



การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง
ด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน

สุกัญญา กาญจนธำรง

การค้นคว้าอิสระเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



WASTEWATER TREATMENT FROM TAPIOCA STARCH
WASTEWATER BY FENTON PROCESS
COMBINED WITH COAGULATION

SUKANYA KANJANATAMRONG

AN INDEPENDENT STUDY SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
MAJOR IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2014
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY



ใบรับรองการค้นคว้าอิสระ
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการเฟนตัน
ร่วมกับการสร้างตะกอน

ผู้วิจัย นางสาวสุกัญญา กาญจนธำรง

คณะกรรมการสอบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ สอนองราชกูร์	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพوخ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิกา รัตนพงศ์เสขา	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

Chakkrit

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพوخ)

[Signature]

(รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

[Signature]

(รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2557

กิตติกรรมประกาศ

งานค้นคว้าอิสระฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ ที่สละเวลาในการ ตรวจและปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ให้คำปรึกษาข้อคิดเห็น แนะนำแนวทางการดำเนินงาน ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งในการทำการค้นคว้าอิสระครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิกา รัตนพงศ์เสลา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ สมองราษฎร์ อาจารย์กรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ ที่กรุณาสละเวลาช่วยเหลือในการให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็น ในการแก้ไขการค้นคว้าอิสระ

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ ให้อุปกรณ์ที่ทำงานวิจัย และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่คอยช่วยเหลือ แนะนำวิธีการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลองอย่างดียิ่ง และขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ถ่ายทอดวิชาความรู้ต่าง ๆ ให้ ความช่วยเหลือ อบรมสั่งสอน ให้ความช่วยเหลือในระหว่างทำการวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนในทุกๆด้าน ทุกๆ เรื่องของชีวิต ให้ประสบความสำเร็จในด้านการเรียน การใช้ชีวิต ให้ความรัก คอยเตือนให้มีสติ ตั้งใจในการทำงาน และเป็น กำลังใจที่สำคัญ จนสามารถทำทุกสิ่งทุกอย่างได้ตามที่มุ่งหวัง ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ นักศึกษา ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่คอย ช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำงานวิจัยที่ดีตลอดมา และสุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณหลักสูตร บัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

สุกัญญา กาญจนธำรง

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

- ชื่อเรื่อง : การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับ การสร้างตะกอน
- ผู้วิจัย : สุกัญญา กาญจนธำรง
- ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
- สาขาวิชา : วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
- อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพูช
- คำสำคัญ : การสร้างตะกอน, แคลเซียมออกไซด์, เปลือกไข่เผา, ซีโอดี, กระบวนการเฟนตัน

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน สารแคลเซียมออกไซด์สังเคราะห์จากเปลือกไข่เผา และสารแคลเซียมออกไซด์ถูกใช้เป็นสารสร้างตะกอนซึ่งถูกนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะด้วย เครื่อง SEM XRD และ FTIR พบว่าสารแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผามีลักษณะทางกายภาพ และโครงสร้างผลึกที่คล้ายกับสารแคลเซียมออกไซด์ การทดลองที่ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการสร้าง ตะกอน โดยปรับค่า pH เป็น 8 เวลาผสม 20 นาทีและเวลาในการตกตะกอน 30 นาที พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีของสารแคลเซียมออกไซด์สูงกว่าสารแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ จากเปลือกไข่เผา คือมีค่าเท่ากับ 79.62 ± 1.24 % และ 67.50 ± 0.00 % ตามลำดับ ประสิทธิภาพการ กำจัดค่าของแข็งแขวนลอยของสารแคลเซียมออกไซด์และสารแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จาก เปลือกไข่มีค่าใกล้เคียงกัน คือมีค่าเท่ากับ 83.85 ± 1.05 % และ 83.27 ± 2.61 % ตามลำดับ และ ปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมเท่ากับ 4 g/L ส่วนที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วน $H_2O_2:Fe^{2+}$ ต่อประสิทธิภาพการกำจัดด้วยกระบวนการเฟนตัน โดยปรับค่า pH เป็น 3 เวลาผสม 120 นาที และเวลาในการตกตะกอน 30 นาที พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมได้แก่ 1,000:1000 mg/L:mg/L มี ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 85.28 ± 2.75 % และ 93.73 ± 0.58 % ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วของทั้ง 2 ส่วน มีค่าเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ได้รับ อนุญาต ดังนั้นจึงทำการศึกษาส่วนที่ 3 คือกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน โดยทำการ ทดลองเหมือนส่วนที่ 2 แต่หลังสิ้นสุดปฏิกิริยาเฟนตันแล้ว ทำการเติมสารสร้างตะกอนทันที พบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอย เท่ากับ 95.66 ± 0.26 % และ 98.63 ± 0.81 % ตามลำดับ โดยน้ำทิ้งหลังการบำบัดมีคุณภาพน้ำเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ถึงแม้ว่าค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเพิ่มขึ้นหลังการบำบัด

ABSTRACT

TITLE : WASTEWATER TREATMENT FROM TAPIOCA STARCH WASTEWATER BY FENTON PROCESS COMBINED WITH COAGULATION

AUTHOR : SUKANYA KANJANATAMRONG

DEGREE : MASTER OF ENGINEERING

MAJOR : ENVIRONMENTAL ENGINEERING

ADVISOR : ASST. PROF. CHAKKRIT UMPUCH, Ph.D.

KEYWORDS : COAGULATION, CALCIUM OXIDE, CALCINED EGGSHELL, CHEMICAL OXYGEN DEMAND, FENTON PROCESS

This research aims to study the treatment efficiency of the effluent from the UASB of a tapioca starch using the Fenton process combined with coagulation. Calcium oxide synthesized from calcined eggshell and calcium oxide were used as coagulants which were characterized by a SEM, an XRD and a FTIR. It was found that the physical properties and the crystalline structure of calcium oxide from calcined eggshell were similar to those calcium oxide. The experiment was divided into 3 parts. First, influences of coagulant type and dosage on the treatment efficiency were investigated by coagulation. The pH was adjusted to pH 8 and agitated for 20 min and then settled for 30 min. The COD removal efficiency of calcium oxide was higher than that of calcium oxide synthesized from calcined eggshell which were 79.62 ± 1.24 % and 67.50 ± 00 %, respectively. The SS removal efficiency of calcium oxide and calcium oxide synthesized from calcined eggshell were identical which were 83.85 ± 1.05 % and 83.27 ± 2.61 %, respectively. The optimum coagulant dosage was 4 g/L. Second, the effect of ratio of H_2O_2 : Fe^{2+} on removal efficiency using the Fenton process was conducted. The pH was adjusted to pH 3 and agitated for 120 min and then left for 30 min. The highest removal efficiency was obtained at the ratio of 1,000:1,000 mg/L : mg/L which could reduce COD and SS up to 85.28 ± 2.75 % and 93.73 ± 0.58 %, respectively. However, the water quality of treated wastewater from above two experiments did not meet the regulations permitted so that the Fenton process combined with coagulation was carried out in the Third experiment. The procedures were similar to those in the second

part but the coagulants were added immediately after terminating the Fenton reaction. The highest removal efficiencies of COD and SS were 95.66 ± 0.26 % and 98.63 ± 0.81 %, respectively. Although the TDS increased after the treatment, the treated water meets the regulations permitted.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 สมมติฐาน	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 สถานที่ทำการศึกษา	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 คุณสมบัติน้ำเสียจากโรงงานผลิตแอมโมเนีย	5
2.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบชีวภาพ	6
2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานผลิตแอมโมเนีย	7
2.4 ขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสีย	9
2.5 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย	10
2.6 กระบวนการเฟนตัน	12
2.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาเฟนตัน	14
2.8 กระบวนการสร้างตะกอน	15
2.9 ปูนขาว (Lime)	17
2.10 แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่	18
2.11 ปัจจัยของกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12 ซีโอดี (ChemicalOxygen Demand; COD)	28
2.13 ของแข็ง(Solids)	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา	33
3.2 กรอบการศึกษา	34
3.3 การเตรียมแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่	36
3.4 วิธีการเตรียมสารเคมีในการวิเคราะห์	37
3.5 รูปแบบการทดลอง	37
3.6 วิธีดำเนินการศึกษา	37
3.7 วิธีการวิเคราะห์	39
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของสารสร้างตะกอน	42
4.2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย	46
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอน	47
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน	40
4.5 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับ การสร้างตะกอน	54
4.6 การคำนวณต้นทุนสารเคมีในการบำบัดน้ำเสีย	59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	60
5.2 ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารอ้างอิง	62
ภาคผนวก	
ก ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	67
ข ตัวอย่างการคำนวณ	76
ค วิธีการวิเคราะห์	79
ประวัติผู้วิจัย	83

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่	18
4.1	ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	46
4.2	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง	47
4.3	การคำนวณต้นทุนสารเคมีในการบำบัดน้ำเสีย	59
ก.1	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง	68
ก.2	ค่าซีไออดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ในการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างตะกอนของแคลเซียมออกไซด์ (วิเคราะห์เมื่อวันที่ 16-17 มีนาคม 2558)	68
ก.3	ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีไออดี (COD) ของแข็งแขวนลอย(SS) และการเพิ่มขึ้นของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ในการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างตะกอนของแคลเซียมออกไซด์ (วิเคราะห์เมื่อวันที่ 16-17 มีนาคม 2558)	69
ก.4	ค่าซีไออดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ในการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างตะกอนของแคลเซียมออกไซด์จากจากเปลือกไข่ (วิเคราะห์เมื่อวันที่ 16-17 มีนาคม 2558)	69
ก.5	ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีไออดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และการเพิ่มขึ้นของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ในการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างตะกอนของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่(วิเคราะห์เมื่อวันที่ 16-17 มีนาคม 2558)	69
ก.6	ค่าและประสิทธิภาพการกำจัดซีไออดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และการเพิ่มขึ้นของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ในการบำบัดด้วยกระบวนการเฟ้นต้นโดยทำการวัดค่าทันที (วิเคราะห์เมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2558)	70
ก.7	ค่าและประสิทธิภาพการกำจัดซีไออดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และการเพิ่มขึ้นของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ในการบำบัดด้วยกระบวนการเฟ้นต้นโดยวัดค่าหลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 นาที (วิเคราะห์เมื่อวันที่ 29 มีนาคม 2558)	70
ก.8	ค่าซีไออดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ในการบำบัดด้วยกระบวนการเฟ้นต้นร่วมกับการสร้างตะกอน อัตราส่วนสารเฟ้นต้น ($H_2O_2:Fe^{2+}$) 1,000:1,000 mg/L:mg/L (วิเคราะห์เมื่อวันที่ 23-24 เมษายน 2558)	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก.9	ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และการเพิ่มขึ้นของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ในการบำบัดด้วยกระบวนการฟentonที่อัตราส่วนสารฟenton ($\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe}^{2+}$) 1,000:1,000 mg/L:mg/L ร่วมกับการสร้างตะกอน (วิเคราะห์เมื่อวันที่ 23-24 เมษายน 2558)	72
ก.10	ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีของเครื่อง XRD	75

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดย (ก) เปลือกไข่ เผาที่ 800 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง (ข) เปลือกไข่เผาที่ 900 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง และ (ค) เปลือกไข่เผาที่ 1,000 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง	19
2.2	องค์ประกอบหลักของเครื่อง SEM	22
2.3	Electromagnetic spectrum	25
2.4	องค์ประกอบของเครื่อง FT-IR	26
3.1	แผนภาพขั้นตอนการวิจัย	35
3.2	ขั้นตอนการเตรียมแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่	36
3.3	รูปแบบการทดลองด้วยเครื่องจาร์เทสต์	37
4.1	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดย (ก) เปลือกไข่ดิบ (ข) เปลือกไข่เผาที่ 500 องศาเซลเซียส (ค) เปลือกไข่เผาที่ 700 องศาเซลเซียส และ (ง) เปลือกไข่เผาที่ 900 องศาเซลเซียส	42
4.2	ภาพ XRD ของแคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่	44
4.3	สเปกตรัม FTIR ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ (Eggshell) แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	45
4.4	ปริมาณค่าซีโอดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) หลังผ่านการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอน (ก) แคลเซียมออกไซด์ (ข) แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่	49
4.5	อิทธิพลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อ (ก) ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีและ ของแข็งแขวนลอย และ (ข) การเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมด	50
4.6	ปริมาณค่าซีโอดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) หลังผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน (ก) วัดค่าหลังการตกตะกอน 30 นาที (ข) วัดค่าทันที	52
4.7	อิทธิพลของปริมาณสารสร้างตะกอนของปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน (ก) ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดี (ข) การเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และ (ค) ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.8	ปริมาณค่าซีโอดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) หลังผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน (ก) แคลเซียมออกไซด์ (ข) แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่	54
4.9	อิทธิพลของสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน	55
4.10	อิทธิพลของสารสร้างตะกอนต่อการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน	56
4.11	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยที่สภาวะ Coagulation: pH 8 แคลเซียมออกไซด์ 4g/L, Fenton:pH 3 อัตราส่วน $H_2O_2:Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/L:mg/L เวลาตกตะกอน 30 นาที, Fenton & Coagulation: อัตราส่วน $H_2O_2:Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/L:mg/L แคลเซียมออกไซด์ 1g/L เวลาตกตะกอน 30 นาที	57
4.12	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่สภาวะ Coagulation: pH 8 แคลเซียมออกไซด์ 4g/L, Fenton:pH 3 อัตราส่วน $H_2O_2:Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/L:mg/L เวลาตกตะกอน 30 นาที, Fenton & Coagulation: อัตราส่วน $H_2O_2:Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/L:mg/L แคลเซียมออกไซด์ 1g/L เวลาตกตะกอน 30 นาที	58
ก.1	สเปกตรัมของเปลือกไข่ดิบ	73
ก.2	สเปกตรัมของเปลือกไข่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง	73
ก.3	สเปกตรัมของเปลือกไข่เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง	73
ก.4	สเปกตรัมของเปลือกไข่เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง	74
ก.5	สเปกตรัมของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide,CaO)	75

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์และอักษรย่อ	ความหมาย
Eggshell	เปลือกไข่
CaO	แคลเซียมออกไซด์
CaCO ₃	แคลเซียมคาร์บอเนต
(MgCa)(CO ₃)	แมกนีเซียมแคลเซียมคาร์บอเนต
JCPDs	ข้อมูลสารมาตรฐานของเครื่อง XRD ที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร (Joint Committee on Powder Diffraction Standard, JCPDs)
pH	ค่าความเป็นกรดต่าง
COD	ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการ เพื่อใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์
SS	ของแข็งแขวนลอย
TDS	ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด
g	กรัม
g/L	กรัมต่อลิตร
mg	มิลลิกรัม
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
L	ลิตร
mL	มิลลิลิตร
XRD	เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer)
FTIR	เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแปงมันสำปะหลังนิยมใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment) โดยอาศัยหลักการทำงานของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นการบำบัดที่ไม่ก่อให้เกิดสารพิษตกค้างและมีประสิทธิภาพสูง แต่จากลักษณะของน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงมาก ทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดทางชีวภาพไม่เพียงพอในการลดปริมาณสารอินทรีย์ได้หมดจึงจำเป็นต้องนำไปบำบัดอีกครั้งด้วยระบบบ่อปรับเสถียรหรือบ่อผึ่งซึ่งเป็นการบำบัดที่ต้องใช้เวลาและพื้นที่ค่อนข้างมาก ดังนั้นกระบวนการบำบัดทางเคมีจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแปงมันสำปะหลัง ซึ่งได้แก่ กระบวนการเฟนตัน คือ ปฏิกิริยาทางเคมีเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่แรง และไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อให้เกิดอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิล ($OH\cdot$) (Ma, X. J. and Xia, H. L., 2009) โดยสุดท้ายจากปฏิกิริยาเฟนตันจะได้ผลิตภัณฑ์คือคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แต่ทั้งนี้เนื่องจากหลังสิ้นสุดปฏิกิริยาเฟนตันพบว่ามีเหล็ก (Fe^{3+} และ Fe^{2+}) ทั้งนี้ก่อให้เกิดปัญหาตะกอนเหล็กที่อาจหลงเหลืออยู่ ดังนั้นจึงควรมีการกำจัดตะกอนเหล็กที่เกิดขึ้นเพื่อไม่ให้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสีย

จากการศึกษาพบว่ากระบวนการสร้างตะกอนเป็นทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการกำจัดตะกอนเหล็กที่อาจหลงเหลืออยู่ และช่วยให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียมีค่าน้ำทิ้งที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ จากการศึกษาของ Xiaojun et al. (2009) กล่าวไว้ว่ากระบวนการสร้างตะกอนถูกนำมาใช้ในการกำจัดของแข็งแขวนลอย (SS) และคอลลอยด์จากน้ำชะขยะของหลุมฝังกลบ ทั้งนี้เพราะมีค่าใช้จ่ายในการควบคุมระบบต่ำและเป็นกระบวนการที่ใช้อย่างแพร่หลาย Ma, X. J. and Xia, H. L. (2009) พบว่าการบำบัดน้ำเสียจากหมักพิมพ์ที่มีปริมาณสารอินทรีย์และสีของน้ำเสียที่สูงด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอนสามารถกำจัดสารอินทรีย์และช่วยลดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งกระบวนการสร้างตะกอนจะช่วยลดเวลาในการตกตะกอนของกลุ่มตะกอนขนาดเล็ก ๆ ได้เป็นอย่างดี Guo (2010) นำกระบวนการสร้างตะกอนมาใช้เพื่อกำจัดของแข็งละลายน้ำ ของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ รวมไปถึงสารอินทรีย์ที่ผ่านจากกระบวนการเฟนตันและ SBR มาแล้วการบำบัดร่วมกันของสองกระบวนการจะช่วยให้เกิดการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้น เนื่องจากเมื่อ

มีการเพิ่มค่าพีเอชของน้ำเสียให้สูงขึ้นในกระบวนการสร้างตะกอนจะทำให้เกิดการตกตะกอนของกลุ่มตะกอนเหล็กจากกระบวนการเฟนตันได้ (Yoon. et al., 1998)

ในปัจจุบันพบว่าแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเลือกที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นสารที่ช่วยปรับค่าพีเอชของน้ำให้เป็นด่าง ซึ่งที่ค่าพีเอชสูงสามารถช่วยให้เกิดการตกตะกอนของสารอินทรีย์ได้ดี อีกทั้งเมื่อเทียบกับสารสร้างตะกอนชนิดอื่นๆ จะพบว่าแคลเซียมออกไซด์มีต้นทุนต่ำกว่า เช่น อะลูมิเนียมซัลเฟต หรือ โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นต้น สารแคลเซียมออกไซด์เป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้น และจากการศึกษาของ วิชัย ดำรงโกคภักดิ์ (2555) พบว่าแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาเปลือกไข่ด้วยระบบไพโรไลซิสจะทำให้ได้แคลเซียมออกไซด์ที่มีคุณสมบัติเหมือนกับแคลเซียมออกไซด์จากการเผาหินปูน ในปัจจุบันได้มีการนำสังเคราะห์เปลือกไข่เพื่อให้ได้สารประกอบต่างๆ ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ นุชนภา ตั้งบริบูรณ์ และณัทย สอนประสาร (2552) สังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมบริสุทธิ์จากเปลือกไข่ อัจฉรา ดวงเดือน (2545) นำเปลือกไข่มาใช้ในการกำจัดโลหะหนักร่วมกับแกลบดำ วันวิสาข์ แก้วสมบูรณ์ (2548) ทำการบำบัดตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่โดยใช้เปลือกไข่ ดังนั้นจะเห็นได้ว่ามีการนำเปลือกไข่มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียมาเป็นเวลานานแล้ว และยังเป็นการนำวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมอาหารที่มีอยู่มากมายมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการแปรรูปเปลือกไข่ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อนมาก จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในชุมชนหรือเมื่อมีการศึกษาเพิ่มเติมอาจเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเน้นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน โดยการสร้างตะกอนจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของสารสร้างตะกอน 2 ชนิดได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากเปลือกไข่ และทำการคำนวณค่าใช้จ่ายเพื่อเปรียบเทียบต้นทุนของสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสร้างตะกอน กระบวนการเฟนตัน และกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอนในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสร้างตะกอน กระบวนการเฟนตัน และกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอนในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง

1.3 สมมติฐาน

1.3.1 กระบวนการเฟ้นต้นร่วมกับการสร้างตะกอนสามารถลดค่าซีไอดี ของแข็งแขวนลอยและของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังได้

1.3.2 ปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อัตราส่วนความเข้มข้นของ H_2O_2 : Fe^{2+} ชนิดและปริมาณของสารสร้างตะกอน ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการเฟ้นต้นร่วมกับการสร้างตะกอน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาด้วยกระบวนการแบบกะ น้ำเสียที่ใช้คือ น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบชีวภาพ (UASB) มาแล้วจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังแห่งหนึ่งในจังหวัดศรีสะเกษ เก็บตัวอย่างน้ำเสียด้วยวิธีการแบบจ้วง ในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ.2557 ถึง เดือนมีนาคม พ.ศ.2558

1.4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างตะกอน ได้แก่

1.4.1.1 ชนิดสารสร้างตะกอน โดยทำการศึกษาสารสร้างตะกอนระหว่าง แคลเซียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

1.4.1.2 ปริมาณสารสร้างตะกอน ที่ความเข้มข้น 1 2 3 และ 4 g/L

1.4.1.3 ความเร็วการกวนผสม คือ กวนเร็ว 120 rpm 10 นาที กวนช้า 95 rpm 10 นาที

1.4.1.4 ระยะเวลาตกตะกอน 30 นาที

1.4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟ้นต้น ได้แก่

1.4.2.1 อัตราส่วนความเข้มข้นของสารประกอบเฟ้นต้น H_2O_2 : Fe^{2+} ที่ 7,500 : 1,000 1,000 : 1,000 และ 1,000:7,500 mg/L:mg/L

1.4.2.2 กำหนด pH ที่ใช้คือ pH 3

1.4.2.3 ความเร็วในการกวน 120 rpm

1.4.2.4 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 120 นาที

1.4.2.5 ระยะเวลาตกตะกอน 30 นาที

1.4.3 การวิเคราะห์ค่าซีไอดี โดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด Close Reflux Method

1.4.4 การวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอย โดย โดยวิธี Gravimetric method

1.4.5 การวิเคราะห์ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด โดย โดยวิธี Gravimetric method

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอนในการบำบัดน้ำเสีย

1.5.2 ทำให้ทราบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน

1.5.3 ทราบถึงประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอนที่ทำการศึกษาระหว่างแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

1.5.4 สามารถนำกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอนไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตอื่นๆได้

1.6 สถานที่ทำการศึกษา

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติที่น้ำเสียจากโรงงานผลิตแอมโมเนียสำหรับปุ๋ย

อุตสาหกรรมผลิตแอมโมเนียสำหรับปุ๋ยเป็นอุตสาหกรรมที่มีการน้ำในกระบวนการผลิตเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้น้ำที่ใช้เกือบทั้งหมดกลายเป็นน้ำเสีย และน้ำอีกส่วนหนึ่งจะสูญหายไปในการบำบัดน้ำเสียและอบแห้ง ส่วนลักษณะสมบัติของน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบมีค่าความสกปรกในรูปบีโอดีซีโอดี และปริมาณของแข็งค่อนข้างสูง

โสภิตา บุญเอกทรัพย์ (2541) พบว่าลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานผลิตแอมโมเนียสำหรับปุ๋ยมีค่าบีโอดีเท่ากับ 12,645 mg/L ซีโอดีเท่ากับ 19,300 mg/L และของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 6,990 mg/L สำหรับโรงงานขนาดใหญ่ ส่วนไนโตรเจนทั้งหมดมีปริมาณค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบในน้ำเสียดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ โดยค่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม จึงต้องมีการบำบัดด้วยระบบที่มีความเหมาะสมและให้ประสิทธิภาพที่ดีเพื่อสามารถปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติได้

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแอมโมเนียสำหรับปุ๋ยเป็นการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ซึ่งพบว่าสามารถบำบัดได้โดยแบ่งออกเป็นวิธีการบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment) วิธีการบำบัดทางเคมี (Chemical treatment) วิธีการบำบัดทางชีววิทยา (Biological treatment) และวิธีการบำบัดทางกายภาพ-เคมี สำหรับอุตสาหกรรมผลิตแอมโมเนียสำหรับปุ๋ย กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยานับเป็นวิธีการที่เหมาะสมเนื่องจากของเสียอยู่ในรูปสารอินทรีย์และสารอินทรีย์เหล่านั้นสามารถเป็นอาหารให้จุลินทรีย์ได้ดี

ระบบบำบัดทางชีวภาพแบ่งตามแบคทีเรียที่ใช้ได้เป็น 2 ชนิด คือ Autotrophic bacteria และ Heterotrophic bacteria

(1) Autotrophic bacteria แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้ออกซิเจนอิสระ (Free oxygen) เฝ้าสาธิตสารอินทรีย์เพื่อให้ได้พลังงานและจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ nitrifying bacteria สามารถเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรด

(2) Heterotrophic bacteria แบคทีเรียประเภทนี้ได้พลังงานและธาตุคาร์บอนจากสารอินทรีย์ แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ Aerobic bacteria Facultative bacteria และ Anaerobic bacteria ชนิดนี้ไม่สามารถเติบโตได้เมื่อมีออกซิเจน

2.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบชีวภาพ

การบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบ การบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ (Aerobic treatment) และการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic treatment)

2.2.1 การบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ (Aerobic treatment)

การบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ หมายถึง การบำบัดโดยใช้ออกซิเจนอิสระเพื่อให้จุลินทรีย์ชนิดที่ใช้ออกซิเจนสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ โดยจุลินทรีย์ชนิดที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic bacteria) จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็น แอมโมเนีย ไนเตรท ซัลเฟต ฟอสเฟต ระบบนี้มีข้อดีคือสามารถบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ ไม่มีกลิ่นเหม็น และระบบบำบัดบางชนิดสามารถกำจัดสารอาหารได้ แต่มีข้อเสียคือ สำหรับในหน่วยงานที่มีพื้นที่จำกัดจำเป็นต้องทำการเติมอากาศให้กับจุลินทรีย์ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง และระบบนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ระบบบำบัดแบบใช้อากาศที่นิยม ได้แก่ ระบบ บ่อปรับเสถียร (Stabilization pond) ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated lagoon) ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge: AS) ระบบโปรยกรอง (Trickling filter) ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating biological contactor: RBC) บึงประดิษฐ์ (Construction wetland)

2.2.2 การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic treatment)

การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ หมายถึง การบำบัดที่อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่ดำรงชีวิตอยู่ได้ โดยไม่ต้องการก๊าซออกซิเจน ระบบบำบัดชนิดนี้มีข้อดีคือ ใช้พลังงานน้อย ได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซมีเทนซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ใช้เป็นก๊าซหุงต้ม ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า มีตะกอนส่วนเกินน้อย แต่ระบบการบำบัดดังกล่าวมีการเริ่มดำเนินงานเดินระบบซับซ้อนและใช้เวลานานน้ำที่บำบัดนอกจากนั้นแล้วน้ำที่ผ่านจากการบำบัดยังมีค่าความสกปรกที่เกินมาตรฐานไม่สามารถปล่อยออกสู่แหล่งน้ำได้โดยตรง และอาจมีกลิ่นเหม็นเนื่องจากก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลาย เช่น ก๊าซไข่เน่า (H_2S) ระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศที่นิยม ได้แก่ ระบบบ่อหมัก (Anaerobic pond) ถังเกราะ (Septic tank) ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) UASB (Upflow anaerobic sludge blanket) และถังหมักไร้อากาศแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic fixed film) เป็นต้น (วันทนา เกียรติสมาน, 2543)

2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานผลิตแอมโมเนีย

2.3.1 ระบบบำบัดแบบบ่อเปิด (Open pond)

วันทนา เกียรติสมาน (2543) ได้อธิบายไว้ว่า โรงงานผลิตแอมโมเนียส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมเกษตร น้ำเสียจากโรงงานจึงมีอินทรีย์สารอยู่สูง ระบบบำบัดน้ำเสียดั้งเดิมที่โรงงานผลิตแอมโมเนียส่วนใหญ่ใช้เป็นระบบเปิดที่เป็นบ่อขุดหลายๆ บ่อไหลอย่างต่อเนื่องกัน ซึ่งใช้พื้นที่ในการบำบัดสูง เนื่องจากมีประสิทธิภาพต่ำ บ่อบำบัดจึงมีขนาดใหญ่ระบบบำบัดน้ำเสียระบบบ่อเปิดประกอบด้วย บ่อหมัก (Anaerobic ponds) ติดตามด้วยบ่อกึ่งหมัก (Facultative ponds) และบ่อผึ่ง (Aerobic ponds) ซึ่งเป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางชีวภาพ (Biological wastewater treatment) เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียอาศัยหลักการที่ใช้สิ่งมีชีวิตหรือจุลินทรีย์ต่างๆ มาทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเพื่อไม่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะมลพิษต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ

ระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแอมโมเนียที่ใช้ในปัจจุบันประกอบด้วย บ่อบำบัดแบบหมัก บ่อบำบัดแบบกึ่งหมัก และบ่อบำบัดแบบผึ่ง ตามลำดับ

2.3.1.1 บ่อบำบัดแบบหมัก (Anaerobic ponds)

เป็นบ่อดินขนาดใหญ่ มีความลึกประมาณ 3.0-4.0 เมตร สามารถรับน้ำเสียที่มีภาระอินทรีย์ (Organic loading rate) ได้มาก หรือมีค่าบีโอดีสูง ๆ จนทำให้บ่อไม่สามารถผลิตออกซิเจนเนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์แสงภายในบ่อสามารถทำให้ไม่เกิดขึ้นได้ โดยการลดพื้นที่ผิวของบ่อ เพิ่มความลึกของบ่อ และเพิ่มภาระการรับสารอินทรีย์ขึ้นในระหว่างที่น้ำทิ้งอยู่ในบ่อ สารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจะถูกแบคทีเรียทำลายด้วยปฏิกิริยาเคมีแบบไม่ใช้ออกซิเจนทำให้น้ำทิ้งมีกลิ่นเหม็นอันเนื่องมาจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และสารประกอบซัลไฟด์อื่นๆ และบางส่วนจะเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำเสียจะถูกปล่อยเข้ามาในบริเวณก้นบ่อ เพื่อให้มีโอกาสสัมผัสกับชั้นของตะกอน จุลินทรีย์ที่จมตัวอยู่ที่ก้นบ่อ และน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะถูกปล่อยออกไปตามท่อที่อยู่ตรงข้ามกับท่อน้ำเข้า และท่อน้ำออกนี้จะต้องอยู่ต่ำกว่าระดับไซซ์ที่ปกคลุมบ่อ ไม่จำเป็นต้องมีการกวนตะกอนให้เกิดการหมุนเวียนภายในบ่อ เพราะก๊าซที่เกิดขึ้นเกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้มีปริมาณมากพอที่ทำให้เกิดการหมุนเวียนของตะกอนจุลินทรีย์ภายในบ่อได้อย่างพอเพียง

2.3.1.2 บ่อบำบัดแบบกึ่งหมัก (Facultative ponds)

เป็นบ่อดินที่มีความลึกน้อยกว่าบ่อหมัก โดยมีความลึกประมาณ 1.0-2.5 เมตร การทำงานของจุลินทรีย์ในบ่อกึ่งหมักมี 3 เขต คือ เขตบนเป็นการทำงานของแบคทีเรียที่ต้องการออกซิเจน (Aerobic bacteria) และจะมีสาหร่ายเกิดขึ้นอยู่รวมกัน เขตก้นบ่อเป็นการทำงานของแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจน (Anaerobic bacteria) ที่จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ก้นบ่อ

และเขตรอยต่อ เป็นการทำงานของแบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ในสภาพที่มีออกซิเจนน้อย คือสามารถอาศัยได้ทั้งในสภาพที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน (Facultative bacteria)

2.3.1.3 บ่อบำบัดแบบบ่อผึ่ง (Aerobic ponds)

เป็นบ่อดินกว้าง มีความลึกน้อยที่สุดในทั้งสามบ่อบำบัดคือมีความลึกประมาณ 1.0-1.5 เมตร จุลินทรีย์ในระบบซึ่งประกอบด้วย แบคทีเรียและสาหร่าย ดำรงชีพอยู่ด้วยการพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกัน และสาหร่ายจะสังเคราะห์แสงโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ปล่อยออกมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนของแบคทีเรีย ให้ก๊าซออกซิเจนออกมา ก๊าซออกซิเจนที่เกิดขึ้นก็จะถูกนำไปใช้โดยแบคทีเรียที่ใช้อากาศในการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสีย และให้ ผลผลิตออกมาเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะถูกสาหร่ายนำไปใช้เป็นวัฏจักรต่อไป นอกจากนี้ การทำให้เกิดสภาพที่มีออกซิเจนละลายอยู่ในบ่ออย่างทั่วถึงนั้น บ่อจึงไม่ควรลึกเพราะออกซิเจนจากบรรยากาศจะแทรกซึมลงไปได้มากขึ้น และสาหร่ายจะได้รับแสงแดดอย่างทั่วถึง และนำไปใช้ในการสังเคราะห์มากยิ่งขึ้น รอบๆ บ่อไม่ควรปลูกต้นไม้ใหญ่หรือสิ่งกีดขวางที่จะบดบังกระแสลมและแสงแดด

2.3.2 ระบบบำบัดแบบปิด (Closed system)

2.3.2.1 ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบผสมกวน (Completely stirred tank reactor: CSTR) เป็นถังปฏิกรณ์ (Closed anaerobic tank system) ซึ่งเป็นระบบบำบัดไร้อากาศที่ใช้จุลินทรีย์เป็นตัวย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์กวาดตะกอน (Scrapper) ตรงด้านล่างของถังปฏิกรณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในภาพในการบำบัด ถังปฏิกรณ์มีจุดเด่น คือการกวนผสมภายในถังตลอดเวลาทำให้จุลินทรีย์ได้สัมผัสกับสารอินทรีย์อย่างทั่วถึง ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพได้อีกด้วย ระบบนี้เมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายสารแขวนลอยในน้ำเสียจะได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้ลอยสู่ด้านบนเหมาะกับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง

2.3.2.2 ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น (Anaerobic baffled reactor: ABR) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบนี้มีลักษณะเป็นถังที่มีแผ่นกั้นขวางหลายแผ่นติดตั้งไว้ในถังยาวตามการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบจะเป็นลักษณะไหลขึ้นไหลลง (หรือซ้ายขวา) สลับกันไปหลายครั้ง เมื่อน้ำเสียไหลไปตามช่องทางที่ออกแบบไว้ภายในบ่อ สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะสัมผัสจุลินทรีย์ระหว่างการเดินทางภายในบ่อจนกว่าความสกปรกตกลงตามลำดับก่อนจะออกจากระบบ

2.3.2.3 ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบชั้นสลัดจ์ (Upflow anaerobic sludge blanket: UASB) หลักการของระบบนี้จะให้น้ำเสียไหลขึ้น น้ำเสียที่ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นสารอาหารของจุลินทรีย์จะถูกป้อนเข้าจากทางด้านล่าง ระหว่างที่ไหลขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์นั้น สารอินทรีย์จะสัมผัสกับเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายคือ จุลินทรีย์จะจับตัวเป็นเม็ดเล็กๆ (Granules) เส้นผ่านศูนย์กลางราว 1-2 มิลลิเมตร มีคุณสมบัติในการตกตะกอนได้ดีมาก ภายในระบบจะแบ่งออกเป็น 2 ชั้น คือ ชั้นน้ำและชั้นตะกอน โดยจะมีระบบแยกน้ำใสภายในถังปฏิกรณ์ และมี

ระบบเก็บรวบรวมก๊าซที่ผลิตขึ้นมาได้นำออกจากถังปฏิกรณ์ วิธีการคือมีเม็ตะคอนจุลินทรีย์สามารถกระจายอยู่ทั่วไปในระบบโดยไม่ต้องเกาะยึดกับวัสดุตัวกลาง(Inert media) จึงจะประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับวัสดุตัวกลางได้ ระบบนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยต่ำ

2.3.2.4 ระบบบำบัดแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ชนิดไร้อากาศ (Anaerobic fixed film reactor: AFFR) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้วัสดุตัวกลางบรรจุอยู่ภายในระบบถังปฏิกรณ์ระบบ บำบัดแบบนี้เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากมีการกักเก็บเซลล์จุลินทรีย์ให้คงอยู่ในระบบบำบัด โดยการตรึงเซลล์จุลินทรีย์ไว้บนผิววัสดุตัวกลาง (Media หรือ Supporting materials) เช่น ตาข่ายไนลอนหรือเชือกไนลอน เป็นต้น ในรูปของฟิล์มชีว (Biofilm) ซึ่งสามารถลดการสูญเสียจุลินทรีย์ออกไปพร้อมกับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดทำให้ระบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้อย่างคงที่และสามารถกลับสู่สภาวะทำงานปกติได้เร็ว หากเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของน้ำเสียที่ไหลเข้าระบบหรือเกิดภาวะสารอินทรีย์สูงเกินไป (วันทนา เกียรติสมานม, 2543)

2.4 ขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสีย

เนื่องจากน้ำเสียมีแหล่งที่มาแตกต่างกันจึงทำให้มีปริมาณและความสกปรกของน้ำเสียแตกต่างกันไปด้วย ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสียจำเป็นต้องเลือกวิธีการที่เหมาะสม สำหรับกรรมวิธีในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสียนั้นก็มีหลายวิธีด้วยกันโดยสามารถแบ่งขั้นตอนในการบำบัดออกได้ดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2.4.1 การบำบัดน้ำเสียขั้นเตรียมการ (Pretreatment)

เป็นการกำจัดของแข็งขนาดใหญ่ออกเสียก่อนที่น้ำเสียจะถูกปล่อยเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อป้องกันการอุดตันท่อน้ำเสีย และเพื่อไม่ทำความเสียหายให้แก่เครื่องสูบน้ำการบำบัดในขั้นนี้ได้แก่

2.4.1.1 การดักด้วยตะแกรง เป็นการกำจัดของแข็งขนาดใหญ่โดยใช้ตะแกรง ตะแกรงที่ใช้โดยทั่วไปมี 2 ประเภทคือ ตะแกรงหยาบและตะแกรงละเอียด

2.4.1.2 การบดตัดเป็นการลดขนาดหรือปริมาตรของแข็งให้เล็กลง ถ้าสิ่งสกปรกที่ลอยมากับน้ำเสียเป็นสิ่งที่เน่าเปื่อยได้ต้องใช้เครื่องบดตัดให้ละเอียด ก่อนแยกออกด้วยการตกตะกอน

2.4.1.3 การดักกรวดทราย เป็นการกำจัดพวกกรวดทราย ทำให้ตกตะกอนในรางดักกรวดทราย โดยการลดความเร็วน้ำลง

2.4.1.4 การกำจัดไขมันและน้ำมันเป็นการกำจัดไขมันและน้ำมันซึ่งมักอยู่ในน้ำเสียที่มาจากครัว โรงอาหาร ห้องน้ำ ปั๊มน้ำมัน และโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิดโดยการกักน้ำเสียไว้ในบ่อดักไขมันในช่วงเวลาหนึ่งเพื่อให้น้ำมันและไขมันลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำแล้วใช้เครื่องดักหรือกวาดออกจากบ่อ

2.4.2 การบำบัดน้ำเสียขั้นที่สอง (Secondary Treatment)

เป็นการกำจัดน้ำเสียที่เป็นพวกสารอินทรีย์อยู่ในรูปสารละลาย หรืออนุภาคคอลลอยด์ โดยทั่วไปมักจะเรียกการบำบัด ขั้นที่สองนี้ว่า “การบำบัดน้ำเสียด้วยขบวนการทางชีววิทยา” เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ต้องอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลาย หรือทำลายความสกปรกในน้ำเสีย การบำบัดน้ำเสีย ในปัจจุบันนี้อย่างน้อยจะต้องบำบัดถึงขั้นที่สองนี้ เพื่อให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณภาพมาตรฐานน้ำทิ้งที่ทางราชการกำหนดไว้ การบำบัดน้ำเสียด้วยขบวนการทางชีววิทยาแบ่ง เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ขบวนการที่ใช้ออกซิเจน เช่น ระบบบ่อเติมอากาศ ระบบแคติเวตเตดสลัดจ์ ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ ฯลฯ และ ขบวนการที่ไม่ใช้ออกซิเจน เช่น ระบบถังกรองไร้อากาศ ระบบถังหมักตะกอน ฯลฯ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ ที่ทำหน้าที่ย่อยสลาย

2.4.3 การบำบัดน้ำเสียขั้นสูง (Advanced Treatment)

เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดในขั้นที่สองมาแล้ว เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกบางอย่างที่ยังเหลืออยู่ เช่น โลหะหนัก หรือเชื้อโรคบางชนิดก่อนจะระบายน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ การบำบัดขั้นนี้มักไม่นิยมปฏิบัติกัน เนื่องจากมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายสูงนอกจากผู้บำบัดจะมีวัตถุประสงค์ในการนำน้ำที่บำบัดแล้วกลับคืนมาใช้อีกครั้ง (กองอนามัยสิ่งแวดล้อม, 2557)

2.5 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

ภิญโญ พานิชพันธ์ (2557) อธิบายไว้ว่า กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีหลากหลายวิธีในการเลือกใช้กำจัดสิ่งเจือปน หรือลดความเป็นพิษที่เกิดขึ้นในน้ำเสีย ทั้งนี้ในปัจจุบันการเลือกกระบวนการบำบัดขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสียและลักษณะความเป็นพิษที่เกิดขึ้นในน้ำเสียนั้น ซึ่งสามารถจำแนกกระบวนการบำบัดออกเป็นดังนี้

2.5.1 กระบวนการทางเคมี (chemical process)

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด ต่างสูงๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ ด้วยการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้ว ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพ

2.5.1.1 การทำให้เกิดตะกอน (precipitation) อาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มตะกอนตกลงมา โดยทั่วไปสารแขวนจะมีประจุลบ ดังนั้นสารเคมีที่เติมลงไปจึงเป็นประจุบวกเพื่อทำให้เป็นกลาง การแยกด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน ดังนั้นวิธีนี้จะเลือกใช้ต่อเมื่อไม่สามารถแยกได้โดยกระบวนการทางชีวภาพหรือกายภาพ

2.5.1.2 การเกิดออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation) อาศัยหลักการเสียอิเล็กตรอนของอะตอมให้แก่สารเคมีที่เติมลงไปใต้น้ำเสีย โดยสารเคมีนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ส่วนมากวิธีนี้จะนิยมใช้เปลี่ยนโมเลกุลของโลหะที่เป็นพิษ เช่น การเปลี่ยน Fe^{2+}

2.5.1.3 การเกิดรีดักชันทางเคมี (chemical reduction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน วิธีการนี้เป็นการเปลี่ยนสภาพของสารพิษไปเป็นสารที่มีอันตรายน้อยลง อะตอมหรือไอออนของสารพิษจะรับอิเล็กตรอนจากสารเคมีที่เติมลงไปซึ่งมีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น การเปลี่ยน Cr^{6+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็น Cr^{3+} ด้วย เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ในสภาพที่เป็นกรด

2.5.1.4 การสะเทิน (neutralization) เป็นการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเสียให้มีฤทธิ์เป็นกลาง (pH = 7) ถ้าต้องการปรับค่าน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรด (pH < 7) ในน้ำเสียให้สูงขึ้นต้องเติมสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนกรณีถ้าต้องการปรับน้ำเสียมีฤทธิ์เป็นด่าง (pH > 7) ให้มีค่า pH ต่ำลงจะต้องเติมกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดเกลือและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

2.5.2 กระบวนการทางชีววิทยา (Biological Process)

กระบวนการทางชีววิทยา (biological process) เป็นการอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์ต่างๆ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้เลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์ โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย แบคทีเรียที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แยกออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ กลุ่มแรกคือแบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) ส่วนกลุ่มที่ 2 คือ พวกไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria)

2.5.3 กระบวนการทางกายภาพ (physical process)

เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50-65 % ส่วนเรื่องการแยกความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD_5) สามารถแยกได้ 20-30 % เท่านั้น วิธีการต่าง ๆ ในกระบวนการทางกายภาพ เช่น

2.5.3.1 การดักด้วยตะแกรง (screening) เป็นการแยกเศษขยะต่างๆ ที่มากับน้ำเสีย เช่น เศษไม้ ถูพลาสติก กระจดาช ตะแกรงมีหลายขนาด การดักด้วยตะแกรงจึงเป็นการแยกขั้นตอนแรกในการบำบัดน้ำเสีย

2.5.3.2 การตัดย่อย (combination) คือ การใช้เครื่องตัดทำลายเศษขยะขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง

2.5.3.3 การกวาด (skimming) เป็นการกำจัดน้ำมันและไขมันโดยทำการดักหรือกวาดออกจากน้ำเสีย

2.5.3.4 การทำให้ลอย (floating) จะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ

2.5.3.5 การตกตะกอน (sedimentation) เป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการเรื่องแรงโน้มถ่วงซึ่งจะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ

2.5.4 กระบวนการทางกายภาพเคมี (physical-chemical process)

เป็นกระบวนการที่ต้องมีอุปกรณ์ช่วยมากกว่ากระบวนการที่กล่าวมา ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้ในขั้นตอนสุดท้ายในการบำบัดน้ำเสีย ที่ผ่านกระบวนการในขั้นตอนอื่นแล้ว เช่น กระบวนการดังต่อไปนี้

2.5.4.1 การดูดซับด้วยถ่าน (carbon adsorption) วิธีการนี้ใช้ผงถ่านหรือคาร์บอนเป็นตัวดูดซับสารเจือปนที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้ง

2.5.4.2 การแลกเปลี่ยนประจุ วิธีการนี้อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารปนเปื้อนในน้ำเสียบกับตัวกลางที่บรรจุซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบ

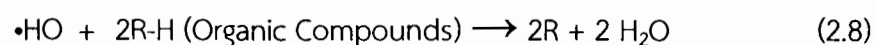
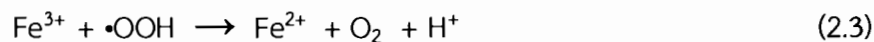
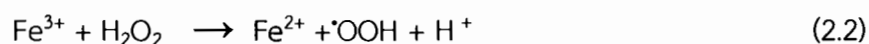
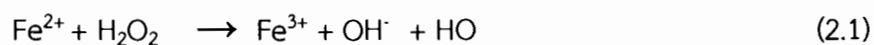
2.6 กระบวนการเฟนตัน

กระบวนการเฟนตันเป็นวิธีหนึ่งของกระบวนการแอกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes: AOPs) ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี โดยการเติมสารเคมีให้เกิดปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, HO•) ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย กระบวนการเฟนตันถูกค้นพบโดย H.J.H. Fenton ในปี 1876 หรือ เมื่อ 136 ปีที่แล้ว โดย Fenton พบว่า ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่มีลักษณะเฉพาะและสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลของสารเคมีที่เป็นพิษได้ โดยมีการออกซิโดระหว่างเฟอร์รัสไอออนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กระบวนการนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่มีสารพิษประเภทสารประกอบอินทรีย์ปะปน เช่น ฟีนอล สารประกอบอะโรมาติก หรือสารเคมีที่มาจากวัสดุสีย้อม ยาฆ่าแมลง สารกันบูด พลาสติก ยาง เป็นต้น กระบวนการเฟนตันที่ประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียมีผลต่อน้ำเสีย คือ ทำให้สามารถลดค่า BOD COD ลดกลิ่นและสี อีกทั้งยังช่วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพและทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษอีกด้วย

เกษม ประดิษฐ์วัฒนกิจ (2555) ทำการศึกษาประสิทธิภาพเทคโนโลยีดีเอสชาร์จทางไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแอมโมเนียปัสเปหลัง ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดด้วยโอโซน โดยทำการวิจัยน้ำเสียจากแหล่งอุตสาหกรรมและจากที่เตรียมขึ้นเอง ทั้งนี้เพื่อให้น้ำทิ้งที่ออกจากโรงงานแอมโมเนียปัสเปในเกณฑ์มาตรฐาน พบว่าสามารถบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแอมโมเนียปัสเปหลังได้เป็นอย่างดี โดยหลังทำการบำบัดแล้วพบว่ามีค่า COD อยู่ในช่วง 63.18 – 105.96 mg/L และค่าเฉลี่ยของ BOD อยู่ในช่วง 15.02 – 18.53 mg/L

2.6.1 กลไกของปฏิกิริยาเฟนตัน

ปฏิกิริยาเฟนตันเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดอย่างรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ซึ่งจะได้เป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, HO) หรือไฮดรอกซิลเรดิคอล ($\bullet OH$) ที่เข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งปฏิกิริยาเคมีหลักๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



จากสมการจะเห็นว่าไฮดรอกซิลเรดิคอล ($\bullet OH$) อยู่ในระบบตลอดเวลาทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์เกือบทั้งหมด และให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ (2.8) ส่วนสำคัญของปฏิกิริยาเฟนตันที่ต้องมีการควบคุม คือ ปริมาณสารประกอบเฟนตันและพีเอชในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา เพราะหากไม่มีการควบคุมแล้วจะทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีโดยเปล่าประโยชน์ และทำให้สิ้นเปลืองต้นทุนในการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งข้อดีของการบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน คือความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยเข้าทำปฏิกิริยาแบบไม่เฉพาะเจาะจงของไฮดรอกซิลเรดิคอล ($\bullet OH$) และยังสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีสารเคมีเป็นพิษที่ไม่สามารถบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพได้ (นาถ ภูวงศ์ผา และคณะ, 2555)

2.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาเฟนตัน

2.7.1 ค่าพีเอช

ค่าพีเอชของกระบวนการเฟนตันที่เหมาะสม คือช่วงสภาวะที่เป็นกรดอยู่ในช่วงพีเอช 3-4 และหากค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการรบกวนการนำกลับมาใช้ใหม่ของ เพอร์ร็อกไซด์ไฮดรอกซิล โดยปฏิกิริยาระหว่างเพอร์ร็อกไซด์ไฮดรอกซิลกับ H_2O_2 จะถูกยับยั้ง และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ลดลง จากการศึกษาบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วงค่าความเป็นกรดที่ pH 3.40 (สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ และวีระนุช บุญรุ่ง, 2553) และสภาวะที่เหมาะสม ของปฏิกิริยาเฟนตันในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมหมักพิมพ์ คือ pH 4 (Ma, X. J. and Xia, H. L., 2009)

Li., J. et al. (2012) ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานเส้นใยอะคลิลิคด้วยกระบวนการเฟนตัน พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดคือ pH 3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีไอดี 65.5%

2.7.2 ปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นหากมีการแปรผันค่าความเข้มข้นของสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระเองทำให้ได้เป็นอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิล ซึ่งอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลเป็นตัวออกซิไดซ์ที่อ่อนกว่าส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ลดลงได้ (สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ และวีระนุช บุญรุ่ง, 2553)

จินต์ อโนทัย และคณะ (2547) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียเพื่อกำจัดซีไอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำชะซึมจากหลุมฝังกลบมันคงที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมาแล้วเพื่อให้ น้ำทิ้งมีค่าซีไอดีเป็นไปตามมาตรฐานของทางราชการ พบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของอนุมูลเพอร์ร็อกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1,000 และ 7,500 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีไอดีและซีไอดีสูงที่สุด

2.7.3 ปริมาณเพอร์ร็อกซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)

เพอร์ร็อกซัลเฟตส่งผลให้อนุมูลไฮดรอกซิลเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว การเพิ่มปริมาณของเพอร์ร็อกซัลเฟตจึงมีผลต่อสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการเข้าทำปฏิกิริยา หากเพิ่มปริมาณมากเกินไปจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง (สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ และวีระนุช บุญรุ่ง, 2553) และการเพิ่มปริมาณเพอร์ร็อกซัลเฟตจากการแปรผันค่าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีลดลง สังเกตได้จากกลุ่มฟล็อกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจำนวนมาก (Ma, X. J. and Xia, H. L., 2009) ดังนั้นจึงเป็นปัจจัยอีกตัวหนึ่งที่ต้องทำการหาปริมาณที่เหมาะสม



2.7.4 ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา

ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา คือระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของสารเฟนตันกับสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นปัจจัยที่ต้องศึกษา เพื่อหาระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ดีที่สุด นาถภูวงศ์ผา (2555) ได้อธิบายว่า การเกิดปฏิกิริยาเฟนตันออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดการกำจัดสารอินทรีย์อย่างรวดเร็วโดยพบว่าในช่วง 30 นาทีแรกจะมีค่าการกำจัดซีโอดีมากที่สุด หลังจากนั้นค่าการกำจัดสารอินทรีย์ก็จะลดลง จากการศึกษาของ li., J. et al. (2012) พบว่าประสิทธิภาพดีที่สุดใน การกำจัดค่าซีโอดี 65.5% ที่ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 120 นาที อีกทั้ง สุเทพ สิริวิทยาปกรณ และวีระนุช บุญรุ่ง (2553) กล่าวไว้ว่าจากการทดลองผันแปรระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาพบว่าที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสีและค่าซีโอดี เนื่องมาจากที่ระยะเวลามากขึ้นทำให้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมีเวลาจับตัวกับสารเพิ่มมากขึ้น

งานวิจัยนี้พบว่าในปัจจุบันมีการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตันเป็นไปในแนวทางที่ดี โดยการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของอัตราส่วน $H_2O_2 : Fe^{2+}$ และแนวทางของระบบบำบัดเพื่อให้มีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับลักษณะความหลากหลายของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียแต่ละประเภท ดังนั้นจึงมีความสนใจในการนำกระบวนการเฟนตันมาใช้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของอัตราส่วน $H_2O_2 : Fe^{2+}$ และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง

2.8 กระบวนการสร้างตะกอน

Coagulation คือ กระบวนการเติมสารเคมีลงไปลงในน้ำเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ (destabilization) และอนุภาคคอลลอยด์ต่างๆเคลื่อนที่มาสัมผัสกันให้มากที่สุด เรียกว่าขั้นตอนการกวนเร็ว (Rapid mixing) อนุภาคคอลลอยด์ที่เป็นความขุ่นในน้ำมักมีประจุลบส่วนใหญ่มาจากอนุภาคของดินเหนียว

Flocculation คือ ขั้นตอนที่เกิดจากการรวมกลุ่มกันของอนุภาคคอลลอยด์จนมีลักษณะเป็นกลุ่มปุยที่เรียกว่า Floc ซึ่งสามารถมองเห็นได้ชัดเจนและจะตกตะกอนได้เร็วขึ้น ในขั้นตอนนี้จะทำการกวนผสมอย่างช้า (Slow mixing) เพื่อให้ floc รวมตัวเป็นกลุ่มก้อน

โศรดา ขุนโหระ และจิรสา กรงกรด (2547) ได้อธิบายไว้ว่า การสร้างตะกอนทางเคมีจัดเป็นขบวนการสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำ โดยสารช่วยทำให้เกิดการตกตะกอนซึ่งจะทำให้มีการเกาะกันเป็นกลุ่มใหญ่ของอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้อัตราเร็วในการตกตะกอนเร็วยิ่งขึ้น สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่

2.8.1 Ammonium alum และ Potassium alum คือ เกลือเชิงซ้อนของสารประกอบที่มีธาตุอะลูมิเนียม และซัลเฟต เป็นส่วนประกอบหลัก หรือ รู้จักกันในนามว่าสารส้ม (alum) หรือ ผลึกเกลือ ผลึกเกลือ มีสูตรทางเคมีทั่วไปคือ $[M(III), (III)](SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

2.8.1.1 เกลือซัลเฟตของอะลูมิเนียมหรืออะลูมิเนียมซัลเฟต $[Al_2(SO_4)_3 \cdot xH_2O]$

2.8.1.2 เกลือเชิงซ้อนของโพแทสเซียมหรือโพแทสเซียมอะลัม

$[Al_2(SO_4)_3 \cdot K_2SO_4 \cdot 24H_2O]$

2.8.1.3 เกลือเชิงซ้อนของแอมโมเนียมหรือแอมโมเนียมอะลัม $[Al_2(SO_4)_3 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 24H_2O]$

โดยสารสัมผัสเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้ Al^{+3} , SO_4^{2-} และสารเชิงซ้อน (complex) ซึ่งเกิดจากการไฮโดรไลซิสของอะลูมิเนียม เช่น $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_3$, $Al(OH)^4-$ ผลกระทบของการไฮโดรไลซิสบางตัวจะรวมกันเป็นลูกโซ่ยาวของ Polymeric aluminium hydroxide ซึ่งมีประจุมากขึ้น พวกที่เกิดซึ่งมีประจุบวกอาจจะรวมกับคอลลอยด์ซึ่งมีประจุลบ เพื่อให้ประจุนอนอนุภาคคอลลอยด์สะเทินทำให้เกิด Agglomeration ของคอลลอยด์เกิดเป็นก้อนใหญ่ขึ้น การตกตะกอนก็จะเกิดเร็วขึ้น

2.8.2 โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ หรือชื่อในภาษาอังกฤษว่า Poly Aluminium Chloride หรือเรียกย่อ ๆ ว่า “PAC” เป็นเกลืออะลูมิเนียมที่มีสูตรเคมี คือ $[Al_n(OH)_mCl_{(6-n)}]_m$ ประเภทสารโพลีอินทรีย์ ซึ่งเกิดจากการรวมตัวโดยนิวเคลียสหลายตัว(โมเลกุลใหญ่) เช่น $(Al_6(OH)_{15})^{3+}$ สารโพลีดังกล่าวนี้มีความเป็นด่างหรือเบสิกซิติสูง (เบสิกซิติ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของไฮดรอกไซด์ไอออน ต่ออะลูมิเนียม m/n) และประจุไฟฟ้าบวกมีคุณสมบัติจับตัวสูงและมีเสถียรภาพมาก ลักษณะทั่วไปของ PAC อาจอยู่ในรูปของสารละลายใสหรือขุ่นเล็กน้อย และอาจอยู่ในรูปของผงละเอียดสีขาว PAC ทำให้สารต่างๆ ที่แขวนลอยในน้ำจับตัวกันได้ โดยตะกอนสกปรกในน้ำที่มีประจุเป็นลบจะรวมตัวกับประจุไฟฟ้าบวกของ PAC ในทุกขนาดของอนุภาคตะกอน PAC มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ และมีหลายนิวเคลียสทำให้เกิดตะกอนหนัก จึงสามารถตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว S., Vimal Chandra. et al. (2005) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอต์และสีในน้ำเสียจากโรงงานกระดาษโดยใช้สารโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์และแก้าลอยจากขานอ้อยเป็นวัสดุดูดซับ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโคแอกกูแลชั่นของสารโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ คือ pH 3 ที่ปริมาณ 3 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอต์ และสี 80% และ 90%

2.8.3 Ferric chloride ($FeCl_3$) ส่วนใหญ่นำมาใช้ในรูปของสารละลายเจือจาง โดยใช้เป็นสารช่วยจับตะกอน(flocculating agent) และสารตกตะกอน(precipitating agent) ในระบบบำบัดน้ำ โดย $FeCl_3$ จะทำปฏิกิริยากับความเป็นด่างในน้ำเกิดเป็น $Fe(OH)_3$ ซึ่งจะทำหน้าที่ดูดซับของแข็งที่มีขนาดเล็กและอนุภาคของคอลลอยด์ $FeCl_3$ มีประสิทธิภาพที่ดีโดยเฉพาะในการตกตะกอนสารโลหะหนัก และซัลไฟด์ นอกจากนี้ในกรณีของน้ำมันและสารโพลีเมอร์ที่ยากต่อการย่อยสลายก็สามารถถูกดูดซับบน $Fe(OH)_3$ ได้

จะเห็นว่าสารสร้างตะกอนที่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันเป็นตัวที่กำจัดสารอินทรีย์ ของแข็งแขวนลอยรวมไปถึงความขุ่นในน้ำเสีย แต่จากงานวิจัยนี้แนะนำกระบวนการสร้างตะกอนมาใช้เพื่อกำจัดตะกอนเหล็ก

ที่เกิดจากปฏิกิริยาเฟนตันจึงเลือกใช้ปูนขาวซึ่งเป็นสารที่ช่วยเพิ่มค่าพีเอชของน้ำให้สูงขึ้น จึงนำมาใช้ในการช่วยตกตะกอนเหล็กที่เกิดขึ้น Li.,J.,et al. (2012) ได้ทำการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หลังจากที่เกิดปฏิกิริยาเฟนตันสิ้นสุดลงเพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก(Fe^{2+} , Fe^{3+}) ที่หลงเหลืออยู่ และพบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ถูกนำมาใช้เป็นสารสร้างตะกอนร่วมกับเฟอร์รัสซัลเฟต ในกระบวนการสร้างตะกอน ก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดด้วยเฟนตันต่อไป (J.A. Perdigon-Malon et al., 2010)

2.9 ปูนขาว (Lime)

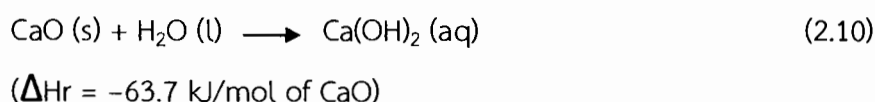
ปูนขาวเป็นสารหนึ่งที่มีความสำคัญในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากปูนขาวเป็นตัวเพิ่มค่าเป็นด่างให้กับน้ำและทำให้เกิดหรือยับยั้งปฏิกิริยาได้ ดังนั้นหากนำปูนขาวมาใช้ในการกระบวนการสร้างตะกอนจะเป็นการลดต้นทุนในการใช้สารเคมีในการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ และเมื่อปูนขาวเข้าทำปฏิกิริยากับตะกอนเหล็กที่เกิดจากปฏิกิริยาเฟนตันจะทำให้เกิดการรวมตัวกันและเกิดการตกตะกอนที่ดีขึ้นได้

ปูนขาว (lime) มีชื่อเรียกทางเคมีว่า แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide) มีสูตรทางเคมีคือ CaO ลักษณะโดยทั่วไปเป็นผงสีขาว มีฤทธิ์เป็นด่าง กัดกร่อนได้ โดยปกติแล้วจะผลิตแคลเซียมออกไซด์ CaO จากการเผาวัสดุใดๆ ที่มีส่วนผสมของหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นองค์ประกอบ อุณหภูมิมากกว่า 825 องศาเซลเซียส เรียกกระบวนการเผาใหม่นี้ว่า calcination และจะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมา โดยปูนขาวสามารถทำปฏิกิริยากับ CO_2 ที่อยู่ในอากาศ โดยอาศัยระยะเวลาที่เพียงพอจะกลับไปเป็น CaCO_3 ได้ ดังนั้นการเก็บรักษาต้องระวังไม่ให้อากาศสามารถผ่านเข้าไปในภาชนะที่ใช้จัดเก็บได้

สมการแสดงปฏิกิริยา calcination หินปูน



เมื่อนำปูนขาว $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้แคลเซียมออกไซด์และความร้อน ดังสมการ (2.9)



นอกจากจะได้ Ca(OH)_2 เป็นผลิตภัณฑ์แล้ว ปฏิกิริยานี้ยังให้ความร้อนออกมาค่อนข้างมากถึง -63.7 kJ/mol ทำให้สามารถประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนได้อีก และในทางกลับกันเมื่อเผา Ca(OH)_2 ที่อุณหภูมิ 512 องศาเซลเซียส ก็จะได้ CaO กลับคืนมาดังสมการ (2.11)



2.10 แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่

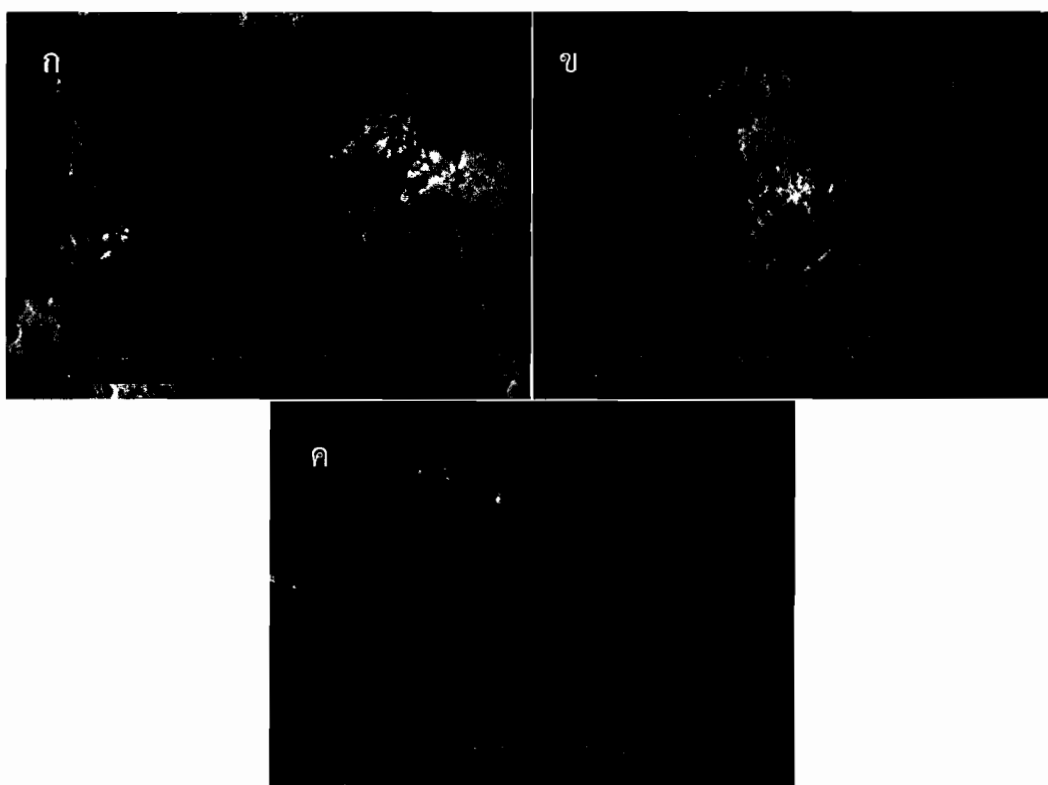
แร่ธาตุ	% (โดยน้ำหนัก)		
	เปลือกไข่ไก่	เปลือกไข่เป็ด	เปลือกไข่นกกระทา
CaCO_3	99.0	96.5	97.3
S	0.1	1.2	0.4
Mg	0.5	0.1	1.0
P	0.2	0.5	1.1
K	-	0.839	-

ที่มา: วิชัย ดำรงโภคภัณฑ์ (2555: 75-83)

เปลือกไข่ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตอาหารทั้งระดับครัวเรือนและอุตสาหกรรม ในแต่ละปีมีปริมาณเปลือกไข่จำนวนมากถูกทิ้งโดยการฝังกลบ โดยไม่เกิดประโยชน์ เสียค่าใช้จ่ายในการขนส่ง และอาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา จึงมีการนำเปลือกไข่มาใช้ประโยชน์ จากตารางที่ 2.2 พบว่าเปลือกไข่ไก่มีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตสูงที่สุด เมื่อเทียบกับเปลือกไข่เป็ดและเปลือกไข่นกกระทา ดังนั้นถึงเหมาะสมที่จะนำมาแปรรูปโดยอาศัยเทคโนโลยีเพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากเปลือกไข่ได้มากยิ่งขึ้น (วิชัย ดำรงโภคภัณฑ์, 2555) ในปัจจุบันพบว่าการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมบริสุทธิ์จากเปลือกไข่โดยกระบวนการให้ความร้อน (Thermal treatment) พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมบริสุทธิ์ คือ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง จะได้สารประกอบแคลเซียมออกไซด์บริสุทธิ์ 66 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวและมีการกระจายตัวที่ดี จากการทดลองเผาเปลือกไข่ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยเริ่มต้นที่สภาวะแรกคือ อุณหภูมิห้องถึง 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 3 และ 5 ชั่วโมง จากนั้นศึกษาสภาวะที่ 2 ที่อุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 3 และ 5 ชั่วโมง และที่สภาวะสุดท้ายที่อุณหภูมิ

800 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 3 และ 5 ชั่วโมง (นุชนภา ตั้งบริบูรณ์ และณททัย สอนประสาร, 2552)

เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเปลือกไข่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าผงเปลือกไข่เผามีลักษณะผงสีขาว ไม่มีกลิ่น และไม่มีคมระดังที่ สภาวะการเผา อุณหภูมิ 800 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส โดยผลจากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในภาพที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงความชัดเจนของผลึกและความพรุนตัวสูง และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2 ไมครอน สำหรับที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด



ภาพที่ 2.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดย (ก) เปลือกไข่เผาที่ 800 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง (ข) เปลือกไข่เผาที่ 900 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง และ (ค) เปลือกไข่เผาที่ 1,000 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง

เทคโนโลยีการใช้ประโยชน์จากเปลือกไข่ จากการใช้เทคโนโลยีในการเปลี่ยนแปลงเปลือกไข่เหลือทิ้งให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้แบ่ง ออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ตามผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปเปลือกไข่ดังนี้

(1) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยการนำเปลือกไขอบแห้งหรือตากแห้งแล้วนำมาบดสามารถนำไปใช้ในการปรับพีเอชของน้ำเสีย ในทางโภชนาการใช้เปลือกไขบดผสมในอาหารเสริมแคลเซียม เช่นผสมเปลือกไขบดในผลิตภัณฑ์ขนมอบกรอบและใช้เป็นแหล่งแคลเซียมเสริมในอาหารสัตว์

(2) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยใช้เทคโนโลยีการเผาเปลือกไขที่อุณหภูมิสูงในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเรียกว่า ระบบไพโรไลซิส (pyrolysis) และทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า กระบวนการแคลไซน์ชัน (calcination) สามารถนำไปใช้ในการปรับพีเอชของน้ำ และดินที่เป็นกรด ใช้ในการผลิตโซดาไฟและสารฟอกขาว เป็นต้น

(3) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) การผลิตแคลเซียมคลอไรด์จากเปลือกไขต้องอาศัยเทคโนโลยีการสกัดด้วยกรด โดยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไขจะทำปฏิกิริยากับกรดเกลือ (HCl) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมคลอไรด์

(4) คอลลาเจน (Collagen) คอลลาเจนเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่พบมากในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมประมาณ 25% ของปริมาณโปรตีนทั้งหมดในร่างกาย พบว่าเยื่อหุ้มภายในเปลือกไขมีคอลลาเจนเป็นองค์ประกอบอยู่สูงถึง 10% จึงเป็นแหล่งวัตถุดิบที่น่าสนใจในการผลิตคอลลาเจนราคาถูก โดยอาศัยเทคโนโลยีในการสกัดโดยการย่อยด้วยกรดและเอนไซม์ (acid-pepsin digestion) และจากนั้นจึงทำการแยกคอลลาเจนออกมาโดยการตกตะกอนด้วยเกลือ (วิชัย ดำรงโภคภัณฑ์, 2555)

โดยงานวิจัยนี้สนใจที่จะนำแคลเซียมออกไซด์มาใช้ เพื่อช่วยให้เกิดการตกตะกอนของเหล็กที่เกิดจากปฏิกิริยาเฟนตัน ทั้งนี้เพราะต้นทุนต่ำและสามารถใช้เป็นสารสร้างและรวมตะกอนช่วยให้ตะกอนเหล็กตกตะกอนได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นจึงทำการศึกษาแคลเซียมออกไซด์เป็นสารสร้างตะกอน และทำการทดลองสารแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการดังกล่าว

2.10.1 เครื่องมือวิเคราะห์คุณลักษณะของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข

จากการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมออกไซด์ขึ้นจากเปลือกไข ด้วยกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงต้องนำสารที่สังเคราะห์ขึ้นมาตรวจสอบคุณลักษณะเพื่อดูลักษณะทางโครงสร้าง รูปร่าง ขนาด และหมู่ฟังก์ชันของสารที่สังเคราะห์

2.10.1.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนรูปแบบหนึ่งซึ่งสร้างภาพขึ้นงานโดยการส่องลำอิเล็กตรอนกราดไปบนผิวหน้าของชิ้นงานอย่างต่อเนื่องที่ละแถวจากนั้นส่งข้อมูลขึ้นไปยังจอภาพ โดยจะปรากฏเป็นเส้นโดยจะมองเห็นเส้นใหม่ก่อนเส้นเก่าหายไปตั้งแต่เส้นแรกสุดไปจนถึงล่างสุด เส้นที่

มองเห็นนี้จะรวมกันเป็นภาพตัวอย่างที่เราต้องการอิเล็กทรอนิกส์เมื่อเกิดอันตรกิริยากับอะตอมบนชิ้นงาน จะปล่อยสัญญาณออกมาซึ่งให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติอื่น

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดที่มีกำลังขยายสูง โดยใช้ลำอิเล็กตรอนที่โฟกัสแล้วแทนแหล่งกำเนิดแสงส่องกราดไปบนผิวหน้าของตัวอย่างในการสร้างภาพในแนวระนาบและแนวลึก เครื่อง SEM สามารถให้ภาพของวัสดุที่มีกำลังขยายและความละเอียดสูง โดยมีกำลังขยายอยู่ในช่วง 10 เท่า ไปจนถึง 500,000 เท่า โดยมีความละเอียดต่ำกว่า 1 นาโนเมตร เครื่อง SEM ได้ถูกใช้บ่อยครั้งในการสร้างภาพที่แสดงรูปร่างของวัสดุที่มีความละเอียดสูง นอกจากนี้ เครื่อง SEM สามารถถูกใช้ในการบ่งชี้เฟสที่มีพื้นฐานมาจากการวิเคราะห์ทางเคมีเชิงคุณภาพ และ/หรือ โครงสร้างผลึก การวัดขนาดโครงสร้างภายในของวัสดุ และ วัสดุที่มีขนาดเล็กมากซึ่งมีขนาดต่ำกว่า 50 นาโนเมตร ได้อย่างแม่นยำ หรือแสดงการเปลี่ยนแปลง องค์ประกอบทางเคมีแบบ 3 มิติ เช่น สามารถถูกใช้ในการแยกแยะเฟสในตัวอย่างที่มีหลายเฟสได้อย่างรวดเร็วหรือ สามารถถูกใช้ในการตรวจสอบหาการจัดเรียงตัวของเส้นใยขนาดไมโครและการเรียงตัวของโครงสร้างผลึกในวัสดุหลายชนิด

1) ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง SEM

เครื่อง SEM ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ ดังต่อไปนี้ (ภาพที่ 2.2)

1.1) แหล่งให้กำเนิดอิเล็กตรอน (electron source) หรือปืนยิงอิเล็กตรอน (electron gun)

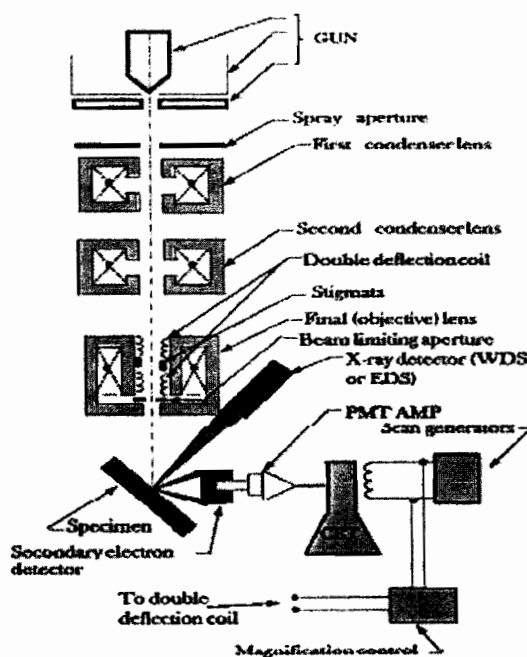
1.2) เลนส์รวมลำอิเล็กตรอน (electron lenses)

1.3) แท่นวางตัวอย่าง (sample stage)

1.4) เครื่องรับสัญญาณ (detector)

1.5) จอภาพ (display/data output device)

และส่วนประกอบเสริม (accessory device) ที่อยู่ภายในเครื่อง ได้แก่ แหล่งให้กำเนิดพลังงาน ระบบสุญญากาศระบบทำความเย็นนอกจากนี้ เครื่อง SEM ควรตั้งอยู่บนพื้นที่ปราศจากแรงสั่นสะเทือน และอยู่ในห้องที่มีบรรยากาศที่ปราศจากสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า



ภาพที่ 2.2 องค์ประกอบหลักของเครื่อง SEM

เครื่อง SEM ส่วนใหญ่ มักจะมีเครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 1 เครื่อง (โดยปกติได้แก่ เครื่องรับสัญญาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ) แต่บางครั้งอาจมีเครื่องรับสัญญาณอื่นเพิ่มเติม ได้แก่ energy-dispersive x-rayspectroscopy (EDS), back-scattered electron (BSE), cathodoluminescence (CL) และ electron back scatterdiffraction (EBSD) เป็นต้น โดยประสิทธิภาพของเครื่องมือชนิดนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนของเครื่องรับสัญญาณที่เป็นส่วนประกอบ

กระบวนการทำให้เกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) เครื่อง SEM ทั่วไป ลำอิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออกมาเมื่อได้รับความร้อนจากปืนยิงอิเล็กตรอน ซึ่งภายในประกอบด้วยขั้วคาโทดที่ทำจากฟิลาเมนต์ของทังสเตน ทังสเตนมักถูกใช้ในปืนยิงอิเล็กตรอนประเภทนี้ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูงที่สุดและมีความดันไอต่ำที่สุดในบรรดาโลหะทั้งหมด ดังนั้นมันจึงถูกใช้ในการปล่อยอิเล็กตรอนออกมา เมื่อได้รับความร้อนและนอกจากนี้มันยังมีราคาไม่แพงอีกด้วย นอกจากนี้ ทังสเตน สารที่สามารถปล่อยอิเล็กตรอนออกมาได้ ได้แก่ ขั้วคาโทดที่ทำจาก แลนทานัม เฮกซะโบไรด์ (lanthanum hexaboride (LaB₆)) ซึ่งสามารถถูกใช้ในเครื่อง SEM มาตรฐานที่ใช้ทังสเตน ฟิลาเมนต์ได้ ถ้าระบบสุญญากาศได้ถูกพัฒนาให้ดีขึ้น และ ปืนปล่อยอิเล็กตรอนแบบสนาม (field emission guns (FEG)) ซึ่งเป็นชนิดคาโทดเย็นที่ใช้ผลึกทังสเตนแบบเดี่ยวเป็นตัวปล่อยอิเล็กตรอนหรือแบบชอตคกี (Schottky) ที่ใช้ความร้อนช่วย ซึ่งใช้เซอร์โคเนียมออกไซด์ (zirconium oxide) เป็นตัวปล่อยลำอิเล็กตรอนซึ่งโดยทั่วไปมีพลังงานอยู่ในช่วง 0.2 keV ถึง 40 keV ได้ถูกทำให้โฟกัสโดยเลนส์

รวมลำอิเล็กตรอนหนึ่งหรือสองอันเพื่อให้เกิดเป็นจุดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.4 nm ถึง 5 nm จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะผ่านขดลวดหนึ่งคู่ หรือ แผ่นหักเหหนึ่งคู่ในคอลัมน์ของอิเล็กตรอน ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในเลนส์อันสุดท้ายซึ่งจะหักเหลำอิเล็กตรอนในแนวแกน x และ y เพื่อว่ามันจะได้ส่องกราดไปที่ละแถวบนพื้นที่สี่เหลี่ยมบนผิวหน้าของชิ้นงานเมื่อลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิได้เกิดอันตรกิริยากับตัวอย่างอิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานไปโดยการกระเจิงแบบไม่มีทิศทางเข้าไปเข้ามาและถูกดูดซับไว้ภายในปริมาตรรูปหยดน้ำของตัวอย่างที่รู้จักกันในชื่อ “ปริมาตรของการเกิดอันตรกิริยา (interaction volume)” ซึ่งลึกลงไปจากผิวหน้าน้อยกว่า 100 นาโนเมตรถึงประมาณ 5 ไมโครเมตร ขนาดของปริมาตรที่เกิดอันตรกิริยาขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบ เลขอะตอมของวัสดุ และความหนาแน่นของวัสดุบนชิ้นงาน การแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างลำอิเล็กตรอนและวัสดุเป็นผลให้เกิดการหักเหของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงโดยการกระเจิงแบบยืดหยุ่น และปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาโดยการกระเจิงแบบยืดหยุ่นและรังสีอิเล็กโตรแมกเนติก ซึ่งแต่ละสัญญาณสามารถตรวจจับได้โดยเครื่องรับสัญญาณแบบพิเศษกระแสไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอนสามารถถูกดูดซับโดยวัสดุ และสามารถถูกตรวจจับและถูกใช้เพื่อสร้างภาพของการกระจายตัวของกระแสไฟบนผิวชิ้นงาน เครื่องขยายสัญญาณไฟฟ้าหลายชนิดได้ถูกใช้เพื่อขยายสัญญาณซึ่งถูกแสดงในรูปของการแปรเปลี่ยนความสว่างบนจอคอมพิวเตอร์ (หรือ บนหลอดคาโทดในรุ่นที่ย้อนยุค)ภาพที่ได้ดั่งนั้นจึงเป็นเสมือนแผนที่การกระจายของความเข้มของสัญญาณที่ถูกปล่อยมาจากพื้นที่ที่อิเล็กตรอนถูกส่องกราดไปบนผิวหน้าของตัวอย่างในกล้องจุลทรรศน์ยุคโบราณ ภาพอาจถูกแสดงโดยการถ่ายภาพจากหลอดคาโทดที่มีความละเอียดสูง แต่ในเครื่องรุ่นใหม่ภาพได้ถูกบันทึกไว้ในส่วนที่เก็บข้อมูลในคอมพิวเตอร์กำลังขยายของ SEM สามารถถูกเพิ่มได้ไปจนถึง 106 เท่าหรือประมาณ 10 ถึง 500,000 เท่า กำลังขยายของภาพในเครื่อง SEM ไม่ได้ขึ้นอยู่กับกำลังของเลนส์วัตถุ ซึ่งแตกต่างจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องทะลุเครื่อง SEM ดังเช่น เครื่อง scanning probe microscopy กำลังขยายเป็นผลมาจากอัตราส่วนของขนาดที่ลากเป็นเส้นบนตัวอย่างและภาพที่ปรากฏเป็นเส้นที่ถูกแสดงบนจอ สมมติว่าจอมีขนาดที่คงที่ กำลังขยายสูงกว่าเป็นผลมาจากการลดขนาดที่ลากเป็นเส้นบนชิ้นงานดั่งนั้นกำลังขยายของ SEM จึงถูกควบคุมโดยกระแสที่ให้กับขดลวด หรือ ค่าความต่างศักย์ที่ให้กับแผ่นหักเหในแนว x, y และไม่ขึ้นกับกำลังของเลนส์วัตถุ (สริยญา ขวพันธ์, 2555)

2.10.1.2 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD)

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ และความรู้เกี่ยวกับวิชาการระบบโครงสร้างผลึก เครื่องมือชนิดนี้มี

ความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพการผลิต ใช้สำหรับตรวจสอบสมบัติของวัสดุและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตตามขั้นตอนต่าง ๆ

ทฤษฎีพื้นฐานของ XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีที่สะท้อนทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ ในปี ค.ศ. 1912 นาย W.L.Bragg ได้นำทฤษฎีดังกล่าวมาศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของแร่ต่าง ๆ ต่อมาได้มีการประดิษฐ์คิดค้น เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ขึ้นในปี 1948 และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งสามารถนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงาน และวิเคราะห์ประมวลผล เพื่อให้เกิดความรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น

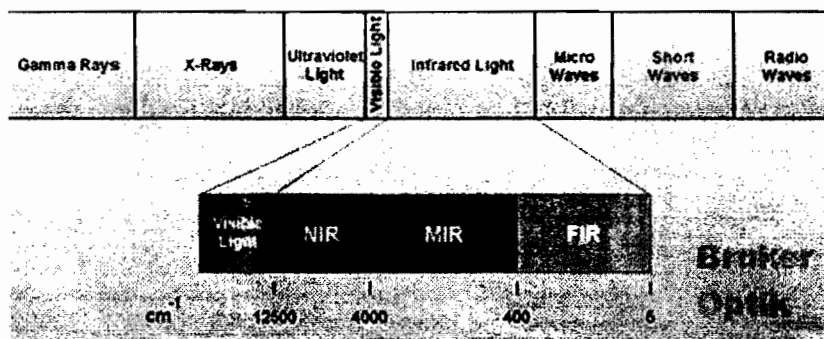
XRD เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ในกลุ่มนักวัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา โลหะวิทยา เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ ผลการวิเคราะห์จาก XRD ทำให้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด หรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกันและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย โดยที่ขนาดและประจุของอะตอมของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว เปรียบได้กับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน (ศันศินีย์ รักไทยเจริญชีพ, 2558)

2.10.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR)

1) Interaction of radiation

Infrared spectroscopy จะวัดแสงอินฟราเรดที่วัตถุดูดกลืนไว้ โดยที่รังสีอินฟราเรดเป็นช่วงสเปกตรัมหนึ่งของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนกับแสง Visible และ UV แต่จะมีพลังงานต่ำกว่า เมื่อถูกวัตถุได้รับรังสีอินฟราเรดจะมีการแผ่รังสีของแสงอินฟราเรดแก่วัตถุ

2) Electromagnetic spectrum



ภาพที่ 2.3 Electromagnetic spectrum

โดยทั่วไปรังสีอินฟราเรดมีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 0.78 mm ถึง 1,000 mm หรือมี Wave Number ที่ $12,500 \text{ cm}^{-1}$ ถึง 5 cm^{-1} จะจัดช่วงสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรด ออกเป็น 3 ช่วงซึ่งเมื่อนำเอาแต่ละช่วงมาวิเคราะห์ทาง Spectroscopy จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ต่างกันคือ

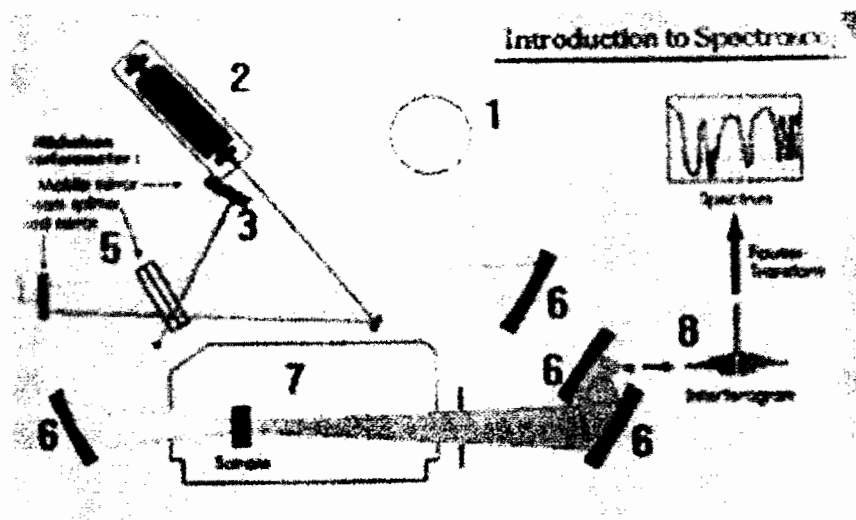
2.1) Near Infrared Region Wavenumber (NIR) $12,500 - 4,000 \text{ cm}^{-1}$ เป็นช่วงที่จะให้สเปกตรัมที่ได้จาก โอเวอร์โทน (Overtone Band)

2.2) Middle Infrared Region Wavenumber (MIR) $4,000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ เป็นช่วงที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เนื่องจากใช้ประโยชน์ได้มากในการวิเคราะห์

2.3) Far Infrared Region Wavenumber (FIR) $400 - 5 \text{ cm}^{-1}$ สเปกตรัมที่ได้จะเป็นการสั่นทั้งแกนของโครงสร้างโมเลกุลหรือเรียกว่า ช่วงลายพิมพ์นิ้วมือของสาร (Fingerprint Region) ซึ่งมีประโยชน์ในการเปรียบเทียบสาร เนื่องจาก ลายพิมพ์นิ้วมือของสารเดียวกันจะให้สเปกตรัมที่เหมือนกัน

3) ลักษณะเด่นของ Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) เครื่อง Infrared Spectrometer จะใช้หลักการกระจายแสงของสเปกตรัมการแผ่ รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงของอินฟราเรดแล้วทำการวัดค่าความเข้มแสงเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นหรือเลขคลื่น (Frequency -Domain Spectrum) ซึ่งก็จะได้ออกมาเป็นสเปกตรัม แต่สำหรับ FT-IR จะใช้การวัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ กันอย่างต่อเนื่องเปรียบเทียบกับเวลา (Time - Domain Spectrum) จากนั้นจะถูกเปลี่ยนให้เป็นสเปกตรัมของความเข้มของแสงต่อความยาวคลื่นหรือเลขคลื่น โดยการ Fourier Transform ด้วยคอมพิวเตอร์ก็จะได้ออกมาเป็น Fourier Transform Spectrum ด้วยวิธีการนี้ช่วยให้การวิเคราะห์มีความรวดเร็วเพิ่มขึ้นพร้อมทั้ง Resolution ก็ดีขึ้นด้วย

4) องค์ประกอบของเครื่อง FT-IR (ภาพที่ 2.4)



ภาพที่ 2.4 องค์ประกอบของเครื่อง FT-IR

4.1) แหล่งกำเนิด Laser เพื่อใช้แสง Laser ในการปรับระยะของ Mobile Mirror

4.2) Mobile Mirror เป็นกระจกเงาที่สามารถสะท้อน รังสีอินฟราเรด และสามารถที่จะเคลื่อนที่ได้

4.3) Fixed Mirror เป็นกระจกเงาที่สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรด เช่นเดียวกับ MobileMirror แต่ไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ได้

4.4) Beam Splitter เป็นส่วนที่จะทำการแยกอินฟราเรดที่ผ่านเข้ามา ให้เป็นสองส่วนคือสามารถให้แสงทะลุผ่านได้ 50 % และจะสะท้อนกลับ 50 %

4.5) เป็นกระจกเงาที่สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรดใช้ในการบังคับทิศทาง การเดินของรังสีอินฟราเรด ให้ไปตามทิศทางที่ต้องการ

4.6) Sample Compartment เป็นส่วนที่จะใช้ในการบรรจุ Sample เข้าไปเพื่อการวิเคราะห์

4.7) Detector ใช้วัดความเข้มแสงที่เหลือจากการดูดกลืนของตัวอย่าง

5) การทำงานของเครื่อง FT-IR

5.1) แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดจะทำการผลิตรังสีอินฟราเรดในช่วง ความยาวคลื่นหรือเลขคลื่นที่จะใช้ในการวิเคราะห์

5.2) Beam Splitter ซึ่ง Beam Splitter จะปล่อยให้ทะลุผ่านไปที่ Fixed Mirror 50% และสะท้อน กลับมาที่ Mobile Mirror 50%

5.3) Fixed Mirror จะสะท้อนกลับมาที่ Beam Splitter

5.4) Mobile Mirror จะสะท้อนกลับมาที่ Beam Splitter

5.5) อินฟราเรดที่สะท้อนมาจาก ทั้ง Mobile Mirror และ Fixed Mirror จะมารวมกันและเกิดการแทรกสอดกันขึ้น แต่จากการที่ Mobile Mirror สามารถเคลื่อนที่ได้โดยการควบคุมระยะการเคลื่อนที่ โดย Laser เมื่อ Mobile Mirror เคลื่อนที่ก็จะทำให้ระยะทางการสะท้อนกลับของ รั้งสีอินฟราเรด ของ Mobile Mirror และ Fixed Mirror ไม่เท่ากันซึ่งก็จะส่งผลให้ รั้งสีอินฟราเรดที่ได้มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปอันเกิดจาก การแทรกสอด แบบเสริมกัน หรือหักล้างกัน เรียกว่า Interferogram

5.6) อินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่างๆ จะสะท้อนไปที่ Sample Compartment ผ่าน Sample ซึ่งจะมีการดูดกลืนอินฟราเรด เอาไว้บางส่วนในบางความยาวคลื่น ส่วนอินฟราเรดที่ไม่ถูกดูดกลืนก็จะผ่านเข้าสู่ Detector สัญญาณที่ได้คอมพิวเตอร์จะทำการแปลงสัญญาณ Interferogram ด้วยสมการ Fourier Transform ผลที่ได้จะเป็นสเปกตรัม การดูดกลืนแสง อินฟราเรดของสารที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ (สำนักงานเลขาธิการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์, 2557)

2.11 ปัจจัยของกระบวนการเฟ้นต้นร่วมกับการสร้างตะกอน

จากปัญหาตะกอนเหล็กหลงเหลือเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาเฟ้นต้นได้นำกระบวนการสร้างตะกอนด้วย สารเคมีเข้ามาช่วยแก้ปัญหานี้ และยังช่วยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงยิ่งขึ้นเพื่อให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับทั้งสองกระบวนการดังนี้

2.11.1 ค่าพีเอช

เนื่องจากในสภาวะค่าพีเอชที่เหมาะสมของกระบวนการเฟ้นต้นและการสร้างตะกอนมีความแตกต่างกันอย่างมาก จากสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟ้นต้นเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาแล้วจะพบว่าสภาวะค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นกรดประมาณ 3 ถึง 4 และสำหรับการสร้างตะกอนพบว่าสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการสร้างตะกอนโดยทั่วไปมีค่าพีเอชตั้งแต่ 8 เป็นต้นไป ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาเฟ้นต้นที่ค่าพีเอช 3 เข้าสู่กระบวนการสร้างตะกอนที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 นั้น ต้องมีการใช้สารเคมีปรับพีเอชเพื่อทำการปรับให้ค่าพีเอชของน้ำเข้าสู่ช่วงพีเอชที่กำหนด ดังนั้นในส่วนนี้หากตั้งสภาวะของกระบวนการสร้างตะกอนไว้สูงจะก่อให้เกิดการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและสารเคมีโดยใช้เหตุ

W., Yanyu. et al. (2010) ได้ทำการทดลองกำจัดสารฮิวมิกในน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบโดยกระบวนการเฟ้นต้นและกระบวนการสร้างตะกอน โดยหลังจากสิ้นสุดระยะเวลาของปฏิกิริยาเฟ้นต้นแล้ว ทำการปรับค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 7 เพื่อยุติการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการเฟ้นต้นและทำการปรับพีเอชให้เท่ากับ 8 เพื่อเข้าสู่กระบวนการสร้างตะกอนและเติม 0.1% polyacrylamide เป็นสารรวมตะกอน

2.11.2 ชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอน

สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ และวีระนุช บุญรุ่ง (2553) ได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยกระบวนการเฟนตันและกระบวนการสร้างตะกอน ทั้งนี้ได้ทำการทดลองสารเคมี 3 ชนิด คือ สารเฟนตัน (H_2O_2 และ Fe^{2+}) สารอะลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$) และสารโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC 30 %) จากการทดลองพบว่าสารเฟนตันมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีไอดีสูงสุด รองลงมาคือ สาร PAC และ $Al_2(SO_4)_3$ ตามลำดับ ในการกำจัดสีพบว่าสาร PAC มีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาคือ สารเฟนตันและ $Al_2(SO_4)_3$

Xiang-Juan Ma and Hui-Long Xia (2009) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียจากหมักพิมพ์ด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน โดยทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ ค่าพีเอช ความเข้มข้นของสารเฟนตัน ระยะเวลาการตกตะกอนพบว่าสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟนตัน คือ พีเอช 4 ความเข้มข้นของสารเฟนตัน คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 มก./ล. และเฟอร์รัสซัลเฟต 25 มก./ล. และระยะเวลาในการตกตะกอน 30 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีไอดี คือ 86.4% และ 92.4% ตามลำดับ ในกระบวนการสร้างตะกอน สารสร้างตะกอน คือ สารโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับเฟอร์รัสซัลเฟต พบว่าสารทั้งสองช่วยลดระยะเวลาในการรวมตะกอน (Flocs settling time) และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียให้ดียิ่งขึ้น

García-Morales et al. (2012) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง กระบวนการโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และกระบวนการโอโซนร่วมกับการสร้างตะกอนในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม พบว่ากระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับกระบวนการโอโซนมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น สี และซีไอดีสูงสุด จึงนำมาศึกษาผลประสิทธิภาพเมื่อทำงานร่วมกับกระบวนการบำบัดทางชีวภาพเดิมของโรงงาน พบว่าค่าความขุ่น สีและซีไอดี มีค่าที่อยู่เกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นจึงประสบความสำเร็จในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

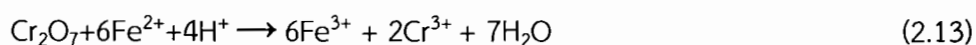
2.12 ซีไอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)

ค่าซีไอดี หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการ เพื่อใช้ในการ oxidize สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดนที่สารอินทรีย์เกือบทั้งหมด (95-100%) ถูก oxidize โดยตัวเติมออกซิเจนอย่างแรง (Strong oxidizing agent) ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด

การเกิดปฏิกิริยาของซีไอดีมีความคล้ายกับบีไอดี คือ สารอินทรีย์ในน้ำจะถูก oxidize จนได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ แตกต่างที่บีไอดีนั้นใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ส่วนซีไอดีใช้ตัวเติมออกซิเจน (oxidizer) เข้าทำปฏิกิริยาดังกล่าว โดยทั่วไปค่าซีไอดีจะมีค่าสูงกว่าค่าบีไอดี ทั้งนี้เพราะ

สารอินทรีย์คาร์บอนจะถูก oxidize อย่างสมบูรณ์โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการดูดซึมทางชีวะ (biological assimilation) ของสารเหล่านั้น เช่น กลูโคส ลิกนิน เซลลูโลส โดยเฉพาะน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถถูก oxidize ทางชีวะรวมอยู่ด้วยทำให้ค่า ซีโอดีสูงกว่าค่าบีโอดีมาก ในกรณีที่น้ำเสียมมีสารอินทรีย์กลุ่ม straight-chain aliphatic compound, aromatic hydrocarbon, pyridine และ betaine ปะปนอยู่ด้วย สารเหล่านี้จะไม่ถูก oxidize ทางเคมี ค่าซีโอดีจึงน้อยกว่าค่าบีโอดี และไอออนของสารอินทรีย์บางตัวเช่น halogen (F, Cl⁻, Br⁻), NO²⁻, S²⁻ และ Fe²⁺ มีผลทำให้ค่าซีโอดีมีมากกว่าความเป็นจริง การหาค่าซีโอดีสามารถรู้ผลได้ในเวลาไม่เกิน 3 ชั่วโมง ดังนั้นการหาค่าซีโอดีจึงเหมาะในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย เพราะสามารถแก้ไขข้อบกพร่อง ๆ ได้อย่างทันเวลา และยังสามารถใช้ในการประเมินค่าบีโอดีอย่างคร่าว ๆ ได้

Strong oxidizing agent ที่ใช้ในการหาค่าซีโอดี มีด้วยกันหลายตัว คือ potassium permanganate, ferric sulfatepotassium iodate และ potassium dichromate การหาค่าซีโอดีโดยใช้โปแตสเซียมไดโครเมตเป็นวิธีที่นิยมใช้ เพราะให้ผลที่น่าเชื่อถือและแน่นอนโดยหลักการของวิธีโปแตสเซียมไดโครเมต คือ สารอินทรีย์คาร์บอนจะถูก oxidized โดยสารโปแตสเซียมไดโครเมตที่สภาวะกรดอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงใช้การรีฟลักซ์ (reflux) เพื่อป้องกันการระเหยของสารเคมีจากนั้นจึงทำการไทเทรตหาปริมาณโปแตสเซียมไดโครเมตที่เหลืออยู่ด้วยสารละลายมาตรฐาน FAS (ferrous ammonium sulfate) โดยใช้ ferroin เป็นอินดิเคเตอร์ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



Ag₂SO₄ ถูกเติมเป็นตัว catalyst เพื่อเร่งปฏิกิริยาการออกซิไดส์ของกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (straight chain aliphatic) นอกจากนี้ Ag₂SO₄ ที่เติมลงไปจะเข้าทำปฏิกิริยากับ Cl⁻, Br⁻ หรือ I⁻ แต่ Ag₂SO₄ เป็นตัว catalyst ที่ไม่สามารถใช้ได้กับสารประกอบเช่น aromatic และ pyridine ซึ่งสารรบกวนที่สำคัญ คือ Cl⁻ จึงต้องมีการใส่ HgSO₄ ก่อนเพื่อไปจับกับ Cl⁻ ให้อยู่ในรูปของ mercuric chloride complex โดยวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีค่าซีโอดีตั้งแต่ 50 มก./ล. ขึ้นไป (กรรณิการ์ สิริสิงห, 2549)

ในกรณีที่น้ำตัวอย่างมีคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) อยู่ด้วย Cl⁻ จะทำปฏิกิริยา precipitation กับ Ag₂SO₄ ได้ AgCl(s) ทำให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการใช้วิเคราะห์หาค่า COD และถ้าไม่มี Ag₂SO₄ อยู่เลย Cl⁻ จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็น Cl₂

อันเป็นผลให้เกิดค่า COD สูงเกินไป ซึ่งไม่ใช่จากสารอินทรีย์ แต่สามารถป้องกันปัญหานี้ได้โดยใช้ HgSO_4 ทำปฏิกิริยาเชิงซ้อนกับ Cl^- ได้ HgCl_2 (aq) อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาออกซิเดชันของ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ และมลสารอื่นๆ อาจเกิดขึ้นได้ ฉะนั้นจึงต้องทำแบลนด์ด้วยน้ำกลั่น

หลังจากการย่อยสารอินทรีย์ด้วยไดโครเมตแล้ว จำเป็นต้องหาความเข้มข้นของไดโครเมตที่เหลืออยู่ในการทดลองนี้ โดยใช้ Fe^{2+} เป็น reducing agent ในการทำการไตเตรทกับไดโครเมต ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ของ Fe^{2+}

จุดสุดท้ายของการไตเตรทด้วย Fe^{2+} กับไดโครเมตจะถูกระบุปริมาณได้ ด้วยสีของเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroun indicator) ซึ่งสารเฟอร์โรอินประกอบด้วย 1, 10 - phenanthroline เมื่อถึงจุดสุดท้ายของการไตเตรทสารไดโครเมต (สีส้ม) ถูกเปลี่ยนไปเป็น Cr^{3+} (สีเขียว) หมดฉะนั้น Fe^{2+} อิสระจะทำปฏิกิริยาเชิงซ้อนกับสารเฟอร์โรอินได้สีน้ำตาล-แดง

การรีฟลักซ์ (Reflux) มี 2 วิธี คือ แบบเปิด (Open Reflux) และแบบปิด (Close Reflux) ทั้งสองวิธีการมีหลักการเหมือนกัน ต่างกันตรงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และแบบปิดสารอินทรีย์ที่ระเหยจะสามารถถูกออกซิไดซ์ได้มากกว่าระบบเปิด เพราะมีเวลาในการสัมผัสกับสารออกซิไดซ์ได้นานกว่า

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดีด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด เพราะเป็นวิธีการที่ประหยัด และสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ระเหยได้มากกว่าวิธีการรีฟลักซ์แบบเปิด

2.13 ของแข็ง (Solids)

ของแข็งทั้งหมด (Total solids) หมายถึงส่วนที่เหลืออยู่ในภาชนะภายหลังจากที่ตัวอย่างถูกนำไประเหยและทำให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิที่กำหนด ของแข็งรวมเป็นผลบวกของของแข็งแขวนลอยรวม (Total suspended solids) ซึ่งเป็นส่วนของของแข็งที่ค้างอยู่บนกระดาษกรองและของแข็งละลายรวม (Total dissolved solids) ซึ่งเป็นส่วนที่ผ่านกระดาษกรอง

2.13.1 ชนิดของของแข็ง

Total solids อาจแบ่งตามลักษณะการละลาย คือ

2.13.1.1 ของแข็งที่ละลายน้ำ หมายถึงของแข็งส่วนที่ละลายน้ำ อาจเป็นได้ทั้งเกลืออนินทรีย์หรือสารอินทรีย์บางอย่าง เช่น น้ำตาล

2.13.1.2 ของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ แบ่งเป็น 2 ชนิด ตามขนาดของส่วนที่ไม่ละลาย

1) ของแข็งแขวนลอย หมายถึง ของแข็งส่วนที่ไม่ละลายน้ำแต่มีขนาดเล็กพอที่จะแขวนลอยอยู่ในน้ำได้

2) ของแข็งตกตะกอน หมายถึง ของแข็งที่เป็นตะกอนขนาดใหญ่และหนัก สามารถตกมารวมกันยังส่วนล่างได้

ในการวิเคราะห์หาค่าของแข็งโดยใช้วิธี Gravimetric method ค่าที่ได้จะบอกในรูปน้ำหนักของสารต่อปริมาตรของน้ำตัวอย่างการหาค่าของแข็งมีวัตถุประสงค์และชนิดที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำและการนำไปใช้ ดังนี้

(1) ของแข็งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ (Dissolved and undissolved)

ปริมาณและชนิดของสารที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำแตกต่างกันออกไปแล้วแต่ชนิดของของเหลวในน้ำบริเวณส่วนใหญ่ของสารอยู่ในรูปของเกลืออนินทรีย์ซึ่งละลายน้ำเป็นส่วนมาก มีเพียงจำนวนเล็กน้อยที่อยู่ในรูปอนินทรีย์และก๊าซที่ละลายน้ำ ค่าของแข็งทั้งหมดของน้ำบริเวณอยู่ที่ 20-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกรณีที่กากตะกอนส่วนใหญ่ของสารอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ มีส่วนที่ละลายน้ำอยู่เพียงเล็กน้อย การหาค่าของแข็งที่ละลายและไม่ละลายน้ำทำได้โดยหาค่าของแข็งส่วนที่ผ่านการกรองกับส่วนที่ยังไม่ได้อกรอง สารที่ไม่ละลายน้ำเรียกว่าของแข็งแขวนลอย (suspended solids หรือ suspended matter)

(2) ของแข็งระเหยและของแข็งคงตัว (Volatile and fixed solids)

การหาค่าของแข็งระเหยเป็นการหาค่าของแข็งระเหยทั้งหมดหรือของแข็งแขวนลอยก็ได้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ การหาค่าสารอินทรีย์ในน้ำตัวอย่างจะทำได้โดยการเผา ซึ่งสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ในขณะที่อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถูกควบคุมไม่ให้สูงเกิน เพื่อสารอินทรีย์จะได้ไม่เกิดการแยกสลาย และน้ำหนักที่หายไปคือน้ำหนักของสารอินทรีย์ในตัวอย่าง โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาคือ 600 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำสุดของการที่สารอินทรีย์จะถูกออกซิไดส์

(3) ของแข็งตกตะกอน (Settleble solids)

หมายถึงของแข็งใน suspension (ของเหลวที่มีสิ่งแขวนลอยอยู่) ซึ่งจะนอนกันเนื่องจากแรงถ่วงภายในสภาวะที่สงบนิ่ง เฉพาะสารแขวนลอยที่หยาบและมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำเท่านั้นที่จะนอนกัน กากตะกอนคือสิ่งที่เกิดจากการสะสมของของแข็งที่ตก ตะกอนลงมามีประโยชน์มากในการพิจารณาสร้างถังตกตะกอน

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) เพื่อเป็นพารามิเตอร์ชี้วัดประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีและประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟ้นต้นร่วมกับการสร้างตะกอน

จากการรวบรวมทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของกระบวนการเฟ้นต้นและการสร้างตะกอนพบว่าการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมและให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูง ทั้งนี้ผลที่ได้ในแต่ละงานวิจัยมีความแตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสียและจากรวบรวมข้อมูลพบว่ากระบวนการบำบัดร่วมของสองกระบวนการขึ้นไปจะมีประสิทธิภาพที่สูงกว่ากระบวนการบำบัดเพียงวิธีเดียว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการบวนการทางเคมีโดย

กระบวนการเฟ้นต้นร่วมกับการสร้างตะกอนทำในการศึกษาประสิทธิภาพและเพื่อศึกษาเป็นทางเลือกของกระบวนการบำบัดน้ำเสียเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง คือ ค่าซีโอดี ค่าพีเอช ค่าของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลายน้ำได้ทั้งหมด เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการดังกล่าว

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 สารเคมี

- 3.1.1.1 สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)
- 3.1.1.2 เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)
- 3.1.1.3 แคลเซียมออกไซด์ (CaO)
- 3.1.1.4 แคลเซียมออกไซด์สังเคราะห์จากเปลือกไข่ (CaO from Eggshell)
- 3.1.1.5 สารโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)
- 3.1.1.6 สารละลายซัลฟูริก (H_2SO_4 20%)
- 3.1.1.7 สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulphate, FAS)
- 3.1.1.8 โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$)
- 3.1.1.9 กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4)
- 3.1.1.10 สารซัลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4)
- 3.1.1.11 สารเมอร์คิวรีซัลเฟต ($HgSO_4$)
- 3.1.1.12 เฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroien indicator)

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.2.1 อุปกรณ์

- 1) เครื่องจาร์เทสต์ (Jar test)
- 2) บีกเกอร์ขนาด 1000 ml.
- 3) นาฬิกาจับเวลา
- 4) บิวเรต (Burettes)
- 5) ปิเปต (Pipettes)
- 6) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flasks) ขนาด 250 ml
- 7) หลอดไตเจสต์แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate) ขนาด 25 x150 mm ชนิด

ฝาเกลียวพร้อมจุก TFE

- 8) ตะแกรงใส่หลอดทดลอง (Test Tube Rack)

- 9) น้ำกลั่น
- 10) เครื่องชั่ง (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
- 11) ตู้อบ ที่อุณหภูมิ 250 ± 2 °C
- 12) ตู้ดูดความชื้น (Dessicator)
- 13) ขวดดูด
- 14) เครื่องดูดสุญญากาศ
- 15) ถ้วยกระเบื้อง
- 16) เต้าเผา
- 17) กระจาดกรองขนาด 47 mm
- 18) ถ้วยกรองกฐ สำหรับ glass fiber filter

3.1.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์

- 1) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter)
- 2) Scanning Electron Microscope (SEM)
- 3) X-ray Diffraction (XRD)
- 4) Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) –Transmission

3.2 กรอบการศึกษา

งานวิจัยทำการศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังด้วยการสร้างตะกอน กระบวนการเฟนตัน และกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอนโดยการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

3.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอน

เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณและชนิดสารสร้างตะกอน 2 ชนิด คือแคลเซียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ผาต่อประสิทธิภาพการบำบัด ที่ความเข้มข้น 1, 2, 3 และ 4 g/L

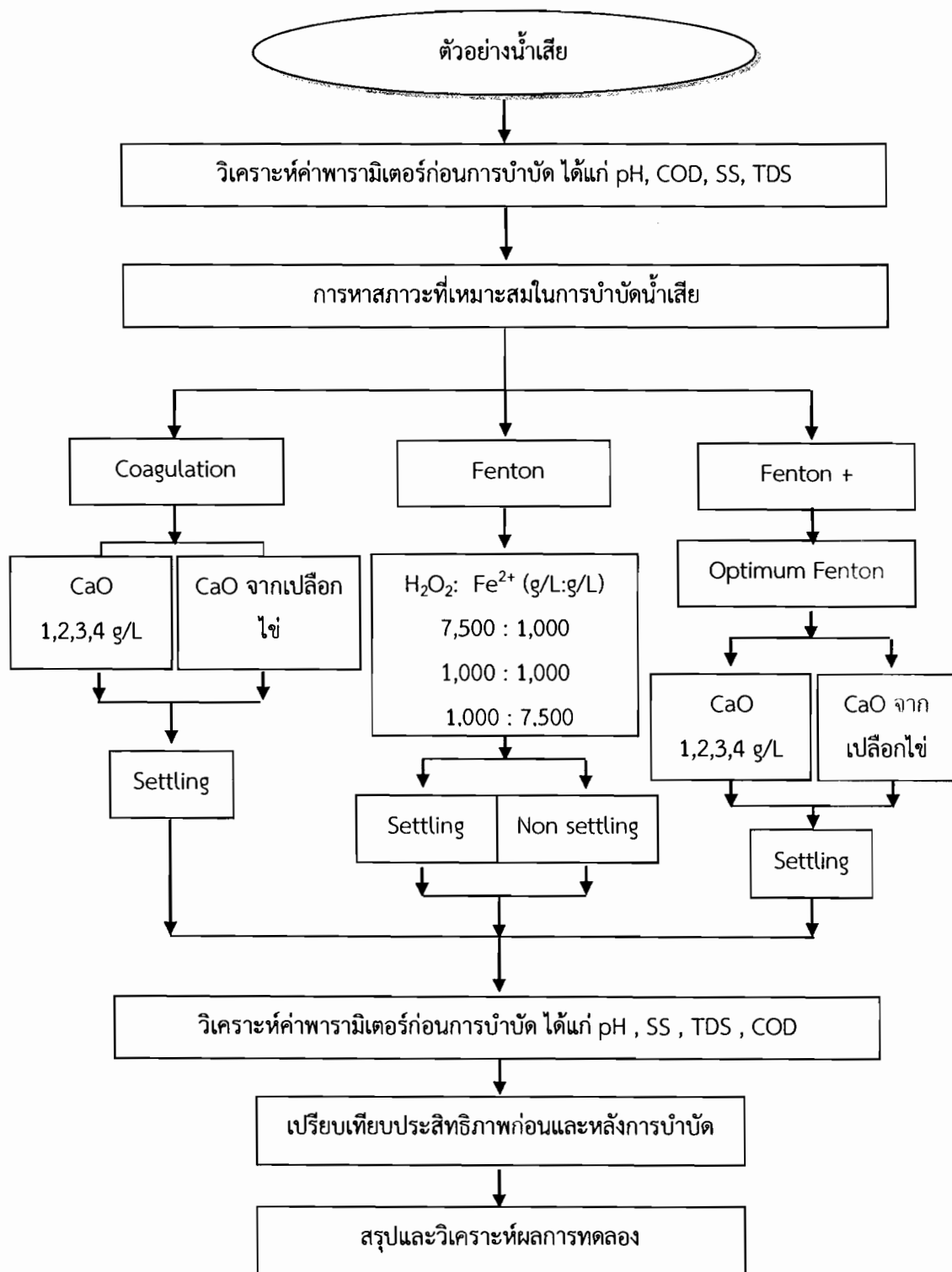
3.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

เพื่อศึกษาอัตราส่วน $\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe}^{2+}$ ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ในอัตราส่วน $\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe}^{2+}$ ที่ทำการศึกษา เท่ากับ 7,500 : 1,000 1,000 :1,000 และ 1,000:7,500 mg/L : mg/L และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดี ของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลายน้ำทั้งหมดทันทีหลังเสร็จสิ้นปฏิกิริยาเฟนตันและหลังจากตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที

3.2.3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน

การหาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม โดยใช้อัตราส่วนของ $\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe}^{2+}$ ที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงที่สุด เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาเฟนตันทำการเติมสารสร้างตะกอนทั้งสอง

ชนิดลงไปทันที เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดและการตกตะกอน
 ขั้นตอนการวิจัยทั้งหมดสามารถแสดงความสัมพันธ์เป็นแผนภาพได้ดังภาพที่ 3.1

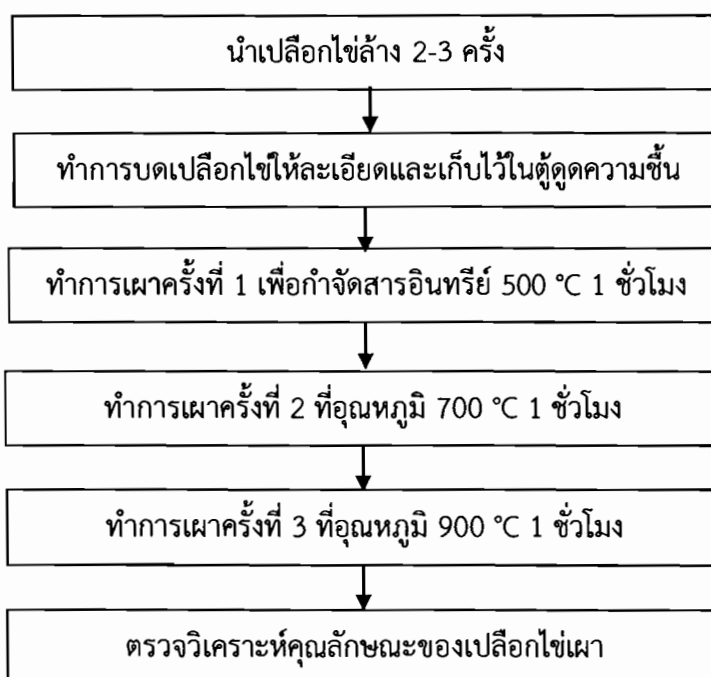


ภาพที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการวิจัย

3.3 การเตรียมแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

การเตรียมเปลือกไข่ทำตามวิธีของ นุชนภา ตั้งบริบูรณ์และ ณหทัย สอนประสาร (2552) โดยนำเปลือกไข่ที่ผ่านการล้างน้ำเปล่า 2-3 ครั้ง บดให้ละเอียดและเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น (Dessicator) จากนั้นนำส่วนที่บดแล้วใส่ลงในถ้วยครุชชีเบลชนิดอะลูมินา (Alumina crucible) จากนั้นทำการเผาเปลือกไข่ ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ตกค้าง ครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ช่วงระยะเวลาการเปลี่ยนรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกไข่เป็นแคลเซียมออกไซด์ และครั้งที่ 3 ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ขั้นตอนนี้จะได้สารแคลเซียมออกไซด์บริสุทธิ์อย่างสมบูรณ์ไม่มีสารอินทรีย์และสสารตกค้าง

การตรวจวิเคราะห์ลักษณะคุณสมบัติแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผา ทำการวิเคราะห์ผงแคลเซียมออกไซด์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD) และเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

3.4 วิธีการเตรียมสารเคมีในการวิเคราะห์

3.4.1 สารละลายมาตรฐานโปแทสเซียมไดโครเมต 0.1 N

ทำการละลาย $K_2Cr_2O_7$ (ซึ่งอบแห้งที่ $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชม.) มา 4.913 g ในน้ำกลั่น 500 ml จากนั้นค่อย ๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 ml และ $HgSO_4$ 33.3 g ตั้งทิ้งไว้ให้ละลายและปล่อยให้เย็นจากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 L

3.4.2 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ผสมกับสารละลายซิลเวอร์ซัลเฟต

โดยทำการเติม $AgSO_4$ 5.5 g ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 kg ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 1-2 วัน เพื่อให้ $AgSO_4$ ละลาย

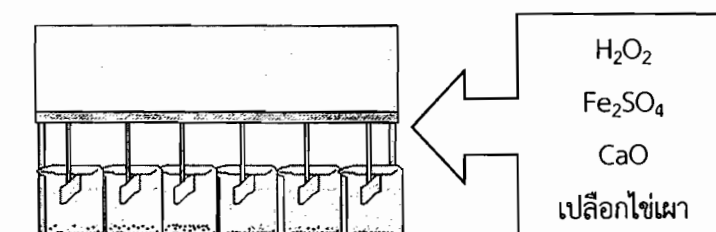
3.4.3 สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.10 N (Ferrous Ammonium Sulphate, FAS)

โดยทำการละลาย $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ 39.2 g ในน้ำกลั่น จากนั้นทำการเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 ml ปล่อยให้เย็นแล้วทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนครบ 1 L

3.4.4 สารละลายอินดิเคเตอร์ Ferroin

โดยทำการละลาย 1.485 g 1,10-phenanthroline monohydrate และ 695 mg $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนครบ 100 ml

3.5 รูปแบบการทดลอง



ภาพที่ 3.3 รูปแบบการทดลองด้วยเครื่องจาร์เทสต์

3.6 วิธีดำเนินการศึกษา

วิธีการดำเนินการศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังมีวิธีการดังนี้

3.6.1 การเก็บน้ำตัวอย่างน้ำเสีย

น้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง เก็บโดยวิธีการเก็บน้ำเสียแบบจ้วง (Grab Sampling) ด้วยถังพลาสติกขนาด 20 L โดยจุดที่เก็บน้ำเสีย คือ จุดที่น้ำออกจากระบบบำบัด UASB

มาแล้ว ช่วงระยะเวลาที่สามารถทำการเก็บตัวอย่างน้ำ คือ ช่วงระหว่างเดือนพฤศจิกายน – เดือนมีนาคม (ช่วงเดินระบบเต็มที) จากนั้นทำการเก็บรักษาน้ำเสียตัวอย่างที่ตู้แช่อุณหภูมิ 4°C

3.6.2 วิธีการทดลอง

3.6.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอน

- 1) เตรียมน้ำเสีย 500 ml และทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ก่อนการทดลอง ได้แก่ pH COD SS และ TDS
- 2) ทำการปรับ pH ให้ได้ค่าที่ pH 8
- 3) เติมสารสร้างตะกอน ปริมาณความเข้มข้นของสารเคมีที่กำหนด
- 4) ทำการกวนผสมด้วยเครื่องจาร์เทสต์ ด้วยความเร็ว 120 rpm 10 นาที และ 95 rpm 10 นาที
- 5) ตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที
- 6) วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์หลังการทดลอง ได้แก่ pH COD SS และ TDS หลังการบำบัด

หมายเหตุ : ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนชนิดและปริมาณสร้างตะกอนตามที่ได้กำหนดไว้

3.6.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

- 1) เตรียมน้ำเสีย 500 ml และทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ก่อนการทดลอง ได้แก่ pH COD SS และ TDS
- 2) ทำการปรับ pH ให้ได้ค่าที่ pH 3
- 3) ทำการเติมสารประกอบเฟนตันที่อัตราส่วน $H_2O_2 : Fe^{2+}$ ที่ได้กำหนดไว้
- 4) ทำการกวนผสมด้วยเครื่องจาร์เทสต์ ที่ความเร็วการกวน 120 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 120 นาที
- 5) ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที
- 6) นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดแล้วมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์หลังการทดลอง ได้แก่ pH COD SS และ TDS

หมายเหตุ : ทำซ้ำอีกครั้งและเมื่อสิ้นสุดเวลาการกวนแล้วให้นำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์หลังการบำบัดทันที

3.6.2.3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน

- 1) เตรียมน้ำเสีย 500 ml และทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ก่อนการทดลอง ได้แก่ pH COD SS และ TDS

ที่สุด

2) ทำการทดลองเดียวกันกับ ข้อ 3.5.2.2 โดยใช้อัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

3) หลังจากเกิดปฏิกิริยาเฟนตันสิ้นสุดลง ทำการปรับพีเอชให้ได้ค่า 8 และเติมสารแคลเซียมออกไซด์ตามปริมาณที่กำหนด

4) ทำการกวน ด้วยความเร็ว 120 rpm 10 นาที และ 95 rpm 10 นาที

5) ตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที

6) วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์หลังการทดลอง ได้แก่ pH COD SS และ TDS

หมายเหตุ : ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนสารสร้างตะกอนเป็นสารแคลเซียมออกไซด์สังเคราะห์ และเปลี่ยนปริมาณสร้างตะกอนตามที่ได้กำหนดไว้

3.6.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตัน การสร้างตะกอน และ กระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอนกับมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม พ.ศ. 2539 โดยเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง ก่อนและหลังการบำบัด

3.7 วิธีการวิเคราะห์

3.7.1 การวิเคราะห์ค่าซีโอดี (COD)

น้ำเสียดัวอย่างจะถูกนำมาวิเคราะห์ค่าซีโอดีก่อนและหลังการบำบัด ด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed reflux method) และทำการหาประสิทธิภาพของการบำบัดทั้งก่อนและหลังทำการทดลอง

3.7.1.1 การหาค่าซีโอดี

$$\text{ค่าซีโอดี (mg/L)} = \frac{\{(A-B) \times N \times 8000\}}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (mL)}} \quad (3.1)$$

เมื่อ A คือ ปริมาณของเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตน้ำกลั่น (mL)

B คือ ปริมาณของเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตน้ำตัวอย่าง (mL)

N คือ ความเข้มข้นในหน่วยนอร์มัลลิตี (N) ของเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้

3.7.1.2 การหาประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี

$$\% \text{ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี} = \frac{((\text{COD}_0 - \text{COD}) \times 100\%)}{\text{COD}_0} \quad (3.2)$$

เมื่อ COD_0 คือ ค่า COD ของน้ำเสียเริ่มต้น (mg/L)

COD คือ ค่า COD ของน้ำเสียหลังการบำบัด (mg/L)

3.7.2 การวิเคราะห์ค่าของแข็ง

น้ำเสียตัวอย่างถูกนำมาวิเคราะห์ค่าของแข็งด้วยวิธี Gravimetric method โดยสามารถคำนวณหาค่าของแข็งและประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งได้จาก

3.7.2.1 การหาค่าของแข็ง

$$\text{ของแข็งแขวนลอย (mg/L)} = \frac{(A-B) \times 1,000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (mL)}} \quad (3.3)$$

เมื่อ A คือ ค่าน้ำหนักของกระดาษกรอง + ของแข็ง (mg)

B คือ ค่าน้ำหนักของกระดาษกรอง (mg)

$$\text{ของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่ } 180^\circ\text{C (mg/L)} = \frac{(A-B) \times 1,000}{C} \quad (3.4)$$

เมื่อ A คือ ค่าน้ำหนักของของแข็งที่แห้ง + ถ้วยกระเบื้อง (mg)

B คือ ค่าน้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง (mg)

C คือ ปริมาตรของน้ำที่ผ่านการกรองที่นำมาใช้ (mL)

3.7.2.2 การหาประสิทธิภาพการบำบัดของของแข็ง

$$\begin{aligned} \% \text{ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย} \\ = \frac{((\text{SS}_0 - \text{SS}) \times 100\%)}{\text{SS}_0} \end{aligned} \quad (3.5)$$

- เมื่อ SS_o คือ ค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียเริ่มต้น (mg/L)
 SS คือ ค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียหลังการบำบัด (mg/L)

% ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

$$= \frac{(TDS_o - TDS)}{TDS_o} \times 100\% \quad (3.6)$$

- เมื่อ TDS_o คือ ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของน้ำเสียเริ่มต้น (mg/L)
 TDS คือ ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของน้ำเสียหลังการบำบัด (mg/L)

% ประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

$$= \frac{(TDS - TDS_o)}{TDS} \times 100\% \quad (3.7)$$

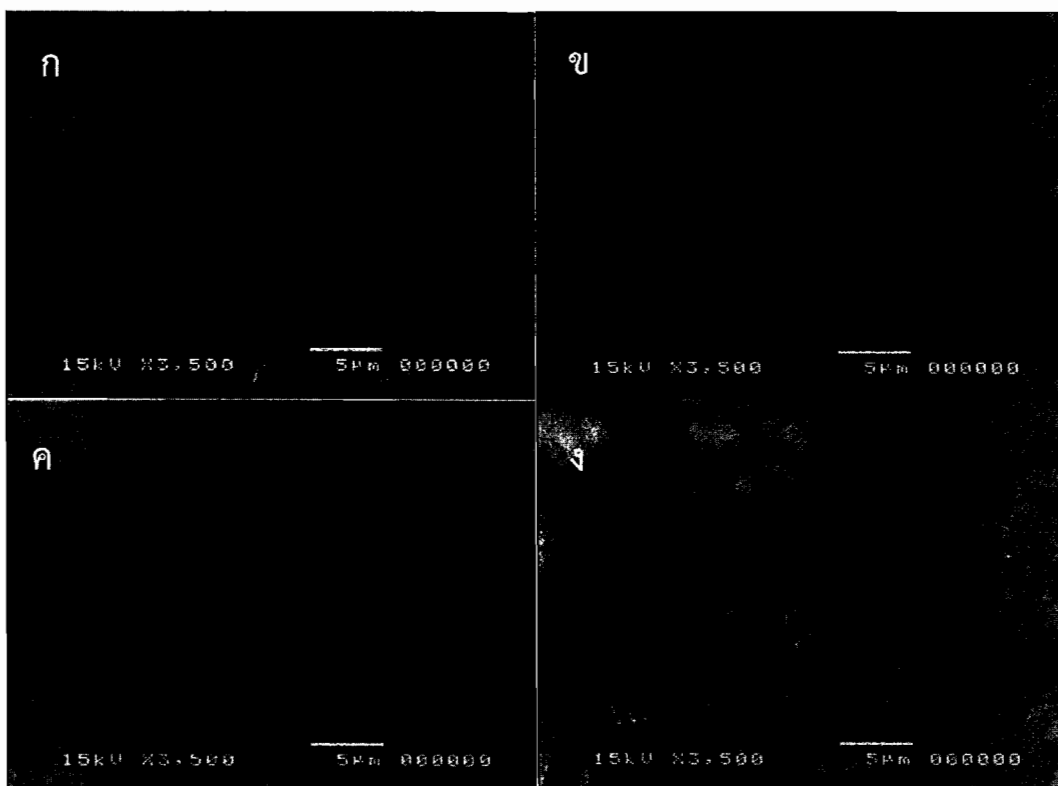
- เมื่อ TDS คือ ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของน้ำเสียหลังการบำบัด (mg/L)
 TDS_o คือ ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของน้ำเสียเริ่มต้น (mg/L)

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเปลือกไข่

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของเปลือกไข่ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

จากการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงเปลือกไข่ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่าลักษณะของผงเปลือกไข่มีลักษณะที่แตกต่างกัน ด้วยอุณหภูมิในการเผาที่แตกต่างกัน โดยที่การเผาอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีลักษณะความชัดเจนของผลึกมากที่สุด สอดคล้องกับ นุชนภา ตั้งบริบูรณ์ และณททัย สอนประसार (2552)

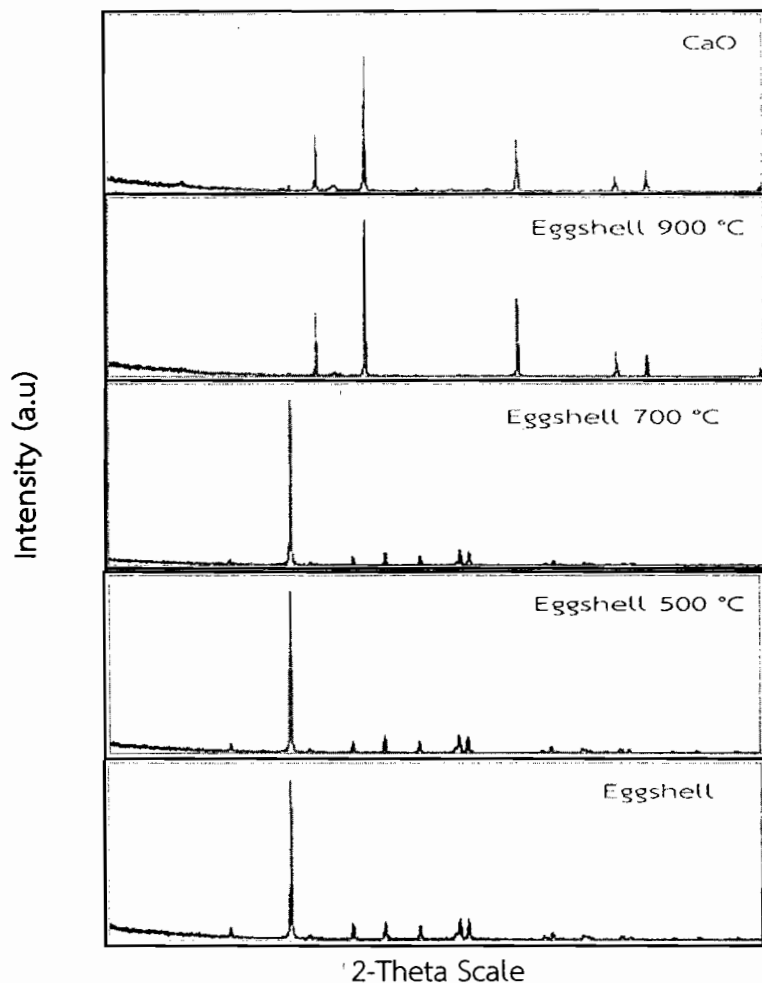


ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดย (ก) เปลือกไข่ดิบ (ข) เปลือกไข่เผาที่ 500 องศาเซลเซียส (ค) เปลือกไข่เผาที่ 700 องศาเซลเซียส และ (ง) เปลือกไข่เผาที่ 900 องศาเซลเซียส

4.1.2 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD)

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในภาพที่ 4.2 พบว่ารูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และเปลือกไข่เผาที่ 900 องศาเซลเซียส (Eggshell 900 °C) มีลักษณะของมุมตกกระทบเหมือนกัน โดยรูปแบบความชัดเจนของผลึกสูงสุดของ Eggshell 900 °C เท่ากับมุม 32.230 37.390 53.890 64.190 และ 67.430 สอดคล้องกับรูปแบบความชัดเจนของผลึกสูงสุดของแคลเซียมออกไซด์ เท่ากับมุม 32.242 37.401 53.928 64.240 และ 67.465 ตามเลขอ้างอิง 78-0649 (The International Center for Diffraction Data: JCPDS) และในส่วนของเปลือกไข่เผาที่อุณหภูมิ 500 °C มีลักษณะรูปแบบความชัดเจนของผลึกเท่ากับมุม 23.118 29.500 31.574 36.056 และ 39.517 สอดคล้องกับเลขที่อ้างอิง 89-1304 Magnesium Calcium Carbonate ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)$) สำหรับเปลือกไข่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C มีลักษณะรูปแบบความชัดเจนของผลึกเท่ากับมุม 23.101 29.466 31.516 36.093 และ 39.489 สอดคล้องกับเลขที่อ้างอิง 85-1108 Calcium Carbonate (CaCO_3) แสดงตารางในภาคผนวก ก

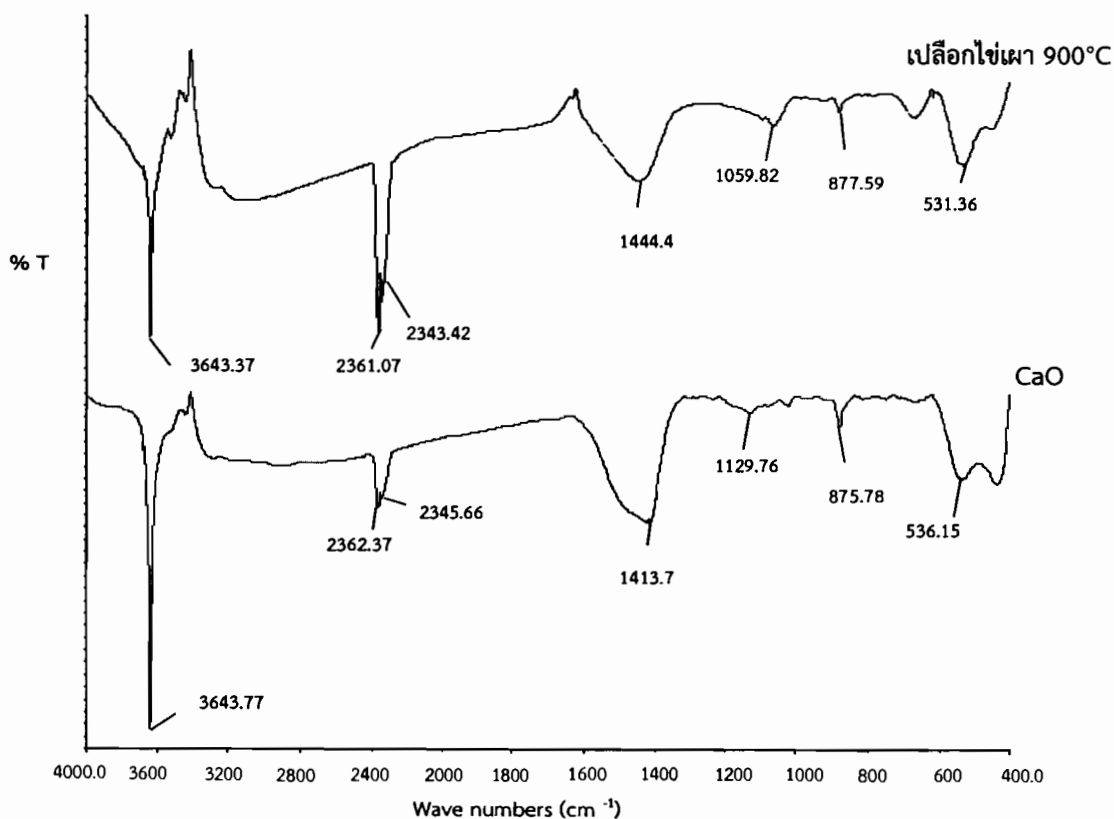
จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เปลือกไข่เผาที่ 900 องศาเซลเซียส มีลักษณะของรูปแบบผลึกตรงกับแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมของการเตรียมสารประกอบแคลเซียมบริสุทธิ์เช่นเดียวกับ นุชนภา ตั้งบริบูรณ์ และณัทย สอนประสาร (2552) เป็นการยืนยันได้ว่าเปลือกไข่ที่สังเคราะห์ขึ้นมีลักษณะที่ตรงกับแคลเซียมออกไซด์จริง ทั้งนี้ได้นำตัวอย่างที่สภาวะเหมาะสมทำการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาลักษณะหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ต่อไป



ภาพที่ 4.2 ภาพ XRD ของแคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

อินฟราเรดสเปกตรัมของแคลเซียมออกไซด์และเปลือกไข่เผา วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง FTIR เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์และเปลือกไข่เผา ที่สภาวะการเผาอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของแคลเซียมออกไซด์และเปลือกไข่เผา แสดงให้เห็นถึง ตำแหน่งพีคของหมู่ฟังก์ชันที่คล้ายกัน



ภาพที่ 4.3 สเปกตรัม FTIR ของเปลือกไข่เผา (Eggshell) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO)

ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์ที่พบตามรายงานของ Aldes Lesbani (2013) ซึ่งได้ทำการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยทาก พบช่วงสเปกตรัมการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1427 cm^{-1} 871 cm^{-1} 709 cm^{-1} และ 362 cm^{-1} ที่ปรากฏหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์ จะเห็นว่าตำแหน่งการดูดกลืนช่วงสเปกตรัมของแคลเซียมออกไซด์และเปลือกไข่เผามีตำแหน่งพีคของหมู่ฟังก์ชันคล้ายกัน 2 จุดที่ตำแหน่ง 1413.72 cm^{-1} 875.78 cm^{-1} และ 1444.49 cm^{-1} 877.59 cm^{-1} ตามลำดับ จากการศึกษาลักษณะและการดูดซับของเปลือกไข่และเยื่อหุ้มเปลือกไข่ของ Tsai, W.T. and et al. (2006) พบว่าจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR แสดงการดูดกลืนอินฟราเรดสเปกตรัมของของหมู่ฟังก์ชันแร่แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) สำหรับตัวอย่างที่เป็นเปลือกไข่ และสำหรับเยื่อหุ้มเปลือกไข่แสดงหมู่ฟังก์ชันของ เอมีนและเอไมด์ ช่วงอินฟราเรดสเปกตรัมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่พบคือ ตำแหน่งพีคที่ 3640 2510 1458 1422.7 876 และ 712.5 cm^{-1} (D.Crina. et al., 2001)

ช่วงตำแหน่งพีคที่คล้ายกันของแคลเซียมออกไซด์และเปลือกไข่เผาที่ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ปรากฏสอดคล้องกับรายงานการวิจัยที่ได้อ้างอิง จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่มีความเหมือนและมีลักษณะเฉพาะเช่นเดียวกับแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่การเผา 900 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง มีหมู่ฟังก์ชันที่ตรงกับแคลเซียมออกไซด์จริง

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

Band range (cm ⁻¹)			หมู่ฟังก์ชัน	องค์ประกอบที่เป็นไปได้
แคลเซียม ออกไซด์	เปลือกไข่	ความแตกต่าง		
3643.77	3643.37	0.4	O-H, N-H stretching	Free Hydroxyl และ Free NH
2362.37	2361.07	1.3	C≡C, C≡N stretching	Amines และ aromatic
2345.66	2343.42	2.24		
1413.72	1444.49	-30.77	C-O-H in plane bending C-H gathering	Carboxylic acids และ Phenol
1129.76	1059.82	69.94	C-O, C-N stretching	Alcohols และ Amines
875.78	877.59	-1.81	≡C-H bending	Alkenes
536.15	531.36	4.79	C-H	Aromatic hydrogen

4.2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบชีวภาพ (UASB) ทำการเก็บตัวอย่างด้วยวิธีแบบจ้วง (Grab sampling) ใส่ในขวดพลาสติกและนำมาเก็บในตู้แช่ที่อุณหภูมิ 4°C ทันที โดยมีลักษณะสมบัติของน้ำเสีย ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะสมบัติ	น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย UASB	มาตรฐานน้ำทิ้ง**
กำลังการผลิต (Ton/day)*	600	-
ปริมาณน้ำเสีย (m ³ /day)*	3,870	-
สี*	ขาวขุ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
กลิ่น*	มีกลิ่นเหม็นปานกลาง	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
อุณหภูมิ(°C)*	28	ไม่เกิน 40
พีเอช	6.7	5.5-9.0
ค่าซีโอดีเฉลี่ย (mg/L)	1,796.66±298.37	120
ของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย (mg/L)	1,064±110.35	50
ของแข็งละลายน้ำเฉลี่ย (mg/L)	1320.33±146.64	3,000

หมายเหตุ: * ข้อมูลจากการสำรวจของโรงงานอุตสาหกรรมที่ศึกษา

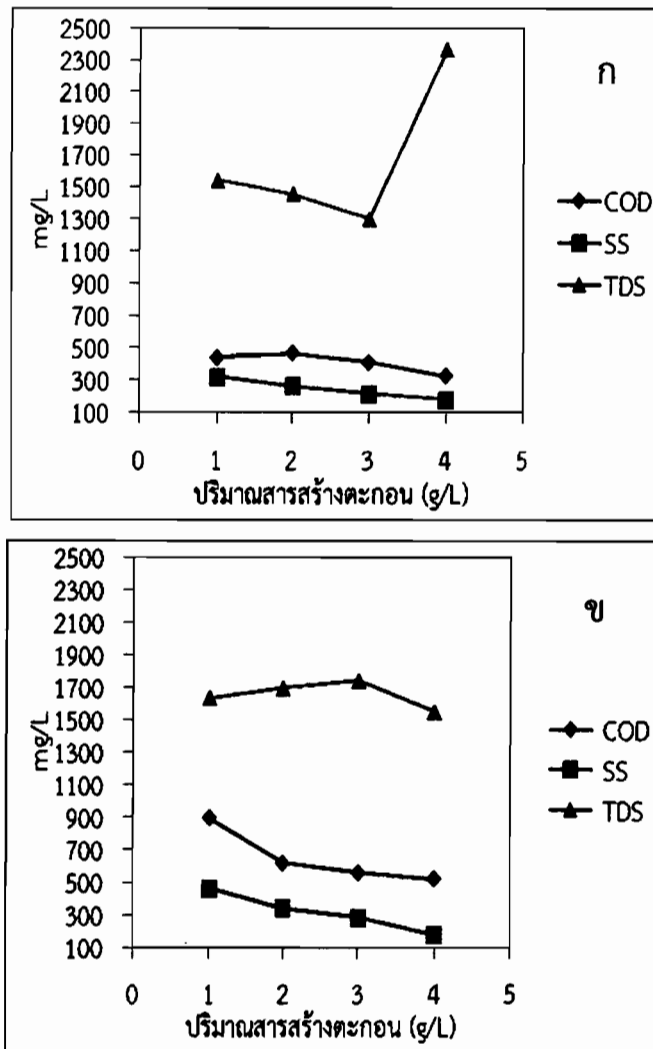
** ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ)

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอน

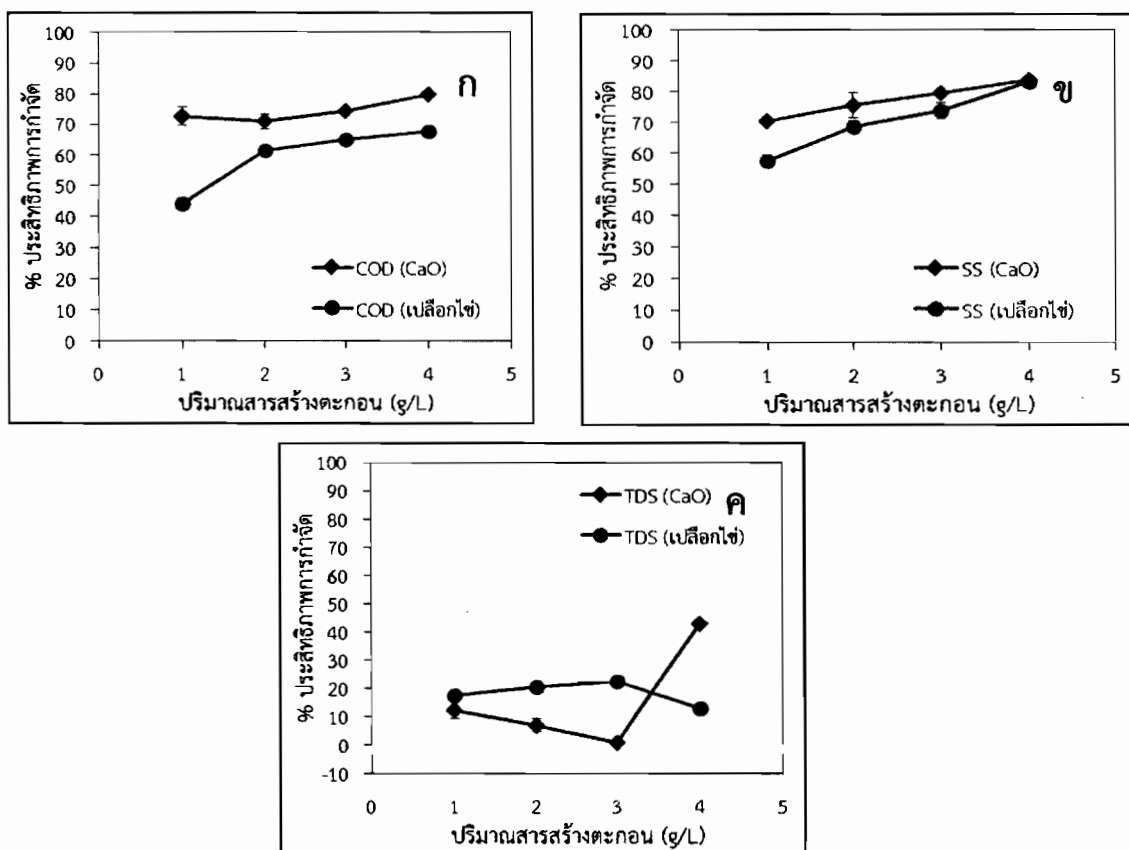
จากการศึกษาผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดและการตกตะกอน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สารแคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยแปรผันตามปริมาณสารสร้างตะกอนในสภาวะที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 เป็นสภาวะค่าพีเอชที่มีผลต่อการสร้างตะกอนและตกตะกอนได้ดี มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษได้ดีที่สุด (Perdigón-Melón, J.A. et al., 2010) โดยที่ความเข้มข้น 4 g/L มีประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยสำหรับสารแคลเซียมออกไซด์สูงที่สุด เท่ากับ 79.62±1.24 % และ 83.85±1.05 % ตามลำดับ นอกจากนี้สารแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่มีประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยสูงสุดที่ความเข้มข้น 4 g/L เช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ 67.50±00 % และ 83.27±2.61 % เนื่องจากปริมาณสารแคลเซียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นช่วยให้สารอินทรีย์เกิดการรวมตัวและเกิดการตกตะกอนในปริมาณมากยิ่งขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารสร้างตะกอนสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดด้วยการสร้างตะกอนมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยสูง แต่ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยหลังการบำบัดยังสูงเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

แต่จากการบำบัดด้วยการสร้างตะกอนทำให้ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเพิ่มขึ้น ที่ความเข้มข้น 4 g/L มีประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดมากที่สุดของแคลเซียมออกไซด์เท่ากับ $2,366 \pm 192.33$ mg/L คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นคือ $42.80 \pm 3.45\%$ ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณสารแคลเซียมออกไซด์ที่เติมลงไปมีปริมาณมากเกินไปจนพอสำหรับเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำเสียภายในระยะเวลาที่กำหนดสังเกตได้จากปริมาณสารแคลเซียมออกไซด์ที่คงเหลืออยู่ร่วมกับตะกอนที่เพิ่มขึ้น สำหรับแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่ต่ำกว่าแคลเซียมออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 3 g/L มีปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่สูงที่สุดเท่ากับ $1,745 \pm 10.60$ mg/L คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นคือ $22.65 \pm 2.09\%$ ทั้งนี้ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อค่ามาตรฐานน้ำทิ้งแต่อย่างใด

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการสร้างตะกอนสำหรับสารสร้างตะกอนทั้ง 2 ชนิด คือ pH 8 ระยะเวลาตกตะกอน 30 นาที และที่ความเข้มข้นสารสร้างตะกอน 4 g/L ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยสูงที่สุดสำหรับแคลเซียมออกไซด์และรองลงมาคือแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่



ภาพที่ 4.4 ปริมาณค่าซีไอดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) หลังผ่านการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอน (ก) แคลเซียมออกไซด์ (ข) แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่



ภาพที่ 4.5 อิทธิพลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อ (ก) ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดี (ข) ประสิทธิภาพการกำจัดค่าของแข็งแขวนลอย (ค) การเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

4.4 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

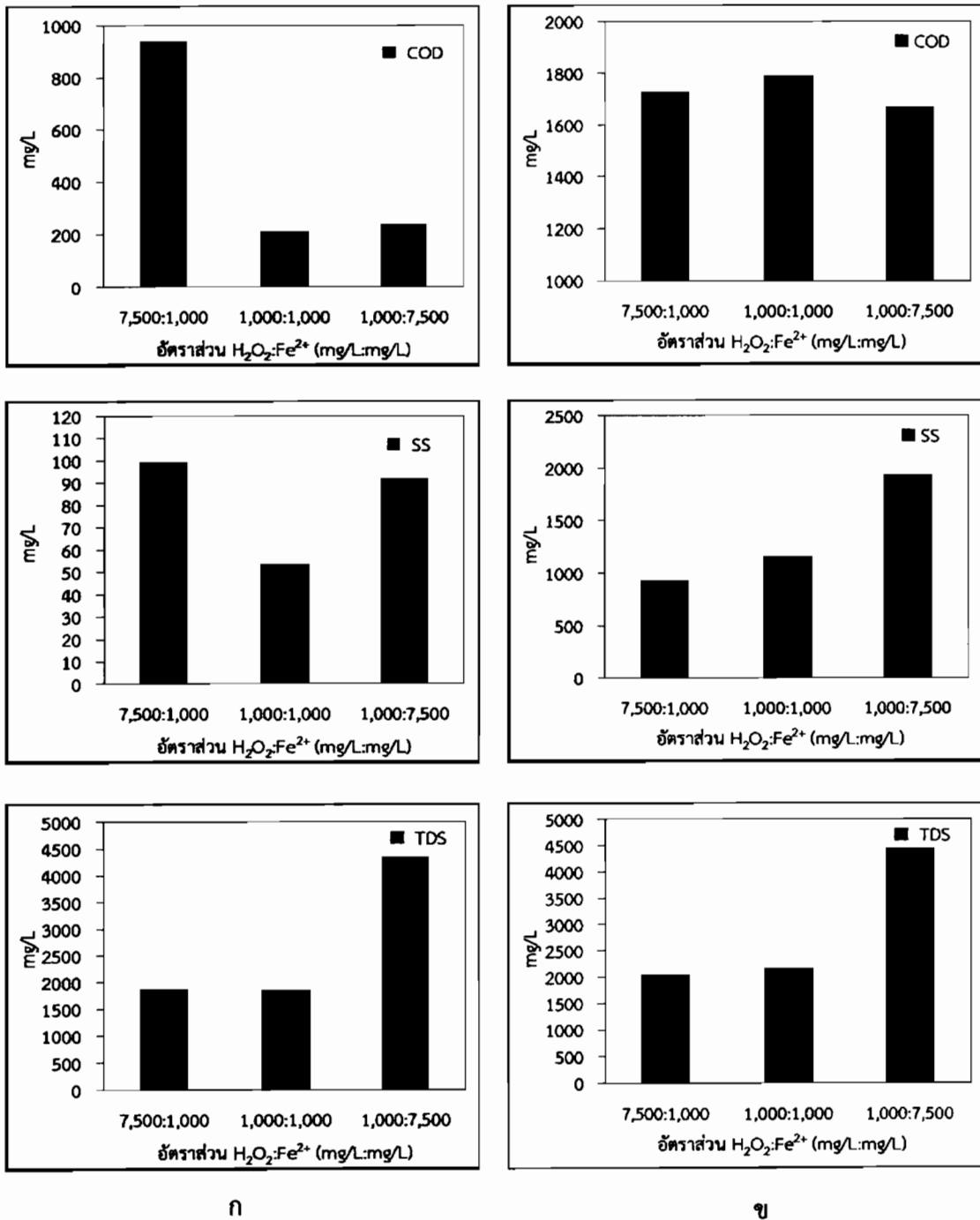
ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วน $H_2O_2:Fe^{2+}$ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดและการตกตะกอน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่ pH 3 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ 120 นาที อัตราส่วนสารเฟนตันที่เหมาะสมคือ 1,000:1,000 mg/L: mg/L และมีระยะเวลาในการตกตะกอน 30 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 85.28 ± 2.75 % และ 93.73 ± 0.58 % ซึ่งเป็นไปตาม (Li, et al, 2012) ที่สภาวะ pH 3 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 120 นาที อัตราส่วน $H_2O_2:Fe^{2+}$ คือ 500 : 300 mg/L: mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดี เท่ากับ 65.50 % สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยพบว่าที่สภาวะที่เหมาะสมของสารเฟนตันสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ดี กล่าวได้ว่าการเข้าทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออนมีปริมาณที่พอดีกันในระยะเวลาและสภาวะที่กำหนด จึงทำให้ไอออนเหล็กที่เหลืออยู่ในรูปที่ตกตะกอนได้ ($Fe(OH)_2$) และทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยมีปริมาณที่ลดลงจำนวนมาก สำหรับประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเท่ากับ 17.33 ± 0.56 % ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ

อัตราส่วน $H_2O_2:Fe^{2+}$ อื่น พบว่าที่อัตราส่วนสารเฟนตัน 1,000:1,000 mg/L: mg/L สามารถกำจัดค่าซีโอติและของแข็งแขวนลอยได้มากที่สุดและปริมาณการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด สำหรับอัตราส่วน $H_2O_2:Fe^{2+}$ ที่ดีที่สุดของปฏิกิริยาเฟนตันที่ไม่มีการตกตะกอน คือ 1,000:7,500 mg/L: mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอติ เท่ากับ 10.21 ± 11.40 % ของแข็งแขวนลอยและของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่อัตราส่วน 7,500:1,000 mg/L: mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 15.03 ± 24.10 % และสำหรับการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่น้อยที่สุด เท่ากับ 34.09 ± 4.49 %

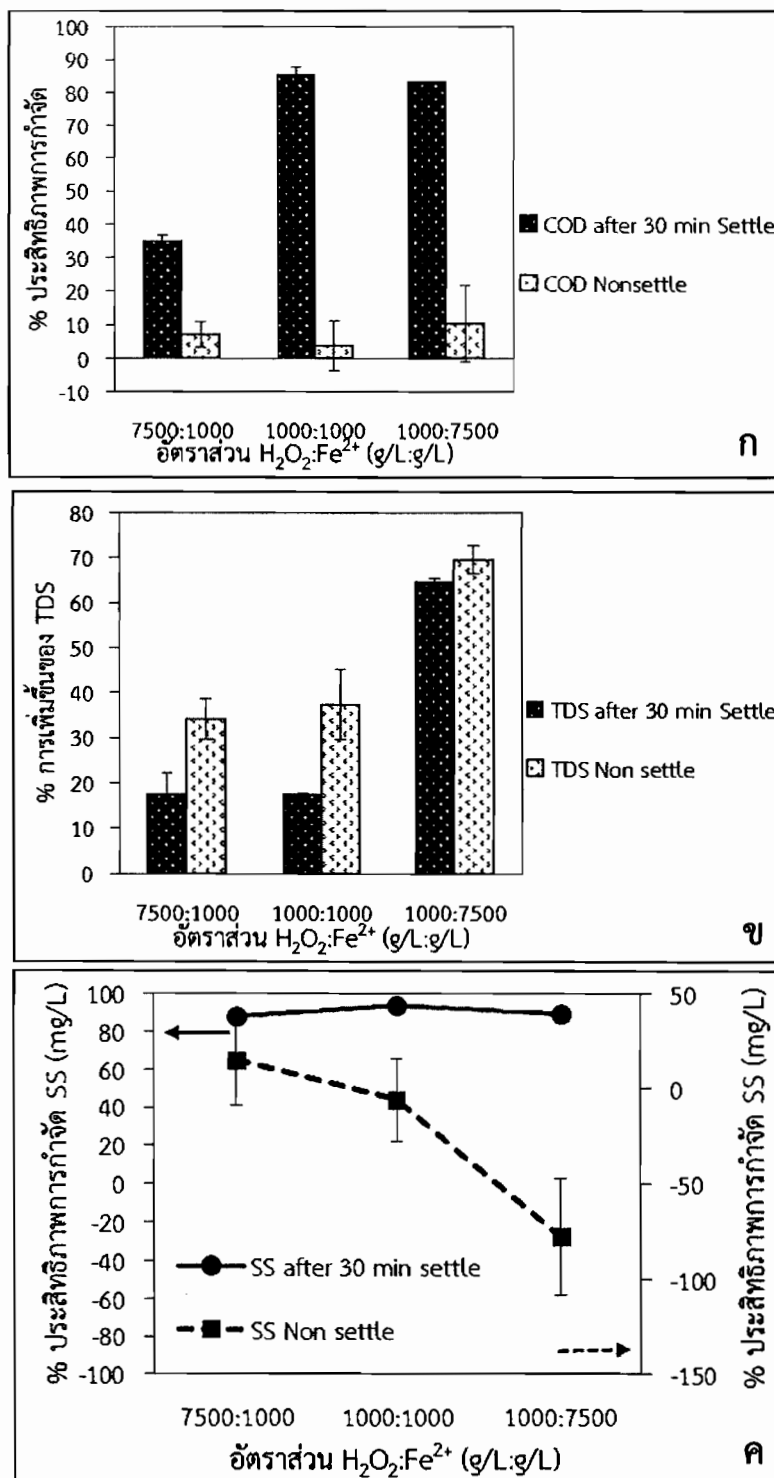
ทั้งนี้เมื่อเพิ่มสัดส่วนของปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณของสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการเข้าทำปฏิกิริยา หากเพิ่มปริมาณมากเกินไปจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง (สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ และวีระนุช บุญรุ่ง, 2553) และเกิดเป็นกลุ่มตะกอนขนาดเล็กของเหล็กกระจายอยู่ทั่วไปสังเกตได้จากปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนของ $H_2O_2:Fe^{2+}$ เป็น 1,000:7,500 mg/L: mg/L

แต่อย่างไรก็ตามค่าประสิทธิภาพของการกำจัดค่าซีโอติและของแข็งแขวนลอยด้วยกระบวนการเฟนตันเพียงอย่างเดียวยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมจึงยังไม่สามารถปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติได้ ซึ่งเป็นผลมาจากตะกอนเหล็กที่อยู่ในรูป Fe^{3+} และ Fe^{2+} ส่งผลให้เกิดกลุ่มตะกอนขนาดเล็กขึ้น และก่อให้เกิดปัญหาสีของน้ำทิ้งและค่าของของแข็งแขวนลอยที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นจึงได้นำ 2 กระบวนการ ทำการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดเพื่อให้ค่าของน้ำทิ้งที่ได้ตามมาตรฐานและสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติได้

จากภาพ 4.7 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอติของอัตราส่วน $H_2O_2:Fe^{2+}$ 1,000:1,000 mg/L: mg/L และ 1,000:7,500 mg/L: mg/L ใกล้เคียงกัน และเมื่อวิเคราะห์จากค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตในอัตราส่วนสารเคมีเฟนตัน จะพบว่าที่ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 7,500 mg/L ส่งผลให้เกิดของแข็งละลายน้ำเป็นจำนวนมาก ทั้งในภาพที่ 4.7 (ก) และ (ข)



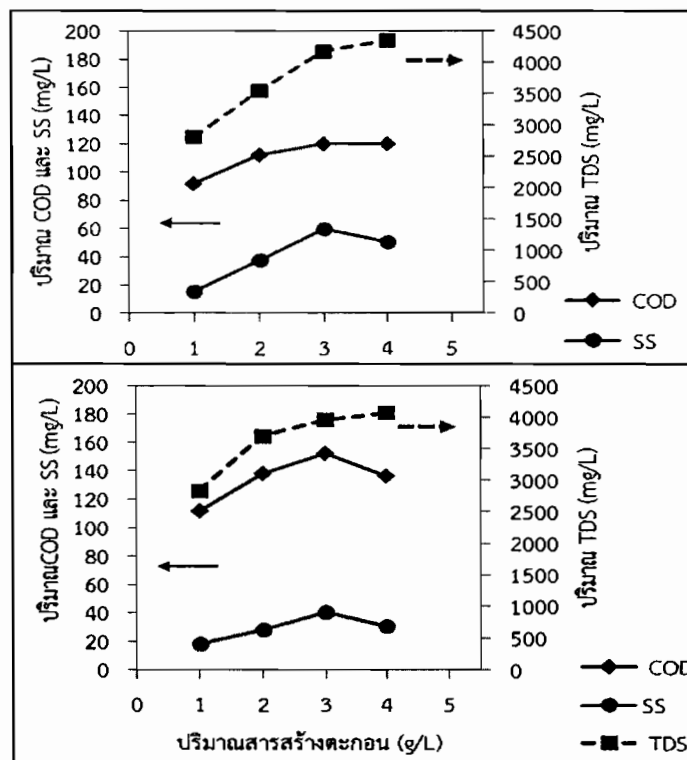
ภาพที่ 4.6 ปริมาณค่าซีไออดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) หลังผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน (ก) วัดค่าหลังการตกตะกอน 30 นาที (ข) วัดค่าทันที สภาวะ pH 3 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 120 นาที



ภาพที่ 4.7 อิทธิพลของปริมาณสารสร้างตะกอนของปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน (ก) ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดี (ข) การเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดและ (ค) ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย สภาวะ pH 3 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 120 นาที

4.5 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน

ผลการศึกษาอิทธิพลของปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับการเติมสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดและการตกตะกอน ดังภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารสร้างตะกอนมีผลต่อการกำจัดค่าซีไอดีและของแข็งแขวนลอย โดยที่ค่าซีไอดีและของแข็งแขวนลอยน้อยที่สุดที่ความเข้มข้นสารสร้างตะกอนเท่ากับ 1 g/L สำหรับแคลเซียมออกไซด์สามารถลดค่าซีไอดีและของแข็งแขวนลอยได้สูงสุดถึง 92 ± 5.65 และ 15.5 ± 9.19 mg/L ตามลำดับ สำหรับแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่อยู่ที่ 112 ± 00 และ 18.5 ± 6.36 mg/L ตามลำดับ ทั้งนี้สำหรับค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดมีอัตราที่เพิ่มขึ้นน้อยที่สุดที่ความเข้มข้นสารสร้างตะกอนแคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ 1 g/L เท่ากับ $2,812 \pm 130.10$ และ $2,835 \pm 306.88$ mg/L ตามลำดับ



ก

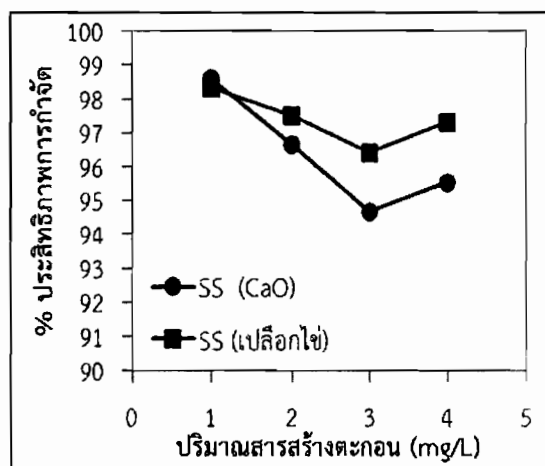
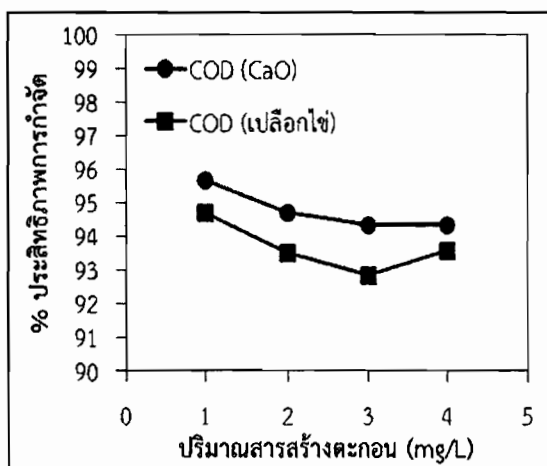
ข

ภาพที่ 4.8 ปริมาณค่าซีไอดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) หลังผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน
(ก) แคลเซียมออกไซด์ (ข) แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

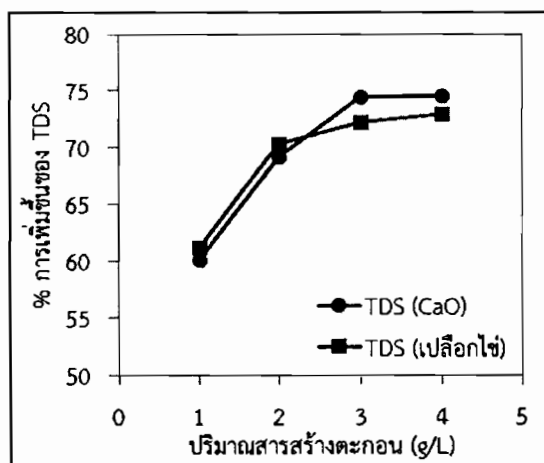
ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีและของแข็งแขวนลอยของสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟนตันร่วมกับสารสร้างตะกอนทั้งสองชนิด พบว่ามีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันมาก เนื่องจาก

แคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกไข่ มีลักษณะทางโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับสารเคมีแคลเซียมออกไซด์ (นุชนภา ตั้งบริบูรณ์ และ ณพทัย สอนประสาร, 2552) ทำให้ประสิทธิภาพในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำเสียเกิดขึ้นได้ดีในปริมาณความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติมสารสร้างตะกอนทั้งสองชนิดหลังสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาเฟนตันทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและของแข็งแขวนลอยสูงขึ้น ภายใต้สภาวะที่ pH 3 อัตราส่วนสารเฟนตันคือ 1,000:1,000 mg/L: mg/L และเมื่อเพิ่มค่าพีเอชเข้าสู่การสร้างตะกอนพบว่า สารแคลเซียมออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 1 g/L มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยสูงที่สุด เท่ากับ 95.66 ± 0.26 % และ 98.63 ± 0.81 % ตามลำดับ ขณะที่สารแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาที่ความเข้มข้น 1 g/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยสูงที่สุด เท่ากับ 94.81 ± 0.00 % และ 98.35 ± 0.57 % ตามลำดับ

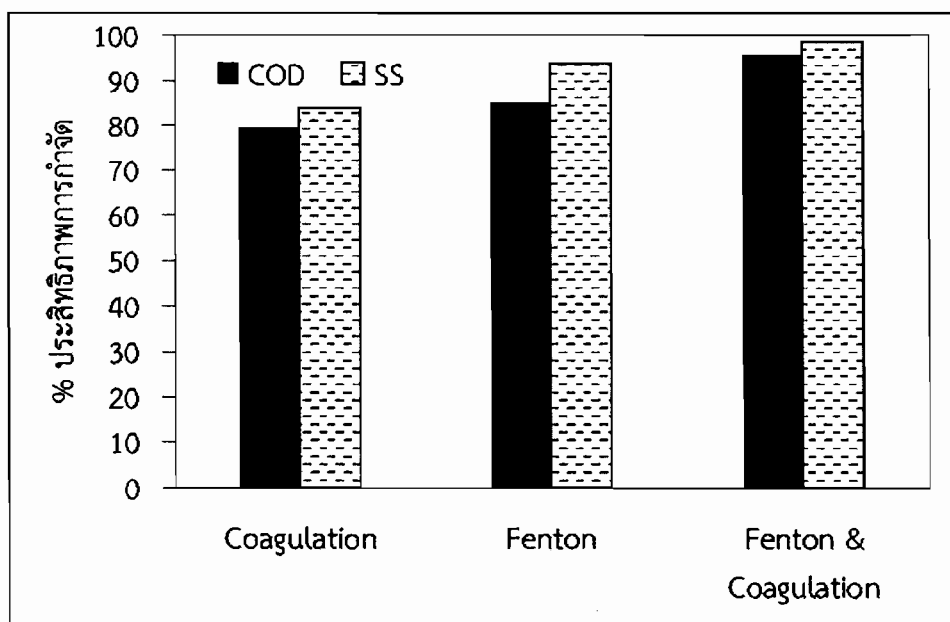


ภาพที่ 4.9 อิทธิพลของสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน



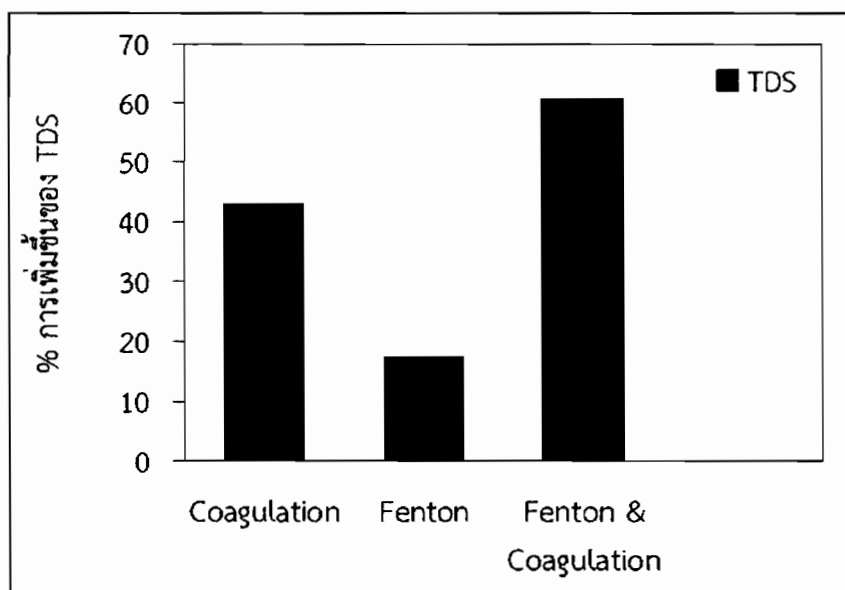
ภาพที่ 4.10 อิทธิพลของสารสร้างตะกอนต่อการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสร้างตะกอน กระบวนการเฟนตันและกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน ในการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยดังแสดงในภาพที่ 4.11 พบว่าการสร้างตะกอนที่สภาวะเหมาะสมและปฏิกิริยาเฟนตันที่สภาวะเหมาะสม มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีสูงเท่ากับ 79.62 ± 1.23 % คงเหลือ 326 ± 19.79 mg/L และ 85.28 ± 2.75 % คงเหลือ 212 ± 39.59 mg/L ตามลำดับ และประสิทธิภาพของการกำจัดของแข็งแขวนลอยคงเหลือเท่ากับ 177 ± 24.04 mg/L คิดเป็น 83.85 ± 1.05 % และ 54 ± 4.95 mg/L คิดเป็น 93.73 ± 0.58 % ตามลำดับ ถึงแม้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยจะสูงมากกว่า 80% ขึ้นไป แต่ยังไม่เพียงพอเมื่อเทียบกับกระบวนการร่วมกันของปฏิกิริยาเฟนตันกับการสร้างตะกอนที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ที่สภาวะ pH 3 อัตราส่วนสารเฟนตันคือ 1,000:1,000 mg/L: mg/L ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 120 นาที และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ 1 g/L ระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที ดังภาพ 4.11 จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยสูงที่สุดเท่ากับ 92 ± 5.65 mg/L คิดเป็น 95.66 ± 0.26 % และ 15.5 ± 9.19 mg/L คิดเป็น 98.63 ± 0.81 % ตามลำดับสำหรับกระบวนการร่วมกันของกระบวนการเฟนตันและการสร้างตะกอน สอดคล้องกับ Ma. and Xia.(2009) ทำการทดลองการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน และมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 93.4 % และ 87.2 % ตามลำดับ



ภาพที่ 4.11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีและของแข็งแขวนลอย ที่สภาวะ Coagulation: pH 8 แคลเซียมออกไซด์ 4g/L, Fenton:pH 3 อัตราส่วน $H_2O_2:Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/L: mg/L เวลาตกตะกอน 30 นาที, Fenton & Coagulation: อัตราส่วน $H_2O_2:Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/L: mg/L แคลเซียมออกไซด์ 1g/L เวลาตกตะกอน 30 นาที

การเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) จากการเปรียบเทียบ ภาพที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเฟ้นต้นร่วมกับการสร้างตะกอนก่อให้เกิดปริมาณของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดสูงที่สุดเท่ากับ 60.76 ± 1.81 % คาดว่าเกิดจากปริมาณของไอออนเหล็กที่ละลายน้ำและปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่คงเหลืออยู่ในรูป $(Ca(OH)_2)$ จึงส่งผลให้ค่าของแข็งละลายน้ำมีค่าการเพิ่มขึ้นที่สูง รองลงมาคือกระบวนการสร้างตะกอน ที่ปริมาณสารแคลเซียมออกไซด์ 4 g/L พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเท่ากับ 42.80 ± 3.45 % สำหรับกระบวนการเฟ้นต้นที่อัตราส่วน $H_2O_2:Fe^{2+}$ 1,000:1,000 mg/L: สภาวะ pH 3 ระยะเวลาเกิดปฏิกิริยา 120 นาที และระยะเวลาตกตะกอน 30 นาทีที่มีการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดน้อยที่สุดที่ 17.33 ± 0.56 % ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของของแข็งแขวนลอยในสภาวะที่เหมาะสมพบว่าไม่ส่งผลต่อค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งอยู่ในค่าที่มาเกินค่ามาตรฐาน



ภาพที่ 4.12 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่สภาวะ Coagulation: pH 8 แคลเซียมออกไซด์ 4g/L, Fenton:pH 3 อัตราส่วน $H_2O_2:Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/L: mg/L เวลาตกตะกอน 30 นาที, Fenton & Coagulation: อัตราส่วน $H_2O_2:Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/L:mg/L แคลเซียมออกไซด์ 1g/L เวลาตกตะกอน 30 นาที

4.6 การคำนวณต้นทุนสารเคมีในการบำบัดน้ำเสีย

ตารางที่ 4.3 ราคาสารเคมีที่ใช้ในการบำบัด (ราคา commercial grade ของ H_2O_2 และ $FeSO_4$)

สารเคมี	สถานะที่เหมาะสม (กรัมต่อลิตร)	ราคา (บาทต่อกิโลกรัม)	ค่าใช้จ่ายในการบำบัด(บาท ต่อลูกบาศก์เมตร)
H_2O_2	1	17	17
Fe_2SO_4	1	9	9
Calcium oxide	4	3	12
	1	3	3
Sulfuric acid	-	18.6	-
Sodium hydroxide	-	48	-

ที่มา: สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ และวีระนุช บุญรุ่ง, 2553

จากการคำนวณต้นทุนของราคาสารเคมีพบว่าค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันเพียงอย่างเดียวสูงกว่าค่าใช้จ่ายของการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างตะกอน โดยพบว่ากระบวนการเฟนตันที่เหมาะสมที่อัตราส่วนสารเคมี $H_2O_2 : Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/L:mg/L มีค่าใช้จ่ายต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตรเท่ากับ 26 บาท สำหรับกระบวนการสร้างตะกอนด้วยสารแคลเซียมออกไซด์มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดเท่ากับ 12 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และสำหรับกระบวนการบำบัดของเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอนพบว่ามีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 29 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

สำหรับสารแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือใช้และจึงไม่มีค่าใช้จ่าย แต่จะมีค่าใช้จ่ายในเรื่องการใช้เทคโนโลยีในการแปรรูปคือค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเผาเปลือกไข่ ดังนั้นหากเลือกที่จะนำเปลือกไข่มาใช้ควรมีการศึกษาในส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การสังเคราะห์สารแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่พบว่าเปลือกไข่ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C มีลักษณะทางโครงสร้างผลึกที่คล้ายกับสารแคลเซียมออกไซด์ เมื่อทำการวิเคราะห์ทางกายภาพด้วยเครื่อง SEM และวิเคราะห์ทางโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD และ FTIR แล้ว

จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการสร้างตะกอน โดยศึกษาปริมาณและชนิดสารสร้างตะกอนในกระบวนการสร้างตะกอน พบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมคือ 4 g/L ที่สภาวะ pH 8 ระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที สำหรับแคลเซียมออกไซด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีสูงกว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ เท่ากับ 72.62 ± 1.24 % และ 67.50 ± 0.00 % ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดค่าของแข็งแขวนลอยของสารทั้งสองชนิดสูงใกล้เคียงกันเท่ากับ 83.85 ± 1.05 % และ 83.27 ± 2.61 % ตามลำดับ สำหรับการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดพบว่าที่แคลเซียมออกไซด์มีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นที่สูงกว่าสารแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เท่ากับ 42.80 ± 3.45 % และ 12.96 ± 1.42 % ตามลำดับ

จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟ้นต้น ภายใต้สภาวะ pH 3 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 120 นาที และระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที พบว่าอัตราส่วน $H_2O_2: Fe^{2+}$ ที่เหมาะสมเท่ากับ 1,000:1,000 mg/L:mg/L มีประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 85.28 ± 2.75 % และ 93.73 ± 0.58 % ตามลำดับ และมีการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมด คิดเป็น 17.33 ± 0.56 % ซึ่งมีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างตะกอนมีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยน้อยกว่ากระบวนการเฟ้นต้น สำหรับการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมด พบว่า ที่สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการสร้างตะกอนมีปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดสูงมากกว่ากระบวนการเฟ้นต้น

จากการทดลองนำทั้งสองกระบวนการในการบำบัดร่วมกันพบว่า กระบวนการเฟ้นต้นร่วมกับการสร้างตะกอนเป็นวิธีที่มีศักยภาพสูงในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยสูงสุดเท่ากับ 95.66 ± 0.26 % และ 98.63 ± 0.81 % ตามลำดับ ภายใต้สภาวะกระบวนการเฟ้นต้นที่ pH 3 อัตราส่วน $H_2O_2: Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/L:mg/L ซึ่งพบว่าค่าซีโอดีที่สามารถบำบัดได้มีค่าเท่ากับ 92 ± 5.65 mg/L ค่า

ของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 15.5 ± 9.19 mg/L และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดประมาณ $2,812 \pm 130.10$ mg/L ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมและสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติได้ นอกจากนี้พบว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยที่สูงใกล้เคียงกับแคลเซียมออกไซด์ ดังนั้นแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่จึงสามารถนำมาใช้ทดแทนสารแคลเซียมสารแคลเซียมออกไซด์ได้และจากการคำนวณต้นทุนในการบำบัดพบว่ากระบวนการร่วมกันของเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอนมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงที่สุดเท่ากับ 29 บาทต่อลูกบาศก์เมตร รองลงมาคือกระบวนการเฟนตันเพียงอย่างเดียวมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 26 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และกระบวนการสร้างตะกอนมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดเท่ากับ 3 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ทั้งนี้พบว่าค่าใช้จ่ายในการบำบัดที่สูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้นเช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทำการศึกษาสภาวะกระบวนการเฟนตันที่สภาวะอื่นๆ เช่น พีเอช ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา ระยะเวลาการตกตะกอน อัตราส่วนสารเคมีเฟนตัน ที่เหมาะสมกับลักษณะของน้ำเสีย ในช่วงที่กว้างมากกว่านี้

5.2.2 ควรทำการศึกษาสารสร้างตะกอนชนิด PAC FeCl หรือ Polymer ชนิดอื่นๆ ร่วมด้วย

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. น้ำเสียชุมชนและระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว. 2545.
- กรรณิการ์ สิริสิงห. การวิเคราะห์ค่าซีโอดี เคมีน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์. กรุงเทพฯ: ประยูรวงศ์, 2549.
- กองอนามัยสิ่งแวดล้อม. น้ำเสียและการบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักอนามัย, 2557.
- เกษม ประดิษฐ์วัฒนกิจ. การพัฒนาต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคโนโลยีดีสซัลฟิไรเซชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2555.
- คณะวิทยาศาสตร์. คู่มือปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์. ชลบุรี: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, ม.ป.ป.
- จินต์ อโณทัย และคณะ. รายงานวิจัยการใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงบำบัดซีโอดีในน้ำออกจากระบบชีวภาพที่บำบัดน้ำชะล้างจากหลุมฝังกลบมันคง. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2547.
- นาถ ภูวงศ์ผา, เฉลิม เรืองวิริยะชัย และสุนทนา เลาว์ณย์ศิริ. “การกำจัดสีและน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน”, วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 40(4): 1272-1284, 2555.
- นุชนภา ตั้งบริบูรณ์ และ ณททัย สอนประसार. การสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมบริสุทธิ์จากเปลือกไข่เพื่อผลิตสารประกอบไฮดรอกซีอะพาไทต์. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552.
- ภิญโญ พานิชพันธ์ และคณะ. “การบำบัดน้ำเสีย”, นิเวศวิทยาสิ่งแวดล้อม.
http://www.ilmahidol.ac.th/emedial/ecology/chapter3/framechapter3_frame.htm. 20 กันยายน, 2557.
- วนิดา ชูอักษร. “เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม”, วารสารศาสตร์บูรพา. 17(1): 181-191, 2555.
- วันทนา เกียรติสมาน. การศึกษาความเหมาะสมของน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังมาใช้ในการชลประทาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- วันวิสาข์ แก้วสมบุรณ์. การบำบัดตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่โดยใช้เปลือกไข่. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยมหิดล, 2548.
- วิชัย ดำรงโกภักดิ์. “เทคโนโลยีการนำเปลือกไข่มาใช้ประโยชน์”, วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์. 11(2): 75-83, 2555.
- คันศนีย์ รักไทยเจริญชีพ. “ประโยชน์จากเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ในงานทดสอบวัสดุดิบและผลิตภัณฑ์”, กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 63(19): 38-40, 2558.
- ไศรดา ขุนโทร และจรัสสา กรงกรต. “สารเคมีสำหรับบำบัดน้ำเสีย”, วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 47(151): 16-18, 2547.
- สรินญา ขวพันธ์. “กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการประยุกต์ใช้ในงานวัสดุศาสตร์”, วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์. 11(2): 51-58, 2555.
- สำนักงานบริหารจัดการน้ำ. “ปูนขาว ไลม์ (lime) ตอนที่ 1”, เทคโนโลยี. <http://202.129.59.73/tn/August55/lime1.htm>. 20 กันยายน, 2557.
- สำนักงานเลขาธิการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์. “มาทำความรู้จักกับเครื่อง FT-IR กันเถอะ”, sec-agazine. <http://www.sec.psu.ac.th/home/ebook/sec-magazine-2557-04-ftir/sec-magazine-2557-04-ftir.pdf>. 25 กันยายน, 2557.
- สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ และวีระนุช บุญรุ่ง. “การกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยกระบวนการเฟ้นต้นในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม”, วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 23(72): 10-16, 2553.
- โสภิตา บุญเอนกทรัพย์. การศึกษาคุณสมบัติน้ำทิ้งในขั้นตอนกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง. กรุงเทพฯ: สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, 2541.
- อัจฉรา ดวงเดือน. รายงานวิจัยการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้เปลือกไข่และถั่วแกลบดำ. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545.
- Aldes Lesbani and et al. “Preparation of Calcium Oxide from Achatina fulica as catalyst for production of Biodiesel from wastecooking oil”, IndoJChem. 13(2): 176-180, 2013.
- Crina Den and et al. “Spectroscopical characterization of precursors for Calcium Hydroxide synthesis”, Physica. 32(5): 308-312, 2001.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Guo, J.S. et al. "Treatment of landfill leachate using a combined stripping, Fenton, SBR, and coagulation process", **Hazardous Materials**. 178(5): 699–705, 2010.
- Jin Li., Zhaokun Luan, Lian Yu and et al. "Pretreatment of acrylic fiber manufacturing wastewater by the Fenton process", **Journal of Desalination**. 284(1): 62-65, 2012.
- M.A. García-Morales and et al. "Treatment of soft drink process wastewater by ozonation, ozonation-H₂O₂ and ozonation-coagulation processes", **Journal of Environmental Science and Health**. 47(14): 22–30, 2012.
- Perdigón-Melón, J.A. et al. "Coagulation-Fenton coupled treatment for ecotoxicity reduction in highly polluted industrial wastewater", **Hazardous Materials**. 181(1-3): 127-132, 2010.
- Tsai, W.T. and et al. "Characterization and Adsorption Properties of Eggshells and Eggshell Membrane", **Bioresour Technol**. 97(9): 488-493, 2006.
- Ma, X. J. and Xia, H. L. "Treatment of water-based printing ink wastewater by Fenton process combined with coagulation", **Journal of Hazardous Materials**. 170(2-3): 386–390, 2009.
- Xiaojun Wang, sili Chen, Xiaoyang Gu and et al. "Pilot study on the advanced treatment of landfill leachate using a combined coagulation, fenton oxidation and biological aerated filter process", **Waste Management**. 29(2): 1354–1358, 2009.
- Yanya Wu, Shaoqi Zhou, Fanghui and et al. "Removal of humic substances from landfill leachate by Fenton oxidation and coagulation", **Process Safety and Environmental Protection**. 88(6): 276-284, 2010.
- Yoon, J. et al. "The characteristics of coagulation of Fenton reaction in the removal of landfill leachate organics", **Water Sci Techno**. 38(2): 209–214, 1998.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง (ค่าจากโรงงานที่ทำการศึกษา)

ลักษณะสมบัติ	น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย UASB	มาตรฐานน้ำทิ้ง
สี	ขาวขุ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
กลิ่น	มีกลิ่นเหม็นปานกลาง	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
อุณหภูมิ(°C)	28	ไม่เกิน 40
พีเอช	6 - 7	5.5-9.0
ค่าความเป็นด่าง (mg/L)	1,146	-
ค่าความเป็นกรด (mg/L)	124	-
ค่าซีโอดี (mg/L)	1,392	120
ค่าปริมาณตะกอน V ₃₀ (mg/L)	13.8	-

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2545

ตารางที่ ก.2 ค่าซีโอดี(COD) ของแข็งแขวนลอย(SS) และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด(TDS) ในการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างตะกอนของแคลเซียมออกไซด์ (วิเคราะห์เมื่อวันที่ 16-17 มีนาคม 2558)

ความเข้มข้น (g/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	TDS (mg/L)
0	1,600±00	1,094±77.78	1,350±28.28
1	440±169.70	321.50±19.09	1,540±48.08
2	466±48.08	267±33.94	1,453±15.55
3	412±40.59	221±28.28	1,364±22.62
4	326±19.79	177±24.04	2,366±192.33

ตารางที่ ก.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดี(COD) ของแข็งแขวนลอย(SS) และการเพิ่มขึ้นของแข็งละลายน้ำทั้งหมด(TDS) ในการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างตะกอนของ แคลเซียมออกไซด์ (วิเคราะห์เมื่อวันที่ 16-17 มีนาคม 2558)

ความเข้มข้น (g/L)	% COD	% SS	% TDS
1	72.50±10.60	70.60±0.34	12.26±4.57
2	70.87±3.00	75.64±1.37	7.07±2.94
3	74.25±2.47	79.65±4.03	1.03±0.43
4	79.62±1.23	83.85±1.05	42.80±3.45

ตารางที่ ก.4 ค่าซีโอดี(COD) ของแข็งแขวนลอย(SS) และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด(TDS) ในการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างตะกอนของแคลเซียมออกไซด์จากจากเปลือกไข่ (วิเคราะห์เมื่อวันที่ 16-17 มีนาคม 2558)

ความเข้มข้น(g/L)	COD(mg/L)	SS(mg/L)	TDS(mg/L)
0	1,600±00	1,094±77.78	1,350±28.28
1	896.5±61.51	464±11.31	1,635±15.55
2	620±28.28	342±2.82	1,699±7.07
3	560±00	286.5±0.70	1,745.5±10.60
4	520±00	182±15.55	1,551±7.07

ตารางที่ ก.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดี(COD) ของแข็งแขวนลอย(SS) และการเพิ่มขึ้นของแข็งละลายน้ำทั้งหมด(TDS) ในการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างตะกอนของ แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ (วิเคราะห์เมื่อวันที่ 16-17 มีนาคม 2558)

ความเข้มข้น (g/L)	% COD	% SS	% TDS
1	43.96±3.84	57.44±4.06	17.42±2.51
2	61.25±1.76	68.66±1.96	20.54±1.33
3	65.00±00	73.74±1.93	22.65±2.09
4	67.50±00	83.27±2.61	12.96±1.42

ตารางที่ ก.6 ค่าและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และการเพิ่มขึ้นของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ในการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยทำการวัดค่าทันที (วิเคราะห์เมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2558)

วัดค่าทันที	อัตราส่วน (mg/L : mg/L)			
	00:00	7,500:1,000	1,000:1,000	1,000:7,500
COD (mg/L)	1,860±367.69	1,730±70.71	1,790±141.42	1,670±212.13
% การกำจัด	-	6.99±3.80	3.76±7.60	10.22±11.40
SS (mg/L)	1,094±77.78	929.5±263.75	1,159.5±236.88	1,941.5±333.04
% การกำจัด	-	15.03±24.10	-5±21.65	-77±30.44
TDS (mg/L)	1,350±28.28	2,053±140.00	2,172±268.70	4,449±456.79
% การเพิ่มขึ้น	-	34.09±4.49	37.36±7.75	69.49±3.13

ตารางที่ ก.7 ค่าและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และการเพิ่มขึ้นของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ในการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยวัดค่าหลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 นาที (วิเคราะห์เมื่อวันที่ 29 มีนาคม 2558)

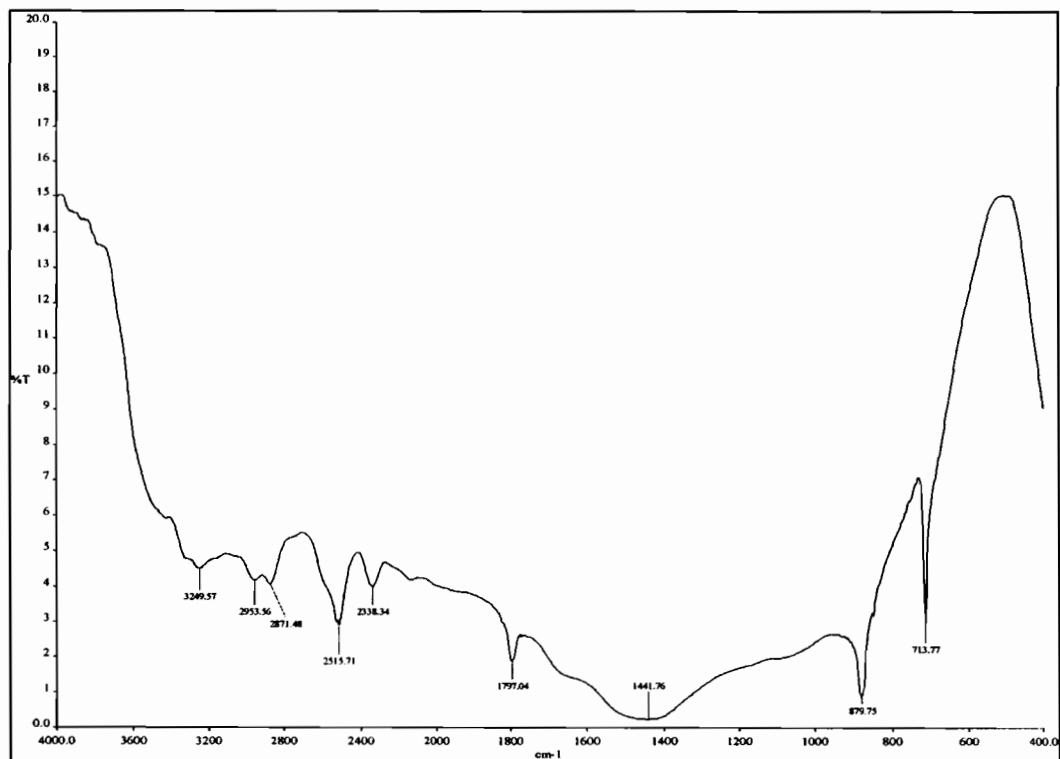
ตกตะกอน 30 นาที	อัตราส่วน (mg/L : mg/L)			
	00:00	7,500:1,000	1,000:1,000	1,000:7,500
COD (mg/L)	1,440±00	940±28.28	212±39.59	240±00
% การกำจัด	-	34.72±1.96	85.27±2.75	83.33±00
SS (mg/L)	853±00	99.5±2.12	53.5±4.95	92±4.24
% การกำจัด	-	83.33±0.24	93.73±0.58	89.21±0.49
TDS (mg/L)	1,540±00	1,865±106.06	1,863±12.72	4,351±103.23
% การเพิ่มขึ้น	-	17.29±4.70	17.33±0.56	64.59±0.84

ตารางที่ ก.8 ค่าซีโอดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ในการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับการสร้างตะกอน อัตราส่วนสารเฟนตัน ($H_2O_2:Fe^{2+}$) 1,000:1,000 mg/L:mg/L (วิเคราะห์เมื่อวันที่ 23-24 เมษายน 2558)

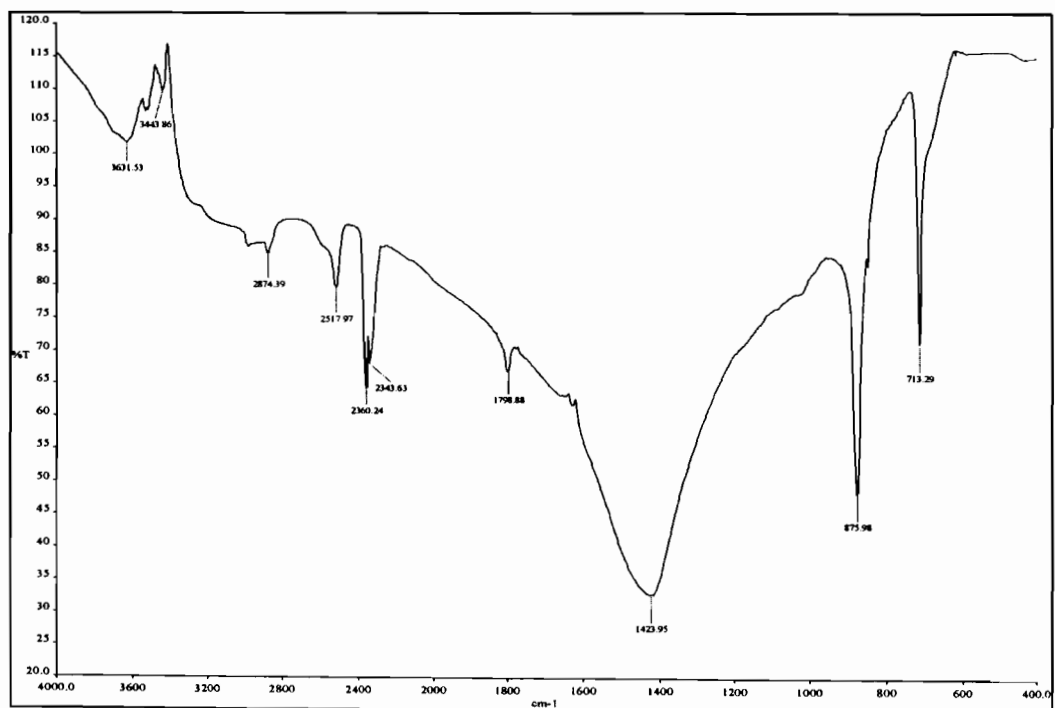
แคลเซียมออกไซด์			
ความเข้มข้น (g/L)	COD(mg/L)	SS(mg/L)	TDS(mg/L)
0	2,120±00	1,131±00	1,102±00
1	92±5.65	15.5±9.19	2,812±130.70
2	112±00	37.5±20.50	3,551±227.68
3	120±00	60±38.18	4,182±132.93
4	120±00	50.5±31.81	4,354±107.48
แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่			
ความเข้มข้น (g/L)	COD(mg/L)	SS(mg/L)	TDS(mg/L)
0	2,160±00	1,120±00	1,230±00
1	112±00	18.5±6.36	2,835±306.88
2	138±8.48	28±4.24	3,709±57.98
3	152±00	40.5±17.67	3,965±813.17
4	136±11.31	30.5±10.60	4,071±414.36

ตารางที่ ก.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และการเพิ่มขึ้นของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ในการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันที่อัตราส่วนสารเฟนตัน ($H_2O_2:Fe^{2+}$) 1,000:1,000 mg/L:mg/L ร่วมกับการสร้างตะกอน (วิเคราะห์เมื่อวันที่ 23-24 เมษายน 2558)

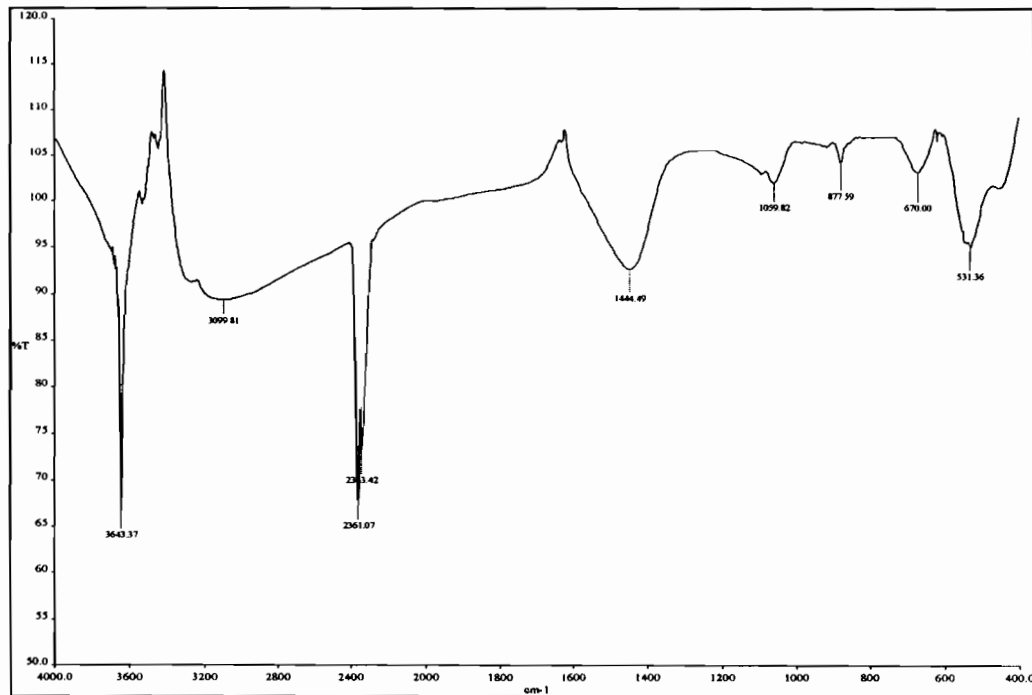
แคลเซียมออกไซด์			
ความเข้มข้น (g/L)	% COD	% SS	%TDS
1	95.66±0.26	98.63±0.81	60.76±1.81
2	94.71±00	96.68±1.81	68.90±1.99
3	94.34±00	94.69±3.37	73.63±0.83
4	94.34±00	95.53±2.81	74.68±0.62
แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่			
ความเข้มข้น (g/L)	% COD	% SS	%TDS
1	94.81±00	98.34±0.56	56.35±4.72
2	93.61±0.39	97.50±0.37	66.83±0.51
3	92.96±00	96.38±1.57	68.31±6.49
4	93.70±0.52	97.27±0.94	69.62±3.09



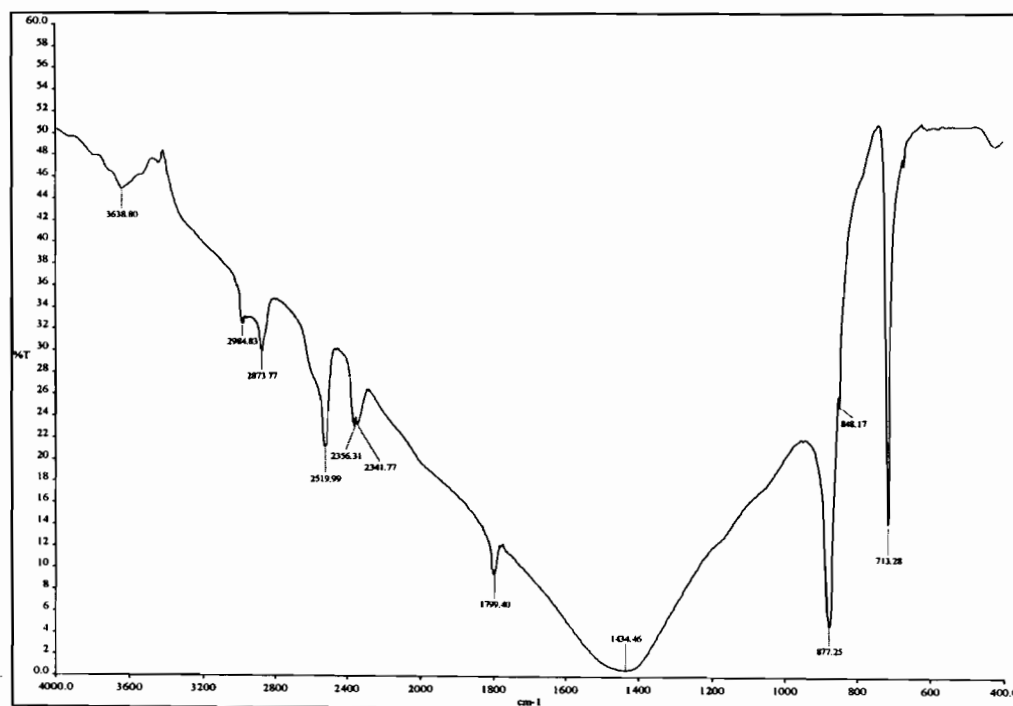
ภาพที่ ก.1 สเปกตรัมของเปลือกไข่ดิบ



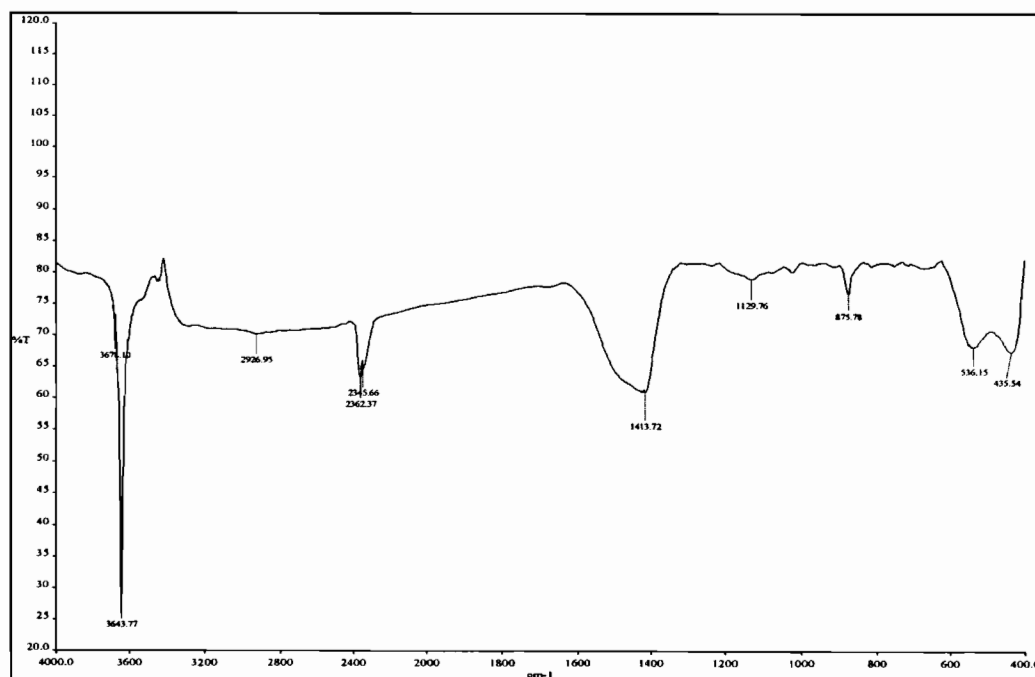
ภาพที่ ก.2 สเปกตรัมของเปลือกไข่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง



ภาพที่ ก.3 สเปกตรัมของเปลือกไข่เหาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง



ภาพที่ ก.4 สเปกตรัมของเปลือกไข่เหาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง



ภาพที่ ก.5 สเปกตรัมของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO)

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีของเครื่อง XRD

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ	สารประกอบ	2θ				
JCPDS data	-	MgCaCO ₃ (เลขที่อ้างอิง 89-1304)	23.118°	29.500°	31.574°	36.056°	39.517°
		CaCO ₃ (เลขที่อ้างอิง 85-1108)	23.101°	29.466°	31.516°	36.039°	39.489°
		CaO (เลขที่อ้างอิง 78-0649)	32.242°	37.401°	53.928°	64.240°	67.468°
เปลือกไข่	-	เปลือกไข่บด ก่อนการเผา	23.15°	29.53°	31.61°	36.09°	39.57°
	500°C	MgCaCO ₃	23.17°	29.53°	31.53°	36.09°	39.53°
	700°C	CaCO ₃	23.13°	29.47°	31.53°	36.03°	39.49°
	900°C	CaO	32.23°	37.39°	53.89°	64.19°	67.43°

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

การหาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 35% (v/v) คือ
 ในสารละลาย 100 ml มีเนื้อสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) อยู่ 35 mL
 ความหนาแน่นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เท่ากับ 1.45 g/cm^3
 มวลโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เท่ากับ 34 g/mol
 ต้องการเตรียมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 7.5 g/L ($7,500 \text{ mg/L}$) ในปริมาตร 0.5L

วิธีคิด หาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

$$\text{H}_2\text{O}_2 = \frac{35 \text{ mL}}{100 \text{ mL}} \times \frac{1.45 \text{ g}}{1 \text{ mL}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}}$$

$$\text{H}_2\text{O}_2 = \frac{(35 \times 1.45 \times 1000 \times 1000)}{100} \text{ mg/L}$$

$$\text{H}_2\text{O}_2 = 507,500 \text{ mg/L}$$

และจะได้ว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 35% มีความเข้มข้น $507,500 \text{ mg/L}$

จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

$$(507,500 \text{ mg/L}) \times V_1 = (7,500 \text{ mg/L}) \times (0.5 \text{ L})$$

$$V_1 = \frac{[7,500 \text{ mg/L} \times 0.5 \text{ L}]}{507,500 \text{ mg/L}}$$

$$V_1 = 7.389 \times 10^{-3} \text{ L} \text{ หรือเท่ากับ } 7.4 \text{ mL}$$

ดังนั้นจะได้ว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 35% ความเข้มข้น 7.5 g/L ต้องใช้ปริมาณ 7.4 mL

การคำนวณค่าใช้จ่ายราคาสารเคมี

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ราคา 17 บาทต่อกิโลกรัม

สถานะที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง 1 กรัมต่อลิตร เท่ากับ 0.001 กิโลกรัมต่อลิตร

วิธีคิด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 กิโลกรัม ราคา 17 บาท

ถ้าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.001 กิโลกรัม ราคา $\frac{17 \text{ บาท} \times 0.001 \text{ กิโลกรัม}}{1 \text{ กิโลกรัม}}$

เท่ากับ 0.0017 บาทต่อกิโลกรัมต่อลิตร

น้ำ 1 ลิตร มีค่าใช้จ่าย 0.0017 บาท

ถ้า 1,000 ลิตร มีค่าใช้จ่าย 17 บาท

ดังนั้น ค่าใช้จ่ายสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อลูกเมตรบาศก์ เท่ากับ 17 บาท

ภาคผนวก ค
วิธีการวิเคราะห์

1. การหาค่า COD ของน้ำตัวอย่างและแบลงค์

ขั้นตอนที่ 1 ใช้หลอดโตเจสต์แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate) ขนาด 25x150 mm ชนิดฝาเกลียวพร้อมจุก TFE ทำการเติมปริมาตรน้ำตัวอย่าง 10 mL สารละลายโปแทสเซียมไดโครเมต 0.1 N ปริมาตร 6 mL สารละลายกรดซัลฟูริก 14 mL (ถ้าค่า COD มากกว่า 500 mg/L ให้ทำการลดปริมาตรน้ำตัวอย่างลง โดยการเติมน้ำกลั่นแทนให้ครบปริมาตรตามที่กำหนดไว้)

ขั้นตอนที่ 2 ทำแบลงค์โดยการเติมน้ำกลั่นลงในหลอดโตเจสต์แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate) ขนาด 20x150 mm ชนิดฝาเกลียวพร้อมจุก TFE 5 mL (แทนปริมาตรน้ำตัวอย่าง)

ขั้นตอนที่ 3 ทำการเติมน้ำตัวอย่างจำนวน 0.5 mL ลงในหลอดโตเจสต์แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate) ขนาด 25x150 mm ชนิดฝาเกลียวพร้อมจุก TFE จากนั้นเติมน้ำกลั่นเพื่อเจือจางให้ได้ปริมาตรรวม 5 mL

ขั้นตอนที่ 4 ทำการเติมสารละลายมาตรฐานโปแทสเซียมไดโครเมต 3 mL ในน้ำตัวอย่างและแบลงค์ โดยใช้ปิเปตขนาด 5 mL ดูดสารดังกล่าว

ขั้นตอนที่ 5 ทำการเติมสารละลายกรดซัลฟูริกที่ผสมกับ AgSO_4 7 mL ในน้ำตัวอย่างและแบลงค์ โดยใช้ปิเปตขนาด 10 mL ดูดสารดังกล่าว

ขั้นตอนที่ 6 ทำการปิดฝาจุกหลอดโตเจสต์แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate) ขนาด 25x150 mm ชนิดฝาเกลียวพร้อมจุก TFE จากนั้นนำเข้าเตาอบที่มีอุณหภูมิ 150 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 7 หลังจากทำการอบจนครบ 2 ชั่วโมงแล้ว จากนั้นนำหลอดโตเจสต์แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate) ขนาด 25x150 mm ชนิดฝาเกลียวพร้อมจุก TFE ออกจากตู้อบ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

ขั้นตอนที่ 8 ทำการเทน้ำตัวอย่างลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้นทำการหยดเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 5 หยด สารละลายเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมน้ำเงิน

ขั้นตอนที่ 9 ทำการไตเตรทด้วยสารละลาย FAS 0.1 N ในการไตเตรทจะต้องค่อยหยดทีละหยด เนื่องจากการถึงจุดยุติจะเร็วมาก คือจะเปลี่ยนเป็นสีแดงอิฐ

2. การหาค่ามาตรฐานของสารละลาย FAS

ขั้นตอนที่ 1 ใช้หลอดโตเจสต์แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate) ขนาด 25x150 mm ชนิดฝาเกลียวพร้อมจุก TFE ทำการเติมปริมาตรน้ำตัวอย่าง 10 mL สารละลายโปแทสเซียมไดโครเมต 0.1 N ปริมาตร 6 mL สารละลายกรดซัลฟูริก 14 mL (ถ้าค่า COD มากกว่า 500 mg/L ให้ทำการลดปริมาตรน้ำตัวอย่างลง โดยการเติมน้ำกลั่นแทนให้ครบปริมาตรตามที่กำหนดไว้)

ขั้นตอนที่ 2 ทำการเติมน้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่างลงในหลอดโตเจสต์แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate) ขนาด 20x150 mm ชนิดฝาเกลียวพร้อมจุก TFE 5 mL

ขั้นตอนที่ 3 ทำการเติมสารละลายมาตรฐานโปแทสเซียมไดโครเมต 3 mL ในน้ำตัวอย่าง โดยใช้ปิเปตขนาด 5 mL ดูดสารดังกล่าว

ขั้นตอนที่ 4 ทำการเติมสารละลายกรดซัลฟูริก (ที่ผสมกับ AgSO_4) 7 mL โดยใช้ปิเปตขนาด 10 mL ดูดสารดังกล่าว

ขั้นตอนที่ 5 ทำการเทน้ำตัวอย่างลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้นทำการหยดเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 5 หยด สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมน้ำเงิน

ขั้นตอนที่ 6 ทำการไตเตรทด้วยสารละลาย FAS 0.1 N ในการไตเตรทจะต้องค่อยๆ หยดทีละหยด เนื่องจากการถึงจุดยุติจะเร็วมาก คือจะเปลี่ยนเป็นสีแดงอิฐ

3. การหาค่าของแข็งแขวนลอยและของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

การหาค่าของแข็งแขวนลอย (SS) สามารถทำได้โดย

1) อบกระดาษกรองให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 –105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงทิ้งให้เย็นในเตสิกเคเตอร์แล้วชั่งน้ำหนัก (B) เก็บกระดาษกรองไว้ในเตสิกเคเตอร์จนกว่าจะใช้ทดลอง

2) วางกระดาษกรองลงในกรวยบุคเนอร์ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องดูดสุญญากาศ

3) ใช้น้ำกลั่นฉีดกระดาษกรองให้เปียกแล้วเปิดเครื่องดูดอากาศ เพื่อให้กระดาษกรองแนบติดกับกรวยบุคเนอร์

4) ตวงปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ผสมเข้ากันดีแล้ว 100 มล. แล้วเทน้ำตัวอย่างลงในกรวยบุคเนอร์ และเปิดเครื่องดูดสุญญากาศจนน้ำแห้ง แล้วล้างเครื่องกรองด้วยน้ำกลั่น 10 มล. เปิดเครื่องทิ้งไว้ 3 นาที

5) เมื่อแห้งแล้วนำกระดาษกรองออกวางในภาชนะเดิม (อาจใช้ถ้วยระเหยหรือกระดาษอะลูมิเนียม) แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 –105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 1 นาทีทิ้งไว้ให้เย็นใน เตสิกเคเตอร์และชั่งน้ำหนัก (A)

การหาค่าของแข็งละลายน้ำได้ทั้งหมด (TDS) สามารถทำได้โดย

1) นำน้ำที่ผ่านการกรองของแข็งแขวนลอยมาใช้ในการวิเคราะห์ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

2) ตวงน้ำส่วนที่ได้จากการกรอง 50 มล. ใส่ลงในถ้วยระเหยที่ผ่านการอบแห้งที่ 180 ± 2 องศาเซลเซียส และชั่งน้ำหนักแล้ว (B)

3) นำประเหยนน้ำให้แห้งบนเครื่องอังไอน้ำ แล้วนำไปเข้าตู้อบ 180 ± 2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4) ทิ้งให้เย็นในเตสิกเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนัก (A)

4. การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

สารตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของแข็งที่เป็นผงขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน (325 เมช) ปริมาณผงตัวอย่างที่เหมาะสมประมาณ 1-2 กรัม (หากตัวอย่างมีน้อย สามารถอัดบนแผ่นวางตัวอย่างแบบ zero background ได้) และอัดด้วยแรงกระทำสม่ำเสมอเท่ากันทุกทิศทาง บริเวณผิวหน้าของตัวอย่างต้องเรียบสม่ำเสมอ ตัวอย่างที่ดีต้องมีการจัดเรียงตัวของผลึกอย่างอิสระ (random orientation) หากตัวอย่างเป็นก้อน ต้องตัดและขัดหน้าตัวอย่างให้เรียบ ขนาดก้อนตัวอย่างประมาณ 10 x 10 เซนติเมตร การเตรียมตัวอย่างที่ดีมีผลมากต่อผลการวิเคราะห์ เช่น หากบดตัวอย่างละเอียดเกินไปจะทำให้ลายโครงสร้างผลึกหรือหากใช้แรงอัดตัวอย่างมากเกินไปจะทำให้เกิด Preferred Orientation ขึ้นได้

5. การเตรียมตัวอย่างของแข็งสำหรับวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Transmission (FTIR)

ตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ที่มีสถานะเป็นของแข็ง มีวิธีการเตรียมตัวอย่าง ดังนี้

- 1) บดตัวอย่างให้มีความละเอียดด้วย agate mortar
- 2) ผสมตัวอย่างเข้ากับ KBr ใน agate mortar โดยให้ตัวอย่างมีความเข้มข้น ประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์ และบดสารให้ละเอียดโดยให้มีการกระจายตัวอย่างอย่างสม่ำเสมอ
- 3) ใส่ตัวอย่างที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ทิ้งไว้ประมาณ 30 วินาที - 1 นาที
- 4) ถอดตัวประกบแม่พิมพ์ออก ตัวอย่างจะติดอยู่ที่แม่พิมพ์ มีลักษณะเป็นวงกลมใสและตัวอย่างจะกระจายอยู่บน KBr แล้วนำตัวอย่างเข้าเครื่อง FT-IR ได้เลย
- 5) ทำความสะอาดแม่พิมพ์ ใช้ซ้อนดักสารสแตนเลสชุดตัวอย่างออกมา ใช้กระดาษทิชชูหรือใช้ cotton bud ชับตัวทำลายและเช็ดตัวอย่างที่ติดอยู่ที่เมต die แห่งระบอบกสูบ ท่อภายในและล้างด้วยอะซิโตน จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้ง แยกเมต die เก็บแยกออกจากกันเพื่อป้องกันการเกิดสนิม

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นางสาวสุกัญญา กาญจนธำรง
วัน เดือน ปี เกิด	26 เมษายน พ.ศ. 2534
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2552- 2555 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิชาสาขาภิบาลสิ่งแวดล้อม
ผลงานในการ ประชุมวิชาการ	สุกัญญา กาญจนธำรง และจักรกฤษณ์ อัมพูช. “การบำบัดน้ำเสียจาก โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการเฟ้นต้นร่วมกับการสร้าง ตะกอน”,ใน การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 14. สมาคม วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2558.

