์อื่น ๆ นอกเหนือจากซีไอดี ได้แก่

- บีไอดี
- ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)
- ปริมาณของแข็งละลายทั้งหมด (TDS)
- ค่าความเป็นกรด-ต่า (pH)
- ปริมาณไอออนคงเหลือหลังการบำบัด ได้แก่ เหล็ก (Fe) และอะลูมิเนียม (Al)

ส่วนที่ 4 ศึกษาการนำตะกอนจากการบำบัดกลับมาใช้ซ้ำ

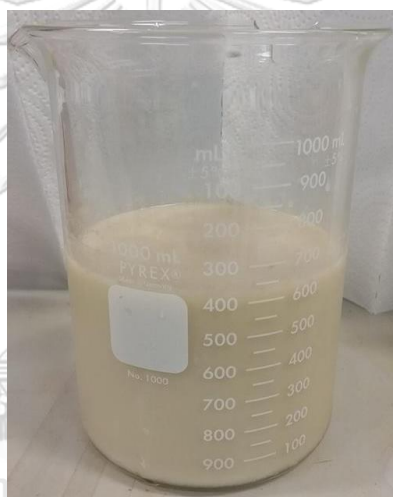
ส่วนที่ 5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการ
เฟนตันประยุกต์และเฟนตันปกติ

ส่วนที่ 6 การประเมินค่าใช้จ่ายในการบำบัด

3.3 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี

3.3.1 วัสดุ

1) น้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในนิคมอุตสาหกรรมแห่งหนึ่ง
ในประเทศไทย นำมาใช้เป็นตัวอย่งน้ำเสียในการทดลอง น้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วที่ใช้ในการทดลอง ดัง
รูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 น้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วที่ใช้ในการทดลอง

2) ผงเหล็กช็อบลาสท์จากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งเดียวกัน โดยผ่านการร่อน
คัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐานขนาด 35 และ 70 เมช ก่อนนำมาใช้ในการศึกษา ผงเหล็ก
ช็อบลาสท์หลังผ่านการเตรียมเพื่อใช้ในการทดลอง ดังรูปที่ 3.2

3) ตะกรันอะลูมิเนียมจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งเดียวกัน โดยผ่านการบด
เป็นผงด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (ball mill) และร่อนคัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐานขนาด 35 และ
70 เมช ก่อนนำมาใช้ในการศึกษา ตะกรันอะลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลอง ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ผงเหล็กช็อคตบลาสท์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.3 ตะกรันอะลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลอง

ก่อนทำการบดและร่อนคัดขนาด (ก.) หลังทำการบดและร่อนคัดขนาด (ข.)

3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 2) เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3) ตะแกรงมาตรฐานขนาด 35 และ 70 เมช
(เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 และ 0.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ)
- 4) เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- 5) เครื่องเขย่า (shaker)
- 6) ตู้อบแบบควบคุมอุณหภูมิ
- 7) ตู้บเพาะเชื้อ (incubator)

บริษัท/ยี่ห้อ: รูน

Mettler Toledo: MS2045

Mettler Toledo: MS1602

Endecott

Denver: UB-10

Gerhardt: RO500

Binder: FD115

Binder: KBW

บริษัท/ยี่ห้อ: รุ่น

- | | |
|---|------------------------|
| 7) เครื่องย่อยตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ซีโอดี (COD digester) | Hach: DRB200 |
| 8) เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) | JEOL: JSM-6610 LV |
| 9) เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) | Bruker AXS: S4 Pioneer |
| 10) เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) | Bruker AXS: D8 Advance |
| 11) เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer | UNICO: 1200 |
| 12) เครื่อง Inductively Coupled Plasma (ICP) | PerkinElmer: Avio™ 200 |
| 13) กระดาษกรอง | Whatman No. 42 |
| 14) กระดาษกรอง Glass-fiber filter | Whatman GF/C |
| 15) หลอดซีโอดี ขนาด 16x100 มม. (COD digestion vessels) | |
| 16) ถ้วยระเหย | |

3.3.3 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นสารเคมีสำหรับงานวิเคราะห์ (Analytical reagent:AR. grade) ทั้งหมด

- 1) สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% (H_2O_2)
- 2) กรดซัลฟูริกเข้มข้น 98% (H_2SO_4)
- 3) กรดไฮโดรคลอริก 37% (HCl)
- 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ 99% (NaOH)
- 4) เฟอรัสซัลเฟต >95% ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)
- 5) แอมโมเนียมเฟอรัสซัลเฟต >95% ($(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$: FAS)
- 6) โพแทสเซียมไดโครเมต 99% ($K_2Cr_2O_7$)
- 7) เมอคิวริกซัลเฟต 99% ($HgSO_4$)
- 8) ซิลเวอร์ซัลเฟต 99% (Ag_2SO_4)
- 9) 1,10 ฟีนานโทโรลีนโมโนไฮเดรต 99% ($C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$)

3.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

3.4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของของเสียอุตสาหกรรมที่นำมาใช้การทดลอง

ศึกษาลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบของผงเหล็กช็อตบลาสท์ และตะกอนอะลูมิเนียม ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM), X-Ray Fluorescence

Spectrometry (XRF) และ X-Ray Diffractometer (XRD) โดยทำการศึกษาทั้งก่อนและหลังการใช้งาน รวมทั้งศึกษาลักษณะของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ซีไอดี บีไอดี ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณของแข็งละลายทั้งหมด ปริมาณเหล็ก และปริมาณอะลูมิเนียม

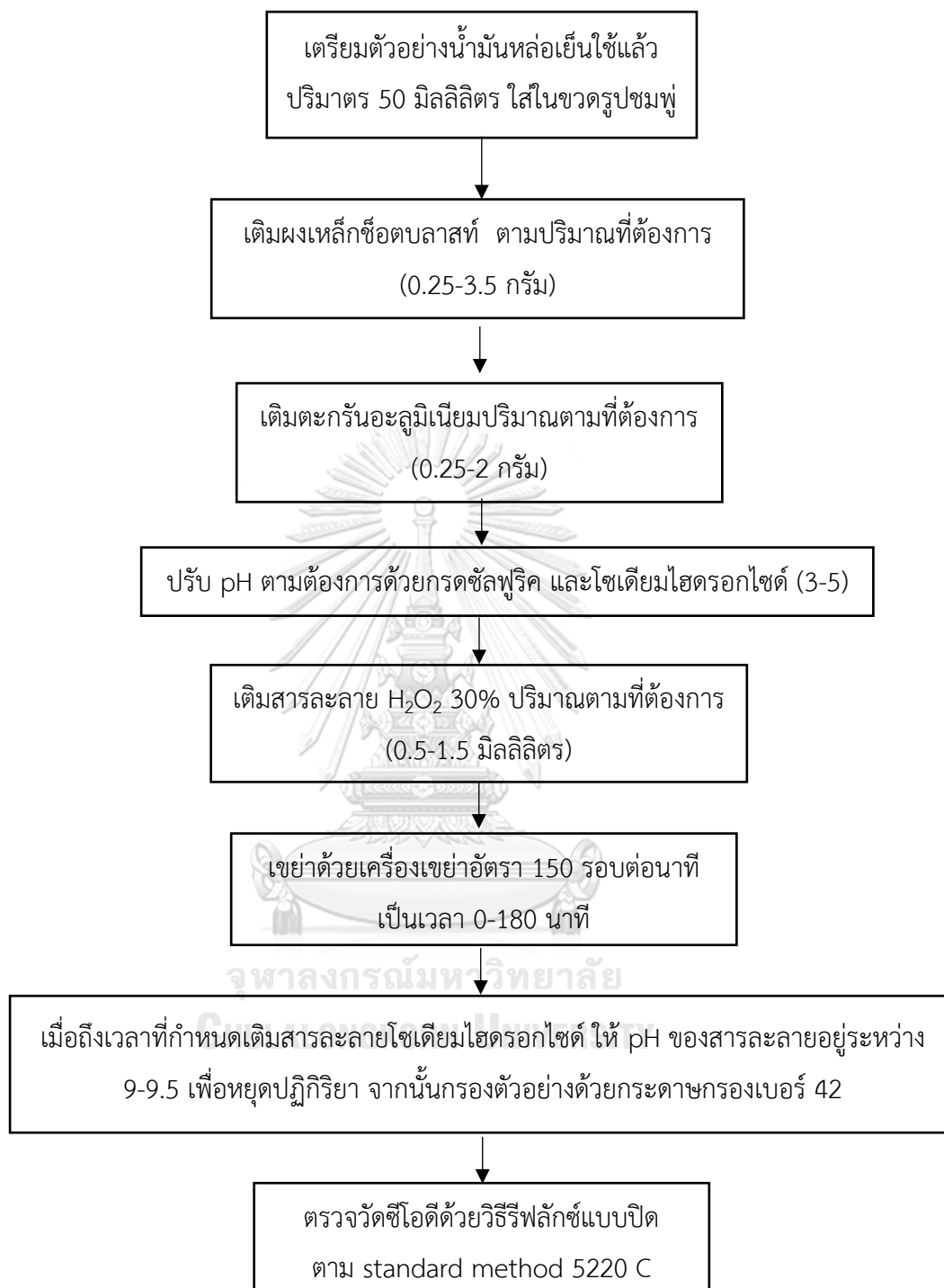
3.4.2 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์

ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟนตันประยุกต์ โดยใช้ผงเหล็กช็อคตบลาสท์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทนสารละลายเกลือเหล็ก และใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ รวมทั้งเพิ่มตะกัณอะลูมิเนียมที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ เพื่อเป็นตัวช่วยสนับสนุนปฏิกิริยา โดยภาวะที่เหมาะสมที่จะทำการศึกษา ได้แก่ เวลาในการบำบัด พีเอชเริ่มต้น ปริมาณผงเหล็กช็อคตบลาสท์ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และปริมาณตะกัณอะลูมิเนียมที่เหมาะสม ตรวจวัดประสิทธิภาพของการบำบัดในรูปของซีไอดี ตาม Standard methods 5220 C (APHA., AWWA. and WEF., 2012) เลือกภาวะที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากปริมาณซีไอดีที่กำจัดได้ และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการบำบัด

สำหรับการศึกษาเวลาในการบำบัด พีเอช ปริมาณผงเหล็กช็อคตบลาสท์ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม จะยังไม่มีผลการเติมตัวสนับสนุนปฏิกิริยา มีขั้นตอนในการศึกษาดังรูปที่ 3.4

3.4.2.1 ศึกษาเวลาในการบำบัดที่เหมาะสม

ศึกษาตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.1 เพื่อหาเวลาในการบำบัดที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาขั้นถัดไป โดยทำการบำบัดที่เวลา 0-180 นาที เก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที ควบคุมปริมาณผงเหล็กช็อคตบลาสท์คงที่ ที่ 1 กรัม ปรับพีเอชก่อนการบำบัดเป็น 3 และ 5 และปรับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.5 และ 1.5 มิลลิลิตรต่อน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว 50 มิลลิลิตร โดยใช้ปริมาณสารและภาวะต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.4 ผังขั้นตอนการศึกษาเวลาในการบำบัด พีเอช ปริมาณผงเหล็กซัลเฟต และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ในการศึกษาเวลาในการบำบัดที่เหมาะสม

pH	ผงเหล็กช็อคตบลาสท์ (g/50 ml)	H ₂ O ₂ (ml/50 ml)	เวลา (นาที)	ตะกอนอะลูมิเนียม (g/50 ml)
3	1	0.5	5	0
5			10	
			15	
			20	
			25	
			30	
			60	
			90	
			120	
			180	

3.4.2.2 ศึกษาพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม

ศึกษาตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.4 โดยใช้เวลาที่เหมาะสมในการบำบัดที่ได้จากหัวข้อ 3.4.2.1 และทำการปรับพีเอชเริ่มต้นก่อนการบำบัดเป็น 3, 4 และ 5 ควบคุมปริมาณผงเหล็กช็อคตบลาสท์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงที่ที่ 1 กรัม และ 1 มิลลิลิตรต่อน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว 50 มิลลิลิตรตามลำดับ เพื่อหาพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาขั้นถัดไป ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ในการศึกษาพีเอชที่เหมาะสม

pH	ผงเหล็กช็อคตบลาสท์ (g/50 ml)	H ₂ O ₂ (ml/50 ml)	เวลา (นาที)	ตะกอนอะลูมิเนียม (g/50 ml)
3	1	1	จากหัวข้อ	0
4			3.4.2.1	
5				

3.4.2.3 ศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

ศึกษาตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.4 โดยใช้เวลาที่เหมาะสมในการบำบัดที่ได้จากหัวข้อ 3.4.2.1 และพีเอชที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.2.2 ทำการปรับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตั้งแต่ 0.5, 0.75, 1, 1.25 และ 1.5 มิลลิลิตร และควบคุมปริมาณผงเหล็กช็อคตบลาสท์คงที่ที่ 1 กรัม ต่อน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว 50 มิลลิลิตร เพื่อหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาขั้นถัดไป ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ในการศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

pH	ผงเหล็กช็อคตบลาสท์ (g/50 ml)	H ₂ O ₂ (ml/50 ml)	เวลา (นาที)	ตะกรันอะลูมิเนียม (g/50 ml)
จาก หัวข้อ 3.4.2.2	1	0.5 0.75 1 1.25 1.5	จากหัวข้อ 3.4.2.1	0

นอกจากนี้ จะทำการทดลองชุดควบคุมโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว เพื่อศึกษาผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัด ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ในการทดลองชุดควบคุมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

pH	ผงเหล็กช็อคตบลาสท์ (g/50 ml)	H ₂ O ₂ (ml/50 ml)	เวลา (นาที)	ตะกรันอะลูมิเนียม (g/50 ml)
จาก หัวข้อ 3.4.2.2	0	0.5 0.75 1 1.25 1.5	จากหัวข้อ 3.4.2.1	0

3.4.2.4 ศึกษาปริมาณผงเหล็กช็อคตบลาสท์ที่เหมาะสม

ศึกษาตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.4 โดยใช้เวลาที่เหมาะสมในการบำบัดที่ได้จากหัวข้อ 3.4.2.1 พีเอชที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.2.2 และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.2.3 ทำการปรับความเข้มข้นของผงเหล็กช็อคตบลาสท์ตั้งแต่ 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 และ 3.5 กรัมต่อน้ำมันหล่อเย็น 50 มิลลิลิตร เพื่อหาปริมาณผงเหล็กช็อคตบลาสท์ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาขั้นถัดไป ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ในการศึกษาปริมาณผงเหล็กช็อคตบลาสท์ที่เหมาะสม

pH	ผงเหล็กช็อคตบลาสท์ (g/50 ml)	H ₂ O ₂ (ml/50 ml)	เวลา (นาที)	ตะกอนอะลูมิเนียม (g/50 ml)
จากหัวข้อ 3.4.2.2	0.25	จากหัวข้อ 3.4.2.3	จากหัวข้อ 3.4.2.1	0
	0.5			
	1			
	1.5			
	2			
	2.5			
	3			
	3.5			

นอกจากนี้ จะทำการทดลองชุดควบคุม โดยใช้ผงเหล็กช็อคตบลาสท์เพียงอย่างเดียว เพื่อศึกษาผลของผงเหล็กช็อคตบลาสท์ต่อประสิทธิภาพการบำบัด ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.6

3.4.2.5 ศึกษาปริมาณตะกอนอะลูมิเนียมที่เหมาะสม

หลังจากทราบภาวะที่เหมาะสมของเวลาในการบำบัด พีเอชเริ่มต้น ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และปริมาณผงเหล็กช็อคตบลาสท์ที่เหมาะสมแล้ว จะทำการศึกษาปริมาณของตัวสนับสนุนปฏิกิริยาเฟนตันที่เหมาะสม ได้แก่ ตะกอนอะลูมิเนียม โดยศึกษาตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.4 และใช้ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาหัวข้อ 3.4.2.1 – 3.4.2.4 ทำการปรับความเข้มข้นของตะกอนอะลูมิเนียม ตั้งแต่ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 กรัมต่อน้ำมันหล่อเย็น 50 มิลลิลิตร เพื่อหาปริมาณตะกอนอะลูมิเนียมที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาขั้นถัดไป ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.6 ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ในการทดลองชุดควบคุมของผงเหล็กช็อคตบลาสท์

pH	ผงเหล็กช็อคตบลาสท์ (g/l)	H ₂ O ₂ (mL/l)	เวลา (นาที)	อะลูมิเนียม (g/l)
จาก หัวข้อ 3.4.2.2	0.25 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5	0	จากหัวข้อ 3.4.2.1	0

ตารางที่ 3.7 ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ในการศึกษาปริมาณตะกอนอะลูมิเนียมที่เหมาะสม

pH	ผงเหล็กช็อคตบลาสท์ (g/l)	H ₂ O ₂ (mL/l)	เวลา (นาที)	อะลูมิเนียม (g/l)
จาก หัวข้อ 3.4.2.2	จากหัวข้อ 3.4.2.4	จากหัวข้อ 3.4.2.3	จากหัวข้อ 3.4.2.1	5 10 20 30 40

พร้อมทำการทดลองชุดควบคุม 3 ชุด โดยใช้ตะกอนอะลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว ไม่มีการเติมผงเหล็กช็อคตบลาสท์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตะกอนอะลูมิเนียมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไม่มีการเติมผงเหล็กช็อคตบลาสท์ และตะกอนอะลูมิเนียมกับผงเหล็กช็อคตบลาสท์ ไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อศึกษาผลของตะกอนอะลูมิเนียมต่อประสิทธิภาพการบำบัด ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ปริมาณสารที่ใช้และภาวะต่าง ๆ ในการทดลองชุดควบคุมของตะกัณอะลูมิเนียม

pH	ซีตบลาสท์ (g/l)	H ₂ O ₂ (mL/l)	เวลา (นาที)	อะลูมิเนียม (g/l)
การทดลองชุดควบคุม ชุดที่ 1 (ตะกัณอะลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว)				
จาก หัวข้อ 3.4.2.2	0	0	จากหัวข้อ 3.4.2.1	5 10 20 30 40
การทดลองชุดควบคุม ชุดที่ 2 (ตะกัณอะลูมิเนียม + ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์)				
จาก หัวข้อ 3.4.2.2	0	จากหัวข้อ 3.4.2.3	จากหัวข้อ 3.4.2.1	5 10 20 30 40
การทดลองชุดควบคุม ชุดที่ 2 (ตะกัณอะลูมิเนียม + ผงเหล็กซีตบลาสท์)				
จาก หัวข้อ 3.4.2.2	จากหัวข้อ 3.4.2.4	0	จากหัวข้อ 3.4.2.4	5 10 20 30 40

3.4.3 การศึกษาพารามิเตอร์อื่น ๆ ในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเพนตันประยุกต์

3.4.3.1 ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีความจำเป็นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีความจำเป็นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม นอกเหนือจากค่าซีไอดี ได้แก่ พีเอช บีไอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอย และปริมาณของแข็งละลาย ในน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเพนตันประยุกต์ โดยใช้ภาวะที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.2 ทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ทุกอย่างหลังการปรับพีเอชเพื่อหยุดปฏิกิริยา ตามวิธีการตรวจวัดใน Standard

methods ยกเว้นพารามิเตอร์พีเอชที่จะทำการตรวจวัดหลังหยุดการเขย่าเมื่อถึงเวลาที่กำหนด โดยใช้ pH meter

3.4.3.2 ศึกษาปริมาณไอออนคองเกลือหลังการบำบัด

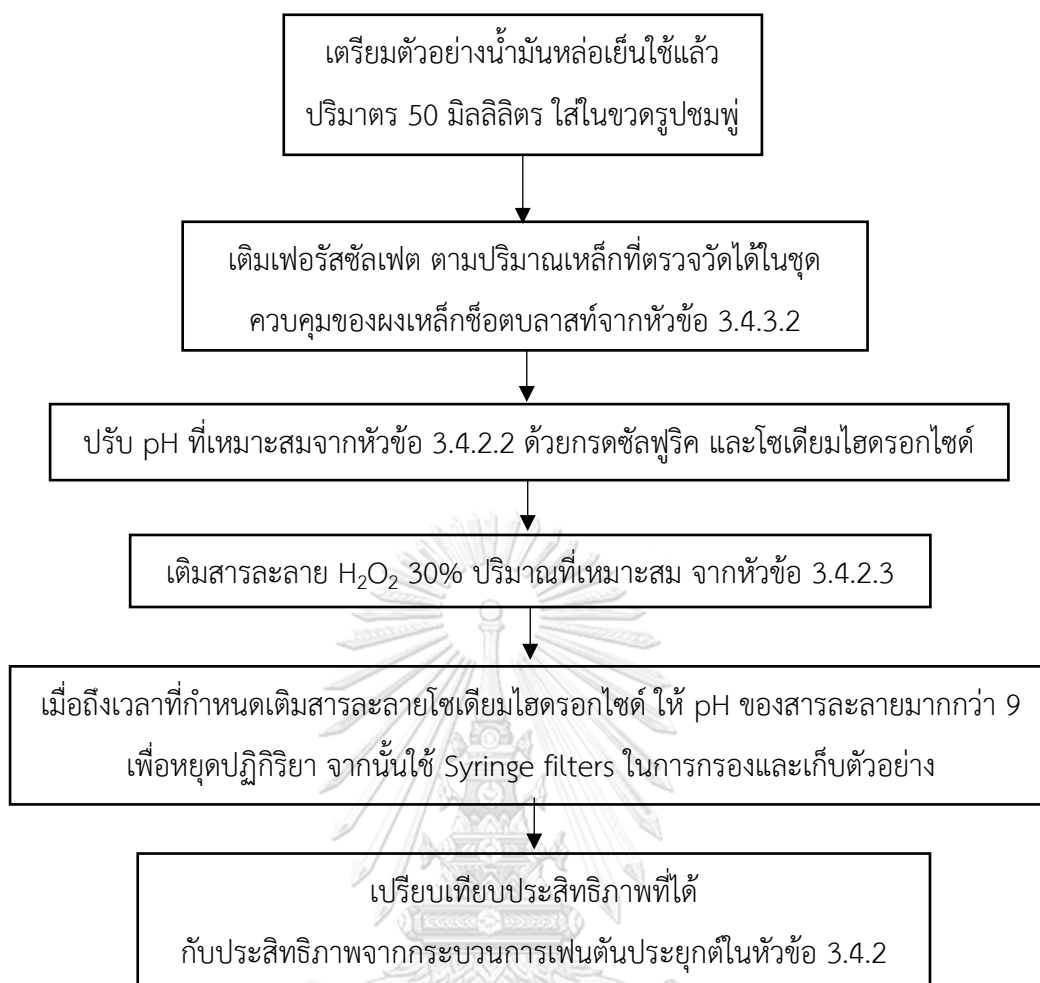
ศึกษาปริมาณไอออนคองเกลือ ได้แก่ เหล็กและอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นไอออนที่เกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยาตัวสนับสนุนปฏิกิริยาหลังการบำบัด ด้วยวิธี Phenanthroline ตาม Standard methods 3500-Fe B และวิธี Eriochrome Cyanine R ตาม Standard methods 3500-Al B ตามลำดับ (APHA. et al., 2012) โดยทำการตรวจวัดในชุดตัวอย่างจากการบำบัดในภาวะที่เหมาะสม และชุดควบคุมของผงเหล็กช็อคตบลาสท์ และตะกอนอะลูมิเนียมหลังหยุดการเขย่าเมื่อถึงเวลาที่กำหนด เพื่อศึกษาการชะละลายของไอออนที่อาจเกิดจากการบำบัด

3.4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันประยุกต์

ทำการศึกษการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันปกติ ที่ใช้เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ โดยใช้ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากับปริมาณไอออนของเหล็กที่ตรวจวัดได้จากชุดควบคุมของผงเหล็กช็อคตบลาสท์จากหัวข้อ 3.4.3.2 และใช้ภาวะที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.2 นำประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีที่ได้เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการบำบัดของกระบวนการเฟนตันประยุกต์ ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.5

3.4.5 ศึกษาการนำตะกอนจากการบำบัดกลับมาใช้ซ้ำ

นำตะกอนจากการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์ในภาวะที่เหมาะสมกลับมาใช้ซ้ำ โดยกรองส่วนสารละลายออก นำส่วนตะกอนมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส และนำกลับมาใช้ซ้ำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันประยุกต์โดยไม่มีการเตรียมหรือปรับสภาพเพิ่มเติม ทำการศึกษาโดยใช้ภาวะที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.2 และตรวจวัดประสิทธิภาพที่เปลี่ยนไปจากการใช้ซ้ำจากค่าซีไอดี



รูปที่ 3.5 ผังขั้นตอนการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนต์ันปกติ

3.4.6 การประเมินต้นทุนในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนต์ันประยุกต์และเฟนต์ันปกติ

ประเมินต้นทุนในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วของกระบวนการเฟนต์ันทั้ง 2 แบบ โดยทำการประเมินในด้านต้นทุนผันแปร (Variable Costs) มีรายละเอียดหัวข้อที่จะทำการประเมิน ดังนี้

- 1) สารเคมีที่ใช้
 - ตัวเร่งปฏิกิริยา
 - ตัวออกซิไดซ์
 - ตัวสนับสนุนปฏิกิริยา
 - สารปรับพีเอช
- 2) ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ
 - ค่าไฟฟ้า

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

การตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้ จะใช้วิธีการตรวจวัด ดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 วิธีการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการศึกษา

พารามิเตอร์	วิธีการตรวจวัด
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)	Standard methods 5220 C (APHA. et al., 2012) วิธีรีฟลักซ์ปิดแบบไทเทรชัน
บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand: BOD)	Standard methods 5210 B
ของแข็งละลาย (Total Dissolved Solids: TDS)	Standard methods 2540 C
แข็งแขวนลอย (Suspended Solids: SS)	Standard methods 2540 D
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	Standard methods 4500-H ⁺ B. วิธี Electrometric
ปริมาณเหล็กละลาย	Standard Methods 3120 B. Inductively Coupled Plasma (ICP) Method
ปริมาณอะลูมิเนียม	Standard Methods 3120 B. Inductively Coupled Plasma (ICP) Method

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ทำการทดลองเพื่อศึกษาการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์ที่นำผงเหล็กช็อคบลาสท์และตะกั่วอะลูมิเนียมซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมแห่งเดียวกัน มาประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวสนับสนุนปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันแทนการใช้สารเคมี โดยทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่าง ๆ ในการบำบัดพิจารณาจากประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว เพื่อให้ได้ภาวะที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด หลังจากนั้นจึงนำภาวะที่เหมาะสมที่ได้ ไปศึกษาในการนำตะกอนกลับมาใช้ซ้ำ การบำบัดพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่มีความจำเป็นต่อภาคอุตสาหกรรม และการเปรียบเทียบกับกระบวนการเฟนตันปกติต่อไป

4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของของเสียอุตสาหกรรมที่ใช้การทดลอง

4.1.1 ลักษณะของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วที่ใช้ในการทดลอง

น้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วที่นำมาเป็นน้ำเสียในการทดลองมาจากบ่อทิ้งน้ำเสียจากการตัดแต่งชิ้นส่วนยานยนต์หลังการหลอม ของโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในนิคมอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งในประเทศไทย ลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวสีขาวขุ่น และมีลักษณะสมบัติทางเคมีดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วที่นำมาใช้ในงานวิจัย

พารามิเตอร์	ค่าที่ได้	ค่ามาตรฐาน ¹
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	8.10 - 8.40	5.5-9.0
ซีโอดี (mg/l)	80,800 - 112,320	750
บีโอดี (mg/l)	8,700 - 21,600	500
ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	1.45 - 0.74	ไม่กำหนด
ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) (mg/l)	3,067 - 3,340	200
ปริมาณของแข็งละลายทั้งหมด (TDS) (mg/l)	20,530 - 20,960	3,000

¹ที่มา: ประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ที่ 76/2560 เรื่อง กำหนดมาตรฐานทั่วไปในการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรม

จากตารางที่ 4.1 น้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วที่ใช้ในการทดลองมีค่าพีเอชเริ่มต้นอยู่ที่ 8.1 – 8.4 ซึ่งมีสภาพค่อนข้างเป็นด่าง มีค่าซีไอสูงถึงกว่า 100,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่มีค่า BOD/COD ค่อนข้างต่ำ (≈ 0.17) บ่งบอกว่าน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradability) ต่ำ นอกจากนี้ยังมีการปนเปื้อนของโลหะ ได้แก่ เหล็ก อะลูมิเนียม และตะกั่ว ปริมาณ 19.12, 131 และ 8.855 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัด ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการใช้ระบบทางชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียประเภทนี้ โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ นอกจากพีเอช มีค่าสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของการนิคมอุตสาหกรรมทั้งสิ้น

4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางการภาพของผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกัณอะลูมิเนียม ก่อนและหลังใช้งาน ด้วย Scanning electron microscope

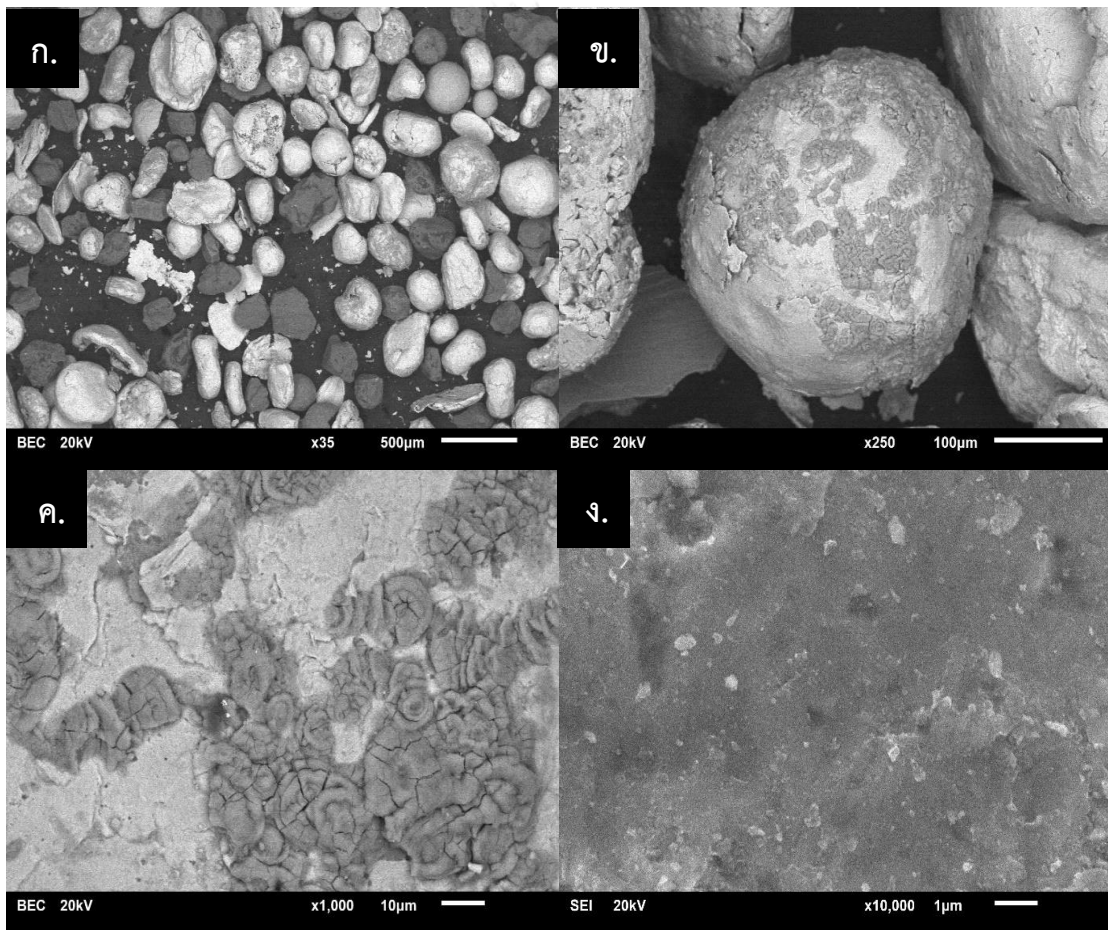
4.1.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางการภาพของผงเหล็กช็อตบลาสท์ก่อนใช้งานด้วย Scanning electron microscope

นำผงเหล็กช็อตบลาสท์จากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผ่านการร่อนคัดขนาดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.2 และ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยตะแกรงมาตรฐาน 35 และ 70 เมช มาศึกษาลักษณะทางการภาพด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) ได้ผลดังรูปที่ 4.1

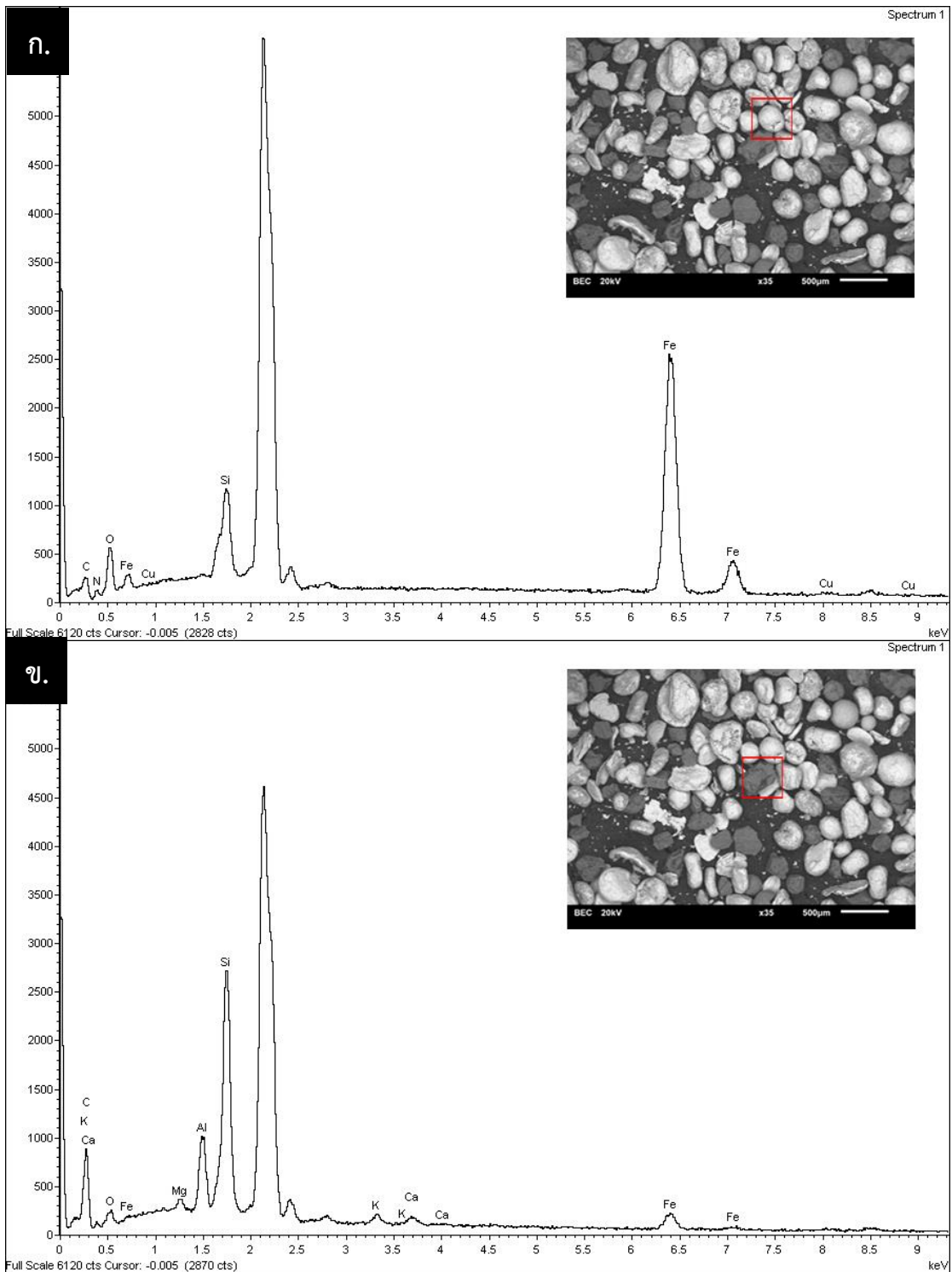
จากภาพถ่ายของเครื่อง SEM ดังรูปที่ 4.1 พบว่าผงเหล็กช็อตบลาสท์ที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีความบิดเบี้ยวผิดรูปร่างไป ซึ่งเกิดจากการใช้ฟันขัดผิวเพื่อตกแต่งชิ้นส่วนยานยนต์หลังผ่านการหลอม โดยจากรูปที่ 4.1 ก. เมื่อใช้ SEM โหมดตรวจจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Detector: BE) พบว่าในตัวอย่างมีทั้งอนุภาคที่มีสัญญาณภาพการกระเจิงดี (มีความสว่างสูง เห็นภาพเป็นสีเทา) และอนุภาคที่มีสัญญาณภาพการกระเจิงไม่ดี (ความสว่างต่ำ เห็นภาพเป็นสีดำ) โดยตามทฤษฎีแล้ว อนุภาคที่มีสัญญาณการกระเจิงกลับสูงจะเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมสูง เช่น ธาตุจำพวกโลหะหนัก หรือโลหะทรานซิชัน (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2559) จากการศึกษากระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ คาดว่าอนุภาคที่มีสัญญาณภาพการกระเจิงดี คือตัวผงเหล็กช็อตบลาสท์ ส่วนอนุภาคที่มีสัญญาณภาพการกระเจิงไม่ดี คือ เศษแบบพิมพ์ทรายใช้แล้วที่อาจปะปนมาหลังการหลอมชิ้นส่วน และถูกกำจัดออกจากชิ้นส่วนโดยการฟันขัดผิว จนหลุดปะปนออกมาที่ผงเหล็กช็อตบลาสท์ที่ใช้งานแล้วในที่สุด ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) ดังรูปที่ 4.2 ก. และ 4.2 ข. ที่พบว่าอนุภาคที่มีสัญญาณภาพการกระเจิงดี มีองค์ประกอบหลักเป็นเหล็ก (Fe) ในขณะที่อนุภาคที่มีสัญญาณภาพการกระเจิงไม่ดี มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา (Si) ซึ่งเป็นธาตุที่เป็นส่วนประกอบของทราย

สำหรับสภาพพื้นผิวของผงเหล็กช็อตบลาส จะสามารถมองเห็นได้เมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.1 ข. พบว่าบริเวณพื้นผิวมีอนุภาคที่มีสัญญาณภาพการกระเจิงไม่ดีเกาะอยู่บนผิวของอนุภาคที่มีสัญญาณภาพการกระเจิงดี ซึ่งคาดว่านอกจากมีเศษแบบพิมพ์ทรายใช้แล้วปะปนมากับผงเหล็กช็อตบลาสที่ในรูปอนุภาคขนาดใหญ่แล้ว ยังมีทรายจากแบบพิมพ์ทรายขนาดเหล็กไปเกาะติดอยู่บนผิวของผงเหล็กช็อตบลาสที่จนกลายเป็นอนุภาคเดียวกันอีกด้วย

เมื่อใช้กำลังขยาย 1,000 และ 10,000 เท่า ดังรูปที่ 4.1 ค. และ 4.1 ง. จะพบว่าลักษณะพื้นผิวของผงเหล็กช็อตบลาสที่มีความขรุขระเล็กน้อย บางบริเวณมีลักษณะคล้ายรอยแตก และบางบริเวณมีสภาพผิวค่อนข้างเรียบ



รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กช็อตบลาสที่ก่อนใช้งาน
ที่กำลังขยาย (ก.) 35 เท่า (ข.) 250 เท่า (ค.) 1,000 เท่า และ (ง.) 10,000 เท่า

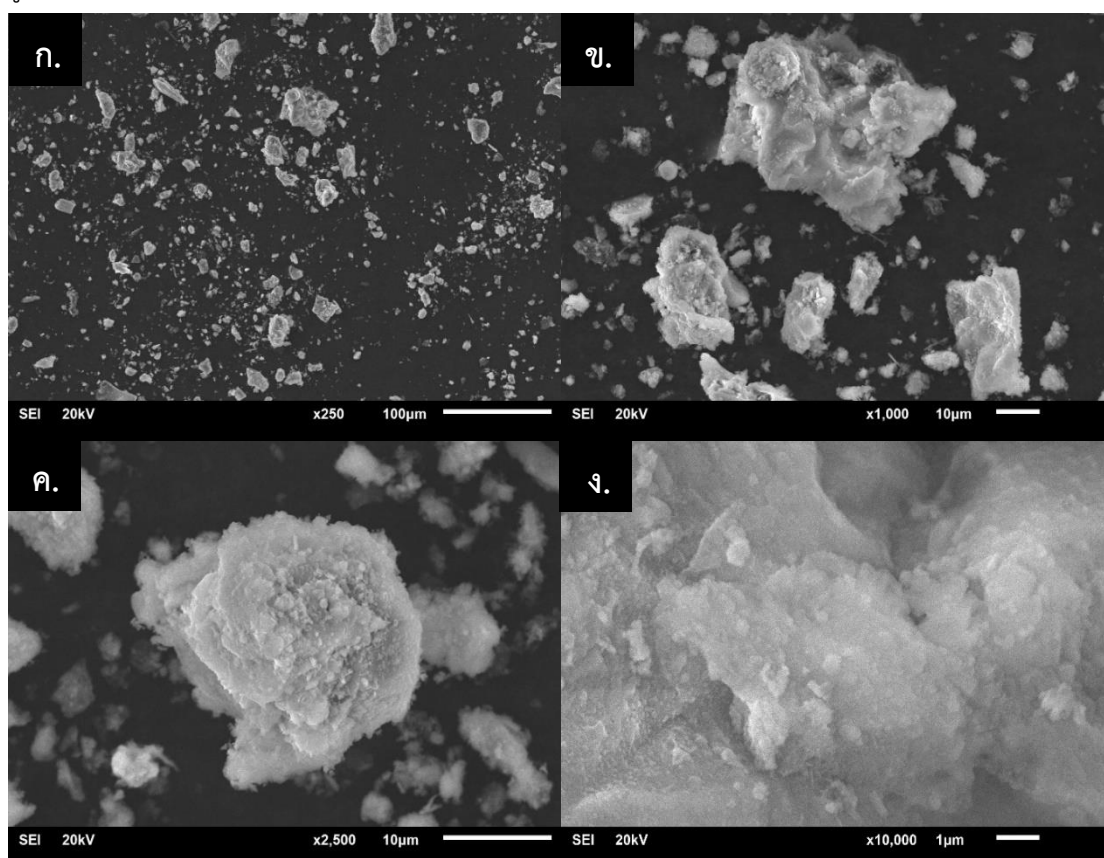


รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS

(ก.) บริเวณที่มีสัญญาณภาพการกระเจิงดี (ข.) บริเวณที่มีสัญญาณภาพการกระเจิงไม่ดี

4.1.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตะกรันอะลูมิเนียมก่อนใช้งานด้วย Scanning electron microscope

นำตะกรันอะลูมิเนียมจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผ่านการบดเป็นผงและร่อนคัดขนาดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.2 และ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยตะแกรงมาตรฐาน 35 และ 70 เมช มาศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วย Scanning electron microscope (SEM) ได้ผลดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของตะกรันอะลูมิเนียมก่อนใช้งาน

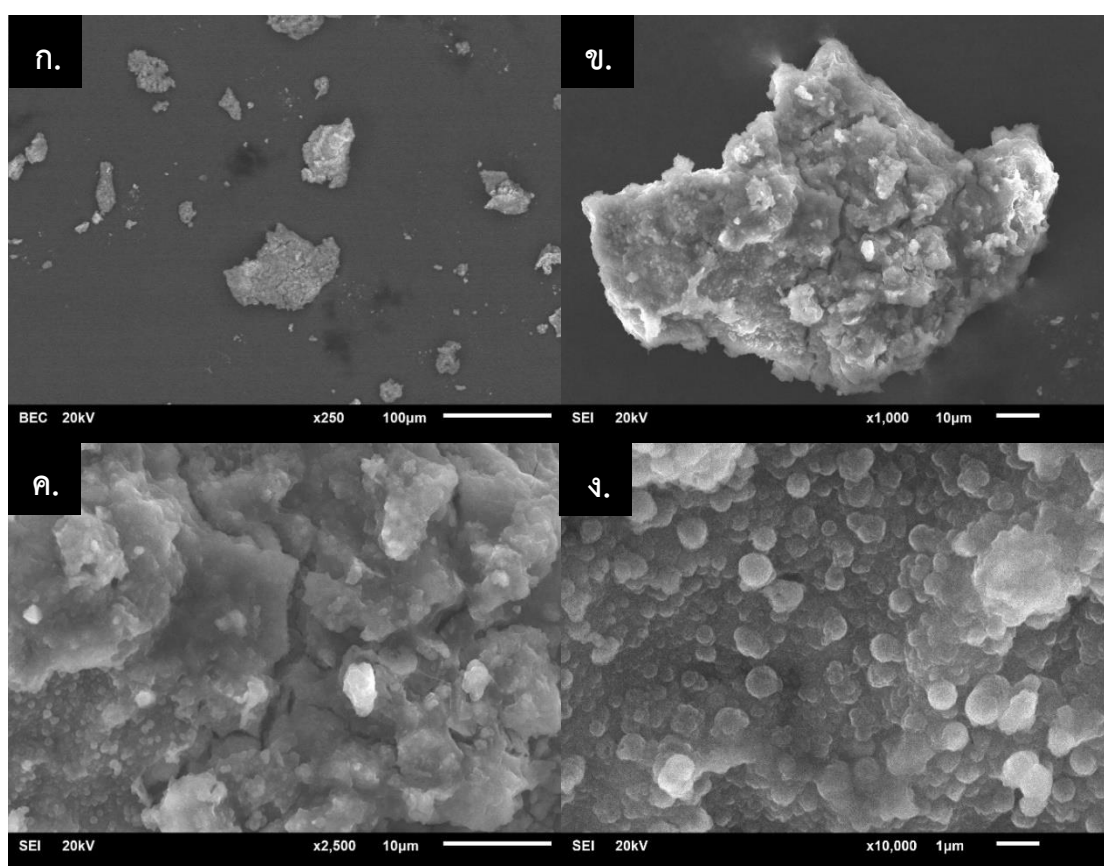
ที่กำลังขยาย (ก.) 250 เท่า (ข.) 1,000 (ค.) เท่า 2,500 เท่า และ (ง.) 10,000 เท่า

จากรูปที่ 4.3 ก. พบว่าลักษณะอนุภาคตะกรันอะลูมิเนียม มีขนาดเล็กและมีความละเอียดสูงกว่าผงเหล็กช็อดท์บลาสท์ และอนุภาคของตัวอย่างส่วนใหญ่มีสัญญาณภาพการกระเจิงใกล้เคียงกัน โดยมีความสว่างในการกระเจิงน้อยกว่าส่วนที่เป็นเหล็กในตัวอย่างผงเหล็กช็อดท์บลาสท์ และมากกว่าส่วนที่เป็นทราย สภาพพื้นผิวของตัวอย่างมีความขรุขระสูง และเมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้น พบว่าภาพมีความคมชัดน้อยลงและมีความไม่สม่ำเสมอของภาพ ซึ่งคาดว่าเกิดจากการรบกวนของออกไซด์ จึงอนุมานได้ว่าผิวของตะกรันอะลูมิเนียมมีออกไซด์เป็นองค์ประกอบ หรืออะลูมิเนียมในตะกรันอาจอยู่

ในรูปของอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลงานวิจัยของ Das et al. (2007) Sultana et al. (2013) และ Mahinroosta and Allahverdi (2018)

4.1.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตะกอนเฟนตันหลังใช้งานด้วย Scanning electron microscope

สำหรับตะกอนหลังใช้งานจะเลือกตัวอย่างจากภาวะการบำบัดที่เหมาะสมมาทำการศึกษา โดยตะกอนหลังใช้งานจะเป็นตะกอนผสมระหว่างผงเหล็กช็อดบลาสท์และตะกรันอะลูมิเนียม ลักษณะทางกายภาพจากภาพถ่าย SEM ดังรูปที่ 4.4

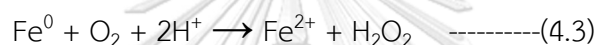
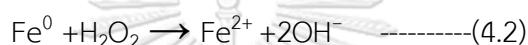
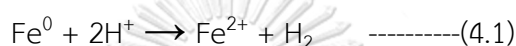


รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของตะกอนหลังใช้งาน

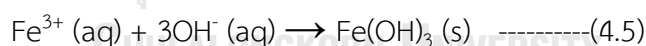
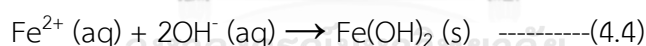
ที่กำลังขยาย (ก.) 250 เท่า (ข.) 1,000 (ค.) เท่า 2,500 เท่า และ (ง.) 10,000 เท่า

จากรูปที่ 4.4 ตะกอนเฟนตันหลังใช้งาน มีลักษณะมีลักษณะและรูปร่างที่ไม่แน่นอน คล้ายกับตะกรันอะลูมิเนียม โดยไม่พบตะกอนที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมแบบผงเหล็กช็อดบลาสท์อยู่เลย และเมื่อใช้กำลังการขยายสูงขึ้น พบว่าสภาพพื้นผิวของตะกอนหลังใช้งานมีลักษณะเป็นเกล็ด และมีความขรุขระมากขึ้นเมื่อเทียบผิวของผงเหล็กช็อดบลาสท์หรือตะกรันอะลูมิเนียม บ่งบอกถึงการถูกกัดกร่อน

ระหว่างการทำปฏิกิริยาจนทำให้พื้นผิวของตัวอย่างมีการหลุดร่อนออกไป นอกจากนี้พื้นผิวส่วนที่มีสัญญาณภาพการกระเจิงดีจากโหมดตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่เคยตรวจจับได้เป็นจำนวนมากในผงเหล็กช็อตบลาสท์ กลับมีปริมาณน้อยลงอย่างมาก โดยพื้นผิวเกือบทั้งหมดมีสัญญาณภาพการกระเจิงที่ไม่ดี บ่งบอกว่าองค์ประกอบที่เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมสูง เช่น เหล็ก มีปริมาณน้อยลง คาดว่าหลังการใช้งาน เหล็กประจุศูนย์จากผงเหล็กช็อตบลาสท์ มีการละลายออกสู่สารละลายในรูป Fe^{2+} หลังการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการเฟนตัน หรือละลายในสถานะกรดจากการปรับพีเอชก่อนการบำบัด ดังสมการ (4.1)–(4.3) ทำให้มีปริมาณเหล็กเหลืออยู่ในตะกอนหลังใช้งานน้อยลง



นอกจากนี้ยังพบว่าภาพถ่ายที่ได้มีความคมชัดน้อยและมีความไม่สม่ำเสมอของภาพ ซึ่งอาจเกิดจากการรบกวนของออกไซด์ ประกอบกับพื้นผิวของตะกอนมีความขรุขระมากขึ้นกว่าตอนก่อนใช้งาน คาดว่าเกิดสารประกอบจำพวกเหล็กออกไซด์ที่ตกตะกอนบริเวณพื้นผิวของตะกอนเฟนตันจากการปรับพีเอชเป็นต่างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์หลังสิ้นสุดปฏิกิริยา ดังสมการ (4.4) และ (4.5)



4.1.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกอนอะลูมิเนียมก่อนและหลังใช้งาน ด้วย X-Ray Fluorescence Spectrometry

นำผงเหล็กช็อตบลาสท์ และตะกอนอะลูมิเนียมที่ผ่านการร่อนคัดขนาดขนาดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.2 และ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยตะแกรงมาตรฐาน 35 และ 70 เมช และตะกอนเฟนตันที่เหลือหลังการใช้งานที่ภาวะที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วสูงที่สุด มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) ได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กซีตบลาสท์ ตะกรันอะลูมิเนียม และตะกอนหลังใช้งาน จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF

ธาตุ	ปริมาณ (% โดยน้ำหนัก)			ปริมาณต่อน้ำหนักที่ใช้จริง		
	ผงเหล็กซีตบลาสท์	ตะกรันอะลูมิเนียม	ตะกอนหลังใช้งาน	ผงเหล็กซีตบลาสท์ (ก./2.5ก.)	ตะกรันอะลูมิเนียม (ก./ก.)	ตะกอนหลังใช้งาน (ก./3.5ก.)
Fe ₂ O ₃	83.39	0.78	50.74	2.08	0.0078	1.78
SiO ₂	11.67	5.72	10.14	0.29	0.057	0.35
Al ₂ O ₃	3.00	41.15	33.43	0.075	0.41	1.17
MnO	0.69	0.16	0.51	0.017	0.0016	0.018
Cr ₂ O ₃	0.32	0.03	0.25	0.0080	0.0003	0.0088
CaO	0.25	1.48	0.47	0.0063	0.015	0.017
TiO ₂	0.22	0.09	0.21	0.0055	0.0009	0.0074
CuO	0.14	0.99	0.53	0.0035	0.0099	0.019
SO ₃	0.09	3.45	0.27	0.0023	0.035	0.0095
Cl	0.09	21.29	0.26	0.0023	0.21	0.0091
NiO	0.04	0.03	0.035	0.0010	0.0003	0.0012
P ₂ O ₅	0.03	-	0.035	0.0008	-	0.0012
MoO ₃	0.03	-	-	0.0008	-	-
K ₂ O	0.02	5.59	0.41	0.0005	0.056	0.014
ZnO	0.01	0.33	0.12	0.0003	0.0033	0.0042
Zr	0.01	-	-	0.0003	-	-
Na ₂ O	-	13.00	0.74	-	0.13	0.026
MgO	-	5.79	1.66	-	0.058	0.058
HfO ₂	-	0.03	-	-	0.0003	-
Br	-	0.02	-	-	0.0002	-
SrO	-	0.02	-	-	0.0002	-
V ₂ O ₅	-	0.02	-	-	0.0002	-

4.1.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กช็อตบลาสท์ก่อนใช้งานด้วย X-Ray Fluorescence Spectrometry

จากตารางที่ 4.2 พบว่าผงเหล็กช็อตบลาสท์ที่ใช้ในการทดลองมีองค์ประกอบหลักเป็นเหล็ก (Fe) สูงถึงร้อยละ 83.39 รองลงมาเป็นธาตุซิลิกา (Si) ร้อยละ 11.67 และอะลูมิเนียม (Al) ร้อยละ 3.00 เนื่องด้วยมีองค์ประกอบหลักเป็นเหล็กในปริมาณสูง อีกทั้งยังมีซิลิกาและอะลูมิเนียมซึ่งสามารถช่วยสนับสนุนกระบวนการเฟ้นต้นได้เป็นองค์ประกอบรอง จึงเป็นตัวบ่งชี้ได้ว่าผงเหล็กช็อตบลาสท์มีความเหมาะสมในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการเฟ้นต้น โดยคาดว่าจะสามารถทำหน้าที่แทนสารละลายเกลือเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับซิลิกาที่ตรวจพบในตัวอย่างผงเหล็กช็อตบลาสท์สัดส่วนร้อยละ 11.67 ซึ่งถือว่ามีปริมาณสูงเมื่อเทียบกับธาตุอื่น ๆ คาดว่ามาจากกรปนเปื้อนของเศษแบบพิมพ์ทรายใช้แล้ว จากการใช้ผงเหล็กช็อตบลาสท์พ่นขัดผิวชิ้นส่วนยานยนต์หลังผ่านการหลอม ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM ในหัวข้อ 4.1.2.1 ที่พบอนุภาคที่มีสัญญาณภาพการกระเจิงไม่ดีปะปนอยู่กับผงเหล็กช็อตบลาสท์ด้วย โดยคาดว่าอนุภาคมีสัญญาณภาพการกระเจิงไม่ดีเหล่านั้น คือ เศษแบบพิมพ์ทรายใช้แล้ว

4.1.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกักรันอะลูมิเนียมก่อนใช้งานด้วย X-Ray Fluorescence Spectrometry

จากตารางที่ 4.2 พบว่าตะกักรันอะลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลองมีองค์ประกอบหลักเป็นอะลูมิเนียม (Al) ร้อยละ 41.15 รองลงมาเป็นคลอไรด์ (Cl) ร้อยละ 21.29 และโซเดียม (Na) ร้อยละ 13.00 นอกจากนี้ยังพบธาตุซิลิกา แคลเซียม ซัลเฟอร์ โพแทสเซียม และแมกนีเซียมอีกเล็กน้อย (น้อยกว่าร้อยละ 10) ถือว่าตะกักรันอะลูมิเนียมมีองค์ประกอบของธาตุที่ค่อนข้างหลากหลาย เมื่อเทียบกับผงเหล็กช็อตบลาสท์ สำหรับธาตุคลอไรด์และโซเดียมที่ตรวจพบในปริมาณค่อนข้างสูง สัดส่วนรวมกันกว่า 1 ใน 3 ของทั้งหมด คาดว่ามาจากการเติมฟลักซ์หรือสารควบคุมผิวหน้า ซึ่งมีส่วนผสมของเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และเกลือโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ในกระบวนการผลิต เนื่องจากระหว่างการหลอม อะลูมิเนียมสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ได้ง่าย ทำให้มีการสูญเสียโลหะอะลูมิเนียมไปโดยเปล่าประโยชน์ อีกทั้งยังทำให้งานที่หล่อออกมามีคุณภาพลดลง จึงต้องมีการเติมฟลักซ์เพื่อป้องกันการเกิดสารประกอบออกไซด์ ส่งผลให้มีตะกักรันเกลือโซเดียมคลอไรด์ปะปนมากับตะกักรันอะลูมิเนียมเหลือทิ้ง

4.1.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนหลังใช้งานด้วย X-Ray Fluorescence Spectrometry

ตะกอนหลังใช้งานจะเป็นตะกอนผสมระหว่างผงเหล็กซัลไฟด์และตะกั่วอะลูมิเนียม ที่ผ่านการใช้บำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟ้นต้นประยุกต์ จากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2 จึงตรวจพบทั้งเหล็กและอะลูมิเนียมในปริมาณที่ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 50.74 และร้อยละ 33.43 สำหรับเหล็กและอะลูมิเนียมตามลำดับ) นอกจากนี้ยังตรวจพบซิลิการ้อยละ 10.14 และธาตุอื่น ๆ อีกเล็กน้อย (น้อยกว่าร้อยละ 1)

เนื่องจากตะกอนหลังใช้งานที่นำมาวิเคราะห์เป็นตะกอนจากการทดลอง ณ ภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟ้นต้นประยุกต์ ซึ่งมีการใช้ผงเหล็กซัลไฟด์และตะกั่วอะลูมิเนียม 2.5 และ 1 กรัมตามลำดับ เมื่อนำน้ำหนักที่ใช้มาเทียบกับสัดส่วนร้อยละของธาตุหลักจากผลการวิเคราะห์ XRF จะทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงของเหล็กในตัวอย่างก่อนและหลังใช้งานได้ โดยจากสัดส่วนของเหล็กร้อยละ 83.39 ในผงเหล็กซัลไฟด์ และร้อยละ 0.78 ในตะกั่วอะลูมิเนียม คิดเป็นปริมาณเหล็กก่อนการใช้งานรวม 2.09 กรัมต่อน้ำหนักรวมของของเสียอุตสาหกรรม 3.5 กรัม หลังการใช้งานสัดส่วนของเหล็กจะอยู่ที่ร้อยละ 50.74 เมื่อเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น 3.5 กรัม จะพบว่าปริมาณเหล็กในตะกอนหลังใช้งานลดลงเหลือเพียง 1.78 กรัม ซึ่งสอดคล้องกับผลของภาพถ่าย SEM ในหัวข้อ 4.1.2.3 ที่ความสว่างของภาพในโหมดตรวจจบบัญญาณภาพการกระเจิงกลับลดลง บ่งบอกว่าธาตุที่มีเลขอะตอมสูงอย่างเหล็กมีปริมาณน้อยลง โดยคาดว่าเหล็กมีการละลายและหลุดออกไปในสารละลายหลังบำบัด

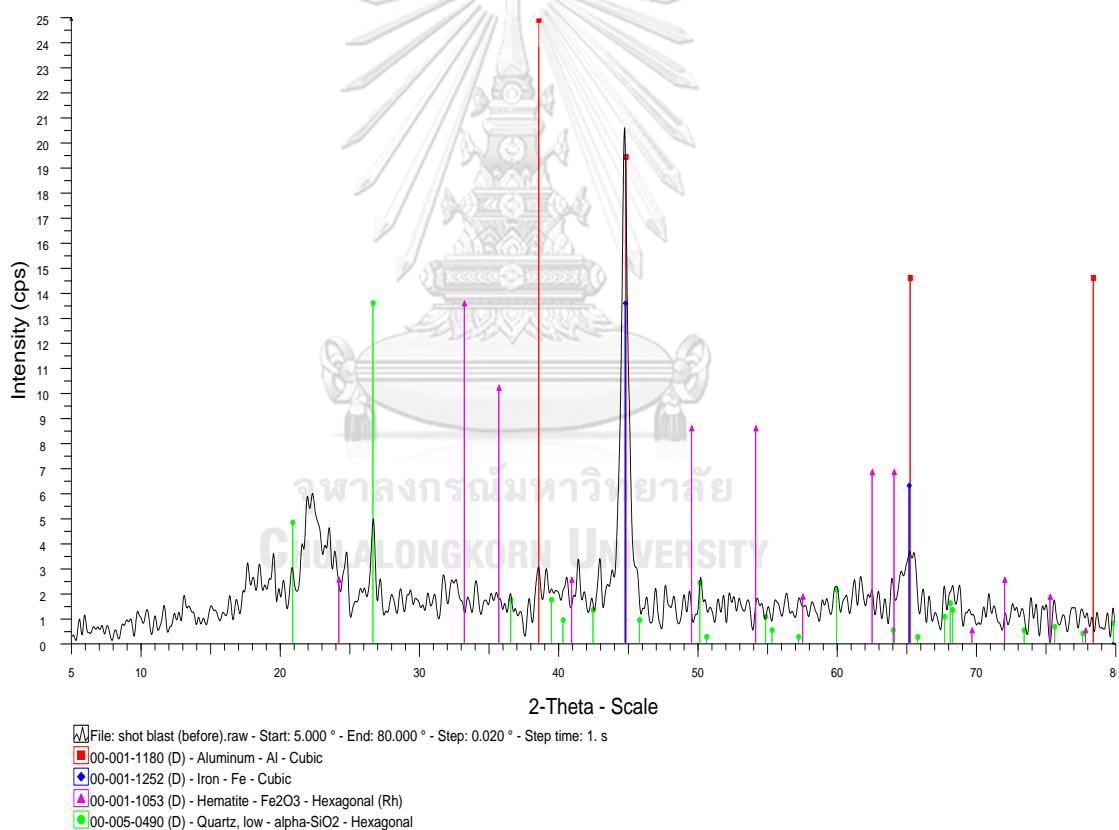
4.1.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กซัลไฟด์และตะกั่วอะลูมิเนียมก่อนและหลังใช้งาน ด้วย X-Ray Diffractometer

ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กซัลไฟด์ ตะกั่วอะลูมิเนียมก่อนและหลังใช้งานด้วย X-Ray Diffractometer (XRD) ทำการวิเคราะห์ที่มุมของการเลี้ยวเบน (2 theta) ระหว่าง 5.00 ถึง 80.00 องศา ใช้ความเร็วในการวิเคราะห์ 0.020 องศาต่อวินาที ได้ผลดังนี้

4.1.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กซัลไฟด์ก่อนใช้งานด้วย X-Ray Diffractometer

นำผงเหล็กซัลไฟด์จากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผ่านการร่อนคัดขนาดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.2 และ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยตะแกรงมาตรฐาน 35 และ 70 เมช มาศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วย X-Ray Diffractometer (XRD) ได้ผลดังรูปที่ 4.5

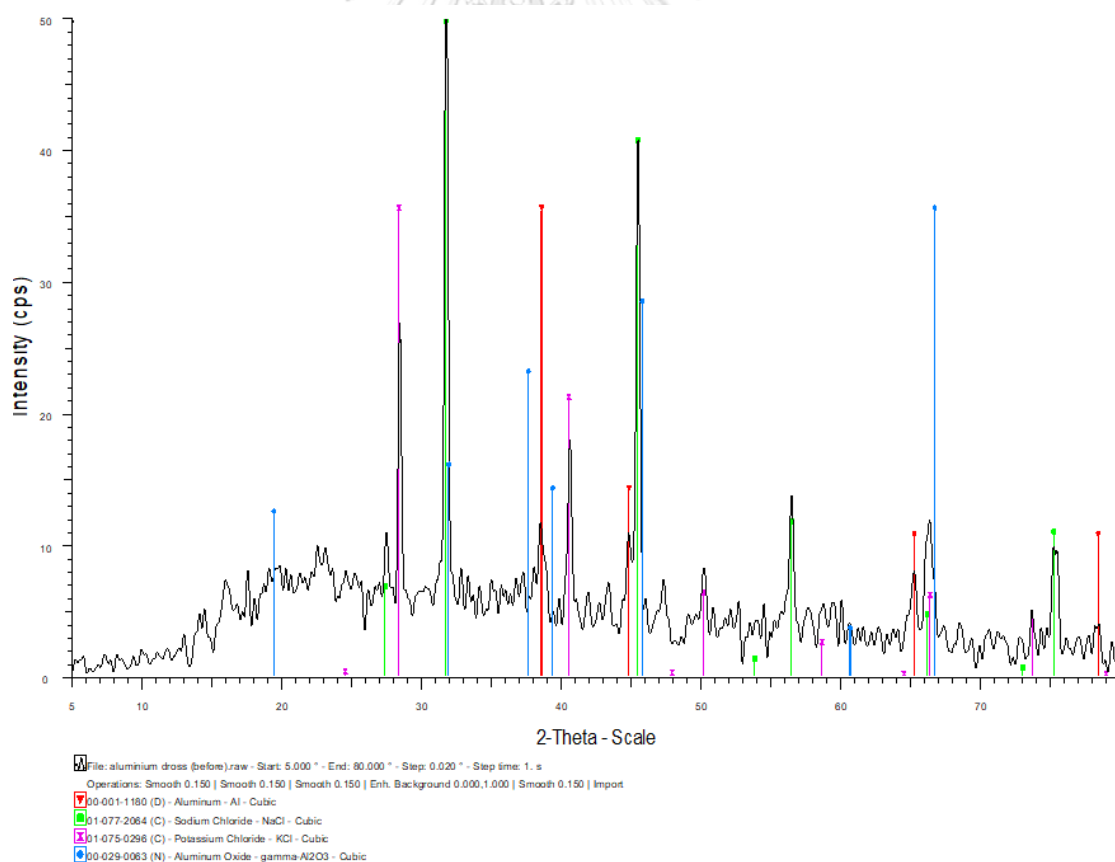
ค่าความเข้ม (intensity) ของผงเหล็กช็อคตบลาสท์ที่ขึ้นสูงที่ประมาณ 44.8 องศา และ 65 องศา ซึ่งตรงกับค่าอ้างอิงของเหล็กและอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างเป็นแบบลูกบาศก์ (Cubic iron และ Cubic aluminium: JCPDS no. 00-001-1252 และ 00-001-1180) นอกจากนี้รูปแบบของกราฟค่าความเข้มที่องศาอื่น ๆ ยังมีความคล้ายกับค่าอ้างอิงของ ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และเหล็กออกไซด์ ในรูปของฮีมาไทต์ (Hematite: Fe_2O_3) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีด้วย XRF ในหัวข้อ 4.1.3.1 ที่ตรวจพบเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักในผงเหล็กช็อคตบลาสท์ โดยมีซิลิกาและอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบรอง แสดงถึงความเหมาะสมในการนำมาใช้งานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนต์ันประยุกต์ และจากการตรวจพบซิลิกาในรูปซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นรูปแบบของซิลิกาที่พบได้ในทราย จึงช่วยยืนยันข้อสันนิษฐานได้ว่าซิลิกาที่ตรวจพบในเหล็กช็อคตบลาสท์จากการวิเคราะห์ XRF คือทรายจากแบบพิมพ์ทรายที่ปะปนมาจากกระบวนการผลิตจริง



รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีของผงเหล็กช็อคตบลาสท์จากเครื่อง XRD

4.1.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันอะลูมิเนียมก่อนใช้งานด้วย X-Ray Diffractometer

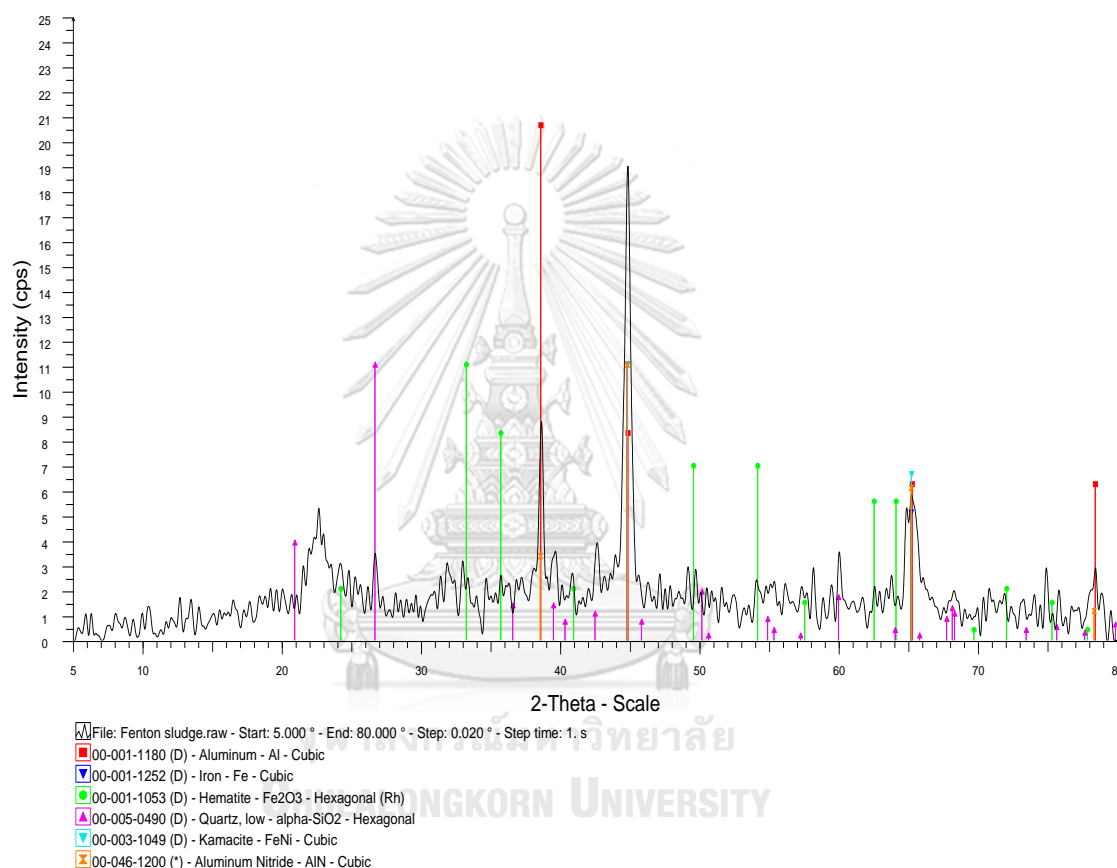
นำตะกรันอะลูมิเนียมจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผ่านการบดและร่อนคัดขนาดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.2 และ 0.5 มิลลิเมตร ด้วยตะแกรงมาตรฐาน 35 และ 70 เมช มาศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วย X-Ray Diffractometer (XRD) ได้ผลดังรูปที่ 4.6 พบว่าค่าความเข้มของตะกรันอะลูมิเนียมตรงกับค่าอ้างอิงของอะลูมิเนียมทรงลูกบาศก์ (JCPDS no. 00-001-1180) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (JCPDS no. 00-029-0063) ส่วนค่าความเข้มของตะกรันอะลูมิเนียมที่ขึ้นสูงที่ประมาณ 38.6, 44.8 และ 65.5 องศา ซึ่งตรงกับค่าอ้างอิงของอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างเป็นแบบลูกบาศก์ ส่วนจุดที่ค่าความเข้มขึ้นสูงจุดอื่น ๆ เช่น ที่ 28.3, 31.9 และ 45.5 ตรงกับค่าอ้างอิงของผลึกโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และโพแทสเซียมคลอไรด์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ XRF ของตะกรันอะลูมิเนียมในหัวข้อ 4.1.3.2 ที่ตรวจพบโซเดียมและคลอไรด์ในตัวอย่างเป็นปริมาณสูง โดยจากผล XRD ทำให้ข้อสันนิษฐานที่คาดว่าโซเดียมและคลอไรด์ที่ปะปนมาในตัวอย่างมาจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต มีความเป็นไปได้มากขึ้น



รูปที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีของตะกรันอะลูมิเนียมจากเครื่อง XRD

4.1.4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนหลังใช้งานด้วย X-Ray Diffractometer

นำตะกอนที่เหลือจากการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์ในภาชนะที่เหมาะสม มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วย X-Ray Diffractometer (XRD) ได้ผลดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีของตะกอนหลังใช้งานจากเครื่อง XRD

จากรูปที่ 4.7 รูปแบบกราฟการเลี้ยวเบนรังสีของตะกอนหลังใช้งานมีความคล้ายคลึงกับกราฟการเลี้ยวเบนรังสีของผงเหล็กช็อตบลาสต์ร่วมกับตะกัณอะลูมิเนียม โดยตรวจพบจุดพีคของกราฟที่เห็นได้ชัด ในองศาเดียวกับจุดพีคของผงเหล็กช็อตบลาสต์และตะกัณอะลูมิเนียม ทำให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของตะกอนหลังใช้งาน ตรงกับค่าอ้างอิงของทั้งเหล็กและอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างเป็นรูปลูกบาศก์ (JCPDS no. 00-001-1252 และ 00-001-1180) ซึ่งถือว่ามีควม

สมเหตุสมผล เนื่องจากตะกอนหลังการใช้งานจะเป็นตะกอนที่ผสมระหว่างผงเหล็กช็อบลาสท์และตะกอนอะลูมิเนียม

นอกจากนี้ยังพบว่ารูปการณ็เลี้ยวเบนของตะกอนหลังใช้งาน มีความตรงกับค่าอ้างอิงของฮีมาไทต์มากขึ้นกว่าตอนเป็นผงเหล็กช็อบลาสท์ คาดว่ามีการเกิดสารประกอบเหล็กออกไซด์มากขึ้น บริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นด้วยกระบวนการเฟนตัน และตรวจยังพบพิคตรงกับสารอื่น ๆ เช่น ซิลิคอนไดออกไซด์ ที่คาดว่าพิเศษแบบพิมพ์ทรายที่หลงเหลือจากการบำบัด สารประกอบของเหล็กอย่าง Iron-nickel alloy (FeNi) และสารประกอบของอะลูมิเนียมอย่าง Aluminium nitride (AlN) ที่คาดว่าเกิดจากการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำมันหล่อเย็นของอะลูมิเนียมระหว่างการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

ทั้งนี้ พิคของค่าความเข้มหลักที่ตรงกับค่าอ้างอิงของโซเดียมคลอไรด์ ที่เคยตรวจพบในตัวอย่างตะกอนอะลูมิเนียมก่อนใช้งานได้หายไปหลังผ่านการใช้งาน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ XRF ที่ตรวจพบธาตุโซเดียมและคลอไรด์ในปริมาณน้อยมากในตัวอย่างตะกอนหลังการใช้งาน คาดว่าเกลือโซเดียมคลอไรด์มีการละลายหลุดออกไปในสารละลายระหว่างการบำบัด

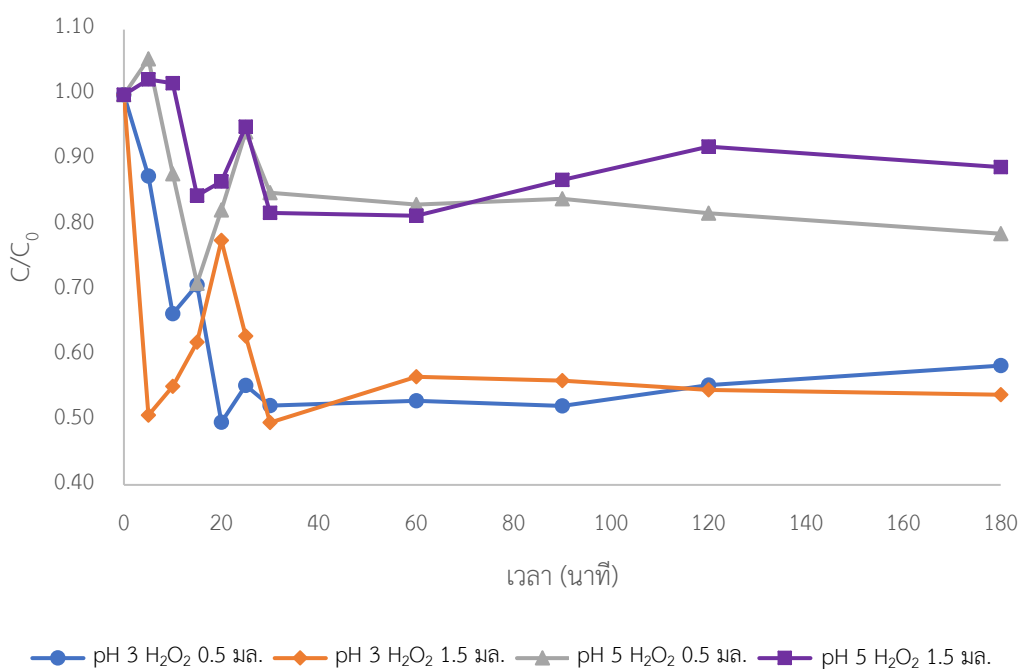
4.2 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์

ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟนตันประยุกต์ โดยใช้ผงเหล็กช็อบลาสท์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทนสารละลายเกลือเหล็ก ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ และมีตะกอนอะลูมิเนียมเป็นตัวสนับสนุนปฏิกิริยาโดยภาวะที่เหมาะสมที่ได้ทำการศึกษา ได้แก่ เวลาในการบำบัด พีเอชเริ่มต้น ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณผงเหล็กช็อบลาสท์ และปริมาณตะกอนอะลูมิเนียม

4.2.1 การศึกษาเวลาในการบำบัดที่เหมาะสม

ทำการศึกษาเพื่อหาเวลาในการบำบัดที่เหมาะสม โดยทำการทดลองบำบัดน้ำมันหล่อเย็นเป็นเวลา 180 นาที เก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที ควบคุมปริมาณผงเหล็กช็อบลาสท์คงที่ 1 กรัม ทำการศึกษาที่พีเอชเริ่มต้น 3 และ 5 และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 และ 1.5 มิลลิลิตรต่อน้ำมันหล่อเย็น 50 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นค่าพีเอช และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต่ำสุดและสูงสุดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่พีเอชเริ่มต้น 3 และ 5 ให้แนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ COD จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเพิ่มกลับขึ้นมาภายในเวลา 30 นาที จนเริ่มคงที่หลังเวลา

ผ่านไป 60 นาที โดยประสิทธิภาพในการบำบัดที่พีเอชเริ่มต้น 3 จะอยู่ในช่วงประมาณ ร้อยละ 40-50 สูงกว่าพีเอชเริ่มต้น 5 ที่อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 10-20 เท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการเฟนตันที่ส่วนใหญ่ได้ผลว่ากระบวนการเฟนตันสามารถบำบัดได้ดีในภาวะที่เป็นกรด เช่น งานวิจัยของ Shimizu et al. (2012), Harada, Yatagai and Kawase (2016) และ Fischbacher et al. (2017) ส่วนปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 และ 1.5 มิลลิลิตรนั้นไม่พบความแตกต่างกันมากนักที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากัน



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการบำบัดและการกำจัดซีโอดีในรูป C/C_0

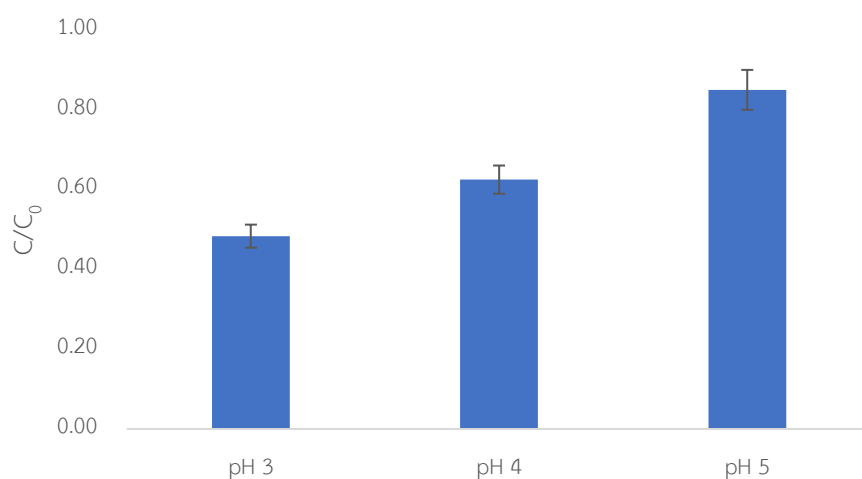
สำหรับการเพิ่มขึ้นของ COD ในช่วงแรก คาดว่ามีสาเหตุจากสารปนเปื้อนบางอย่างในผงเหล็กช็อคบลาสท์ที่หลุดออกมาในระหว่างการทดลอง และ/หรือประกอบกับผงเหล็กช็อคบลาสท์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองอยู่ในรูปของแข็ง ซึ่งต้องใช้เวลาในการละลายเพื่อปลดปล่อยเฟอร์รัสไอออนออกสู่สารละลาย (Jiang et al., 2013) ทำให้ในช่วงแรกปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีปริมาณน้อย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงยังไม่ถูกใช้จนหมด ส่งผลให้ค่า COD สูงขึ้นเนื่องจากมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เหลืออยู่ในตัวอย่าง (Kang, Cho and Hwang, 1999; Mandal et al., 2010; Talinli and Anderson, 1992) โดยลักษณะที่ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีมีความแปรปรวนในช่วงแรกของการบำบัด มีลักษณะคล้ายกับ

งานวิจัยของชนัญญา เพิ่มชาติ (2556) ที่ใช้กระบวนการเฟนตันเสมือนในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นสังเคราะห์

และเมื่อเวลาผ่านไปสารเปื้อนและ/หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะถูกกำจัดจากการทำปฏิกิริยาของกระบวนการเฟนตัน ทำให้ค่า COD หลังจาก 60 นาทีเริ่มคงที่ ดังนั้น จึงเลือกเวลาในการบำบัดที่ 60 นาทีเป็นเวลาในการบำบัดที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลองหัวข้อต่อไป

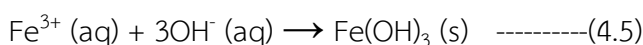
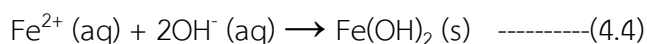
4.2.2 การศึกษาพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม

ทำการปรับพีเอชเริ่มต้นก่อนการบำบัดเป็น 3, 4 และ 5 ควบคุมปริมาณผงเหล็กช็อคบลาสท์ 1 กรัม และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงที่ที่ 1 มิลลิตรต่อน้ำเสีย 50 มิลลิตร ใช้เวลาในการบำบัด 60 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2.1 เพื่อหาพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาขั้นถัดไป ได้ผลดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นและการกำจัดซีโอทีในรูป C/C_0

จากรูปที่ 4.8 พบว่าการเพิ่มของพีเอชเริ่มต้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณร้อยละ 50 ที่พีเอช 3 และประสิทธิภาพลดลงเหลือเพียงประมาณร้อยละ 15 ที่พีเอช 5 ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.1 และสอดคล้องกับงานวิจัยส่วนใหญ่ที่รายงานว่ากระบวนการเฟนตันมีประสิทธิภาพการบำบัดดีในภาวะกรด (Fischbacher et al., 2017; Harada et al., 2016; Shimizu et al., 2012) เนื่องจากพีเอชที่สูงขึ้น ทำให้เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) หรือเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ที่ละลายออกมาจากผงเหล็กช็อคบลาสท์เริ่มตกตะกอนในรูปของเหล็กออกไซด์ ดังสมการที่ (4.4) และ (4.5)



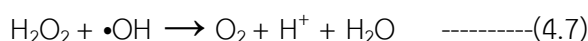
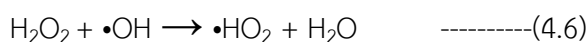
หรืออาจเป็นเพราะปริมาณ H^{+} ลดลง ผงเหล็กซ็อดบลาสซึ่งเป็นเหล็กประจุศูนย์จึงละลายและปลดปล่อย Fe^{2+} ออกมาดังสมการ ที่ (4.1) และ (4.3) ได้น้อยลง ส่งผลให้ Fe^{2+} ซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการเฟนตันที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อสร้าง $\bullet\text{OH}$ มีปริมาณลดลง ดังนั้นจึงเลือก พีเอช 3 เป็นพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการศึกษาขั้นถัดไป

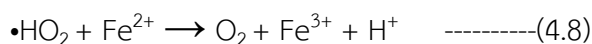
4.2.3 การศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

ทำการปรับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการเฟนตันประยุกต์เป็น 0.5, 0.75, 1, 1.25 และ 1.5 มิลลิลิตร ควบคุมปริมาณ ผงเหล็กซ็อดบลาสที่คงที่ที่ 1 กรัมต่อน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว 50 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการบำบัด 60 นาที และปรับพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 ซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 ตามลำดับ และทำการทดลองชุดควบคุมที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวไม่เติมผงเหล็กซ็อดบลาส เพื่อหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาขั้นถัดไป ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.10

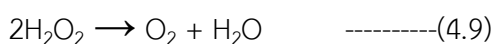
จากผลที่ได้พบว่ายิ่งเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดยีสสูงขึ้น จนประสิทธิภาพเริ่มคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถึง 1 มิลลิลิตร และมีแนวโน้มว่าประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่า 1 มิลลิลิตร ซึ่งอาจมีผลมาจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไปเข้าแย่งปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลอิสระดังสมการที่ (4.6) และ (4.7) ทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลอิสระที่ทำหน้าที่บำบัดน้ำมันหล่อเย็นมีปริมาณลดลง (Bojana, Donald and Michel, 2008; Chen, Lin and Chen, 2017)

ปฏิกิริยาสมการที่ (4.6) จะเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเปอร์ออกซิลอิสระ ($\bullet\text{HO}_2$) ซึ่งไฮโดรเปอร์ออกซิลอิสระนี้ สามารถทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้เช่นเดียวกับไฮดรอกซิลอิสระ แต่เนื่องจากความสามารถในการออกซิไดซ์ของไฮโดรเปอร์ออกซิลอิสระ (Redox potential: $E_h = 1.70 \text{ v}$) มีค่าน้อยกว่าไฮดรอกซิลอิสระ ($E_h = 2.80 \text{ v}$) จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำมันหล่อเย็นลดลง (George et al., 2003; Zhou and Smith, 2002) นอกจากนี้ไฮโดรเปอร์ออกซิลอิสระยังสามารถออกซิไดซ์ Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} ทำให้ Fe^{2+} ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันมีปริมาณลดลง ดังสมการที่ (4.8)

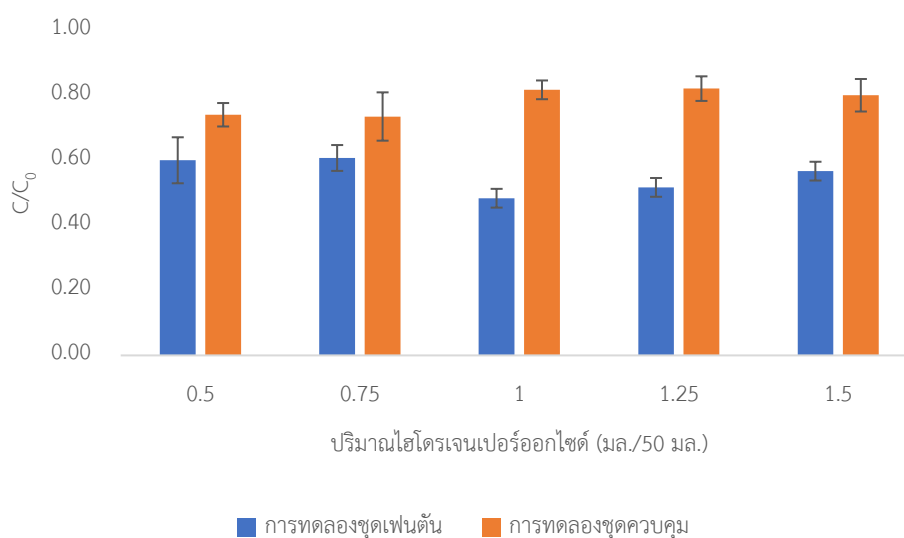




นอกเหนือจากการทำให้ไฮดรอกซิลอิสระลดลงแล้วซึ่งทำให้เกิดผลเสียด้านประสิทธิภาพตามที่กล่าวไปข้างต้นแล้ว การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไปอาจทำให้เกิดการสูญเสียของสารเคมีเนื่องจากการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กลายเป็นน้ำและออกซิเจน ดังสมการที่ (4.9) ซึ่งส่งผลโดยตรงในด้านค่าใช้จ่ายในการบำบัด



ทั้งนี้ ปฏิกิริยาดังสมการที่ (4.9) จะเกิดในภาวะที่จำเพาะ เช่น อุณหภูมิสูง พีเอชสูง หรือมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ไอออนของโลหะ ออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ (Kirk, 1984; Kuo, 1992; Mandal et al., 2010) แม้ว่าการทดลองนี้จะทำการทดลองที่อุณหภูมิปกติ และพีเอชต่ำซึ่งไม่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่เนื่องจากในกระบวนการเฟ้นต้นมีไอออนเหล็ก ซึ่งเป็นไอออนโลหะจำนวนมาก จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในชุดการทดลองที่มีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และการกำจัดซีไอดีในรูป C/C_0

ดังนั้น จึงเลือกใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 มิลลิลิตรต่อน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว 50 มิลลิลิตรเป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาขั้นต่อไป

สำหรับการทดลองชุดควบคุม จะเป็นการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว ทำการปรับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.5, 0.75, 1, 1.25 และ 1.5 มิลลิลิตรเช่นเดียวกับการทดลองชุดเพนตัน โดยไม่มีการเติมผงเหล็กช็อดบลาสท์ จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.10 พบว่าในการทดลองชุดควบคุม แม้จะมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว ก็ยังสามารถลดซีไอดีของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วลงได้ประมาณร้อยละ 20 เนื่องจากตัวไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก็เป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ ($E_h = 1.78 \text{ v}$) (Zhou and Smith, 2002) จึงสามารถกำจัดซีไอดีในน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วได้บางส่วน เพียงแต่ยังไม่มากกว่าการออกซิไดซ์ที่เกิดจากกระบวนการเพนตัน

นอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถเกิดการแตกพันธะแบบเสมอภาค (Homolytic cleavage) ได้เป็นไฮดรอกซิลอิสระหรือไฮดรอกซิลอิสระ ดังสมการที่ (4.10) และ (4.11)

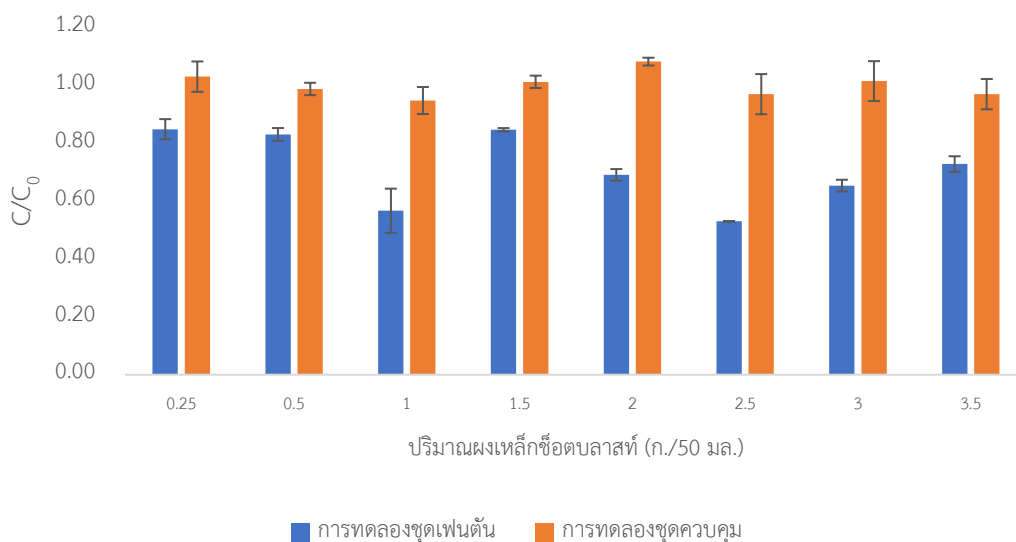


ทั้งนี้ ปฏิกิริยาดังสมการที่ (4.10) และ (4.11) จะเกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาเด่นเมื่ออยู่ในภาวะที่เหมาะสม เช่น ในปฏิกิริยาเคมีที่มีแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Photochemistry) (Kirk, 1984) ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้ซึ่งเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างจึงไม่มีการสัมผัสกับแสงอาทิตย์ อีกทั้งยังไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น หลอดยูวี จึงคาดว่าปฏิกิริยาดังกล่าว ไม่ได้มีผลต่อการลดลงของซีไอดีในการทดลองชุดควบคุมมากนัก

4.2.4 การศึกษาปริมาณผงเหล็กช็อดบลาสท์ที่เหมาะสม

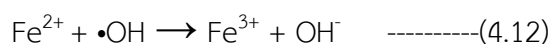
ศึกษาโดยปรับปริมาณของเหล็กช็อดบลาสท์เป็น 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 และ 3.5 กรัมต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการบำบัด 60 นาที พีเอชเริ่มต้น 3 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในหัวข้อ 4.2.1, 4.2.2 และ 4.2.3 ตามลำดับ และทำการทดลองชุดควบคุมที่ใช้เหล็กช็อดบลาสท์เพียงอย่างเดียวโดยไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดซีไอดีของเหล็กช็อดบลาสท์ที่ไม่ได้มาจากการออกซิไดซ์โดยเพนตัน (เช่น การดูดซับ และการรีดิวซ์) ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีสูงสุด (ร้อยละ) เกิดขึ้นเมื่อใช้เหล็กช็อดบลาสท์ 2.5 กรัม และมีแนวโน้มว่าประสิทธิภาพในการ

บำบัดค่อย ๆ ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเหล็กช็อคบลาสท์มากกว่า 2.5 กรัม ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการมีเหล็กช็อคบลาสท์ในระบบมากเกินไป ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยารวมกลุ่มกันแน่น (agglomeration) จนพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลดลง (Chen et al., 2017)



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงเหล็กช็อคบลาสท์และการกำจัดซีโอดีในรูปแบบ C/C_0

นอกจากนี้เหล็กส่วนเกินยังสามารถแย่งทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลอิสระดังสมการที่ (4.12) โดย Fe^{2+} จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลอิสระ กลายเป็น Fe^{3+} ส่งผลให้ทั้งไฮดรอกซิลอิสระที่ทำหน้าที่กำจัดสารอินทรีย์ และ Fe^{2+} ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันมีปริมาณลดลง ประกอบกับปฏิกิริยาดังกล่าวเกิด OH^- เป็นผลิตภัณฑ์ ทำให้พีเอชเพิ่มขึ้นซึ่งอาจเป็นภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อกระบวนการเฟนตัน จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเมื่อใช้ผงเหล็กช็อคบลาสท์ปริมาณมากเกินไป ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณผงเหล็กช็อคบลาสท์ 2.5 กรัมต่อน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว 50 มิลลิลิตรเป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการศึกษารุ่นต่อไป



เมื่อพิจารณาสัดส่วน $Fe:H_2O_2$ ณ ภาวะที่เหมาะสม มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของ $Fe:H_2O_2$ อยู่ที่ 5.5:1 โดยประมาณ ซึ่งเป็นสัดส่วนที่แตกต่างจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้กระบวนการเฟนตันในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็น เช่น งานวิจัยของชนัญญา เพิ่มชาติ (2556) อัจริย์ ประเสริฐศรี (2557) และชนารัตน์ สุทธะนันท์ (2558) ที่มีสัดส่วนน้ำหนักของ $Fe:H_2O_2$ ที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูงสุดอยู่ที่ 1:2.5 โดยในงานวิจัยดังกล่าว ณ ภาวะที่เหมาะสม สัดส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะสูงกว่าเหล็ก

ในขณะที่ในงานวิจัยนี้มีสัดส่วนของเหล็กสูงกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างกันของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือความเข้มข้นของน้ำมันหล่อเย็นที่ใช้

สำหรับการทดลองชุดควบคุม จากรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อใช้ผงเหล็กช็อตบลาสเพียงอย่างเดียวโดยไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอติมีค่าต่ำมาก (น้อยกว่าร้อยละ 5) ในทุกความเข้มข้นของผงเหล็กช็อตบลาสที่ศึกษา แม้จะมีงานวิจัยที่ระบุว่าเหล็กประจุศูนย์มีคุณสมบัติในการกำจัดสารอินทรีย์ได้ด้วยกระบวนการดูดซับหรือการรีดิวซ์ (Huang et al., 2018; Martins et al., 2012; Santos-Juanes et al., 2017) แต่จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีดังกล่าวไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว คาดว่ามีสาเหตุจากน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ประเภทที่ถูกรีดิวซ์ได้ยากเป็นส่วนใหญ่ ประกอบกับผงเหล็กช็อตบลาสที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นเหล็กประจุศูนย์ที่ไม่บริสุทธิ์ จากผล SEM ในหัวข้อ 4.1.2 ที่พบว่ามี การปนเปื้อนของทรายจากกระบวนการผลิตทำให้ทำปฏิกิริยารีดิวซ์ได้ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร หรืออาจเกิดจากสภาพพื้นผิวและลักษณะทางกายภาพของเหล็กช็อตบลาสที่ไม่เหมาะสมต่อการเป็นตัวดูดซับ จึงส่งผลให้การบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยผงเหล็กช็อตบลาสเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพต่ำกว่าผลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทั้งนี้ผลการทดลองชุดควบคุมแสดงให้เห็นว่า น้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วมีความเหมาะสมที่จะบำบัดด้วยวิธีออกซิไดซ์มากกว่าการดูดซับหรือการรีดิวซ์ และปริมาณซีโอติที่กำจัดไปได้เกิดจากการออกซิไดซ์ด้วยกระบวนการเฟนตันเป็นหลัก

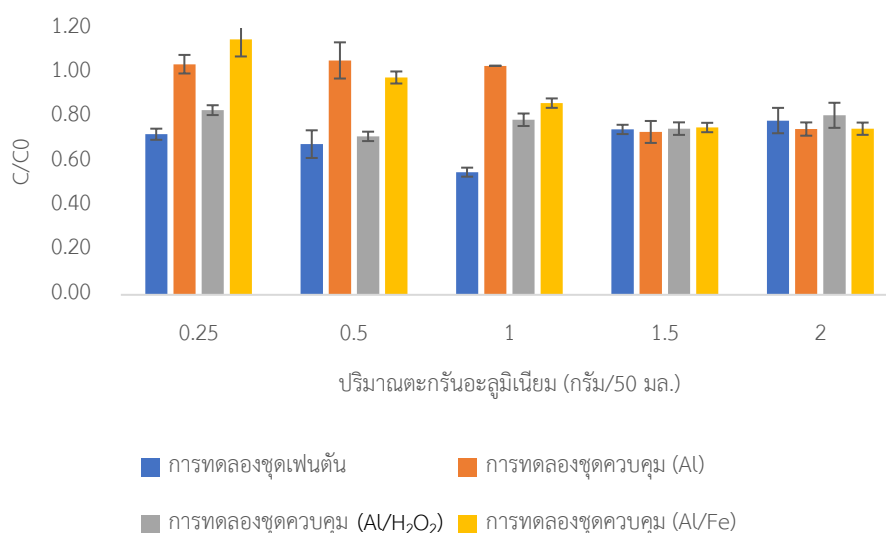
4.2.5 การศึกษาปริมาณตะกอนอะลูมิเนียมที่เหมาะสม

หลังจากทราบภาวะที่เหมาะสมของเวลาในการบำบัด พีเอชเริ่มต้น ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และปริมาณผงเหล็กช็อตบลาสที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการศึกษาปริมาณตะกอนอะลูมิเนียมที่เหมาะสม ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวสนับสนุนตัวสนับสนุนปฏิกิริยาของกระบวนการเฟนตันประยุกต์ โดยทำการปรับความเข้มข้นของตะกอนอะลูมิเนียมตั้งแต่ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 กรัมต่อน้ำมันหล่อเย็น 50 มิลลิลิตร เพื่อหาปริมาณตะกอนอะลูมิเนียมที่เหมาะสม โดยควบคุมพารามิเตอร์อื่น ๆ ให้อยู่ในภาวะที่เหมาะสมตามที่ได้จากการศึกษาในหัวข้อ 4.2.1–4.2.4 ได้แก่ เวลาในการบำบัด 60 นาที พีเอชเริ่มต้น 3 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 มิลลิลิตร และปริมาณผงเหล็กช็อตบลาส 2.5 กรัม พร้อมทำการทดลองชุดควบคุม 3 ชุดดังนี้

การทดลองชุดควบคุม ชุดที่ 1 โดยใช้ตะกอนอะลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว ไม่มีการเติมผงเหล็กช็อตบลาสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอติของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการดูดซับหรือการรีดิวซ์ของอะลูมิเนียม

การทดลองชุดควบคุม ชุดที่ 2 โดยใช้ตะกั่วอะลูมิเนียมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไม่มีการเติมผงเหล็กซ็อบลาสท์ เพื่อศึกษาผลของปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากอะลูมิเนียมจัดเป็นธาตุโลหะที่มีประจุ 3+ ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับเหล็ก จึงมีความเป็นไปได้ที่อะลูมิเนียมจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นกระบวนการคล้ายเฟนต์ัน (Fenton-like reaction) ได้เช่นเดียวกับเหล็กซ็อบลาสท์

และการทดลองชุดควบคุม ชุดที่ 3 โดยใช้ตะกั่วอะลูมิเนียมกับผงเหล็กซ็อบลาสท์ ไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อศึกษาผลของตะกั่วอะลูมิเนียมและผงเหล็กซ็อบลาสท์ที่อาจมีความสามารถในการกำจัดซีโอดีของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วจากกระบวนการดูดซับ หรือจากการรวมกันของอะลูมิเนียมและเหล็กเกิดเป็น bimetal (Wei, Wu and Sun, 2017) ได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.12



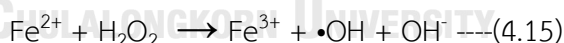
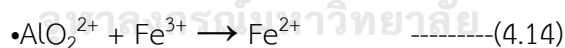
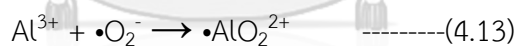
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วอะลูมิเนียมและการกำจัดซีโอดีในรูป C/C_0

จากรูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วมีค่าสูงที่สุดในการทดลองชุดเฟนต์ันที่ใช้ผงเหล็กซ็อบลาสท์ร่วมกับตะกั่วอะลูมิเนียมปริมาณ 1 กรัมต่อน้ำมันหล่อเย็น 50 มิลลิลิตร โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 45 โดยประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตะกั่วอะลูมิเนียมจาก 0.25 เป็น 1 กรัม แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตะกั่วอะลูมิเนียมมากกว่า 1 กรัม ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีจะเริ่มลดลง และประสิทธิภาพของการทดลองชุดเฟนต์ันแทบไม่แตกต่างจากชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณตะกั่วอะลูมิเนียมมากเกินไป ปฏิกิริยาหลักที่ช่วยในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นไม่ได้มาจากการ

ออกซิไดซ์ด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์ แต่อาจเกิดจากการดูดซับหรือตกตะกอนโดยผงเหล็ก
ซ็อดบลาสท์หรือตะกัณอะลูมิเนียม

นอกจากนี้การที่ประสิทธิภาพของการทดลองชุดเฟนตันลดลง อาจเกิดจากการเกาะกลุ่มกัน
ของตัวอะลูมิเนียมที่มากเกินไปจนทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวออกซิไดซ์ลดลง
เช่นเดียวกับการเติมผงเหล็กซ็อดบลาสท์มากเกินไปในหัวข้อ 4.2.4 หรืออาจเป็นเพราะการเติมตะกัณ
อะลูมิเนียมมากเกินไป จนทำให้สัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวสนับสนุนปฏิกิริยาที่อยู่ในภาค
ของแข็ง (Solid phase) และตัวออกซิไดซ์ที่อยู่ในภาคของเหลว (Liquid phase) ของกระบวนการ
เฟนตันประยุกต์แตกต่างกันมากขึ้นจนกลายเป็นภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการบำบัด ดังนั้นจึงเลือกใช้
ปริมาณตะกัณอะลูมิเนียม 1 กรัมต่อน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว 50 มิลลิลิตร เป็นภาวะที่เหมาะสมของ
กระบวนการเฟนตันประยุกต์

สำหรับผลของอะลูมิเนียมต่อกระบวนการเฟนตันนั้น มีงานวิจัย ที่ระบุว่าอะลูมิเนียมสามารถ
เพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเฟนตันได้ โดยเข้ามาสนับสนุนในการหมุนเวียนไอออนเหล็ก โดย
การช่วยรีดิวซ์ไอออนเหล็กจาก Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} ทำให้กระบวนการเฟนตันทำงานได้อย่างมี
ประสิทธิภาพมากขึ้น โดยอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) จะทำปฏิกิริยากับซูเปอร์ออกไซด์ ($\bullet O_2^-$) เกิดเป็น
อะลูมิเนียมซูเปอร์ออกไซด์ ($\bullet AlO_2^{2+}$) ดังสมการที่ (4.13) และอะลูมิเนียมซูเปอร์ออกไซด์จะไปรีดิวซ์
 Fe^{3+} ให้เป็น Fe^{2+} ดังสมการที่ (4.14) ทำให้มี Fe^{2+} ในระบบมากขึ้นและสามารถเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน
ดังสมการที่ (4.15) ต่อไป (Masarwa et al., 2005; Wang et al., 2016)



แม้จะมีงานวิจัยที่สนับสนุนว่าอะลูมิเนียมมีส่วนสนับสนุนปฏิกิริยาเฟนตันได้ อย่างไรก็ตาม
ก็ตามเมื่อนำประสิทธิภาพเฉลี่ยของภาวะที่ดีที่สุดจากกระบวนการเฟนตันประยุกต์ที่ใช้ผงเหล็ก
ซ็อดบลาสท์ร่วมกับตะกัณอะลูมิเนียม (ประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 45) มาเทียบกับกระบวนการเฟน
ตันประยุกต์ที่ใช้ผงเหล็กซ็อดบลาสท์โดยไม่มีตัวสนับสนุนปฏิกิริยา จากหัวข้อ 4.2.4 (ประสิทธิภาพ
เฉลี่ยร้อยละ 42) กลับพบว่าประสิทธิภาพไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งอาจมีสาเหตุจากการที่ผงเหล็ก
ซ็อดบลาสท์ที่ใช้ในการทดลองมีตัวสนับสนุนปฏิกิริยา เช่น ซิลิกา หรืออะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบอยู่
แล้ว (จากผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีในหัวข้อ 4.1.2 และ 4.1.3) ทำ
ให้การเติมตะกัณอะลูมิเนียมเพิ่มไปอีกไม่มีผลต่อปฏิกิริยามากนัก หรืออาจเป็นเพราะประสิทธิภาพใน
การบำบัดที่ทำได้นี้ เป็นประสิทธิภาพสูงสุดที่กระบวนการเฟนตันสามารถทำได้สำหรับการบำบัด

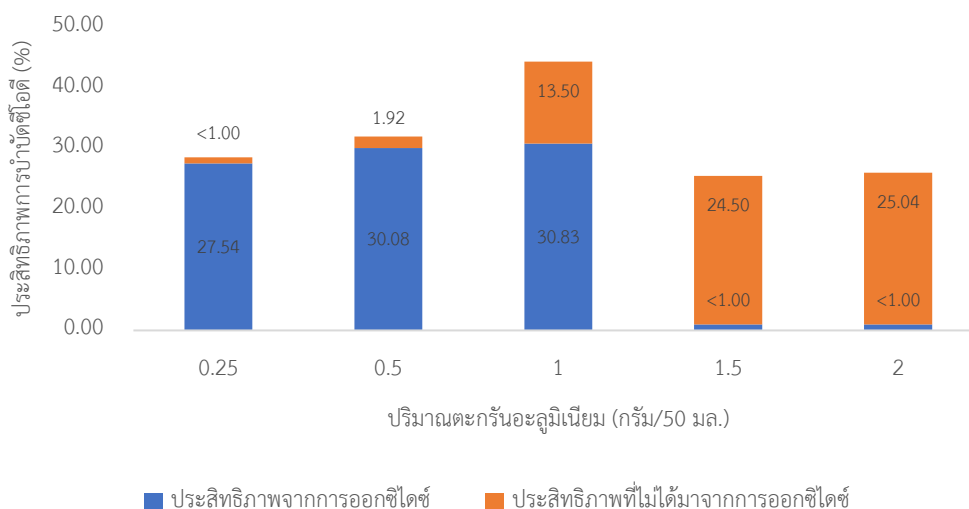
น้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว เนื่องจากน้ำมันหล่อเย็นมีทั้งส่วนประกอบเป็นพวกสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่กระบวนการเฟ้นต้นอาจไม่สามารถย่อยสลายให้หมดไปได้ ทำให้ประสิทธิภาพไม่สามารถเพิ่มไปได้มากกว่าที่เป็นอยู่

สำหรับการทดลองชุดควบคุมที่ใช้ตะกั่วอะลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว ไม่เติมผงเหล็กซ็อบลาสท์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณตะกั่วอะลูมิเนียมน้อยกว่า 1 กรัมต่อน้ำมันหล่อเย็น 50 มิลลิลิตร ค่าซีไอดีหลังบำบัด 60 นาที แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ($C/C_0 \approx 1$) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตะกั่วอะลูมิเนียมเป็น 1.5 และ 2 กรัม สามารถลดซีไอดีลงได้เฉลี่ยร้อยละ 26 และร้อยละ 25 ตามลำดับ ซึ่งคาดว่าเกิดจากการดูดซับหรือตกตะกอนโดยตะกั่วอะลูมิเนียม

สำหรับการทดลองชุดควบคุมที่ใช้ตะกั่วอะลูมิเนียมร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยไม่เติมผงเหล็กซ็อบลาสท์ สามารถลดปริมาณซีไอดีของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วลงได้ประมาณร้อยละ 20-30 โดยประสิทธิภาพที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกันทุกความเข้มข้นของตะกั่วอะลูมิเนียม และประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 28 เมื่อใช้ตะกั่วอะลูมิเนียม 0.5 กรัมต่อน้ำมันหล่อเย็น 50 มิลลิลิตร เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้ไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของการทดลองชุดควบคุมที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว ในหัวข้อ 4.2.3 พบว่าประสิทธิภาพมีความใกล้เคียงกัน จึงอาจอนุมานได้ว่าปริมาณซีไอดีที่ลดลงในการทดลองชุดนี้เกิดจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นส่วนใหญ่

ส่วนการทดลองชุดควบคุมที่ใช้ตะกั่วอะลูมิเนียมร่วมกับผงเหล็กซ็อบลาสท์ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณตะกั่วอะลูมิเนียม โดยประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 25 เมื่อใช้ตะกั่วอะลูมิเนียม 2 กรัมต่อน้ำมันหล่อเย็น 50 มิลลิลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองชุดควบคุมที่ใช้ผงเหล็กซ็อบลาสท์เพียงอย่างเดียวในหัวข้อ 4.2.4 ที่มีประสิทธิภาพน้อยกว่าร้อยละ 5 จึงอนุมานได้ว่าซีไอดีที่ลดลงเป็นผลมาจากตะกั่วอะลูมิเนียมเป็นหลัก ซึ่งยืนยันได้จากการที่ประสิทธิภาพของการทดลองในชุดนี้มีความใกล้เคียง และมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับการทดลองชุดควบคุมที่ใช้ตะกั่วอะลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว

เมื่อนำข้อมูลการทดลองจากรูปที่ 4.12 มาคำนวณเพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีที่เกิดจากการออกซิไดซ์และที่ไม่ได้เกิดจากการออกซิไดซ์ โดยให้ประสิทธิภาพของชุดการทดลองที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นประสิทธิภาพที่เกิดจากการออกซิไดซ์ และให้ประสิทธิภาพของชุดการทดลองที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นประสิทธิภาพที่เกิดจากกระบวนการอื่น ๆ (โคแอกกูเลชันและ/หรือการดูดซับ) ได้ผลดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอโอดีของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว จากกระบวนการออกซิไดซ์ และกระบวนการที่ไม่ใช่การออกซิไดซ์

จากรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อใช้ตะกั่วอะลูมิเนียมปริมาณต่ำ (0.25 และ 0.5 กรัม) ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอโอดีส่วนใหญ่จะมาจากการออกซิไดซ์ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตะกั่วอะลูมิเนียมสูงขึ้น (1.5 และ 2 กรัม) ประสิทธิภาพการบำบัดส่วนใหญ่จะมาจากกระบวนการที่ไม่ใช่การออกซิไดซ์ ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการโคแอกกูเลชันและ/หรือการดูดซับโดยอะลูมิเนียม ในขณะที่ชุดการทดลองที่ใช้ปริมาณตะกั่วอะลูมิเนียม 1 กรัม ซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสม ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอโอดีจะมาจากทั้งการออกซิไดซ์และกระบวนการอื่น ๆ ร่วมกัน โดยประสิทธิภาพการบำบัดส่วนใหญ่ (ประมาณ 3 ใน 4 ของประสิทธิภาพทั้งหมด) มาจากการออกซิไดซ์ และอีกส่วนหนึ่ง (ประมาณ 1 ใน 4) มาจากกระบวนการอื่น ๆ

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 ทั้งหมด ทำให้ทราบภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟ้นต้นประยุกต์ ที่ใช้ผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกั่วอะลูมิเนียมซึ่งเป็นของเสียอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวสนับสนุนปฏิกิริยาตามลำดับ ได้แก่ เวลาในการบำบัดที่เหมาะสม 60 นาที พีเอชในการบำบัดเริ่มต้น 3 ปริมาณตัวออกซิไดซ์หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม 1 มิลลิลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาหรือผงเหล็กช็อตบลาสท์ที่เหมาะสม 2.5 กรัม และปริมาณตัวสนับสนุนปฏิกิริยาหรือตะกั่วอะลูมิเนียมที่เหมาะสม 1 กรัม โดยที่ภาวะที่เหมาะสมสามารถกำจัดซีไอโอดีสูงสุดร้อยละ 47 โดยประมาณ ทั้งนี้ ภาวะที่เหมาะสมของชุดการทดลองที่ใช้และไม่ใช้ตะกั่วอะลูมิเนียมเป็นตัวสนับสนุนปฏิกิริยา ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่ต่างกันมากนัก

4.3 การศึกษาพารามิเตอร์อื่น ๆ ในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์

ศึกษาความสามารถของกระบวนการเฟนตันประยุกต์ในการบำบัดพารามิเตอร์อื่น ๆ นอกเหนือจากซีโอดีของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ พีเอช บีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ปริมาณของแข็งละลายทั้งหมด (TDS) และปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ เหล็ก และอะลูมิเนียม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญและมีการกำหนดค่ามาตรฐานสำหรับน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ยกเว้นอะลูมิเนียมที่ยังไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐาน แต่เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการศึกษาในครั้งนี้ เนื่องจากมีการใช้อะลูมิเนียมเป็นตัวสนับสนุนปฏิกิริยาเฟนตัน จึงต้องทำการศึกษาปริมาณอะลูมิเนียมหลังบำบัดเพื่อศึกษาผลกระทบของกระบวนการเฟนตันประยุกต์ต่อน้ำทิ้งหลังการบำบัด โดยในการทดลองจะใช้ภาวะที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2 ทำการตรวจวัดพารามิเตอร์น้ำมันหล่อเย็นที่บำบัดแล้ว หลังการปรับพีเอชเพื่อหยุดปฏิกิริยา ยกเว้นค่าพีเอชหลังบำบัด ที่จะทำการตรวจวัดหลังหยุดการเขย่าเมื่อถึงเวลาที่กำหนด

ทั้งนี้ เนื่องจากกระบวนการเฟนตันที่ใช้ผงเหล็กช็อคบลาสท์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว และเฟนตันที่ใช้ผงเหล็กช็อคบลาสท์ร่วมกับตะกอนอะลูมิเนียม มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีไม่ต่างกันมากนัก ในการศึกษาหัวข้อนี้จึงทำการทดลองเฟนตันทั้ง 2 แบบควบคู่ไปด้วยกัน ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3

แม้จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีไม่ต่างกัน แต่จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.3 กระบวนการเฟนตันที่ใช้ผงเหล็กช็อคบลาสท์เพียงอย่างเดียว และเฟนตันที่ใช้ผงเหล็กช็อคบลาสท์ร่วมกับตะกอนอะลูมิเนียม มีประสิทธิภาพในการบำบัดพารามิเตอร์อื่น ๆ ต่างกันไป โดยกระบวนการเฟนตันที่ใช้ผงเหล็กช็อคบลาสท์ร่วมกับตะกอนอะลูมิเนียมมีประสิทธิภาพในการบำบัด บีโอดี ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และปริมาณตะกั่ว อยู่ที่ร้อยละ 53.04, 74.96 และ 72.28 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่ากระบวนการเฟนตันที่ใช้ผงเหล็กช็อคบลาสท์เพียงอย่างเดียว ที่มีประสิทธิภาพอยู่ที่ร้อยละ 39.47, 16.44 และ 59.40 ตามลำดับ ถึงแม้จะยังไม่สามารถบำบัดพารามิเตอร์แต่ละชนิดให้ต่ำกว่ามาตรฐานได้ แต่กระบวนการเฟนตันประยุกต์ที่ใช้ผงเหล็กช็อคบลาสท์ร่วมกับตะกอนอะลูมิเนียมก็ให้ประสิทธิภาพในการบำบัด 3 พารามิเตอร์ดังกล่าวค่อนข้างสูง

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์

พารามิเตอร์	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด				มาตรฐาน ¹
		เฟนตัน Fe ⁰	ประสิทธิภาพ (%)	เฟนตัน Fe ⁰ + Al	ประสิทธิภาพ (%)	
pH	2.95 - 3.05	3.88 - 4.00			3.88 - 4.21	5.5-9.0
BOD (mg/l)	18400 ± 2799.29	11137 ± 1734.83	39.47	8640 ± 277.60	53.04	500 mg/l
TSS (mg/l)	3203 ± 193.28	2676 ± 60.85	16.44	803 ± 11.10	74.96	200 mg/l
TDS (mg/l)	17223 ± 6103.49	39652 ± 205.20	-	39030 ± 331.81	-	3,000 mg/l
Fe (mg/l)	19.12	261.09	-	233.5	-	10 mg/l
Al (mg/l)	131.00	107.00	-	159.00	-	ไม่กำหนด

¹ที่มา: ประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ที่ 76/2560 เรื่อง กำหนดมาตรฐานทั่วไปในการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรม

หมายเหตุ: เฟนตัน Fe⁰ = เฟนตันที่ใช้ผงเหล็กช็อตบลาสท์เพียงอย่างเดียว

เฟนตัน Fe⁰ + Al = เฟนตันที่ใช้ผงเหล็กช็อตบลาสท์ร่วมกับตะกอนอะลูมิเนียม

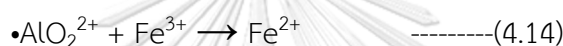
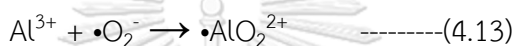
สำหรับค่าพีเอช เฟนตันทั้ง 2 แบบมีค่าพีเอชหลังบำบัดสูงขึ้น จากพีเอชเริ่มต้นที่อยู่ในช่วง 2.95-3.05 เป็น 3.88-4.21 ซึ่งพีเอชที่เพิ่มขึ้นนี้มีความสอดคล้องกับปฏิกิริยาเฟนตัน ดังสมการที่ (2.5) ที่ได้กล่าวถึงไปในบทที่ 2 หัวข้อ 2.1.2.1 ที่จะเกิด OH⁻ ขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาระหว่าง Fe²⁺ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งถือเป็นผลดีในด้านการลดค่าใช้จ่ายในการบำบัด เนื่องจากพีเอชหลังบำบัดที่สูงขึ้นทำให้ปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ในการปรับพีเอชเพื่อหยุดปฏิกิริยาเฟนตันน้อยลง



ส่วนพารามิเตอร์ปริมาณของแข็งละลายทั้งหมด รวมทั้งปริมาณโลหะอย่างเหล็ก และอะลูมิเนียม จะมีค่าสูงขึ้นหลังผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันทั้ง 2 แบบ โดยทำให้ปริมาณของแข็งละลายทั้งหมดสูงขึ้นจาก 17,223 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นมากกว่า 39,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการละลายของเหล็ก อะลูมิเนียม หรือโลหะอื่น ๆ จากผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกอนอะลูมิเนียม เนื่องจากการปรับพีเอชเป็นกรดก่อนทำการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันซึ่งค่าไอออนของโลหะละลายเหล่านี้จะส่งผลโดยตรงให้ปริมาณของแข็งละลายทั้งหมดมีค่าสูงขึ้น

สอดคล้องกับผลของปริมาณเหล็กที่เพิ่มขึ้นจากประมาณ 19 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นมากกว่า 230 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปริมาณเหล็กที่วัดได้นี้ มีความสอดคล้องกับปริมาณเหล็กในตะกอนหลังใช้งาน ที่คำนวณจากสัดส่วนขององค์ประกอบธาตุโดยน้ำหนักจากการวิเคราะห์ด้วย XRF ในหัวข้อ 4.1.3

ทั้งนี้ สำหรับปริมาณอะลูมิเนียม จัดเป็นโลหะที่พบในน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วก่อนบำบัดในปริมาณมาก (131 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งมีสาเหตุจากการใช้น้ำมันหล่อเย็นในกระบวนการตัดชิ้นส่วนยานยนต์ที่เป็นอะลูมิเนียม ทำให้เศษอะลูมิเนียมปะปนมากับน้ำมันหล่อเย็นที่ใช้แล้ว และละลายปนมากับตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง โดยปริมาณอะลูมิเนียมมีค่าลดลง หลังผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันที่ใช้ผงเหล็กช็อคบลาสท์เพียงอย่างเดียว คาดว่าไอออนของอะลูมิเนียมถูกใช้ไปเป็นตัวสนับสนุนปฏิกิริยาเฟนตัน ดังสมการ (4.13) และ (4.14) ที่ได้กล่าวถึงไปในหัวข้อ 4.2.5 และ/หรือตกตะกอนไปจากการปรับพีเอช



แต่สำหรับกระบวนการเฟนตันที่ใช้ผงเหล็กช็อคบลาสท์ร่วมกับตะกอนอะลูมิเนียม กลับทำให้ปริมาณอะลูมิเนียมหลังบำบัดเพิ่มขึ้น 159 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณที่เพิ่มขึ้นเกิดจากอะลูมิเนียมในตะกอนอะลูมิเนียมละลายออกมาหลังการบำบัด ถึงแม้ว่าอะลูมิเนียมจะถูกใช้เพื่อเป็นตัวสนับสนุนปฏิกิริยาเฟนตัน แต่เนื่องจากน้ำมันหล่อเย็นเริ่มต้นมีอะลูมิเนียมอยู่ก่อนแล้ว เมื่อเติมตะกอนอะลูมิเนียมเพิ่มเข้าไป ทำให้อะลูมิเนียมในระบบมีมากเกินไป จนเหลือจากการทำปฏิกิริยาหลังการบำบัด ซึ่งการที่มีอะลูมิเนียมมากเกินไป อาจเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของกระบวนการเฟนตันประยุกต์ที่เติมตะกอนอะลูมิเนียมเพิ่มเข้าไป ไม่มีความแตกต่างจากการใช้ผงเหล็กช็อคบลาสท์เพียงอย่างเดียว

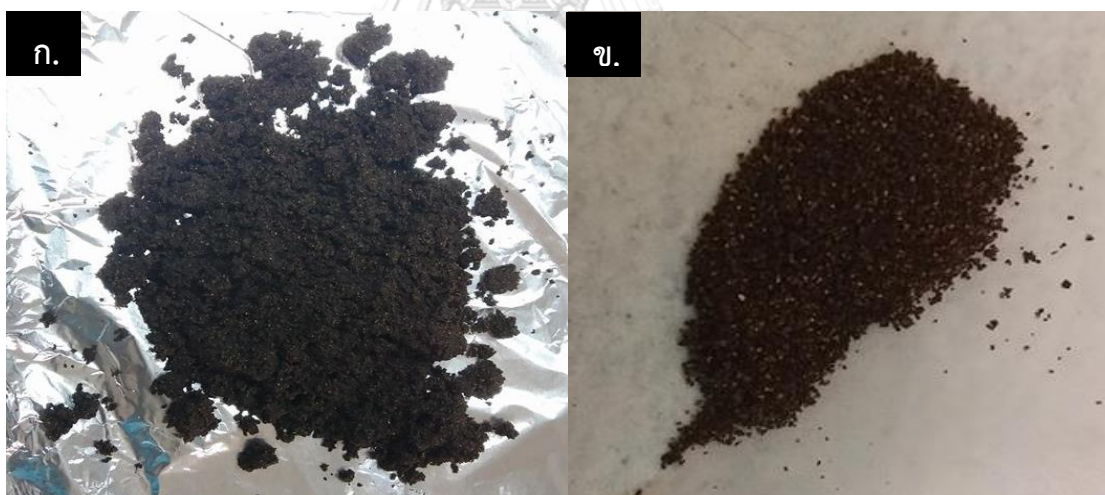
แม้กระบวนการเฟนตันที่ใช้ผงเหล็กช็อคบลาสท์ร่วมกับตะกอนอะลูมิเนียมมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีไม่ต่างจากการใช้ผงเหล็กช็อคบลาสท์เพียงอย่างเดียว แต่สามารถบำบัดพารามิเตอร์อื่น ๆ เช่น บีโอดี ของแข็งละลายทั้งหมดได้ดีกว่า และมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง อีกทั้งยังเป็นการหมุนเวียนของเสียจากกระบวนการผลิตกลับมาใช้ใหม่ จึงเลือกใช้กระบวนการเฟนตันที่ใช้ผงเหล็กช็อคบลาสท์ร่วมกับตะกอนอะลูมิเนียมเป็นกระบวนการเฟนตันประยุกต์ที่จะใช้สำหรับการศึกษาขั้นต่อไป

4.4 ศึกษาการนำตะกอนจากการบำบัดกลับมาใช้ซ้ำ

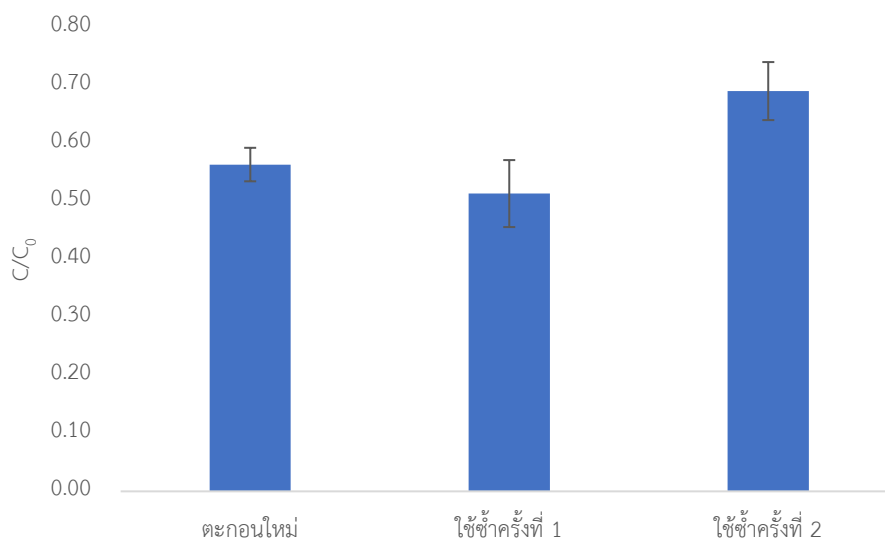
นำตะกอนจากการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์ในภาวะที่เหมาะสมกลับมาใช้ซ้ำ โดยนำตัวอย่างหลังบำบัดที่ปรับพีเอชเป็น 9 แล้ว มากรองด้วยกระดาษกรอง

whatman หมายเลข 42 เพื่อแยกเอาส่วนสารละลายออก นำส่วนตะกอนมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส และนำกลับมาใช้ซ้ำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันประยุกต์โดยไม่มีการเตรียมหรือปรับสภาพเพิ่มเติม ทำการศึกษาโดยใช้ภาวะที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2 และตรวจวัดประสิทธิภาพที่เปลี่ยนไปจากการใช้ซ้ำจากค่าซีโอดี เนื่องจากตะกอนที่ได้จากการใช้ซ้ำจะเป็นตะกอนผสมระหว่างผงเหล็กช็อคบลาสท์และตะกัณอะลูมิเนียม ในการทดลองจึงใช้ตะกอนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเฟนตันปริมาณ 3.5 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่เทียบเท่ากับน้ำหนักรวมของผงเหล็กช็อคบลาสท์ที่เหมาะสม (2.5 กรัม) และตะกัณอะลูมิเนียมที่เหมาะสม (1 กรัม) ลักษณะของตะกอนหลังการใช้งาน ดังรูปที่ 4.14 และผลการทดลองดังรูปที่ 4.15

จากผลการทดลองพบว่าตะกอนจากกระบวนการเฟนตันประยุกต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว 1 ครั้ง สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตันได้โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วใกล้เคียงกับตะกอนใหม่ โดยประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณร้อยละ 40-50 แต่เมื่อนำกลับมาใช้ซ้ำเป็นครั้งที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพลดลงอย่างเห็นได้ชัด เหลือเพียงประมาณร้อยละ 30 เท่านั้น

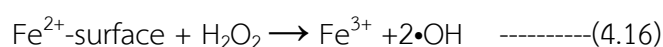


รูปที่ 4.14 ตะกอนหลังใช้งาน (ก.) ก่อนผ่านการอบ และ (ข.) หลังผ่านอบ



รูปที่ 4.15 การกำจัดซีโอติในรูป C/C₀ ของตะกอนเฟนตันหลังใช้ซ้ำครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

หากพิจารณาจากผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วย SEM และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย XRF ในหัวข้อ 4.1.2 และ 4.1.3 ตามลำดับ แม้ว่าตะกอนหลังใช้งานจะมีปริมาณเหล็กน้อยลง แต่การที่ยังสามารถรักษาประสิทธิภาพในการบำบัดไว้ได้ อาจมีสาเหตุจากสารปนเปื้อนบริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีการหลุดออกไประหว่างการทำปฏิกิริยาทำให้การสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวออกซิไดซ์เป็นไปได้ดีขึ้น เนื่องจากไม่มีสารปนเปื้อนมาขัดขวาง หรืออาจมีสาเหตุจากการรวมตัวของเหล็กบริเวณผิวตัวเร่งปฏิกิริยาหลังใช้งานในรูปของเหล็กออกไซด์ ซึ่งเหตุผลดังกล่าวมีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากสีของผิวตะกอนหลังการบำบัดที่ผ่านการอบแล้วดังรูปที่ 4.13 ข. เป็นสีน้ำตาลส้มที่เป็นสีของสนิมเหล็กหรือเหล็กออกไซด์ จึงทำให้ในการนำมาใช้ซ้ำเหล็กจากตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถละลายและปลดปล่อย Fe²⁺ ออกมาได้ง่ายขึ้น เมื่ออยู่ในภาวะกรดหรือสัมผัสกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือมีการทำปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous reaction) จากไอออนเหล็กบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรง ดังสมการที่ (4.15) และ (4.16) จึงทำให้ตะกอนหลังการใช้งานยังสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการเฟนตันได้ โดยที่ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่

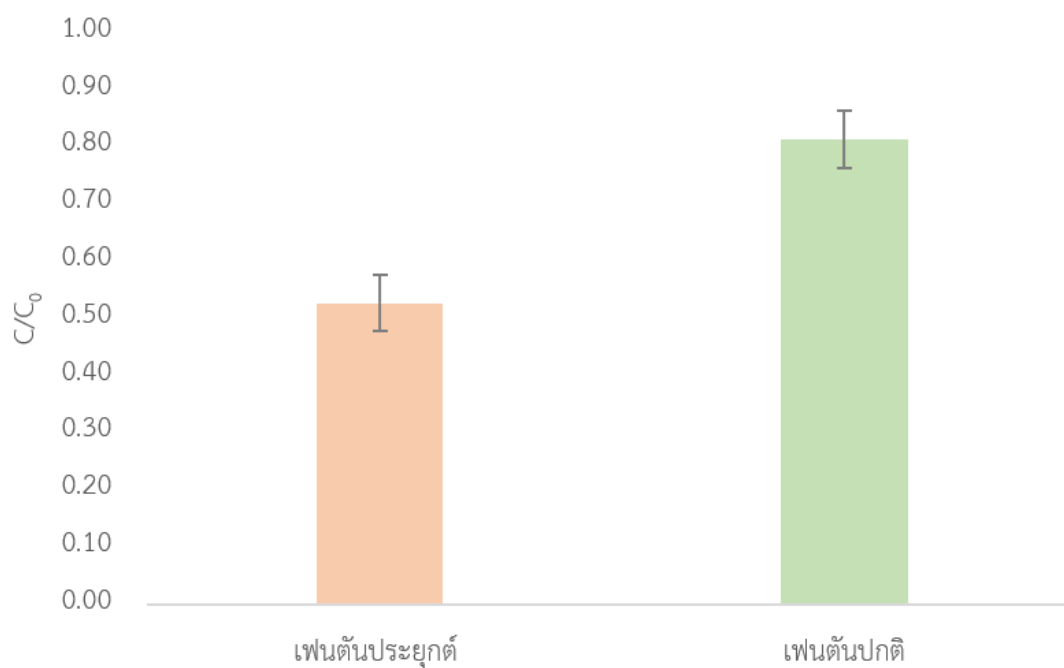


ทั้งนี้ ในการใช้ซ้ำครั้งที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีลดลง อาจมีสาเหตุมาจากทุกครั้งที่ผ่านการใช้งาน เหล็กประจุศูนย์ในตัวผงเหล็กซัลเฟอร์จะลดลงไป จากการกลายเป็น Fe^{2+} เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และจากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3 ที่พบว่ามีปริมาณเหล็กละลายในตัวอย่างหลังการบำบัดสูงถึงกว่า 230 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงมีความเป็นไปได้เหล็กในตะกอนหลังการใช้ซ้ำครั้งที่ 2 มีปริมาณคงเหลือน้อยมาก จนไม่เพียงพอต่อการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตัน เมื่อนำตัวอย่างหลังการบำบัดไปวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก พบว่าตัวอย่างที่มีการใช้ตะกอนซ้ำครั้งที่ 2 มีปริมาณเหล็กละลายลดลง เหลือเพียงประมาณ 60 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่านั้น โดยประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของตะกอนใช้ซ้ำครั้งที่ 2 อยู่ที่ประมาณร้อยละ 30 อาจเป็นผลมาจากเหล็กที่ยังหลงเหลืออยู่ หรือการดูดซับโดยสารอื่นในตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ซิลิกา หรือ อะลูมิเนียม

4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันประยุกต์

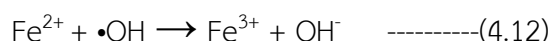
ทำการศึกษาการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันปกติที่ใช้เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ โดยใช้ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากับปริมาณไอออนของเหล็กที่ตรวจวัดได้จากการนำผงเหล็กซัลเฟอร์มาละลายเป็นเวลา 60 นาที ที่พีเอช 3 และเทียบจากสัดส่วนโดยน้ำหนักของเหล็กเป็นน้ำหนักของเฟอร์รัสซัลเฟตที่ต้องใช้ และใช้ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.2 นำประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ได้เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการบำบัดของกระบวนการเฟนตันประยุกต์ที่ใช้ผงเหล็กซัลเฟอร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตะกอนอะลูมิเนียมเป็นตัวสนับสนุนปฏิกิริยา

จากการศึกษาพบว่าหลังนำผงเหล็กซัลเฟอร์มาละลายที่พีเอช 3 เป็นเวลา 60 นาที ตรวจวัดปริมาณเหล็กเฉลี่ยได้ 250 มิลลิกรัม เทียบสัดส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับต้องใช้เฟอร์รัสซัลเฟต 1.24 กรัม นำน้ำหนักที่ได้มาใช้เป็นน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟนตัน เพื่อบำบัดซีโอดีของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีในรูป C/C_0 ของกระบวนการเฟนตันประยุกต์และเฟนตันปกติ

จากรูปที่ 4.16 พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการบำบัดซีโอดีในน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วของกระบวนการเฟนตันประยุกต์อยู่ที่ร้อยละ 47 ซึ่งมากกว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของกระบวนการเฟนตันปกติซึ่งอยู่ที่ร้อยละ 20 เท่านั้น อาจเป็นเพราะการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปของแข็งอย่างเหล็กประจุศูนย์ในผงเหล็กช็อตบลาสต์ จะค่อย ๆ ละลายและปลดปล่อย Fe^{2+} ออกมาทีละน้อยเท่าที่จำเป็น ทำให้ Fe^{2+} ที่ปล่อยออกมาส่วนใหญ่ได้ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อสร้างไฮดรอกซิลอิสระ ในขณะที่เฟนตันปกติจะมี Fe^{2+} จำนวนมากละลายอยู่ในระบบตั้งแต่แรก ทำให้ Fe^{2+} มีโอกาสถูกแย่งทำปฏิกิริยาจากสารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยเฉพาะการแย่งทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลอิสระดังสมการที่ (4.12) ที่ได้กล่าวถึงไปในหัวข้อ 4.2.4 ซึ่งการทำปฏิกิริยาในรูปแบบแรกอาจมีความเหมาะสมต่อการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วมากกว่า ทำให้กระบวนการเฟนตันประยุกต์ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าเฟนตันปกติ



ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของกระบวนการเฟนตันปกติในการทดลองนี้ ถือว่ามีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้กระบวนการเฟนตันปกติบำบัดน้ำมันหล่อเย็น เช่น งานวิจัยของชญญา เพิ่มชาติ (2556) อาจรรย์ ประเสริฐศรี (2557) และชนารัตน์ สุทธะนันท์ (2558) ที่มี

ประสิทธิภาพสูงสุดถึงร้อยละ 81, 97 และ 90 ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุที่ประสิทธิภาพมีความแตกต่างกันนี้ อาจเกิดจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวออกซิไดซ์ที่ใช้ในการทดลองยังไม่ใช่วิธีที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเฟนตันปกติ หรือความแตกต่างกันของน้ำเสีย ที่ในงานวิจัยใช้น้ำเสียเป็นน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วซึ่งเป็นน้ำเสียจริงที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมทำให้มีความเข้มข้นสูง ในขณะที่งานวิจัยดังกล่าวใช้น้ำมันหล่อเย็นที่เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่า

4.6 การประเมินต้นทุนในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์และเฟนตันปกติ

หลังจากทำการทดลองเปรียบเทียบการประสิทธิภาพในหัวข้อ 4.5 แล้ว จะทำการประเมินต้นทุนที่ใช้ในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วของกระบวนการเฟนตันประยุกต์และเฟนตันปกติ เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าในการใช้งานของทั้ง 2 กระบวนการ โดยจะทำการประเมินในด้านต้นทุนผันแปร (Variable Costs) ประกอบด้วยค่าสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวออกซิไดซ์ สารปรับพีเอช ตัวสนับสนุนปฏิกิริยา รวมถึงค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ ได้แก่ ค่าไฟฟ้าในการจ่ายน้ำเสียและค่าสารเคมีเข้าระบบบำบัด และค่าไฟฟ้าในการกวนของถังปฏิกิริยา คิดเป็นต่อปริมาตรน้ำ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยค่าสารเคมีที่ใช้ในการประเมินค่าใช้จ่ายจะเป็นราคาสารเคมีเกรดอุตสาหกรรมทั้งหมด ดังตารางที่ 4.4

จากตารางที่ 4.4 ค่าใช้จ่ายในแต่ละส่วนของกระบวนการเฟนตันประยุกต์และเฟนตันปกติมีความคล้ายคลึงกัน แต่ต่างกันตรงที่กระบวนการเฟนตันปกติ จะมีค่าใช้จ่ายจากเพอร์สัลเฟตที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเฟนตัน ในขณะที่กระบวนการเฟนตันประยุกต์มีการใช้ผงเหล็กช็อคบลาสท์ซึ่งเป็นของเสียอุตสาหกรรมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ไม่มีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายรวมในการบำบัดของกระบวนการเฟนตันประยุกต์น้อยกว่ากระบวนการเฟนตันปกติอยู่ประมาณ 340 บาทต่อการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว 1 ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 4.4 การประเมินต้นทุนในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์ และเฟนตันปกติ

รายการ	ค่าใช้จ่าย (บาท/ลบ.ม.)	
	เฟนตันประยุกต์	เฟนตันปกติ
ค่าสารเคมี¹		
1) ตัวเร่งปฏิกิริยาเฟนตัน (FeSO ₄) หรือ Fe ²⁺	ไม่มีค่าใช้จ่าย ²	340.29
2) ตัวออกซิไดซ์ (H ₂ O ₂)	375.70	375.70
3) ตัวสนับสนุนปฏิกิริยา (Al)	ไม่มีค่าใช้จ่าย ²	ไม่มีตัวสนับสนุนปฏิกิริยา
4) สารปรับพีเอช		
- H ₂ SO ₄	65.19	65.19
- NaOH	124.32	124.32
ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ		
1) ค่าไฟฟ้าในการจ่ายน้ำเข้าระบบ (ใช้ปั๊มจ่ายขนาด 111 วัตต์)	0.44	0.44
2) ค่าไฟฟ้าในการเดินระบบ (ใช้เครื่องกวนกำลัง 0.15 แรงม้า)	0.49	0.49
3) ค่าไฟฟ้าในการจ่ายสารเคมี (ใช้ปั๊มจ่ายกำลัง 10 วัตต์)	0.044 × 2 (ใช้ปั๊ม 2 ตัว สำหรับจ่าย สารปรับพีเอช)	0.044 × 3 (ใช้ปั๊ม 2 ตัว สำหรับจ่ายสาร ปรับพีเอช และ 1 ตัวสำหรับ จ่ายตัวเร่งปฏิกิริยา)
รวม	566.76	907.09

¹ไม่มีค่าใช้จ่ายเนื่องจากนำของเสียอุตสาหกรรมมาใช้แทนสารเคมี

²ราคาสารเคมีอ้างอิงจาก Henan Premtec Enterprise

เมื่อพิจารณาด้านค่าใช้จ่ายร่วมกับประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันทั้ง 2 แบบ จึงสามารถสรุปได้ว่า กระบวนการเฟนตันประยุกต์ที่มีการนำของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้ มีความคุ้มค่าที่จะนำมาใช้งานมากกว่ากระบวนการเฟนตันปกติ ทั้งในด้านประสิทธิภาพ (ดังผลการทดลองในหัวข้อ 4.5) และในด้านค่าใช้จ่าย สำหรับด้านประสิทธิภาพ แม้กระบวนการเฟนตันประยุกต์จะยังไม่สามารถบำบัดซีไอดีของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของการนิคมอุตสาหกรรมได้ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดเพียงประมาณร้อยละ 50

เท่านั้น แต่หากพิจารณาถึงปริมาณซีโอดีที่สามารถกำจัดไปได้ ถือว่ากระบวนการเฟนตันประยุกต์สามารถกำจัดซีโอดีลงได้ในระดับที่น่าพอใจ โดยจากค่าซีโอดีเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วเฉลี่ยประมาณ 100,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังบำบัดถูกลดลงเหลือประมาณ 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่านั้น แสดงว่ากระบวนการเฟนตันประยุกต์สามารถกำจัดซีโอดีไปได้มากถึง 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตรในเวลาเพียง 60 นาที ส่วนในด้านค่าใช้จ่าย นอกจากช่วยลดค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีได้แล้ว กระบวนการเฟนตันประยุกต์ยังมีข้อดี คือ ช่วยในการหมุนเวียนของเสียกลับมาใช้ใหม่ ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายจากการส่งของเสียอุตสาหกรรมไปกำจัดลงได้บางส่วน



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลจากการศึกษาการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นด้วยกระบวนการเฟ้นต้นประยุกต์โดยใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟ้นต้นประยุกต์ที่นำผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอะลูมิเนียมเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มาประยุกต์ใช้ คือ เวลาในการบำบัด 60 นาที พีเอชเริ่มต้น 3 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 มิลลิลิตร ปริมาณผงเหล็กช็อตบลาสท์ 2.5 กรัม และปริมาณตะกรันอะลูมิเนียม 1 กรัม ต่อน้ำมันหล่อเย็น 50 มิลลิลิตร
2. ที่ภาวะเหมาะสม กระบวนการเฟ้นต้นประยุกต์สามารถบำบัดซีโอดีในน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วได้เฉลี่ยร้อยละ 47.31 และสามารถบำบัดบีโอดี และของแข็งแขวนลอยทั้งหมดได้เฉลี่ยร้อยละ 53.34 และ 74.96 ตามลำดับ แต่จะทำให้ปริมาณของแข็งละลายทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 127 และทำให้พีเอชหลังบำบัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย
3. ตะกอนจากการบำบัดของกระบวนการเฟ้นต้นประยุกต์สามารถนำมาใช้ซ้ำได้อีก 1 ครั้ง โดยที่ประสิทธิภาพไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ
4. ที่ภาวะเหมาะสมกระบวนการเฟ้นต้นประยุกต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีในน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วมากกว่ากระบวนการเฟ้นต้นปกติเฉลี่ยร้อยละ 28.00
5. กระบวนการเฟ้นต้นประยุกต์มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำกว่ากระบวนการเฟ้นต้นปกติอยู่ 340 บาทโดยประมาณ ต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

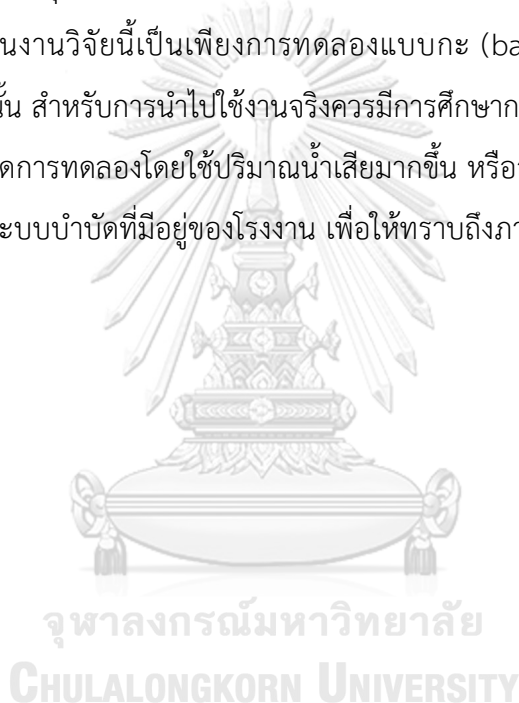
5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการทดลองครั้งนี้ การใช้กระบวนการเฟ้นต้นประยุกต์เพียงอย่างเดียว ยังไม่สามารถบำบัดซีโอดีของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของการนิคมอุตสาหกรรมได้ (750 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในการใช้งานจริงจึงควรมีระบบบำบัดอีกระบบหนึ่ง ที่ใช้งานร่วมกับการบำบัดด้วยเฟ้นต้นเพื่อกำจัดสารมลพิษที่ยังหลงเหลือจากการบำบัดด้วยเฟ้นต้น เช่น กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) เนื่องจากกระบวนการเฟ้นต้นประยุกต์สามารถกำจัดสารอินทรีย์ใน

น้ำมันหล่อเย็นไปได้บางส่วน (อ้างอิงจากค่าซีไอดีที่ลดลงกว่า 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทำให้ระบบที่ใช้เพื่อทำการบำบัดต่อจากกระบวนการเฟนตันไม่ต้องรับภาระหนักจนเกินไป ซึ่งอาจทำให้สามารถบำบัดได้ประสิทธิภาพมากขึ้น หรืออาจมีปรับสภาพน้ำเสียก่อนที่จะเข้าสู่ระบบเฟนตัน เช่น การกรอง การตกตะกอน หรือการเติมอากาศ ซึ่งการปรับสภาพน้ำเบื้องต้นอาจช่วยให้กระบวนการเฟนตันทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในอนาคตหากมีการนำผลการทดลองไปศึกษาต่อ อาจเพิ่มการศึกษาในด้านสัดส่วน ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวออกซิไดซ์ หรือปรับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว เพื่อให้ได้ภาวะที่เหมาะสมที่ครอบคลุมยิ่งขึ้น ซึ่งอาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้มากขึ้นได้

การทดลองในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการทดลองแบบกะ (batch experiment) ซึ่งเป็นการทดลองขนาดเล็กเท่านั้น สำหรับการนำไปใช้งานจริงควรมีการศึกษาการจำลองถึงปฏิกิริยา (reactor) เพิ่มเติม และเพิ่มขนาดการทดลองโดยใช้ปริมาณน้ำเสียมากขึ้น หรืออาจมีการศึกษาความเหมาะสมในการใช้งานร่วมกับระบบบำบัดที่มีอยู่ของโรงงาน เพื่อให้ทราบถึงภาวะและข้อจำกัดในการนำไปใช้จริงมากขึ้น



บรรณานุกรม

- APHA., AWWA. and WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22nd. Washiton, DC: American Public Health Association, 2012.
- Azmi, N. H. M., Ayodele, O. B., Vadivelu, V. M., Asif, M. and Hameed, B. H. Fe-modified local clay as effective and reusable heterogeneous photo-Fenton catalyst for the decolorization of Acid Green 25. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 45 (2014): 1459-1467.
- Bai, J., Liu, Y., Yin, X., Duan, H. and Ma, J. Efficient removal of nitrobenzene by Fenton-like process with Co-Fe layered double hydroxide. Applied Surface Science 416 (2017): 45-50.
- Barbusinski, K. Henry John Horstman Fenton-shot biography and brief history of Fenton reagent discovery. Chemia Dydaktyka Ekologia 14 (2009): 101–105.
- Bojana, G., Donald, M. C. and Michel, D. The $H_2O_2+OH \rightarrow HO_2+H_2O$ reaction in aqueous solution from a chargedependent continuum model of solvation. Journal of Chemical Physics 129 (2008):
- Chen, Y., Lin, J. and Chen, Z. Remediation of water contaminated with diesel oil using a coupled process: Biological degradation followed by heterogeneous Fenton-like oxidation. Chemosphere 183 (2017): 286-293.
- Das, B. R., Dash, B., Tripathy, B. C., Bhattacharya, I. N. and Das, S. C. Production of η -alumina from waste aluminium dross. Minerals Engineering 20 (2007): 252-258.
- Dash, B., Das, B. R., Tripathy, B. C., Bhattacharya, I. N. and Das, S. C. Acid dissolution of alumina from waste aluminium dross. Hydrometallurgy 92 (2008): 48-53.
- Deng, Y. and Zhao, R. Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. Current Pollution Reports 1 (2015): 167-176.
- Devi, L. G., Srinivas, M. and ArunaKumari, M. L. Heterogeneous advanced photo- Fenton process using peroxymonosulfate and peroxydisulfate in presence of zero valent metallic iron: A comparative study with hydrogen peroxide photo-Fenton process. Journal of Water Process Engineering 13 (2016): 117-126.
- Esplugas, S., Giménez, J., Contreras, S., Pascual, E. and Rodríguez, M. Comparison of

- different advanced oxidation processes for phenol degradation. Water Research 36 (2002): 1034-1042.
- Fischbacher, A., von Sonntag, C. and Schmidt, T. C. Hydroxyl radical yields in the Fenton process under various pH, ligand concentrations and hydrogen peroxide/Fe(II) ratios. Chemosphere 182 (2017): 738-744.
- George, T., Franklin, L. B. and David, S. H. Wastewater engineering: treatment and reuse. Boston McGraw-Hill, 2003.
- Ghime, D. and Ghosh, P. Heterogeneous Fenton degradation of oxalic acid by using silica supported iron catalysts prepared from raw rice husk. Journal of Water Process Engineering 19 (2017): 156-163.
- Glaze, W. H. Drinking-water treatment with ozone. Environmental Science & Technology 21 (1987): 224-230.
- Glaze, W., Kang, J.-W. and H. Chapin, D. The Chemistry of Water Treatment Processes Involving Ozone, Hydrogen Peroxide and Ultraviolet Radiation. 9, 1987.
- Gomathi, D. L., Girish, K. S., Mohan, R. K. and Munikrishnappa, C. Photo degradation of Methyl Orange an azo dye by Advanced Fenton Process using zero valent metallic iron: Influence of various reaction parameters and its degradation mechanism. Journal of Hazardous Materials 164 (2009): 459-467.
- Harada, T., Yatagai, T. and Kawase, Y. Hydroxyl radical generation linked with iron dissolution and dissolved oxygen consumption in zero-valent iron wastewater treatment process. Chemical Engineering Journal 303 (2016): 611-620.
- Huang, T., Zhang, G., Zhang, N., Ye, J. and Lu, P. Fe⁰-H₂O₂ for advanced treatment of citric acid wastewater: Detailed study of catalyst after several times use. Chemical Engineering Journal 336 (2018): 233-240.
- International Aluminium Institute. Global Aluminium Recycling: A Cornerstone of Sustainable Development. London Global Aluminium Recycling Committee, International Aluminium Institute, 2009.
- Izadifard, M., Achari, G. and Langford, C. H. Degradation of sulfolane using activated persulfate with UV and UV-Ozone. Water Research 125 (2017): 325-331.
- Jiang, C. et al. A new insight into Fenton and Fenton-like processes for water treatment: Part II. Influence of organic compounds on Fe(III)/Fe(II) interconversion and the

- course of reactions. Journal of Hazardous Materials 250-251 (2013): 76-81.
- Kang, Y. W., Cho, M.-J. and Hwang, K.-Y. Correction of hydrogen peroxide interference on standard chemical oxygen demand test. Water Research 33 (1999): 1247-1251.
- Kirk, O. Encyclopedia of Chemical Technology. 24, the University of California: Wiley, 1984.
- Kuo, W. G. Decolorizing dye wastewater with Fenton's reagent. Water Research 26 (1992): 881-886.
- Liu, Y., Zha, S., Rajarathnam, D. and Chen, Z. Divalent cations impacting on Fenton-like oxidation of amoxicillin using nZVI as a heterogeneous catalyst. Separation and Purification Technology 188 (2017): 548-552.
- Lu, M., Zhang, Z., Qiao, W., Guan, Y., Xiao, M. and Peng, C. Removal of residual contaminants in petroleum-contaminated soil by Fenton-like oxidation. Journal of Hazardous Materials 179 (2010): 604-611.
- Mahinroosta, M. and Allahverdi, A. Hazardous aluminum dross characterization and recycling strategies: A critical review. Journal of Environmental Management 223 (2018): 452-468.
- Mandal, T., Maity, S., Dasgupta, D. and Datta, S. Advanced oxidation process and biotreatment: Their roles in combined industrial wastewater treatment. Desalination 250 (2010): 87-94.
- Martins, R. C., Lopes, D. V., Quina, M. J. and Quinta-Ferreira, R. M. Treatment improvement of urban landfill leachates by Fenton-like process using ZVI. Chemical Engineering Journal 192 (2012): 219-225.
- Masarwa, A., Rachmilovich-Calis, S., Meyerstein, N. and Meyerstein, D. Oxidation of organic substrates in aerated aqueous solutions by the Fenton reagent. Coordination Chemistry Reviews 249 (2005): 1937-1943.
- Punzi, M., Mattiasson, B. and Jonstrup, M. Treatment of synthetic textile wastewater by homogeneous and heterogeneous photo-Fenton oxidation. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 248 (2012): 30-35.
- Ruipérez, F., Mujika, J. I., Ugalde, J. M., Exley, C. and Lopez, X. Pro-oxidant activity of aluminum: Promoting the Fenton reaction by reducing Fe(III) to Fe(II). Journal of

- Inorganic Biochemistry 117 (2012): 118-123.
- Santos-Juanes, L., García Einschlag, F. S., Amat, A. M. and Arques, A. Combining ZVI reduction with photo-Fenton process for the removal of persistent pollutants. Chemical Engineering Journal 310 (2017): 484-490.
- Santos, A., Rodríguez, S., Pardo, F. and Romero, A. Use of Fenton reagent combined with humic acids for the removal of PFOA from contaminated water. Science of The Total Environment 563-564 (2016): 657-663.
- Seo, D. C. et al. Treatment of non-biodegradable cutting oil wastewater by ultrasonication-Fenton oxidation process. Journal of the International Association on Water Pollution Research 55 (2007): 251-259.
- Shimizu, A., Tokumura, M., Nakajima, K. and Kawase, Y. Phenol removal using zero-valent iron powder in the presence of dissolved oxygen: Roles of decomposition by the Fenton reaction and adsorption/precipitation. Journal of Hazardous Materials 201-202 (2012): 60-67.
- Sultana, U. K., Gulshan, F., Gafur, M. A. and Kurny, A. S. W. Kinetics of Recovery of Alumina from Aluminium Casting Waste through Fusion with Sodium Hydroxide. American Journal of Materials Engineering and Technology 1 (2013): 30-34.
- Talinli, I. and Anderson, G. K. Interference of hydrogen peroxide on the standard cod test. Water Research 26 (1992): 107-110.
- Tian, X. et al. Heterogeneous Fenton-like degradation of ofloxacin over a wide pH range of 3.6–10.0 over modified mesoporous iron oxide. Chemical Engineering Journal 328 (2017): 397-405.
- Tu, Y., Tian, S., Kong, L. and Xiong, Y. Co-catalytic effect of sewage sludge-derived char as the support of Fenton-like catalyst. Chemical Engineering Journal 185-186 (2012): 44-51.
- United Nation, Newyork and Geneva. Transport of dangerous goods. United Nation: 2009.
- Wang, N., Zheng, T., Zhang, G. and Wang, P. A review on Fenton-like processes for organic wastewater treatment. Journal of Environmental Chemical Engineering 4 (2016): 762-787.
- Wang, P. et al. Preparation and performance of Fe₃O₄@hydrophilic graphene

- composites with excellent Photo-Fenton activity for photocatalysis. Materials Letters 183 (2016): 61-64.
- Wei, X., Wu, H. and Sun, F. Magnetite/Fe-Al-montmorillonite as a Fenton catalyst with efficient degradation of phenol. Journal of Colloid and Interface Science 504 (2017): 611-619.
- Xia, Q., Jiang, Z., Wang, J. and Yao, Z. A facile preparation of hierarchical dendritic zero-valent iron for Fenton-like degradation of phenol. Catalysis Communications 100 (2017): 57-61.
- Yehia, F. Z., Eshaq, G. and ElMetwally, A. E. Enhancement of the working pH range for degradation of p-nitrophenol using Fe²⁺-aspartate and Fe²⁺-glutamate complexes as modified Fenton reagents. Egyptian Journal of Petroleum 25 (2016): 239-245.
- Yoon, I.-H. et al. Kinetic study for phenol degradation by ZVI-assisted Fenton reaction and related iron corrosion investigated by X-ray absorption spectroscopy. Chemosphere 145 (2016): 409-415.
- Zhou, H., Shen, Y., Lv, P., Wang, J. and Li, P. Degradation pathway and kinetics of 1-alkyl-3-methylimidazolium bromides oxidation in an ultrasonic nanoscale zero-valent iron/hydrogen peroxide system. Journal of Hazardous Materials 284 (2015): 241-252.
- Zhou, H. and Smith, D. W. Advanced technologies in water and wastewater treatment. Journal of Environmental Engineering and Science 1 (2002): 247-264.
- Zhuang, H., Han, H. and Shan, S. Treatment of British Gas/Lurgi coal gasification wastewater using a novel integration of heterogeneous Fenton oxidation on coal fly ash/sewage sludge carbon composite and anaerobic biological process. Fuel 178 (2016): 155-162.
- เสริมพงศ์ สายเรียม. การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนอะนิลีนด้วยกระบวนการเฟนตันไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. กฎกระทรวง (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535. [ออนไลน์]. 2535. แหล่งที่มา: http://www2.diw.go.th/mac/form/A2_FORM/DOC_%20A/Law_industry35.pdf [15

กันยายน 2560]

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. ข้อมูลโรงงานที่ได้รับอนุญาตประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรมตาม

พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535. [ออนไลน์]. 2560. แหล่งที่มา:

<http://www.diw.go.th/hawk/content.php?mode=dataservice> [15 กันยายน 2560]

กรมควบคุมมลพิษ. คู่มือการประเมินการปลดปล่อยและเคลื่อนย้ายมลพิษ สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

ยานยนต์ ขึ้นส่วนและอะไหล่ยานยนต์ ในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2556.

กรมควบคุมมลพิษ. สถานการณ์มลพิษประเทศไทย ปี 2559. [ออนไลน์]. 2559. แหล่งที่มา:

http://www.pcd.go.th/public/Publications/print_report.cfm?task=pcdreport-59final [27 กันยายน 2560]

กระทรวงอุตสาหกรรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

พ.ศ. 2548. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา:

<http://www2.diw.go.th/PIC/download/waste/waste11.pdf>

กฤษฎาพร สีโต. โฟโตเพนต์และ TiO₂ – โฟโตคะตะไลติกเดครีเอชันของสีรีแอคทีฟเรด 141. .

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.

การนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย. ประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย เรื่อง กำหนด

มาตรฐานทั่วไปในการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรม. .

[ออนไลน์]. 2560. แหล่งที่มา: ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2560/E/180/30.PDF

จิตราภา มงคลนาวรัตน์. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า :

ลักษณะถึงปฏิกรณ์ และ ความเข้มข้นน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สหสาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.

ชญัญญา เพิ่มชาติ. การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการเพนต์และเพนต์เสมือน.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.

ชนารัตน์ สุทธะนันท์. การเปรียบเทียบประเภทของกระบวนการอิเล็กโตรเพนต์ในการบำบัดน้ำเสีย

ปนเปื้อนน้ำมันตัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.

ณัชชาธิ์ ธนกรจิตติพัฒน์. การบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหารด้วยกระบวนการเพนต์. วิทยานิพนธ์

ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร

- อาหาร และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2555.
- ณัฐพล สุนทรวิภาต. การลดความเป็นพิษในน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2547.
- ณัฐวิญญู ชวลิตพรศิยา. การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดและแยกอนุภาคน้ำมันจากน้ำเสียปนเปื้อน
น้ำมันตัดโดยกระบวนการโคอะเลสเซอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาการ
จัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- ณิชชาบุล บุญวรโชติ. การศึกษาการนำน้ำมันหล่อเย็นที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และ
ปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- ดิษยพงศ์ หกสุวรรณ. การบำบัดผองตะกอนไขมันและไขมันโดยการทำปฏิกิริยากับน้ำ.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- ทักษิณา โพธิ์ใหญ่. การเพิ่มประสิทธิภาพการแยกและบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการ
ร่วมระหว่าง อิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์และอัลตราฟิลเตรชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญา
โทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2557.
- ธันนทร์ เฉลิมสินสุวรรณ. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและโซ
โนเฟนตัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิต
วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- นุสรรา โรจน์วิลาวัลย์. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและโฟโตอิเล็กโท
รเฟนตัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- ปาริฉัตร ชิวปรีชา. การย่อยสลายอะนิลีนด้วยกระบวนการเฟนตันและอิเล็กโตรเฟนตัน. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี, 2546.
- เพชร โพธิ์ทอง. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้
ลอยตัวด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ,
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

- มณฑา ประดิษฐุฑา. การปรับปรุงกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีของโรงงานผลิตเคมีภัณฑ์โดยเฟนตันออกซิเดชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.
- วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล. การตรวจหาและการบำบัดสารอินทรีย์อันตรายในน้ำเสียจากโรงงานยางพาราทางภาคใต้ของประเทศไทยด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- วิภาดา วิศาลศิริรักษ์. การกำจัดลิกนินในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเฟนตันและเฟนตันแบบประยุกต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- วุฒิ วิพันธ์พงษ์. การใช้สารเคมีเฟนตันกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- ศุภย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. รู้จักอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง. [ออนไลน์]. 2559. แหล่งที่มา: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/301_11.pdf [13 ตุลาคม 2561 2561]
- สงกรานต์ คำศรี. การกำจัด สีและซีไอทีในน้ำชะมูลฝอยโดยการออกซิไดซ์ด้วยสารละลายเฟนตัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2546.
- อาจารย์ ประเสริฐศรี. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟนตันในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

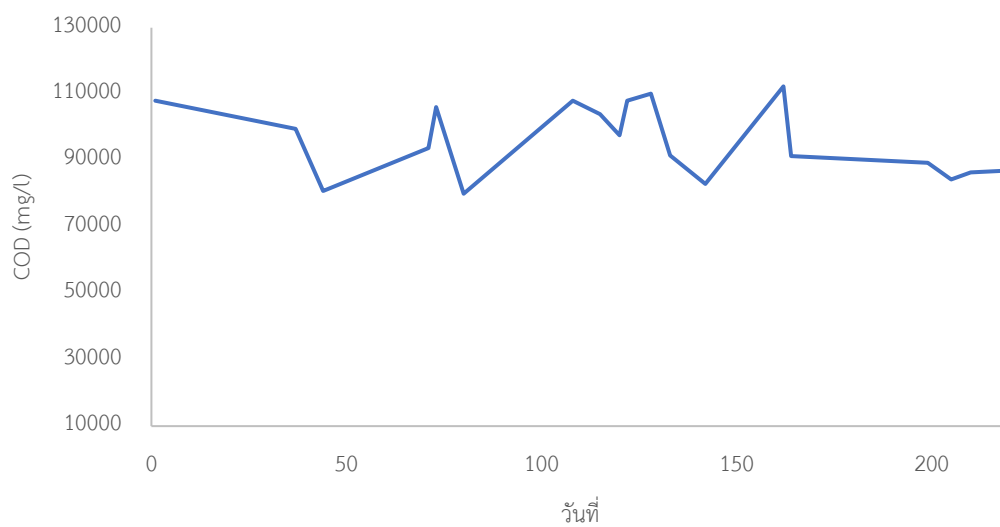
ข้อมูลพารามิเตอร์ของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วก่อนการบำบัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ก.1 ค่าซีโอดีเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วตลอดการศึกษา

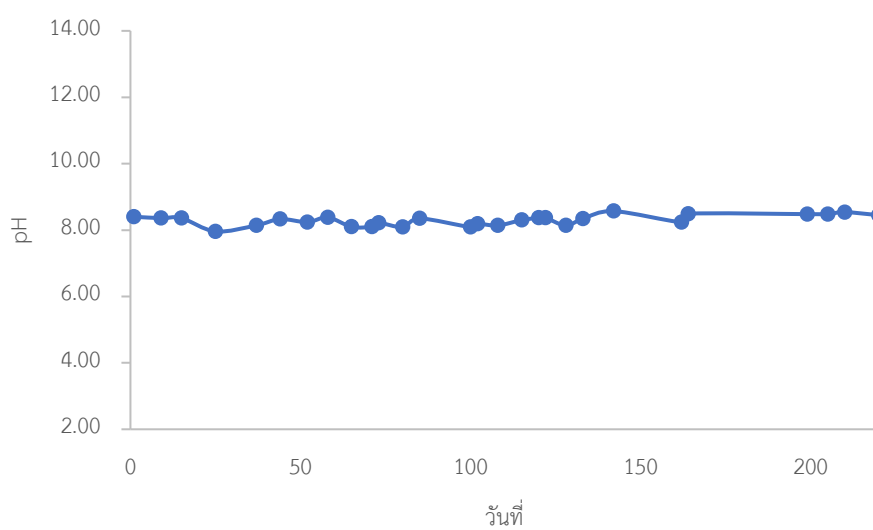
วันที่	COD เริ่มต้น (mg/l)
1	108,000
37	99,500
44	81,000
71	94,000
73	106,000
80	80,000
108	108,000
115	104,000
120	97,500
122	108,000
128	110,000
133	91,500
142	83,000
162	112,500
164	91,500
199	89,500
205	84,500
210	86,500
220	87,000



รูปที่ ก.1 การเปลี่ยนแปลงของซีโอดีในน้ำมันหล่อเย็นตลอดการศึกษา

ตารางที่ ก.2 พีเอชเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วตลอดการศึกษา

จำนวนวัน	pH เริ่มต้น
1	8.40
9	8.36
15	8.36
25	7.96
37	8.14
44	8.33
52	8.24
58	8.38
65	8.10
71	8.10
73	8.22
80	8.09
85	8.35
100	8.09
102	8.19
108	8.14
115	8.30
120	8.37
122	8.37
128	8.14
133	8.34
142	8.57
162	8.24
164	8.49
199	8.48
205	8.48
210	8.54
220	8.45



รูปที่ ก.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำมันหล่อเย็นตลอดการศึกษา





ตาราง ข.1 ข้อมูลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการ
เฟนตันประยุกต์ ที่พีเอชเริ่มต้น 3

เวลา (นาที)	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 มล.		ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.5 มล.	
	ซีโอดีเฉลี่ย (มก./ ล.)	C/C ₀ เฉลี่ย	ซีโอดีเฉลี่ย (มก./ ล.)	C/C ₀ เฉลี่ย
0	90,500	1.00	108,000	1.00
5	79,000	0.87	55,000	0.51
10	59,500	0.66	59,500	0.55
15	64,500	0.71	67,000	0.62
20	45,500	0.50	84,000	0.78
25	49,500	0.55	68,000	0.63
30	47,000	0.52	54,000	0.50
60	48,000	0.53	61,500	0.57
90	47,000	0.52	60,500	0.56
120	49,500	0.55	59,500	0.55
180	52,500	0.58	58,500	0.54

ตาราง ข.2 ข้อมูลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการ
เฟนตันประยุกต์ ที่พีเอชเริ่มต้น 5

เวลา (นาที)	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 มล.		ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.5 มล.	
	ซีโอดีเฉลี่ย (มก./ ล.)	C/C ₀ เฉลี่ย	ซีโอดีเฉลี่ย (มก./ ล.)	C/C ₀ เฉลี่ย
0	81,500	1.00	81,500	1.00
5	86,500	1.06	83,000	1.02
10	71,500	0.88	83,000	1.02
15	58,000	0.71	69,500	0.85
20	67,000	0.82	71,000	0.87
25	76,500	0.94	77,500	0.95
30	69,500	0.85	67,000	0.82
60	67,500	0.83	66,000	0.81
90	68,500	0.84	71,000	0.87
120	67,000	0.82	75,000	0.92
180	64,500	0.79	72,500	0.89

ตาราง ข.3 ข้อมูลการทดลองหาพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วย
กระบวนการเฟนตันประยุกต์

พีเอชเริ่มต้น	ซีโอดีเริ่มต้นเฉลี่ย (มก./ล.)	ซีโอดีหลังบำบัดเฉลี่ย (มก./ล.)	C/C ₀ เฉลี่ย
3	78,500	37,500	0.48
4		49,500	0.63
5		66,500	0.85

ตาราง ข.4 ข้อมูลการทดลองหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟ้นต้นประยุกต์

ปริมาณไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ (มล.)	ซีโอดีเริ่มต้น เฉลี่ย (มก./ล.)	การทดลองชุดเฟ้นต้น		การทดลองชุดควบคุม	
		ซีโอดีหลัง บำบัดเฉลี่ย (มก./ล.)	C/C ₀ เฉลี่ย	ซีโอดีหลัง บำบัดเฉลี่ย (มก./ล.)	C/C ₀ เฉลี่ย
0.5	94,000	56,400	0.60	69,500	0.74
0.75		57,500	0.61	68,500	0.73
1		45,000	0.48	77,000	0.82
1.25		49,000	0.52	77,000	0.82
1.5		53,500	0.57	75,000	0.80

ตาราง ข.5 ข้อมูลการทดลองหาปริมาณผงเหล็กช็อดบลาสท์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟ้นต้นประยุกต์

ปริมาณผงเหล็ก ช็อดบลาสท์ (กรัม)	ซีโอดีเริ่มต้น เฉลี่ย (มก./ล.)	การทดลองชุดเฟ้นต้น		การทดลองชุดควบคุม	
		ซีโอดีหลัง บำบัดเฉลี่ย (มก./ล.)	C/C ₀ เฉลี่ย	ซีโอดีหลัง บำบัดเฉลี่ย (มก./ล.)	C/C ₀ เฉลี่ย
0.25	99,500	84,500	0.85	102,500	1.03
0.5		82,500	0.83	98,500	0.99
1		54,500	0.55	94,500	0.95
1.5		84,500	0.85	100,500	1.01
2		68,500	0.69	107,500	1.08
2.5	109,080	58,000	0.53	106,000	0.97
3		71,000	0.65	110,000	1.01
3.5		79,500	0.73	106,000	0.97

ตาราง ข.6 ข้อมูลการทดลองหาปริมาณตะกอนอะลูมิเนียมที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์

ปริมาณตะกอน อะลูมิเนียม (กรัม)	ซีโอดีเริ่มต้น เฉลี่ย (มก./ล.)	การทดลองชุดเฟนตัน		การทดลองชุดควบคุม (ตะกอนอะลูมิเนียม)	
		ซีโอดีหลัง บำบัดเฉลี่ย (มก./ล.)	C/C ₀ เฉลี่ย	ซีโอดีหลัง บำบัดเฉลี่ย (มก./ล.)	C/C ₀ เฉลี่ย
0.25	107,500	69,500	0.72	114,500	1.04
0.5		69,000	0.68	118,500	1.06
1		54,000	0.55	85,500	1.03
1.5		83,500	0.75	73,500	0.74
2		84,000	0.79	82,000	0.75
ปริมาณตะกอน อะลูมิเนียม (กรัม)	ซีโอดีเริ่มต้น เฉลี่ย (มก./ล.)	การทดลองชุดควบคุม (ตะกอนอะลูมิเนียม+ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์)		การทดลองชุดควบคุม (ตะกอนอะลูมิเนียม+ ผงเหล็กช็อตบลาสท์)	
		ซีโอดีหลัง บำบัดเฉลี่ย (มก./ล.)	C/C ₀ เฉลี่ย	ซีโอดีหลัง บำบัดเฉลี่ย (มก./ล.)	C/C ₀ เฉลี่ย
0.25	107,500	93,500	0.83	129,500	1.15
0.5		82,000	0.72	112,500	0.98
1		86,500	0.79	95,000	0.87
1.5		84,000	0.75	84,000	0.76
2		90,500	0.81	84,000	0.75

ตาราง ข.7 ข้อมูลการทดลองการนำตะกอนกลับมาใช้ซ้ำ

ตะกอนใช้ครั้งที่	ซีโอดีเริ่มต้นเฉลี่ย (มก./ ล.)	ซีโอดีหลังบำบัดเฉลี่ย (มก./ ล.)	C/C ₀ เฉลี่ย
1	87,000	47,600	0.56
2		43,520	0.51
3		61,333	0.69

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ปรีชาพัฒน์ พัวสุวรรณ
วัน เดือน ปี เกิด	17 พฤศจิกายน 2535
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลหัวเฉียว กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปัจจุบันศึกษาปริญญาโท หลักสูตรสหสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจาก ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อ พ.ศ. 2558
ที่อยู่ปัจจุบัน	303/6 ซอยเสือใหญ่อุทิศ ถนนรัชดาภิเษก แขวงจันทระเกษม เขตจตุจักร กรุงเทพฯ
ผลงานตีพิมพ์	การประชุมวิชาการครั้งที่ 3 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา เรื่อง "การบำบัดน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการเฟนตันประยุกต์โดย ใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์" วันที่ 30 สิงหาคม พ.ศ. 2561